



**Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação  
Departamento de Sistemas e Energia**

**Lia Farias Pinto**

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA TECNOLOGIA LED E  
TÉCNICAS DE GESTÃO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA  
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

**CAMPINAS**

**2018**



**Universidade Estadual de Campinas  
Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação  
Departamento de Sistemas e Energia**

**Lia Farias Pinto**

**AVALIAÇÃO DOS IMPACTOS DA TECNOLOGIA LED E  
TÉCNICAS DE GESTÃO DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA  
EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO**

**Orientador:** Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva  
**Coorientador:** Dr. Paulo César Magalhães Meira

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Mestra em Engenharia Elétrica, na Área de Energia Elétrica.

**Este exemplar corresponde à versão final da dissertação defendida pela aluna Lia Farias Pinto e orientada pelo Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva**

**CAMPINAS**

**2018**

**Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s):** CAPES, 1570708

**ORCID:** <https://orcid.org/0000-0001-8187-1155>

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

P658a Pinto, Lia Farias, 1991-  
Avaliação dos impactos da tecnologia LED e técnicas de gestão de iluminação pública em redes de distribuição / Lia Farias Pinto. – Campinas, SP : [s.n.], 2018.

Orientador: Luiz Carlos Pereira da Silva.

Coorientador: Paulo César Magalhães Meira.

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação.

1. Iluminação pública. 2. Iluminação. 3. Rede - Distribuição. I. Silva, Luiz Carlos Pereira da, 1972-. II. Meira, Paulo César Magalhães, 1985-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação. IV. Título.

#### Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Impacts of LED technology and public lighting management on electric distribution systems

**Palavras-chave em inglês:**

Public lighting

Lighting

Network - Distribution

**Área de concentração:** Energia Elétrica

**Titulação:** Mestra em Engenharia Elétrica

**Banca examinadora:**

Luiz Carlos Pereira da Silva [Orientador]

Leandro Tiago Manera

Ivan Nunes da Silva

**Data de defesa:** 30-01-2018

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Elétrica

## **COMISSÃO JULGADORA – DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Candidata:** Lia Farias Pinto      **RA:** 94892

**Data da Defesa:** 30 de janeiro de 2018

**Título da Dissertação:** “Avaliação dos Impactos da Tecnologia LED e Técnicas de Gestão de Iluminação Pública em Redes de Distribuição”.

### **Membros da banca:**

Prof. Dr. Luiz Carlos Pereira da Silva (Presidente, FEEC/UNICAMP)

Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva (SEL/EESC/USP/São Carlos)

Prof. Dr. Leandro Tiago Manera (FEEC/UNICAMP)

A ata de defesa, com as respectivas assinaturas dos membros da Comissão Julgadora, encontra-se no processo de vida acadêmica da aluna.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço à minha família por todo suporte que recebi.

Agradeço às falecidas Sandra e Arlete, que mesmo não estando presente fisicamente, sempre estiveram presentes no coração. À Shirlei, por toda força e batalha para que eu tivesse tudo o que houvesse de melhor. À Raquel, por todo o companheirismo e amizade durante a vida.

Agradeço ao meu orientador Luiz por toda compreensão, paciência, conhecimentos e excelente orientação. Ao meu coorientador Paulo pela ajuda que recebi e que elevou a qualidade deste trabalho.

Agradeço ainda à Ana Luiza, por todo apoio incondicional que recebi durante os anos de graduação. À querida Maria de Fátima, pelo suporte e conselhos. À Vanessa, por me mostrar outros lados da vida. Agradeço ao Cristian e ao Tarupó que, ao segurarem minhas mãos nas noites de terça-feira, ensinaram-me sobre ternura, acolhimento e fé. Agradeço à espiritualidade que me acompanha.

Agradeço a todos os meus grandes amigos Guilherme, Ivan, Talita, Alan Eduardo, Carina, Samia, Nelson, Raíssa e Maurício pela amizade, companheirismo, risadas e aprendizado compartilhados. Ao pessoal do LEPO, Tisciane, Marcos, Hugo, Dante, Michelle, Karen e Tatiane. Sou muito grata pela amizade de vocês. Ao Danilo, pela ajuda e paciência.

Agradeço a todos os meus atuais e antigos professores por seu admirável e incansável esforço para ensinar. Em especial, agradeço à Professora Flávia, por me despertar o interesse pela ciência, ao Professor Carlos Sérgio, pelo incentivo nos primeiros anos de graduação e ao Professor Laécio, por compartilhar seus sábios conselhos e conhecimento.

Agradeço, por fim, à CPFL por ceder todos os dados necessários para que este trabalho fosse possível.

## RESUMO

Objetiva-se, nesta dissertação, estudar os efeitos que aplicação da tecnologia LED para iluminação pública poderá ter sobre o sistema elétrico de distribuição. Os pontos principais de investigação visam entender como a introdução de luminárias LED e novas formas de gerenciamento de iluminação pública afetam a rede elétrica. Para atingir esse fim são analisadas as características dessa tecnologia e os seus impactos para o sistema de iluminação pública em relação à gestão de seus ativos. Uma rede real existente no distrito Barão Geraldo, em Campinas – SP, foi modelada e simulada através do software OpenDSS permitindo a comparação do sistema de iluminação convencional *versus* iluminação LED, bem como a simulação de diferentes estratégias de controle para a o sistema de iluminação LED. As características do sistema de iluminação pública desta rede foram levantadas e os impactos que a tecnologia LED e técnicas de gestão produzem na demanda, nas perdas e no consumo de energia do sistema, no desequilíbrio e no perfil de tensão foram analisados. Os resultados mostram que economia significativa pode ser obtida com a substituição pela tecnologia LED: redução da ordem de 32 % no consumo de energia ativa foi obtida. Demonstra-se ainda que a introdução de regras inteligentes de controle para o sistema de iluminação também gera diminuição de consumo entre 22 % e 82 %, dependendo da técnica de gestão aplicada.

**Palavras-chave:** Iluminação pública; Iluminação; Rede - Distribuição.

## ABSTRACT

In this work, the potential effects of the application of LED technology in public lighting are studied. The main investigation topics target the understanding of how the introduction of LED lights and new public lighting management methods can affect electric distribution networks. To achieve this goal, the characteristics of LED technology and its impacts to the public lighting system in terms of asset management are analyzed. A real-life distribution feeder from the district of Barão Geraldo, in Campinas – Brazil, is modeled and simulated using the OpenDSS software, enabling comparisons of the conventional lighting system *versus* a LED lighting replacement, as well as the simulation of different control strategies of LED dimming. The characteristics of the public lighting system of this feeder were surveyed and analyzed, along with the impacts that LED technology and management techniques result in the demand, losses and energy consumption of the system, in the voltage unbalance and profile. The results show that savings of active energy of about 32 % can be obtained with the application of LED technology as well as between 22 % and 82 % with the introduction of smart control rules to the lighting system.

**Keywords:** Public lighting; Lighting; Network - Distribution.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Pontos de iluminação pública por região do Brasil. [8] .....	22
Figura 2.2 – Curva Característica de um transformador de Iluminação Pública. Dados retirados de [9] .....	22
Figura 2.3 – Curva de carga típica de uma residência [10] .....	23
Figura 2.4 – Projeção no custo de luminárias LED [11, 12].....	24
Figura 2.5 – Via iluminada por LEDs em Hamilton, Ontario, Canadá [13] .....	25
Figura 2.6 – Iluminação de via com tecnologia LED em Oceanside, Califórnia, Estados Unidos [13] .....	25
Figura 2.7 – Comparação entre as formas de onda de uma luminária vapor de sódio e uma luminária LED (adaptado) [12] .....	27
Figura 2.8 – Avaliação do conteúdo harmônico de uma luminária de vapor de sódio (a) e uma luminária LED (b) em relação à norma IEC 61000. Dados retirados de [12] .....	27
Figura 2.9 – Comparação entre luminária LED e Vapor de Sódio [12] .....	28
Figura 2.10 – Ilustração da via principal da UFMT e marcação de todos os pontos de iluminação [14] .....	29
Figura 2.11 – Luminária de três pétalas com lâmpadas VSAP [14] .....	30
Figura 2.12 – Instalação das luminárias LED com a utilização de suporte duplo [14].....	30
Figura 2.13 – Via com iluminação LED na USP [15] .....	31
Figura 2.14 – Diodo Emissor de Luz [17] .....	35
Figura 2.15 – Características elétricas de um LED [20].....	36
Figura 2.16 – Estrutura detalhada de uma luminária LED [22].....	37
Figura 2.17 – Modelo Simplificado de um LED .....	37
Figura 2.18 – Circuito de um driver de LED [17] .....	38
Figura 2.19 – Efeito da Temperatura de Junção na vida útil de um LED. Dados retirados de [24] .....	39
Figura 2.20 – Variação da distribuição espectral da radiação emitida por um LED. Dados retirados de [25] .....	39
Figura 2.21 – Representação gráfica do ciclo de trabalho .....	41
Figura 2.22 – Estrutura de um driver ativo para controle de LEDs [22]. .....	43
Figura 2.23 – LEDs sendo controlados por chip [28].....	44
Figura 2.24 – Corrente e Iluminância do LED em função dos níveis estabelecidos pelo chip. Dados retirados de [28] .....	45
Figura 2.25 – Reatores internos [34]. .....	47
Figura 2.26 – Modelo de reator externo para lâmpada a vapor de mercúrio de 250W, com tomada para relé [34]. .....	48
Figura 2.27 – Exemplos de relés fotoelétricos. [34].....	49
Figura 2.28 – Melhora no direcionamento do fluxo luminoso está exemplificada, da esquerda para a direita. Conjunto óptico eficiente [34]. .....	52
Figura 2.29 – Luminária com a carcaça tipo Aberta [34]. .....	52

Figura 2.30 – Modelo de luminária fechada sem equipamento [34].	53
Figura 2.31 – Modelo de luminária integrada [34].	53
Figura 2.32 – Especificações dos braços médio e longo utilizados pela CPFL [42].	54
Figura 2.33 – Especificações dos braços médios e longos utilizados pela CPFL [42].	55
Figura 2.34 – Especificações do braço viela utilizados pela CPFL [43].	55
Figura 2.35 – Especificações do braço viela utilizado pela CPFL [43].	56
Figura 2.36 – Especificações do braço curto utilizado pela CPFL [44].	57
Figura 2.37 – Especificações do braço curto utilizado pela CPFL [44].	58
Figura 2.38 – Algumas características de sistemas de iluminação inteligentes.	59
Figura 2.39 – Perfil típico de um controle estático para o centro da Itália na Primavera [50].	61
Figura 2.40 – Dynadimmer [51].	61
Figura 2.41 – Exemplo de perfil de controle de luz para o produto Dynadimmer [51].	62
Figura 2.42 – Perfil de Controle Adaptativo sugerido em [50].	64
Figura 2.43 – Comportamento padrão de tráfego [56].	65
Figura 2.44 – Volume de tráfego para diferentes dias da semana [56].	65
Figura 2.45 – Perfil de volume de tráfego médio ao longo do dia para Segunda, Terça e Domingo. Dados retirados de [57].	66
Figura 2.46 – Perfil de volume de tráfego médio diário para Segunda, Terça, Quinta e Sexta. Dados retirados de [57].	66
Figura 2.47 – Perfil de Volume de Tráfego das 15h às 9h [58].	67
Figura 2.48 – CitySense Plus [60].	68
Figura 2.49 – Controlador Skylite [60].	68
Figura 2.50 – Sistema proposto em [61].	69
Figura 2.51 – Economia de energia no sistema proposto em [61].	69
Figura 2.52 – A operação diária com Luminárias com lâmpadas vapor de sódio e com Luminárias LED utilizando o sistema com fotocélula e sensores de movimento [62].	70
Figura 2.53 – Potência consumida para cada nível de dimerização comparada ao consumo nominal de potência [63].	71
Figura 2.54 – Modelos para definição de zonas de ativação de luminárias. As áreas em cinza representam prédios, enquanto círculos amarelos representam pontos de luz acionados e estrelas, a localização dos usuários. [64].	72
Figura 2.55 – Imagem explicativa do sistema presente em cada poste [65].	73
Figura 2.56 – Posição dos pontos de luz (círculos vermelhos) e ruas (linhas azuis) usadas na simulação. Retirado de [58].	74
Figura 2.57 – Consumo de energia de vários tipos de controle de iluminação em duas áreas geográficas diferentes. Adaptado de [58].	75
Figura 2.58 – Consumo de energia do modelo Adaptativo com vários valores de volume de tráfego. Adaptado de [58].	76
Figura 3.1 – Disposição geográfica das luminárias (círculos laranjas) do alimentador BGE-09 no distrito de Barão Geraldo. Dados elétricos da CPFL Energia (2016), mapa de fundo de [72].	79

Figura 3.2 – Quantidade de luminárias com determinada potência .....	80
Figura 3.3 – Reatores divididos por suas perdas ôhmicas .....	81
Figura 3.4 – Arranjo de fases da conexão elétrica das luminárias .....	81
Figura 3.5 – Quantidade de luminárias por configuração .....	81
Figura 3.6 – Tipo de suporte das luminárias.....	82
Figura 3.7 – As sete curvas de carga estáticas utilizadas.....	84
Figura 3.8 – Influência da velocidade de viagem no consumo de energia médio pelo sistema de iluminação pública. Adaptado de [58] .....	86
Figura 3.9 – Curvas de carga utilizadas para simular os métodos de controle preditivo .....	88
Figura 3.10 – Processo de associação de luminárias aos tipos de vias. ....	89
Figura 3.11 – Iluminância durante o crepúsculo. Dados retirados de [75, 76]. ....	90
Figura 3.12 – Valores de iluminância calculados para a cidade de Campinas de acordo com as equações de Seidelman. ....	92
Figura 3.13 – Bancada de ensaios da luminária. ....	97
Figura 3.14 – Potência média em relação ao nível de dimerização. ....	98
Figura 3.15 – Processo de preparação dos dados. ....	99
Figura 4.1 – Curvas de carga do sistema elétrico alimentado por BGE-09 com iluminação pública e sem iluminação .....	101
Figura 4.2 – Curvas de carga do sistema elétrico alimentado por BGE-09 com iluminação pública e sem iluminação – restrição ao período de interesse. ....	101
Figura 4.3 – Tensões no pico de demanda com as cargas de iluminação pública (com IP) e sem as cargas de iluminação pública (sem IP) .....	103
Figura 4.4 – Diferença de tensão no pico (em pu) ocasionada pelas cargas de IP.....	103
Figura 4.5 – Desequilíbrio percentual por barra com as cargas de iluminação pública (com IP) e sem as cargas de iluminação pública (sem IP). ....	103
Figura 4.6 – Diferença entre o desequilíbrio com as cargas de IP e sem as cargas de IP .....	104
Figura 4.7 – (a) Curvas de carga dos transformadores do alimentador com cargas de IP; (b) Diferença causada pelas cargas de IP na carga dos transformadores do alimentador; (c) Participação da IP na carga total de cada transformador em cada instante de carga.....	105
Figura 4.8 – Curvas de carga da rede do alimentador BGE-09 sem cargas de IP (sem IP), com as cargas convencionais de IP (IP original) e com a substituição das luminárias atuais por luminárias LED (IP LED). ...	106
Figura 4.9 – Diferença entre cargas do sistema de IP original e com luminárias LED em relação à carga total da rede elétrica sem IP. ....	107
Figura 4.10 – Curvas de carga baseadas em método de controle estático e em modelos preditivos comparadas à curva de carga convencional. ....	109
Figura 4.11 – Diferença da carga entre cada método e a curva convencional — curvas baseadas em método de controle estático e modelos preditivos.....	109
Figura 4.12 – Curvas de carga baseadas em método de controle em tempo real comparadas à curva de carga convencional.....	110

Figura 4.13 – Diferença da carga entre cada método e a curva convencional — curvas baseadas em método de controle em tempo real. ....	110
Figura 4.14 – Redução percentual dos diversos valores medidos frente ao caso Convencional com IP LED. ...	112
Figura 4.15 – Redução percentual dos diversos valores medidos frente ao caso Convencional com IP original de vapores metálicos. ....	112
Figura 4.16 – Histogramas sobrepostos das tensões no pico de demanda para os casos Itália e Adaptativo. ....	115
Figura 4.17 – Histogramas sobrepostos das tensões no vale de demanda para os casos Itália e Adaptativo. ....	115
Figura A.1 – Partes constituintes do olho humano [89]. ....	132
Figura A.2 – Densidade de cones e bastonetes em torno da retina. Dados retirados de [90], [91] .....	132
Figura A.3 – Curva de sensibilidade do olho humano [4] .....	133
Figura A.4 – Curvas de sensibilidade mesópicas do olho humano [95] .....	134
Figura A.5 – Comprimento de onda e frequência do espectro eletromagnético [96] .....	135
Figura A.6 – Valores de Iluminância para cada hora do dia no outono para Brasília. Dados retirados de [98] ..	136
Figura A.7 – Iluminância média global mensal para Florianópolis [99] .....	137
Figura A.8 – Crepúsculo civil, náutico e astronômico (baseado em [97, 100]).....	139
Figura A.9 – Representação da área perpendicularmente projetada ao eixo de observação. Adaptado de [102]	141
Figura A.10 – Diferença entre iluminância e luminância. Adaptado de [102] .....	142
Figura A.11 – Temperatura de cor e as diferentes percepções de cores relacionadas. Adaptado. [104] .....	143
Figura A.12 – Alguns tipos de fontes de luz e suas respectivas temperaturas de cor [22, 105] .....	143
Figura A.13 – Variação na reprodução de cores de diferentes tipos de fonte de luz [104] .....	144
Figura A.14 – Proporção S/P para alguns tipos comuns de luminárias. Dados retirados de [95] .....	145
Figura C.1 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) [112] .....	151
Figura C.2 – Selo Procel [113] .....	153

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Comparação entre características elétricas das lâmpadas vapor de sódio e LED. Adaptado. [12] ...	26
Tabela 2.2 – Parâmetros fotométricos medidos em campo [12].....	28
Tabela 2.3 – Características fotométricas [12] .....	28
Tabela 2.4 – Valor estimado de Potências ativas, reativa e aparente [14].....	29
Tabela 2.5 – Níveis de eficiência energética para reatores eletromagnéticos [35]. .....	47
Tabela 2.6 – Níveis de operação [39]. .....	50
Tabela 2.7 – Consumo incremental de energia de acordo com a potência da lâmpada [40, 41] .....	51
Tabela 2.8 – Economia de energia resultante do aumento da quantidade de relés fotocontroladores com Selo Procel em 2016. [40] .....	51
Tabela 2.9 – Tabela com valores dos parâmetros destacados nas figuras anteriores [42]. .....	57
Tabela 2.10 – Estratégias de dimerização para o verão e inverno para a cidade de Comiso, Itália [52], (adaptado) .....	63
Tabela 2.11 – Planejamento estudado em [62] (adaptado).....	70
Tabela 2.12 – Variação de consumo da potência para cada nível de dimerização. Retirado de [63] (adaptado) ..	71
Tabela 2.13 – Energia consumida nos quatro cenários apresentados. Adaptado de [65] .....	73
Tabela 3.1 – Número de transformadores com cargas de IP por potência.....	79
Tabela 3.2 – Valores de dimerização (%) para cada curva – valores não representados são nulos. ....	85
Tabela 3.3 – Velocidade média atribuída a cada tipo de via .....	86
Tabela 3.4 – Valores de consumo normalizados para cada método de controle.....	87
Tabela 3.5 – Altura solar ao longo do dia. Calculado para Campinas, São Paulo, dia 21 de março de 2017. Retirado de [77]......	91
Tabela 3.6 – Tipos de lâmpadas e suas respectivas potências utilizadas no sistema de IP do alimentador BGE-09. ....	94
Tabela 3.7 – Características de lâmpadas de vapor de mercúrio de 125W de três fabricantes diferentes. ....	94
Tabela 3.8 – Valores de fluxo luminoso médio para cada potência e tipo de luminária.....	94
Tabela 3.9 – Características das luminárias LED equivalentes à luminária originais. ....	95
Tabela 3.10 – Coeficientes ZIP para as luminárias empregadas. ....	96
Tabela 3.11 – Resultados obtidos no ensaio da luminária NVC.....	97
Tabela 4.1 – Comparação entre a rede com as cargas de iluminação pública e sem as cargas de iluminação pública. ....	102
Tabela 4.2 – Porcentagem que as cargas de IP representam do total de cada grandeza. ....	102
Tabela 4.3 – Dados de consumo, demanda e perdas para rede elétrica do alimentador BGE-09 sem cargas de IP, com as cargas originais de IP e com a substituição das luminárias atuais por luminárias LED. ....	107
Tabela 4.4 – Percentual que os sistema de IP com luminárias LED original representam em relação ao sistema com carga total. ....	108
Tabela 4.5 – Resultados gerais do alimentador para cada caso analisado. ....	111

Tabela A.1 – Lista de grandezas radiométricas fundamentais [86, 87] .....	131
Tabela A.2 – Eficácia Luminosa para Condições Fotópica e Escotópica de Diferentes Fontes Luminosas [4]..	135
Tabela A.3 – Coeficientes para cálculo da iluminância da luz solar [97, 100].....	138
Tabela C.1 – Resultados do Procel para o ano de 2016 (adaptado de [8]) .....	152
Tabela C.2 – Resultados do Procel Reluz de 1994 a 2016 [8].....	154

# SUMÁRIO

1	Introdução.....	17
2	Conceitos Básicos.....	20
2.1	Sistema de iluminação pública no Brasil .....	20
2.1.1	Sistemas de iluminação pública com LED .....	23
2.2	Tecnologias de Iluminação .....	31
2.2.1	Lâmpadas incandescentes .....	31
2.2.2	Lâmpada de baixa pressão fluorescente.....	32
2.2.3	Lâmpadas de baixa pressão de sódio .....	33
2.2.4	Lâmpadas de alta pressão de vapor de mercúrio.....	33
2.2.5	Lâmpadas de alta pressão de sódio .....	34
2.2.6	Lâmpadas de haleto metálico.....	34
2.2.7	Diodo emissor de luz (light emitting diode – LED).....	35
2.2.8	Indução .....	45
2.3	Componentes .....	46
2.3.1	Reatores e drivers .....	46
2.3.2	Circuitos de comando .....	48
2.3.3	Luminárias .....	51
2.3.4	Braços para Iluminação Pública .....	54
2.4	Sistemas de iluminação com LED e controle inteligente .....	58
3	Materiais e Métodos .....	77
3.1	Alimentador estudado .....	77
3.2	Curvas de carga para iluminação pública.....	82
3.2.1	Curvas estáticas .....	82
3.2.2	Curvas por tipo de via.....	86
3.2.3	Efeitos da iluminação natural .....	89
3.3	Fluxo de potência via OpenDSS .....	92

3.4	Luminárias .....	93
3.4.1	Características das luminárias escolhidas .....	93
3.4.2	Modelagem das luminárias no fluxo de potência.....	95
3.4.3	Comportamento do consumo da luminária LED em relação à dimerização .....	96
3.5	Resumo geral .....	98
4	Simulações e Resultados .....	100
4.1	Cenário atual .....	101
4.2	Substituição por luminárias LED .....	106
4.3	Simulação dos métodos de controle .....	108
4.3.1	Efeitos nas tensões do sistema .....	114
4.4	Síntese dos resultados .....	116
5	Conclusões.....	118
5.1	Trabalhos futuros .....	120
5.2	Publicação dos resultados .....	120
	Bibliografia.....	121
	Apêndices.....	130
A	Conceitos Básicos.....	130
A.1	Olho humano.....	131
A.2	Luz .....	135
A.3	Crepúsculo .....	138
A.4	Fluxo Luminoso $\phi$ (lúmens).....	139
A.5	Intensidade luminosa I (candela) .....	140
A.6	Iluminância ou iluminamento E (lux) .....	140
A.7	Luminância L (cd/m <sup>2</sup> ) .....	141
A.8	Eficácia luminosa $\eta$ .....	142
A.9	Refletância .....	142
A.10	Temperatura de cor (Kelvin).....	143
A.11	Índice de Reprodução de Cores (IRC) .....	144
A.12	Proporção S/P .....	144
B	Normas .....	146
B.1	Normas Brasileiras.....	147

B.1.1	ABNT NBR 5101 Iluminação Pública – Procedimento .....	147
B.1.2	ABNT NBR 5181 – Sistema de Iluminação de Túneis .....	147
B.2	Normas Internacionais .....	148
B.2.1	CIE 115:2010 Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic .....	148
B.2.2	IESNA RP-08-14 – Road Lighting .....	148
B.3	Resolução 414/2010.....	148
C	Eficiência Energética e Iluminação Pública no Brasil.....	150

# CAPÍTULO 1:

## INTRODUÇÃO

Nas duas últimas décadas, o Brasil passou por crises energéticas de grande magnitude devido à incompatibilidade entre geração e consumo. Como a fonte hidráulica é responsável pela geração da maior parte da energia elétrica nacional [1], fatores climáticos, que podem resultar em um regime de chuvas desfavorável, influenciam fortemente a disponibilidade e preço da energia.

Representando 4,5 % da demanda e 3 % do consumo no Brasil [2], as cargas de Iluminação Pública (IP) são expressivas e é possível afirmar que o aperfeiçoamento e a modernização da malha de iluminação pública visando diminuir seu consumo proporcionará efeitos positivos diretos e indiretos em todo o sistema elétrico brasileiro.

Outro fato importante a ser ressaltado é que o impacto pode ser ainda maior se for considerado o fato de que o pico de demanda de iluminação pública coincide com os horários de pico do sistema elétrico brasileiro [3]. Sabe-se que o sistema elétrico é dimensionado para atender a demanda no horário de pico e fora destes horários, a sua capacidade é subutilizada. Logo, prezar por eficiência energética em um sistema de iluminação pública significa diminuir a demanda nos horários de ponta e, conseqüentemente, diminuir gastos com a expansão da capacidade dos sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia elétrica. A utilização de técnicas inteligentes de gestão e tecnologias mais avançadas de luminárias pode ainda reduzir gastos com substituições de componentes, manutenção e redução do consumo de energia durante sua operação.

Tecnologias mais eficientes de luminárias estão disponíveis, mas devido ao alto custo inicial ainda não se disseminaram completamente no mercado. Exemplo dessa tecnologia é a luminária LED que possui maior eficácia luminosa e, portanto, produz mais radiação visível para o olho humano por unidade de potência de entrada [4]. A utilização dessa luminária e a consequente diminuição no consumo de energia em grande escala produziria menor impacto ambiental.

É importante observar ainda que com o avanço de tecnologias de Iluminação Pública e dos sistemas de comunicação sem fio, a aplicação de novas formas de gerenciamento dos ativos torna-se possível, permitindo gerar mais economia e eficiência energética. Propõe-se, para atingir este fim, o estudo de tecnologias de luminárias presentes no mercado, bem como o que existe de mais moderno para gerir os ativos de iluminação pública. Com base nestes levantamentos, utiliza-se o software OpenDSS para simular a aplicação destas tecnologias e técnicas em um sistema elétrico de distribuição real e verificar seus impactos no perfil de tensão, nas perdas, no consumo de energia e na curva de carga (demanda).

As análises abrangem: o estudo dos impactos das cargas de iluminação pública no consumo de energia ativa e reativa, demanda no horário de ponta, perdas, afundamento e desequilíbrio de tensão na rede analisada e nos transformadores com cargas de IP; o estudo dos impactos da reposição das luminárias de vapores metálicos por luminárias LED no consumo de energia, demanda no horário de ponta e perdas; o estudo dos impactos da introdução de métodos de gestão e controle de iluminação pública no consumo de energia, demanda no horário de pico, perdas, afundamento e desequilíbrio de tensão na rede.

Este trabalho está estruturado da seguinte forma:

- Capítulo 2: aborda tecnologias de iluminação, componentes e, por fim, sistemas de IP inteligentes;
- Capítulo 3: descreve como foram preparados os dados para a realização das simulações, definições utilizadas, funcionamento de software e o que se espera obter;
- Capítulo 4: apresenta os resultados das simulações, bem como as análises destes resultados;
- Capítulo 5: apresenta as conclusões e sugestões para trabalhos futuros;

- Apêndice A: apresenta conceitos da área de iluminação e luminotécnica que auxiliarão na compreensão do presente trabalho;
- Apêndice B: apresenta uma breve explanação das normas nacionais e internacionais utilizadas na área de IP;
- Apêndice C: apresenta uma breve explicação sobre as iniciativas brasileiras na área de eficiência energética e iluminação pública.

# CAPÍTULO 2:

## CONCEITOS BÁSICOS

A presença de iluminação pública permite à sociedade a completa possibilidade de se usufruir dos espaços comuns ao oferecer maior segurança aos acessos a estes locais nos períodos de ausência de luz solar. Auxiliando o tráfego de veículos e a circulação de pessoas, bem como outras funções secundárias, como ressaltar aspectos positivos de monumentos e da paisagem urbana em geral, pode-se dizer que a iluminação pública promove o desenvolvimento social e econômico e contribui para uma melhor qualidade de vida [5]. Ao assegurar o pleno direito de ir e vir ao cidadão, todas as questões relacionadas à Iluminação Pública tornam-se de substancial interesse para toda sociedade.

### **2.1 Sistema de iluminação pública no Brasil**

O primeiro tipo de iluminação pública se deu através de lampiões a combustível, na segunda metade do século XIX. Em 1879, lâmpadas a arco voltaico foram instaladas na *Public Square*, em Cleveland, Estados Unidos. Neste mesmo ano, Thomas Edison desenvolveu a primeira lâmpada com filamento incandescente com características próximas às modernas, tecnologia largamente utilizada durante 56 anos. Em seguida, na década de 60, lâmpadas de vapor de mercúrio e vapor de sódio, a altas e baixas pressões passaram a ser o tipo predominante de luminária em iluminação pública.

A iluminação pública possuía, nesse período, importância econômica para os setores de energia, primeiramente para o setor petrolífero, devido a utilização do querosene nas

luminárias; em seguida, o setor de gás; e por fim, o setor de energia elétrica, cujas primeiras cargas foram as de iluminação pública. [6]

No Brasil, o primeiro sistema de iluminação com energia elétrica entrou em operação em 1879 na estação central da Estrada de Ferro D. Pedro II (Central do Brasil, Rio de Janeiro). Alguns anos depois, Porto Alegre inaugurou o primeiro serviço municipal de iluminação com energia elétrica, seguido do Rio de Janeiro, com a criação da Companhia de Força e Luz, que alimentava mais de 100 lâmpadas de iluminação pública. [6]

Devido à administração pública ineficiente, os serviços públicos funcionavam por meio de concessão, inclusive o fornecimento de energia elétrica. As primeiras companhias de geração e distribuição, instituídas no início do século XX, eram estrangeiras em sua grande maioria.

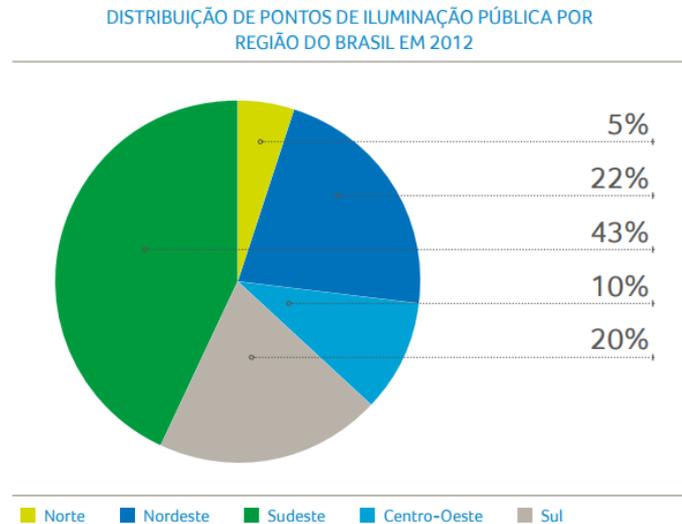
Atualmente, estudos e novas tecnologias recém-chegadas ao mercado impactaram positivamente na forma como é concebida a iluminação pública. Diversas cidades latino-americanas, como, por exemplo, Rio de Janeiro, Curitiba e Buenos Aires, estão reestruturando suas malhas de iluminação e levando em consideração critérios inovadores, tais como ausência de poluição e ofuscamento, melhor índice de reprodução de cores (IRC), incorporando aos projetos pela primeira vez, além de sistemas de trânsito, parques, praças, monumentos, conjuntos habitacionais, hospitais, entre outros. [7]

No Brasil, a malha de iluminação urbana aumentou significativamente na década de 60, com o crescente aumento de veículos nas cidades. De forma incoerente e desordenada, com pouca ou nenhuma preocupação “com efeitos estéticos ou com os componentes do espaço urbano que iluminava”, a expansão da malha resultou em poluição luminosa e sombras projetadas em calçadas, desfavorecendo pedestres. [7]

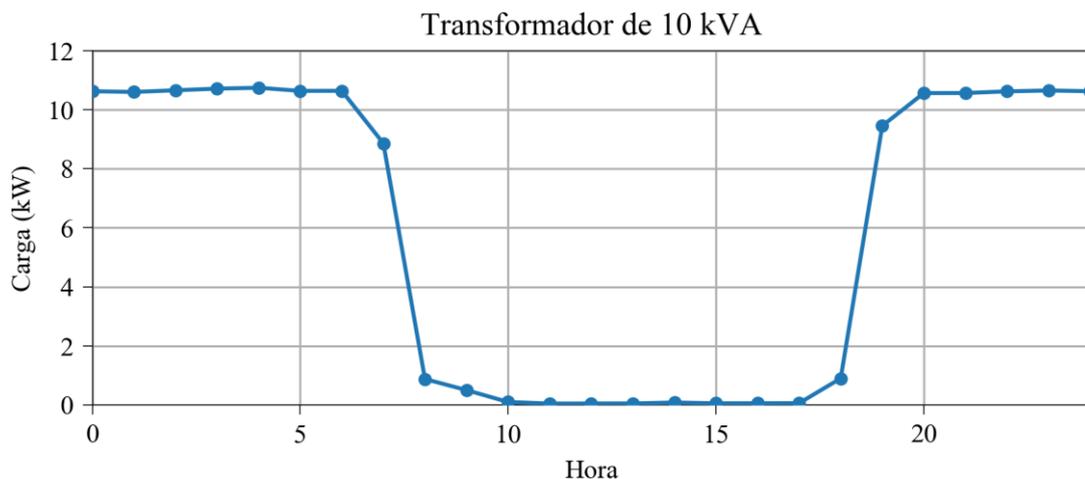
O crescimento populacional e a expansão de áreas urbanas no Brasil demanda constante ampliação da rede elétrica e da área de cobertura de iluminação. Além dos altos custos iniciais com aquisição e instalação de novos postos de iluminação, outros fatores como futuras substituições, necessidade de manutenção e impactos no sistema elétrico, tornam um desafio garantir Iluminação Pública de qualidade, sem exceder os limites orçamentários.

De acordo com informações disponibilizadas pela Eletrobrás, o Brasil conta com mais de 14 milhões de pontos de luz, sendo que aproximadamente 63 % deles possuem luminárias Vapor de Sódio de Alta Pressão, quase 32 % possuem luminárias com lâmpadas

Vapor de Mercúrio. Mista, Incandescente e outras representam apenas 7 %. [5] Com relação à distribuição de pontos de iluminação por região do Brasil, pode-se conferir na Figura 2.1.

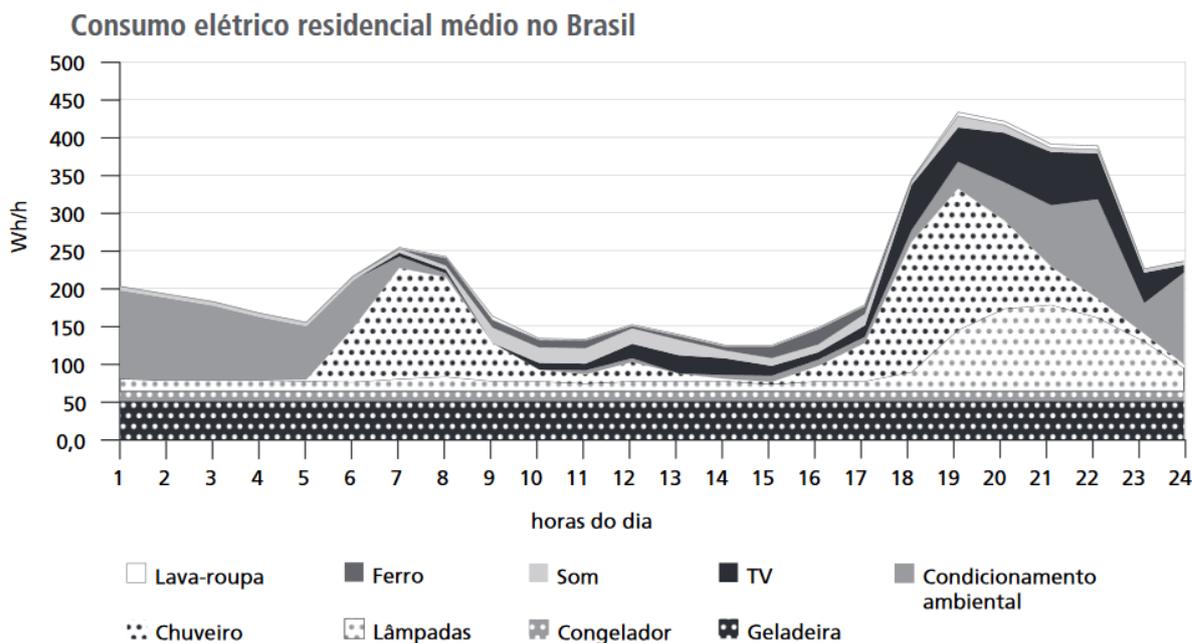


**Figura 2.1 – Pontos de iluminação pública por região do Brasil. [8]**



**Figura 2.2 – Curva Característica de um transformador de Iluminação Pública. Dados retirados de [9]**

Idealmente, pode-se considerar que a curva de carga de um sistema de Iluminação Pública como um degrau de 0 % a 100 % da potência em algum horário entre às 17h e às 19h e de 100 % a 0 % da potência em algum horário entre às 5h e às 7h. As variações nos horários de ligamento e desligamento desse sistema se devem às variações de duração do dia ao longo do ano. Nas Figura 2.2 e Figura 2.3, apresenta-se uma curva de carga típica de um transformador de iluminação pública e uma curva de carga típica residencial, respectivamente. É possível observar que o horário de maior uso de energia elétrica na carga residencial, por exemplo, corresponde ao período em que as cargas de iluminação aparecem no sistema.



**Figura 2.3 – Curva de carga típica de uma residência [10]**

Sabe-se que a capacidade do sistema elétrico é dimensionada visando atender a demanda de energia máxima, ao longo do ano e ao longo do dia. Exatamente por isso, usinas geradoras, linhas e sistemas de transmissão e distribuição operam ociosamente durante uma parte significativa do dia. O custo de energia fica, portanto, maior, levando-se em consideração que quanto maior a diferença entre o pico e a média de consumo, maior o custo médio da energia. Considera-se o horário de pico entre às 18 h e às 21 h, podendo variar ligeiramente em torno dessa faixa de acordo com a distribuidora. [10]

Esforços para diminuição de carga no horário de pico tornam-se justificáveis na medida em que resultariam na redução de gastos com expansão de capacidade dos sistemas de energia elétrica. Com este foco e sabendo do potencial de dimerização da tecnologia LED, propõe-se estudar como o controle adaptativo de luz pode impactar a rede elétrica.

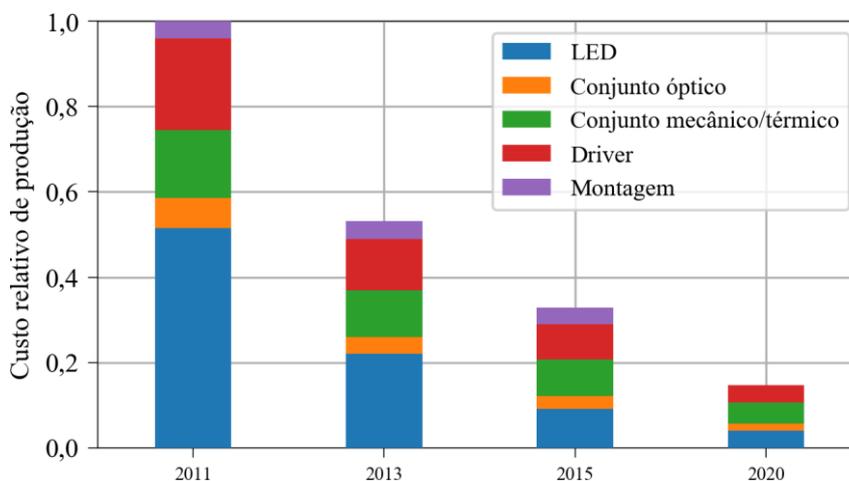
### 2.1.1 Sistemas de iluminação pública com LED

Calcula-se que o consumo de sistemas de iluminação artificial represente 30 % de toda energia elétrica consumida no mundo. Nos Estados Unidos, por exemplo, o Departamento de Energia (*U.S Department of Energy – DOE*) estima que o consumo com cargas de iluminação represente 22 % de todo consumo de energia primária anual. Por representar fração tão significativa da energia, esforços visando melhorar a eficiência, custo e

performance desses sistemas são importantes já que contribuem com a sustentabilidade e economia financeira e energética.

Fontes de luz ineficientes, equipamentos obsoletos ou que apresentam falhas são alguns dos obstáculos que os sistemas de IP enfrentam e que impossibilitam a obtenção de melhores indicadores de eficiência energética. Além destes, conforto visual, bem estar e baixa poluição luminosa passaram a ser critérios desejados em projetos de iluminação. Neste contexto, a tecnologia LED torna-se interessante na medida em que suas excelentes características luminotécnicas, durabilidade, eficiência e confiabilidade, que serão discutidas mais adiante, podem impactar fortemente os sistemas de iluminação, diminuindo desperdícios de energia e gastos com manutenção. Inúmeros são os exemplos em que a utilização de iluminação LED trouxe benefícios e alguns deles serão apresentados a seguir.

Apesar do alto custo desta tecnologia, projeções apontam que este se reduzirá consideravelmente até 2020, como demonstra a Figura 2.4, viabilizando progressivamente sua utilização em sistemas de iluminação pública, diminuindo payback de projetos.



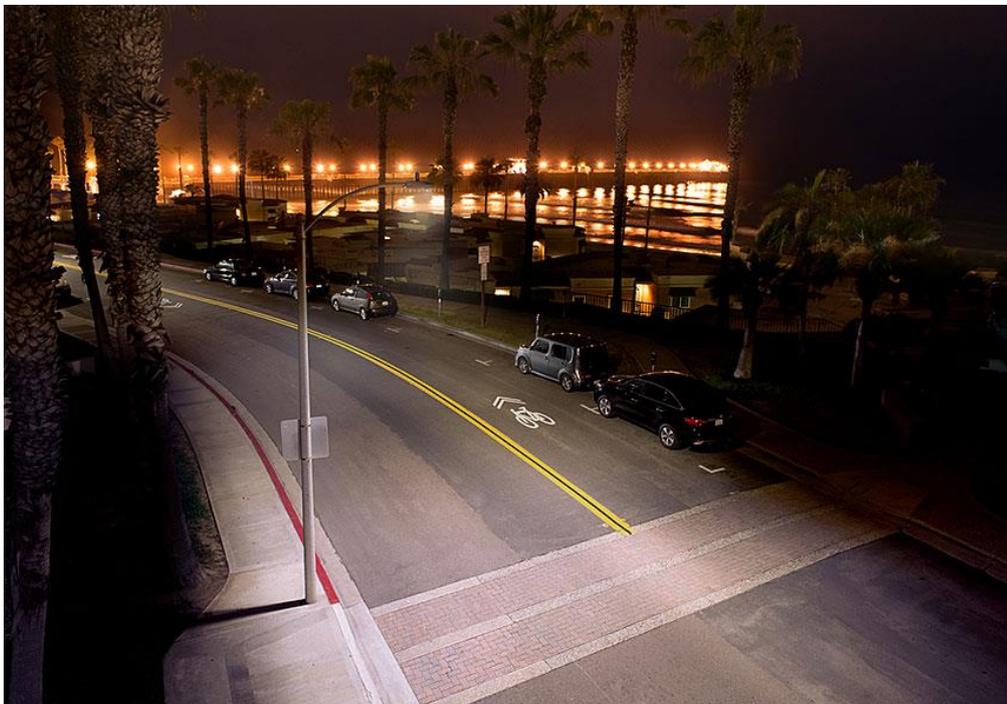
**Figura 2.4 – Projeção no custo de luminárias LED [11, 12]**

Em Hamilton, no Canadá, a substituição de suas luminárias de vapor de sódio de alta pressão por tecnologia LED em uma área específica da cidade trouxe economias de 700 mil dólares por ano. Uma via com iluminação LED em Hamilton pode ser observada na Figura 2.5. Mais de 10 mil pontos de luz tiveram suas luminárias substituídas, economizando 6,9 milhões de quilowatt horas por ano. Outro projeto, implementado em Oceanside, na Califórnia, Estados Unidos, um sistema inteligente de iluminação de cerca de 7700 pontos de luz foi instalado. Na Figura 2.6, pode-se observar uma via com iluminação LED em

Oceanside. Espera-se que o projeto proporcione economias de mais de 600 mil dólares anuais. [13].



**Figura 2.5 – Via iluminada por LEDs em Hamilton, Ontario, Canadá [13]**



**Figura 2.6 – Iluminação de via com tecnologia LED em Oceanside, Califórnia, Estados Unidos [13]**

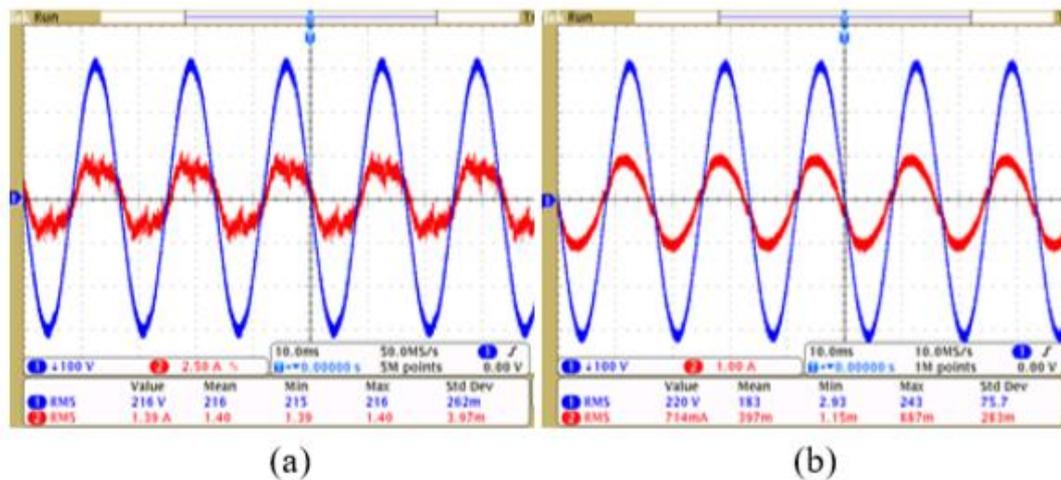
No Brasil, a Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), em conjunto com o Procel/Eletrôbrás, realizou um projeto piloto de instalação de 44 luminárias LED em substituição a luminárias Vapor de Sódio em alta pressão.

As luminárias LED escolhidas, comparadas com as luminárias com lâmpadas de Vapor de Sódio anteriores, apresentaram características elétricas superiores, tanto em qualidade de energia, quanto em economia, como pode ser visto na Tabela 2.1.

**Tabela 2.1 – Comparação entre características elétricas das lâmpadas vapor de sódio e LED. Adaptado. [12]**

	Luminária com Lâmpada de Vapor de Sódio	Luminárias LED
Tensão de Entrada (V)	220	220
Corrente de Entrada (A)	1,40	0,714
Potência Total de Entrada (W)	280 (lâmpada + reator)	157
Fator de Potência	0,893	0,97
THDi (%)	21,88	10,2
Potência Instalada (44 luminárias) (kW)	12,39	6,9

Durante oito meses, foi realizado um acompanhamento do desempenho luminotécnico das luminárias. Medições periódicas de iluminância média, uniformidade e luminância foram realizadas visando verificar o nível de luminosidade da via. Os resultados obtidos demonstraram conformidade com a norma ABNT NBR 5101 durante todo o período de medição. Um acompanhamento de desempenho elétrico também ocorreu com objetivo de avaliar possível degradação no fator de potência. Todas as luminárias ensaiadas permaneceram com fator de potência de 0,97 durante os ensaios, com emissão de conteúdo harmônico abaixo do máximo estabelecido pela norma IEC 61000-2-3 [12]. Alguns destes resultados podem ser verificados nas Figura 2.7 e Figura 2.8.



Formas de onda de corrente (vermelho) e tensão (azul) na entrada das luminárias com (a) vapor de sódio e (b) LED.

Figura 2.7 – Comparação entre as formas de onda de uma luminária vapor de sódio e uma luminária LED (adaptado) [12]

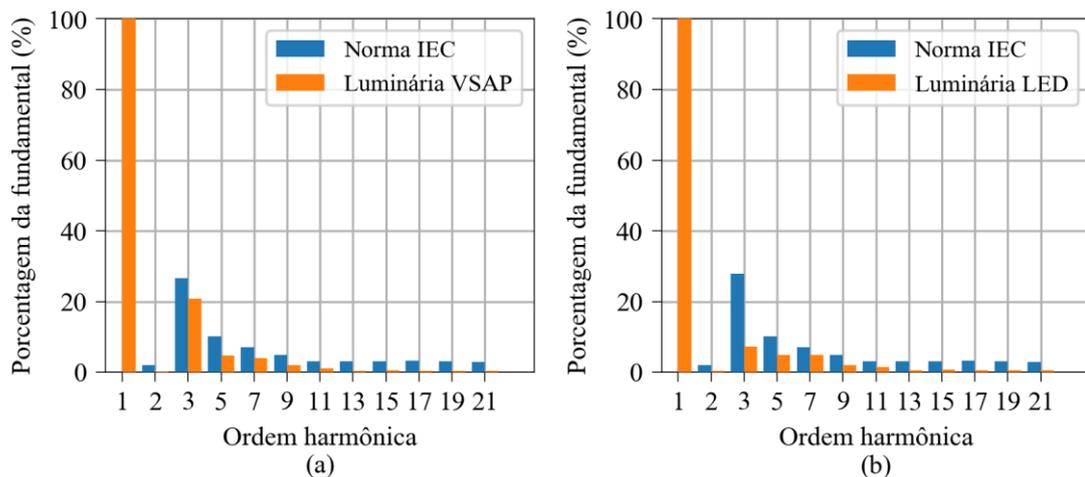


Figura 2.8 – Avaliação do conteúdo harmônico de uma luminária de vapor de sódio (a) e uma luminária LED (b) em relação à norma IEC 61000. Dados retirados de [12]

Outra avaliação feita neste estudo comparou os parâmetros fotométricos das luminárias Vapor de Sódio e LED. Estes parâmetros, medidos em campo e laboratório, forneceram informações acerca da performance luminotécnica com os dois tipos de tecnologia. As luminárias Vapor de Sódio obtiveram melhor resultado em relação à iluminância e luminância médias, indicando que o projeto anterior também atendia à norma ABNT NBR 5101. As luminárias LED, por outro lado, apresentaram melhor uniformidade e melhor relação na razão iluminância por potência de entrada, utilizada no estudo para medir a eficiência na conversão de energia em luz. Os resultados podem ser vistos nas Tabela 2.2 e Tabela 2.3.

**Tabela 2.2 – Parâmetros fotométricos medidos em campo [12]**

Luminária	Emed (lux)	$U_0$	$L_{med}$ (cd/m <sup>2</sup> )	$E_{med}/P_{in}$ (lux/W)
Vapor de Sódio	22,00	0,34	1,15	0,079
LED	17,58	0,48	1,02	0,112

**Tabela 2.3 – Características fotométricas [12]**

Luminária	Fluxo Luminoso Fotópico (lm)	Eficácia Luminosa (lm)	IRC (%)	TCC (K)
Vapor de Sódio	23270	83,1	25	2000
LED	9600	61,2	85	6000

O estudo obteve ainda que a eficácia luminosa da luminária vapor de sódio é maior, demonstrando que fluxo luminoso e eficácia luminosa não possuem necessariamente relação com melhor desempenho luminotécnico. Com relação ao Índice de Reprodução de Cores e Temperatura de Cor Correlata, a luminária LED apresentou IRC de 85 % e 6000 K, respectivamente, enquanto a Vapor de Sódio apresentou IRC de 25 % e 2000 K, respectivamente. A diferença entre o IRC e TCC destas tecnologias pode ser conferida na Figura 2.9.

**Figura 2.9 – Comparação entre luminária LED e Vapor de Sódio [12]**

Em outro estudo publicado na Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), onde um projeto para substituição das luminárias Vapor de Sódio de Alta Pressão por luminárias LED na principal via da universidade foi implementado, encontrou-se um aumento na iluminância média de 27 %, no fator de uniformidade de quase 32 %, diminuindo pontos

de sombra e redução significativa no consumo, como pode ser visto na Tabela 2.4, obtida através de estimações e dados de ensaios realizados em laboratório.

**Tabela 2.4 – Valor estimado de Potências ativas, reativa e aparente [14]**

Descrição	LED	VSAP
Quantidade de Lâmpadas por Poste	2	3
Quantidade de Postes	40	40
Quantidade total de lâmpadas	80	120
Potência Ativa Total (W)	17.120	41.880
Potência Reativa Total (Var)	4.320	100.800
Potência Aparente Total (kVA)	17.680	109.200



**Figura 2.10 – Ilustração da via principal da UFMT e marcação de todos os pontos de iluminação [14]**

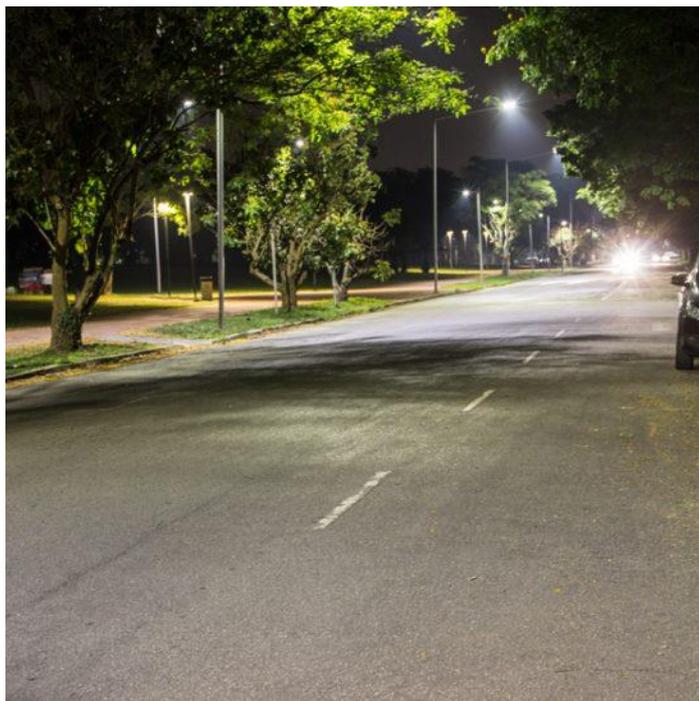


**Figura 2.11 – Luminária de três pétalas com lâmpadas VSAP [14]**

O trecho estudado possuía 40 postes de 20 metros de altura com luminárias de três pétalas com tecnologia Vapor de Sódio, como pode ser visto nas Figura 2.10 e Figura 2.11. O trecho foi substituído por duas luminárias LED em suporte duplo por poste, demonstrado na Figura 2.12.



**Figura 2.12 – Instalação das luminárias LED com a utilização de suporte duplo [14]**



**Figura 2.13 – Via com iluminação LED na USP [15]**

Na Universidade de São Paulo (USP), foi implantado um projeto retrofit de iluminação com mais de 6 mil pontos de luz, utilizando luminárias LED e vapor metálico de alta eficiência, como demonstrado na Figura 2.13. Utilizando um sistema de telegestão, o projeto permite controle total à distância da variação de intensidade de luz, bem como medição contínua do consumo e outras grandezas elétricas [16]. Apesar de contar com quase o dobro de luminárias do antigo projeto de iluminação, houve uma redução de mais de 30 % no consumo de energia elétrica.

## **2.2 Tecnologias de Iluminação**

### **2.2.1 Lâmpadas incandescentes**

O primeiro tipo de iluminação pública se deu através de lampiões a combustível, na segunda metade do século XIX. Em 1879, lâmpadas a arco voltaico foram instaladas na *Public Square*, em Cleveland, Estados Unidos. Neste mesmo ano, Thomas Edison desenvolveu a primeira lâmpada com filamento incandescente. [17]

Na lâmpada incandescente, a emissão de luz se dá devido à passagem de uma corrente elétrica por um filamento, levando-o a incandescer e brilhar. Nesse processo, o metal do filamento gradualmente se vaporiza, limitando a vida útil da lâmpada.

Apesar de possuírem baixo custo de produção e operar sem a necessidade de um balastro, as lâmpadas incandescentes possuem uma eficácia muito baixa, ou seja, a maior parte de sua energia é convertida em calor e não em luz. Diversos países colocaram padrões de eficácia que as lâmpadas incandescentes não podem alcançar e em breve, esta tecnologia estará extinta do mercado.

### **2.2.2 Lâmpada de baixa pressão fluorescente**

Idealizada pelo físico francês Alexandre Becquerel, a tecnologia de lâmpadas de descarga em baixa pressão fluorescente se tornou disponível na década de 1930 e se popularizou na década de 1970, sendo responsável atualmente por cerca de 80 % da iluminação artificial do mundo. [17]

Em uma lâmpada de descarga de baixa pressão, um tubo de vidro selado, com revestimento de fósforo é preenchido com uma mistura de gases inertes, como argônio, criptônio, neon e xenônio a baixa pressão. Uma quantidade muito pequena de mercúrio líquido é também colocada dentro do tubo de vidro. Uma bobina de fio de tungstênio é colocada nas extremidades de cada tubo, formando eletrodos. O cátodo emitirá elétrons quando uma tensão for colocada entre os eletrodos. No processo, uma parte do mercúrio se transformará em um gás e haverá colisão entre o vapor de mercúrio e os elétrons. O resultado dessa colisão produzirá fótons na faixa ultravioleta que, por sua vez, ao colidir com os átomos de fósforo na superfície do tubo de vidro, produzirá fótons na faixa de luz visível. Manipulando a composição do revestimento de fósforo, várias cores de luz branca podem ser produzidas.

No passado, o dispositivo que dá a partida e limita a corrente era chamado de balastro magnético. Este dispositivo apresenta grandes desvantagens que tornam a tecnologia de lâmpada fluorescente menos atrativa. Grandes, pesados, os balastros ainda produziam um ruído audível. Por ser basicamente um indutor, o balastro atrasa a corrente em relação à tensão, resultando em um fator de potência baixo. Atualmente, os balastros mais usados são os de estado sólido, que promovem a correção do fator de potência e flicker, além de serem mais eficientes.

Em relação às lâmpadas incandescentes, as lâmpadas fluorescentes possuem uma eficiência relativamente alta, de aproximadamente 22 %, e sua vida útil pode variar de 10.000 a 50.000 horas [17]. Como desvantagens desta tecnologia, todas as lâmpadas fluorescentes

são sensíveis à temperatura ambiente, já que a saída de luz diminui significativamente com temperaturas ambientes altas ou baixas, além de conter uma pequena quantidade de mercúrio, um metal pesado tóxico.

### **2.2.3 Lâmpadas de baixa pressão de sódio**

As lâmpadas de baixa pressão de sódio contém argônio, neon e sódio em um pressão relativamente baixa que melhora a eficácia e reduz a temperatura de operação do bulbo, exigindo, no entanto, um tubo mais longo. Na confecção da luminária, vidros normais podem ser utilizados mas revestimentos de borato devem ser usados para proteger o vidro da corrosão do vapor de sódio. Devido ao fato de serem necessários tubos mais longos, o design desse tipo de lâmpada é em formato de U. [17]

Uma limitação deste tipo de lâmpada é que ela produz luz monocromática em um comprimento de onda de 589.3 nm, muito próxima da cor com a qual o olho humano é mais sensível. Isso significa que o Índice de Reprodução de Cor é muito baixo, impossibilitando o uso dessa tecnologia em diversas aplicações.

As luminárias de vapor de sódio de baixa pressão possuem vida útil de aproximadamente 18000 horas e diferentemente de todas as outras tecnologias de iluminação, não possui degradação na quantidade de lumens produzidos com o tempo: sua saída de luz permanece constante durante toda a vida da lâmpada, mas o consumo de energia aumenta ligeiramente devido ao desgaste do eletrodo.

### **2.2.4 Lâmpadas de alta pressão de vapor de mercúrio**

A lâmpada de vapor de mercúrio consiste de um arco de tubo de quartzo com eletrodos de tungstênio em cada extremidade. O arco de tubo contém uma quantidade pequena de mercúrio em uma atmosfera de argônio. Um eletrodo de partida em série com um resistor limitador de corrente é localizado perto de um dos eletrodos principais. O tubo é encaixado com um vidro revestido de fósforo, enquanto o espaço entre o tubo e o vidro é preenchido com um gás inerte, geralmente nitrogênio. Quando a tensão é aplicada entre os principais eletrodos, a diferença na tensão entre o eletrodo de partida e um dos eletrodos principais ioniza o gás no tubo. Quando a corrente começa a fluir, um resistor em série com o eletrodo de partida limita a corrente. Depois que a ionização começa, uma descarga entre os eletrodos principais torna-se possível e a corrente circula entre os eletrodos principais,

removendo o eletrodo de partida e o resistor do circuito. O mercúrio se vaporiza, produzindo luz que, ao passar pelo revestimento de fósforo, tem seu índice de reprodução de cor melhorado. A produção de luz na faixa ultravioleta é uma desvantagem desta tecnologia, já que pele e olhos são extremamente sensíveis a essa radiação.

A eficiência deste tipo de tecnologia é comparável a de iluminação fluorescente, mas consideravelmente baixa em relação a outros sistemas de iluminação de alta descarga. As vantagens desta tecnologia são sua vida útil que é relativamente grande, na ordem de 24000 horas, e seu índice de reprodução de cor superior à tecnologia de sódio. [17]

### **2.2.5 Lâmpadas de alta pressão de sódio**

Neste tipo de tecnologia, um tubo em formato de arco é preenchido com um gás inerte como xenônio para estabelecer ionização. A baixa temperatura de ionização deste gás facilita a ignição da lâmpada. Para resistir aos efeitos corrosivos do vapor de sódio, o tubo é composto de uma cerâmica de óxido de alumínio. Um amálgama de mercúrio e sódio é armazenado em um reservatório no final do tubo. Com o calor produzido pelo arco que é gerado pelo gás xenônio, o calor produzido vaporiza o amálgama e o vapor de sódio começa a ionizar. O espectro de luz produzido é bem amplo, diferentemente da tecnologia de vapor de sódio em baixa pressão, que produz uma luz monocromática. [17]

A combinação de espectro amplo, alta eficácia e vida útil longa tornam essa tecnologia muito atrativa para diversas aplicações, incluindo iluminação pública. Em 2014, segundo dados disponibilizados pelo site da Eletrobrás, cerca de 62 % das luminárias de Iluminação Pública utilizavam a tecnologia de alta pressão de vapor de sódio. [5]

### **2.2.6 Lâmpadas de haleto metálico**

A estrutura deste tipo de tecnologia é constituída de um tubo em formato de arco, similar ao usado em lâmpadas de vapor de mercúrio. Envolvendo o tubo, encontra-se um vidro de borossilicato que pode ser revestido de fósforo, com o objetivo de espalhar a luz, melhorar o índice de reprodução de cores e diminuir a emissão de radiação ultravioleta emitida pela lâmpada. Devido a temperaturas e pressão altas, os sais de haleto metálicos no tubo se dissociam no calor do plasma em íons de metal e iodo. Os íons de metal emitem fótons no espectro visível quando atingidos por fótons de luz ultravioleta. Controlando a composição química dos sais, torna-se possível alterar as características da luz emitida.

Para acender, uma lâmpada de haleto metálico pode demorar de 1 a 15 minutos. Em sua partida, um resistor limita a corrente e assim que a temperatura de operação é atingida, o resistor é curto-circuitado e uma tensão é aplicada no tubo. [17]

Devido ao seu Índice de Reprodução de Cores alto, lâmpadas de haleto metálico são utilizadas em aplicações fotográficas, bem como iluminação de campos esportivos. Algumas desvantagens dessa tecnologia são a emissão de luz ultravioleta e a possibilidade de explosão.

### 2.2.7 Diodo emissor de luz (light emitting diode – LED)

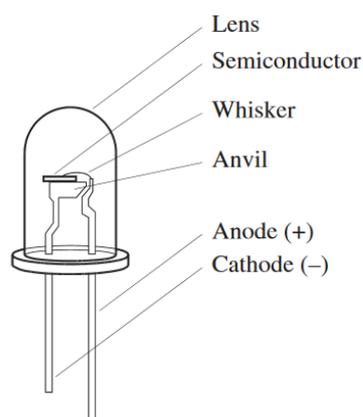


Figura 2.14 – Diodo Emissor de Luz [17]

Há várias versões sobre o surgimento do primeiro LED (*Light Emitting Diode*). Segundo uma das versões, o engenheiro Henry Joseph Round foi o descobridor da eletroluminescência em 1907, apesar de Round não haver publicado absolutamente nenhuma nota ou artigo sobre sua descoberta [18]. Outra versão atribui ao técnico de rádio Oleg Vladimir Losev, a criação do primeiro LED composto de óxido de zinco e carboneto de silício em 1927. Losev, por sua vez, publicou sua descoberta em detalhes em um jornal russo no mesmo ano [18]. A eletroluminescência é a propriedade que alguns materiais possuem de emitir luz quando há corrente elétrica circulando por eles [17]. Na Figura 2.14, pode-se observar um Diodo Emissor de Luz ou LED.

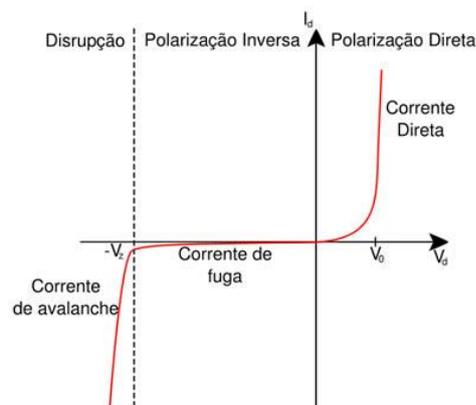
Em 1962, o primeiro LED de luz vermelha de 10 microcandelas foi criado pelo cientista Nick Holonyak Jr. O que se seguiu nas décadas posteriores foi o aumento de sua eficiência, até o surgimento do primeiro LED comercialmente viável, o LED de luz azul. Em 1995, o LED de luz branca foi descoberto pelo japonês Shuji Nakamura, ao aplicar uma

camada de fósforo que, tal qual em lâmpadas fluorescentes, converte luz ultravioleta em branca. [17, 18]

De acordo com [17], para produzir luz branca para aplicações de iluminação, pode-se utilizar duas abordagens: a primeira, citada anteriormente, é utilizar revestimento de fósforo, enquanto a segunda, um dispositivo tricromático pode ser construído. Um dispositivo tricromático acopla lâmpadas de LED de três cores diferentes (vermelho, verde e azul), a saída de luz do dispositivo mescla as cores e produz luz branca. Como a cor vermelha possui um comprimento de onda muito menor que as luzes verde e azul, o espectro de luz desses dispositivos não são uniformes. Adicionando-se mais uma cor e formando, portanto, um dispositivo tetracromático, melhora-se o Índice de Reprodução de Cores. O custo, entretanto, aumenta significativamente.

O LED é um componente eletrônico semiconductor que permite ou não a passagem de corrente dependendo de sua polarização. Constitui-se de uma pastilha semicondutora envolvida por uma superfície refletora [19]. A passagem de corrente e o consequente processo de recombinação dos portadores de carga leva à emissão de luz, que se concentra principalmente na faixa do infravermelho. É interessante observar que, ao contrário de uma lâmpada incandescente, por exemplo, que possui radiação com frequências em todo o comprimento de onda, o LED emite em uma faixa de frequência estreita.

As características elétricas do diodo podem ser conferidos na Figura 2.15. Percebe-se que, com um pequeno aumento da tensão, a corrente eleva-se significativamente.



**Figura 2.15 – Características elétricas de um LED [20]**

Pode-se dividir a luminária LED em quatro componentes: LEDs, *Drivers*, lentes e dissipadores de calor, conforme Figura 2.16. [21]

Atribui-se a cada componente a seguinte função:

- LEDs: responsável pela emissão de fluxo luminoso;
- Driver: Circuito eletrônico de chaveamento de alta frequência que controla a corrente de alimentação e a dimerização, que será explicada mais adiante;
- Lente: Direciona, concentra e distribui o fluxo luminoso;
- Dissipador de calor: como o próprio nome sugere, auxilia na dissipação de calor produzida por efeito joule nos componentes da luminária;

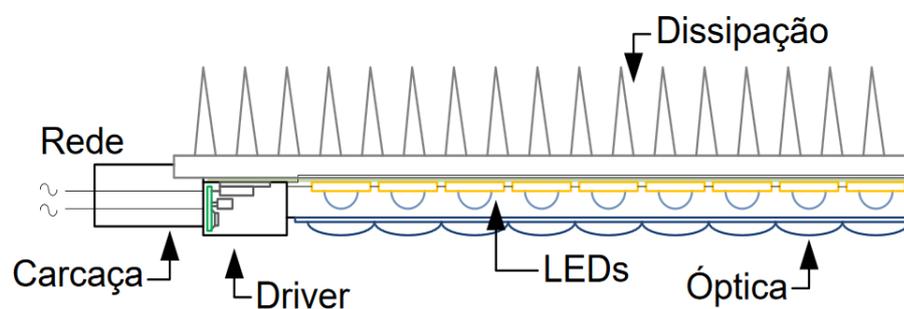


Figura 2.16 – Estrutura detalhada de uma luminária LED [22]

O modelo elétrico do LED pode ser observado na Figura 2.17.

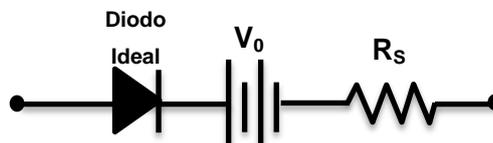


Figura 2.17 – Modelo Simplificado de um LED

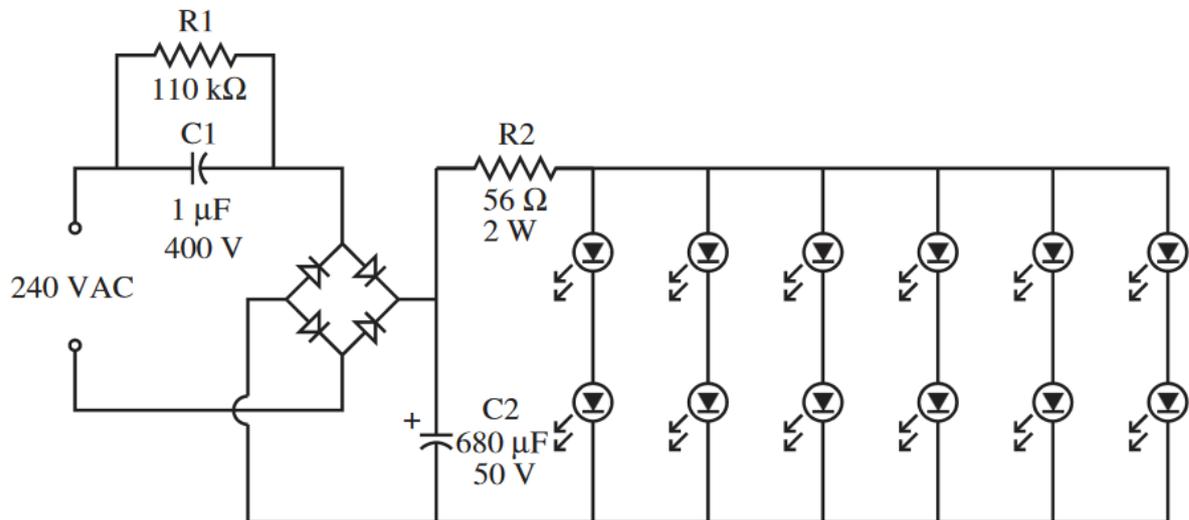
Em (2.1), representa-se o comportamento elétrico do LED:

$$V_{LED} = V_0 + R_S I_{LED} \quad (2.1)$$

- $V_{LED}$ : Tensão do LED
- $V_0$ : Fonte Interna de Tensão
- $R_S$ : Resistência Interna dinâmica do LED
- $I_{LED}$ : Corrente do LED

Como todas as lâmpadas LED operam em uma tensão de corrente contínua relativamente baixa, faz-se necessário um circuito que reduza a tensão e a retifique. Este

circuito pode ser integrado à lâmpada ou implementado separadamente, como um driver. Um tipo de circuito comum de driver pode ser visto na Figura 2.18.

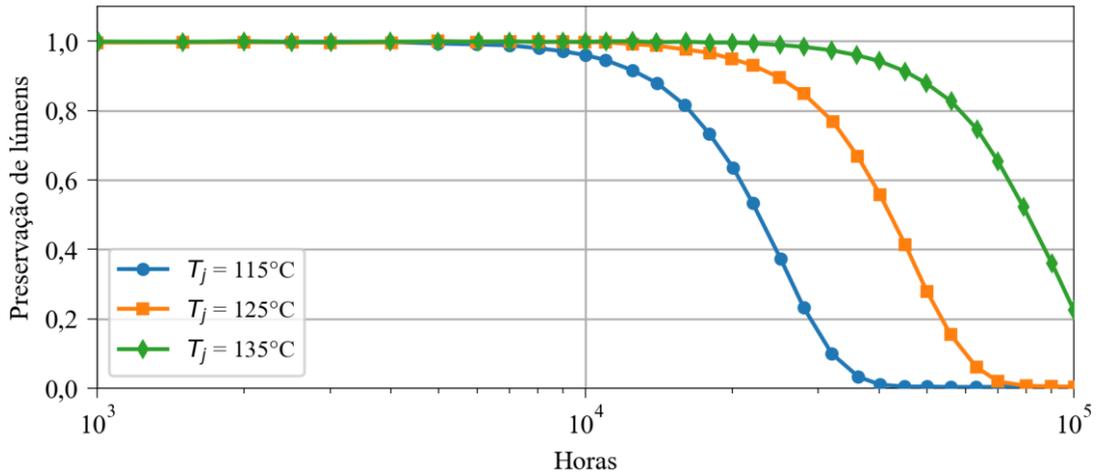


**Figura 2.18 – Circuito de um driver de LED [17]**

Na Figura 2.18, o capacitor C1 forma um divisor de tensão com o resto do circuito, reduzindo a tensão sobre o capacitor C2 para aproximadamente 15 V, eliminando a necessidade de um transformador para reduzir a tensão. O resistor R1 previne que a tensão no capacitor aumente. As especificações do resistor R2 dependerão da tensão aplicada sobre os LEDs, o número de LEDs utilizados e da corrente direta para qual eles foram projetados. [17]

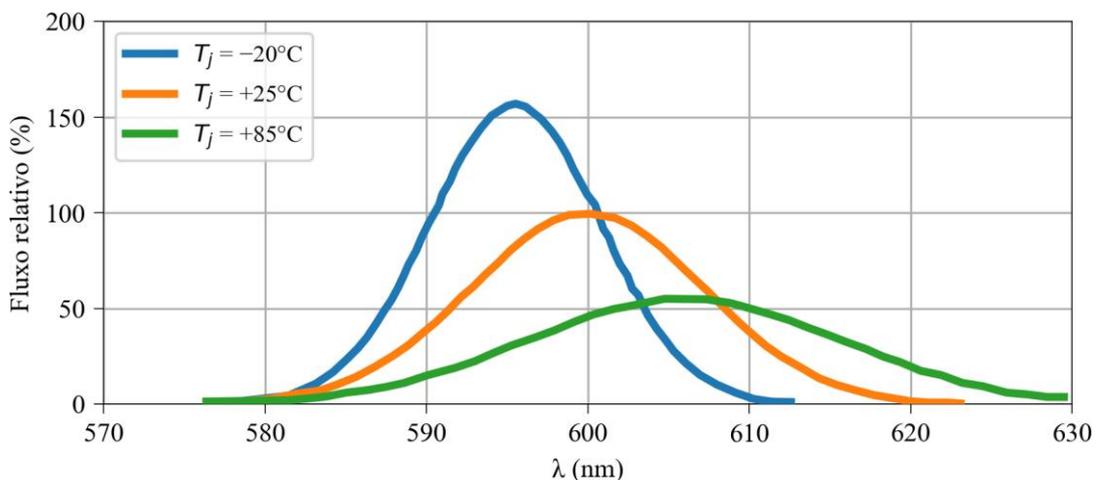
Deve-se atentar para a influência da temperatura nas características luminosas e vida útil dos LEDs. A vida útil do LED, bem como a corrente que passa por ele, diminui exponencialmente com o aumento da sua temperatura de junção. Isso significa que aumentar a temperatura afetará sua corrente direta, interferindo diretamente na quantidade de fluxo luminoso, já que estes parâmetros estão diretamente relacionados nesta tecnologia. É importante lembrar ainda que LEDs, devido ao seu tamanho compacto, geralmente possuem uma pequena área para dissipação térmica, sendo necessária a utilização de um dissipador de calor com área adequada. [23]

Em [24], reforça-se a influência da temperatura na vida útil do LED. Para um determinado LED (LED Luxeon K2 Philips), as curvas de variação do fluxo luminoso em relação à quantidade de horas de uso com uma corrente fixa para três temperaturas de junção diferentes são mostradas na Figura 2.19. É possível notar que a temperatura aumenta a degradação do fluxo luminoso ao longo do tempo, reduzindo a vida útil do LED.



**Figura 2.19 – Efeito da Temperatura de Junção na vida útil de um LED. Dados retirados de [24]**

Em [25], a variação da distribuição espectral da radiação emitida por um LED âmbar de AlInGaP em três temperaturas distintas foi obtida, como pode ser visto na Figura 2.20.



**Figura 2.20 – Variação da distribuição espectral da radiação emitida por um LED. Dados retirados de [25]**

As principais características do LED são: excelente rendimento luminoso (cerca de 90 lm/W), alta durabilidade (tipicamente de 20 mil – 30 mil horas, podendo chegar até 50 mil horas), temperatura de cor entre 2700 K e 6500 K, baixo consumo de energia e manutenção reduzida. O principal entrave a esta tecnologia é o seu alto custo inicial. [17, 18]

As lâmpadas LEDs possuem ainda tamanho compacto, comparado com lâmpadas incandescentes e fluorescentes, possuem alta eficácia luminosa, acendimento instantâneo, vida útil longa e são resistentes a choques e vibrações, que contribuem para a sua confiabilidade. Devido ao fato de trabalharem com níveis baixos de tensão e corrente, eles

podem ser manipulados com segurança pelo usuário [23]. Outras vantagens que os LEDs proporcionam são a ausência de substâncias nocivas à saúde humana e natureza, como mercúrio e chumbo, por exemplo, e a ausência de emissão de radiação ultravioleta [14].

Nas duas últimas décadas, o avanço tecnológico permitiu que a eficácia luminosa do LED progredisse significativamente. Em 2002, a eficácia dos LEDs era em torno de 25 lm/W. Cinco anos depois, a eficácia luminosa dos LEDs havia dobrado, atingindo 50 lm/W. Espera-se que em 2020, LEDs possuam eficácia em torno de 200 lm/W. [23]

#### ***A.1.1.1 Dimerização***

Alguns LEDs apresentam também a característica de poderem ser dimerizados, isto é, podem ter seu fluxo luminoso variado. Existem dois métodos de dimerização utilizados atualmente: o primeiro utiliza-se da variação linear da corrente contínua aplicada, enquanto o segundo utiliza Modulação por Largura de Pulso (*Pulse Width Modulation* – PWM), isto é, a aplicação de uma onda quadrada com variação da razão cíclica dessa forma de onda. Como o LED é um dispositivo semicondutor, ele pode ser ligado e desligado rapidamente, permitindo o uso da utilização do método PWM para dimerização. [23, 26, 27]

Devido a relação não-linear entre tensão e corrente, observada na Figura 2.15, se a tensão fornecida a um LED variar levemente, a corrente e a saída de luz mudam significativamente, tornando difícil um controle preciso da saída de luz. Observa-se, no entanto, que pequenas mudanças na corrente resultam em pequenas mudanças na saída de luz. O método mais adequado, portanto, para controlar a saída de luz de um LED é através do controle de sua corrente. [27]

Para efetivamente dimerizar um LED, trabalha-se somente na região linear da relação I-V. Desta forma, é possível dimerizar utilizando o controle da corrente dentro dos limites de 10 % a 100 % do máximo atingível (dimerizar abaixo de 10 % é difícil). Com a utilização do método PWM, utiliza-se um rápido chaveamento para produzir o efeito de tensão variável, controlando a corrente média do LED, possibilitando aumentar a faixa de dimerização com controle linear da intensidade luminosa até 0 %. Para evitar o efeito de flicker, quando é possível observar pulsos de luz individuais, utiliza-se usualmente uma alta frequência de modulação. [27]

O ciclo de trabalho é expresso pela razão entre a duração do pulso e o período completo do sinal, como pode ser visto na Figura 2.21 e em (2.2):

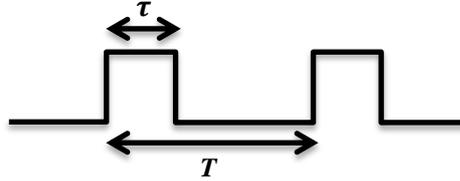


Figura 2.21 – Representação gráfica do ciclo de trabalho

$$D = \frac{\tau}{T} \quad (2.2)$$

- $D$ : Ciclo de trabalho
- $\tau$ : Duração do pulso
- $T$ : Período completo do sinal

A corrente média do LED se relaciona com o ciclo de trabalho e com a corrente de pico do sinal PWM aplicado de acordo com a relação demonstrada na (2.3):

$$I_m = I_p \times D \quad (2.3)$$

- $I_m$ : Corrente média
- $I_p$ : Corrente de pico

Algumas desvantagens do método PWM são a diminuição da vida útil dos dispositivos de LED, bem como a possível produção de ruído de interferência eletromagnética devido aos transientes de energia devido ao chaveamento da corrente do LED. [28]

Em [23], um estudo comparativo entre os dois tipos de métodos é realizado. Utilizando um conversor Buck CC-CC operando em modo de condução contínua e um controlador digital implementado em um microcontrolador, aplicou-se uma corrente média de 50 % do valor nominal nos dois métodos citados. Os resultados obtidos indicaram que aplicando-se o método de variação linear de corrente contínua, a eficiência do sistema é maior quando os valores da corrente que alimenta o LED são menores. Quando o valor da corrente se aproxima de seu valor nominal, a eficiência dos dois métodos é muito parecida. O estudo

também apontou que os níveis de brilho luminoso são mais altos com o método de dimerização por PWM.

A principal vantagem da dimerização está relacionada a possibilidade de não se utilizar o fluxo luminoso total em períodos em que o tráfego de veículos é menor, como durante a madrugada.

#### ***A.1.1.2 Driver***

Para operar corretamente, o LED deve ser alimentado em baixas tensões e corrente contínua, o que impossibilita a conexão direta com a rede elétrica convencional. Conseqüentemente, faz-se necessária a intermediação de um driver para retificar e diminuir a tensão da rede, mantendo a corrente e a tensão fornecida ao LED dentro dos patamares especificados pelo fabricante. Como dito anteriormente, a vida útil do LED diminui significativamente com o aumento da temperatura, logo, os valores de tensão e corrente devem ser rigorosamente observados e controlados pelos drivers para que o dispositivo não se sobreaqueça. Espera-se ainda que o driver seja eficiente e com vida útil longa para que toda a luminária LED atenda às expectativas do mercado.

De acordo com [29], é possível classificar os drivers em dois tipos: drivers de estágio único e de dois estágios. Os drivers de um único estágio são simples e de alto rendimento, mas necessitam de um capacitor de alto valor na saída. Seu único estágio possui como principal função corrigir o fator de potência (estágio PFC), obedecendo aos requisitos da norma IEC61000-3-2. Para aplicações em iluminação pública, onde a potência requerida é frequentemente maior que 70 W, capacitores eletrolíticos são amplamente utilizados.

Em [29] e [30], discute-se a utilização de capacitores eletrolíticos nos drivers e alternativas ao seu uso, já que este tipo de capacitor é comumente utilizado para a função de filtragem e se constitui como uma das principais causas de falha em drivers. Quando os drivers operam em altas temperaturas, o gel existente dentro de capacitores eletrolíticos evapora mais rapidamente levando a uma diminuição de sua vida útil [31].

O modelo equivalente do LED é composto de uma fonte de tensão em série com uma resistência de baixo valor, conseqüentemente a corrente pode variar significativamente com pequenas variações de tensão. Caso haja alguma componente alternada e a corrente oscile, seu valor de pico não deve extrapolar o limite máximo estipulado pelo fabricante. Isso significa que quanto maior a amplitude da componente alternada menor a corrente média que

alimenta o LED e conseqüentemente, menor luminosidade emitida. Visando filtrar a componente de baixa frequência, pode-se utilizar um capacitor com alta capacitância no final do estágio de Correção de Fator de Potência (CFP), elevando os custo do capacitor e, portanto, do driver [29].

A estrutura típica de um driver pode ser conferida na Figura 2.22 abaixo. Um Filtro de Interferência Eletromagnética (Filtro EMI) é colocado na entrada do driver para bloquear componentes harmônicas, seguido de um estágio retificador. Como dito anteriormente, o estágio PFC se encarrega de evitar a injeção de correntes harmônicas na rede, enquanto que o Conversor Principal atua entregando corrente constante aos LEDs. [22]

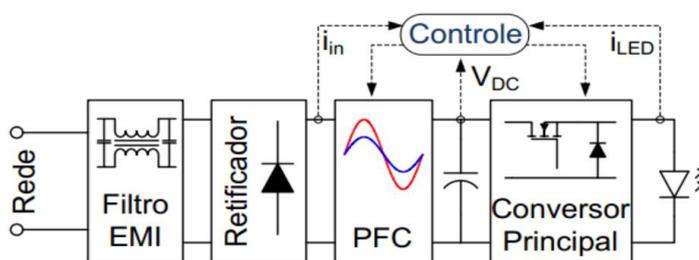


Figura 2.22 – Estrutura de um driver ativo para controle de LEDs [22].

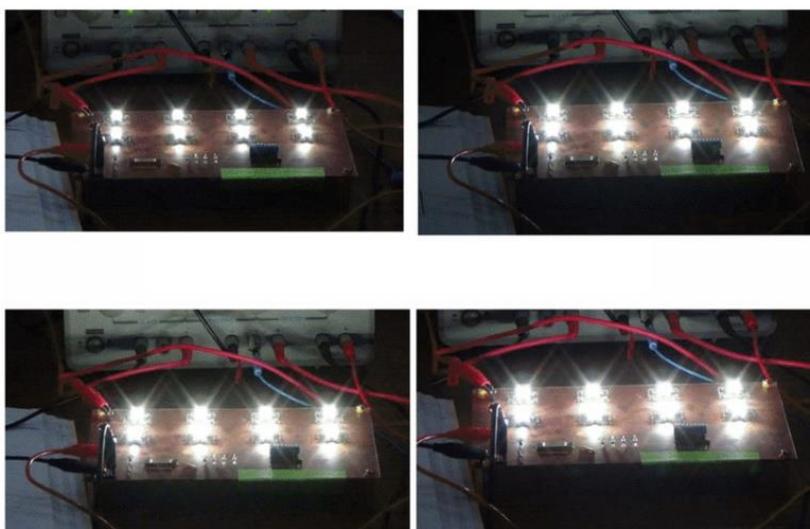
Diferentemente dos drivers que possuem somente um estágio, a presença do segundo estágio possibilita a utilização de capacitores menores e de outras tecnologias, expandindo a vida útil do driver. O rendimento neste tipo de driver, entretanto, é menor devido ao processamento duplo de energia. [29]

De acordo com [22], as topologias mais utilizadas nos conversores principais nos drivers de LEDs são derivadas dos conversores CC-CC não isolados básicos, como *buck*, *boost*, *buck-boost*, *Ćuk*, *SEPIC* e *zeta*; conversores isolados típicos, como *flyback*, *forward*, *push-pull*; e conversores ressonantes isolados, como *half-bridge*, *full-bridge*, *forward* ressonante, *Ćuk* isolado, *SEPIC* isolado, *zeta* isolado.

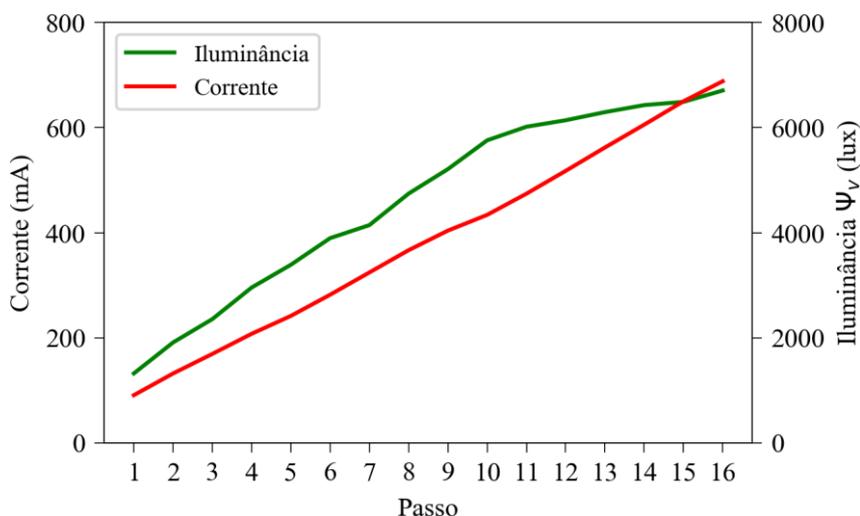
Para [32], pode-se dividir os driver em quatro grupos: drivers de um estágio, dois estágios, integrados e cascata otimizada. De acordo com os autores, os drivers integrados são parecidos com os drivers de dois estágios porém possuem menos chaves, que são compartilhadas entre os circuitos de controle de fator de potência (PFC) e controle de potência (PC). Este tipo de circuito, entretanto, apresenta, bem como os drivers de dois estágios, perda de eficiência.

Em [29], sugere-se a utilização de um driver de dois estágios em que o processamento de energia seja menor, visando aumentar seu rendimento e diminuir perdas. Os autores propõem a aplicação do conceito Redução do Processamento Redundante de Potência (*Reduced Redundant Power Processing, R<sup>2</sup>P<sup>2</sup>*) e apresentam a topologia de cascata otimizada: o segundo estágio somente controla a corrente fornecida aos LEDs reduzindo a capacitância necessária no primeiro estágio, aumentando o rendimento. No estudo, foi permitido uma amplitude maior da componente alternada e utilizou-se o estágio CP como compensador da ondulação e como processador de somente uma parcela da potência. Desta forma, a energia não foi duplamente processada e o driver operou com rendimento de 90 %, com uma DHT de 9,66 % e fator de potência de 0,99, obedecendo aos requisitos da norma IEC 61000-3-2. Os autores ressaltaram ainda que nenhum capacitor eletrolítico foi utilizado, o que estende a durabilidade do dispositivo.

Em [28], um chip que fornece vários níveis de corrente foi confeccionado para dimerização de sistemas de iluminação de alta potência. Com um controle de 16 níveis de valores de corrente e interface digital, o chip controla direta e precisamente 8 LEDs de 5W, como pode ser observado na Figura 2.23. A eficiência obtida pelo chip é de 93 %. Na Figura 2.24, percebe-se o comportamento aproximadamente linear entre a iluminância e a corrente do LED.



**Figura 2.23 – LEDs sendo controlados por chip [28]**



**Figura 2.24 – Corrente e Iluminância do LED em função dos níveis estabelecidos pelo chip. Dados retirados de [28]**

Em [32], uma topologia de três estágios de alta eficiência e confiabilidade é proposta para sistemas de iluminação que utilizam LED. De acordo com os autores, neste tipo de aplicação, o custo do driver não é tão importante quanto a sua eficiência e confiabilidade devido à grande quantidade de energia consumida pelos sistemas de iluminação e aos custos de manutenção e substituição de drivers que, por sua vez, costumam ser maiores que aplicações em ambientes internos. O driver estudado possui no primeiro estágio um conversor *boost* sem capacitor eletrolítico, um transformador eletrônico de duas saídas no segundo estágio, garantindo isolamento galvânica com alta eficiência. No terceiro estágio, colocam-se conversores Buck de duas entradas para eliminar o *ripple* de baixa frequência e controlar a corrente em cada *string* de LEDs.

### 2.2.8 Indução

A lâmpada de indução foi descoberta por Hittorf em 1884 e somente 100 anos depois, na década de 80, foi introduzida no mercado pela indústria de iluminação. Esse atraso se deve principalmente à falta de dispositivos eletrônicos baratos e confiáveis e à interferência eletromagnética desse tipo de tecnologia. [33]

No interior de uma lâmpada de indução, uma bobina gera um campo magnético que acelera o vapor de mercúrio, gerando radiação ultravioleta que, por sua vez, é convertida em radiação visível devido à camada de fósforo na superfície interna do bulbo. [22]

Algumas das vantagens dessa tecnologia são: a rápida partida, capacidade de dimerização, ausência de eletrodos, ou seja, não há perdas no eletrodo e está menos

susceptível à falhas (eletrodos são uma das principais causas de falha em lâmpadas fluorescentes), sua vida útil é longa e pode chegar até 100 mil horas, IRC satisfatório em torno de 80 %, temperatura média de 4000 K e boa eficiência luminosa (cerca de 80 lm/W). Esta alta durabilidade associada a sua baixa manutenção, levam esta lâmpada a ser utilizada em locais de difícil acesso. [18, 33]

## **2.3 Componentes**

Os conjuntos de iluminação pública possuem vários componentes: lâmpadas, reatores/drivers, circuitos de comando, luminárias, braços.

### **2.3.1 Reatores e drivers**

Para tecnologias que utilizam a excitação de gases para produzir luz, faz-se necessária a utilização de circuitos mais complexos para acionamento da lâmpada. Do ponto de vista da alimentação, as lâmpadas de descargas são vistas como circuitos de impedância muito alta, sendo necessária a utilização de eletrodos auxiliares ou da aplicação de uma tensão muito alta por um curto período de tempo através de um dispositivo denominado ignitor. Após a ionização dos gases no interior da lâmpada, a impedância tem seu valor reduzido, comportando-se como um curto-circuito. Utiliza-se então um reator que, por sua vez, pode ser magnético ou eletrônico para limitar a corrente. [34]

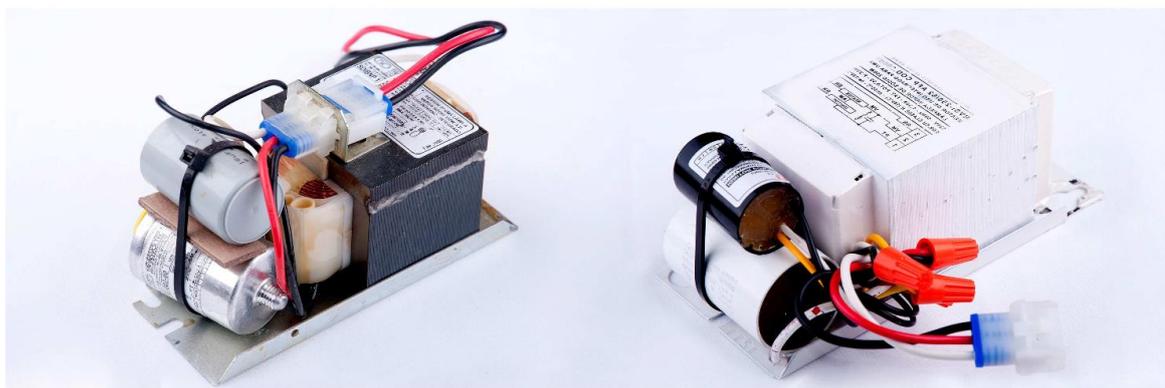
O reator magnético é um indutor confeccionado para operar na frequência da rede elétrica. No interior de um reator, encontram-se também o ignitor e um capacitor para correção de fator de potência que podem ser internos ou instalados externamente em uma estrutura de sustentação. Já os reatores eletrônicos são fontes chaveadas que trabalham em frequências mais altas, em torno de kHz, controlando a corrente da lâmpada e dispensando a utilização de ignitores e capacitores. [34]

Em dezembro de 2010, o Ministério de Minas e Energia publicou a Portaria Interministerial nº959, estabelecendo valores máximos admissíveis para as perdas de reatores magnéticos utilizados em Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão e Vapor Metálico “de fabricação nacional ou importados, para comercialização ou uso no Brasil”, como pode ser visto na Tabela 2.5 [34, 35]. Na Figura 2.25, é possível observar reatores internos, ou seja, que ficam acomodados no interior da luminária, enquanto na Figura 2.26, tem-se um reator externo.

**Tabela 2.5 – Níveis de eficiência energética para reatores eletromagnéticos [35].**

Potência da Lâmpada (W)	Perda Elétrica Máxima (W)
35 (*)	10
70	14
100	17
150	22
250	30
250 (*)	23
400	38
400 (*)	29

(\*) Somente para os Reatores Eletromagnéticos para Lâmpadas a Vapor Metálico (halogenetos)

**Figura 2.25 – Reatores internos [34].**



**Figura 2.26 – Modelo de reator externo para lâmpada a vapor de mercúrio de 250W, com tomada para relé [34].**

No passado, quando os LEDs eram utilizados somente como indicadores (como ligado/desligado, entre outros) em equipamentos e, portanto, operavam com tensão e correntes baixas, o controle de sua corrente se dava apenas através de uma fonte de tensão constante em série com alguns resistores. [36]

Com o avanço da tecnologia, muitas aplicações de iluminação utilizam vários LEDs conectados serialmente e uma corrente significativamente maior. Devido a isso, as perdas adicionais com um resistor em série não podem ser mais desprezadas, já que uma pequena variação na tensão sobre o LED leva a uma variação significativa na corrente, levando ao desenvolvimento de circuitos com eletrônica de potência para o controle da corrente. [36]

Convencionalmente, o driver utilizado para controlar a corrente do LED é composto de um conversor de potência de dois estágios. Um conversor CC-CC com alta frequência de chaveamento encontra-se no primeiro estágio, fornecendo corrente no valor nominal do LED, enquanto o segundo estágio utiliza-se de um outro conversor que aumenta a frequência fornecida pelo primeiro estágio para valores da ordem de kHz e alimenta o LED. [37]

### **2.3.2 Circuitos de comando**

Para acionamento dos circuitos de iluminação, existem equipamentos disponíveis que utilizam como referência horários pré-determinados, movimento ou nível de iluminância.

No Brasil, os sensores baseados em níveis de iluminância foram amplamente utilizados. A estes detectores de luz solar, dá-se o nome de relés fotoelétricos que, por sua vez, podem ser vistos na Figura 2.27. A estrutura principal do relé é composta de uma célula fotoelétrica que tem sua resistência reduzida sob ação da luz, levando a um aumento na corrente que, por sua vez, aciona outros circuitos [38]. Os princípios de funcionamento dos relés podem ser térmicos, que se baseiam na detecção de corrente elétrica produzida através da deformação de lâminas bimetálicas; magnéticos, que alterna a posição de seus polos através da força gerada por um campo magnético (mecanismo denominado chave eletromecânica) que, por sua vez, é gerado quando uma corrente originada pela sensibilização de uma fotocélula flui em sua bobina; e/ou eletrônicos, que também se utiliza de chave eletromecânica, porém com a corrente utilizada para sensibilizá-la proveniente de circuitos eletrônicos. Baixo custo de produção e durabilidade razoável levam os relés com acionamentos magnéticos e eletrônicos a serem mais comercializados e utilizados nos sistemas de iluminação pública [34].

Pode-se classificar ainda os relés em dois tipos: Normalmente Abertos (NA) e Normalmente Fechados (NF). Na ausência de luz, relés NA mantêm os contatos abertos, enquanto que os relés NF mantêm os contatos fechados [38].



**Figura 2.27 – Exemplos de relés fotoelétricos. [34]**

**Tabela 2.6 – Níveis de operação [39].**

Relé fotocontrolador tipo	Níveis de operação (lux) – Iluminância			Relação		
	Ligar		Desligar	desligar/ligar		
T1	5 a 20		Até 40	mínima 1,2		
T2, T3 e T4	zenital ou azimutal	Lux Normal	De 5 a 15	Até 30	1,5 a 3,0	
		/		/		ligar/desligar
		Lux inverso	até 30	de 5 a 15	1,5 a 3,0	

A norma ABNT NBR 5123 – “*Relé fotocontrolador intercambiável e Tomada para Iluminação – Especificação e Ensaios*” estabelece os requisitos “de construção e desempenho e os procedimentos de ensaios aplicáveis ao relé fotocontrolador intercambiável, tomada embutida, tomada externa, capa isolada e capa ligada, para uso ao tempo, e destinados ao comando de iluminação em circuitos de baixa tensão de corrente alternada de 60 Hz.” [39] Nesta norma, são definidos os valores de iluminância mínimos para os quais os relés fotovoltáicos devem atuar ligando e desligando o sistema de iluminação. Estes valores podem ser conferidos na Tabela 2.6.

De acordo com a norma ABNT NBR 5123, o relé fotocontrolador do tipo T1 abrange os tipos térmico magnético e monotensão, já o tipo T2 se refere ao relé fotocontrolador eletrônico multitensão. Os relés fotocontroladores T3 e T4, por sua vez, referem-se ao tipo eletrônico monotensão e eletrônico temporizado, respectivamente. [39]

Em relação ao seu grau de proteção, os relés fotocontroladores T1 devem apresentar grau de proteção IP55, ou seja, devem apresentar proteção contra poeira e jatos de água, enquanto os relés fotocontroladores T2, T3 e T4 devem apresentar IP65 que representa proteção total contra poeira e jatos potentes de água. [40]

A norma define ainda que os relés devem operar normalmente nas temperaturas de -5°C a 50°C. [39]

Por serem responsáveis pelo acionamento de luminárias, os relés fotocontroladores desempenham um papel importante em sistemas de IP. Em estudo conduzido pela Eletrobras/Procel e pela Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul (PUCRS) visando analisar o sistema brasileiro de Iluminação Pública, constatou-se que

mais de 70 % dos relés fotovoltaicos não atendiam à norma, mantendo, em média, as luminárias ligadas por 27 minutos a mais do que o necessário [40]. Na Tabela 2.7 a seguir, foi calculada a quantidade de energia extra consumida para cada potência da lâmpada devido ao mal funcionamento do relé.

**Tabela 2.7 – Consumo incremental de energia de acordo com a potência da lâmpada [40, 41]**

Potência da Lâmpada (W)	70	100	150	250	400
Consumo incremental (Wh/mês)	945	1350	2025	3375	5400

Em [40], calculou-se a economia de energia obtida caso os relés fotocontroladores utilizados em Iluminação Pública fossem adequados à norma e possuíssem certificação do Selo Procel. Os resultados podem ser vistos na Tabela 2.8.

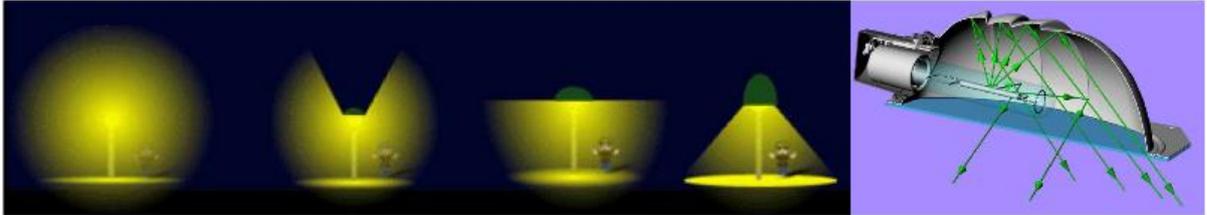
**Tabela 2.8 – Economia de energia resultante do aumento da quantidade de relés fotocontroladores com Selo Procel em 2016. [40]**

Percentual de Relés com Selo Procel (%)	Economia de Energia Elétrica (GWh)
10	20,16
20	40,32
30	60,47
40	80,63
50	100,79
60	120,95
70	141,10
80	161,26
90	181,42
100	201,58

### 2.3.3 Luminárias

No passado, a principal função da luminária era de apenas sustentar e conectar as lâmpadas à rede elétrica, sem qualquer preocupação com o direcionamento do fluxo luminoso

e proteção da lâmpada em relação à ação da temperatura, insetos, entre outros. Posteriormente, outros tipos de luminária foram desenvolvidos utilizando conjuntos ópticos que conduziam o fluxo luminoso para áreas de interesse, causando diminuição de poluição luminosa devido à dispersão de luminosidade, como pode ser visto na Figura 2.28.



**Figura 2.28 – Melhora no direcionamento do fluxo luminoso está exemplificada, da esquerda para a direita. Conjunto óptico eficiente [34].**

Para a proteção da lâmpada, leva-se em consideração no projeto de luminárias mais modernas a configuração de suas carcaças. As carcaças das luminárias podem ser abertas, fechadas ou integradas. As luminárias tipo abertas deixam a lâmpada exposta a diversas intempéries, como citado anteriormente, relacionadas a clima, choques térmicos, insetos, vandalismo, como pode ser observado na Figura 2.29. Já as luminárias com a carcaça fechada utilizam materiais poliméricos ou vidro para proteger a lâmpada, como demonstrado na Figura 2.30. A grande desvantagem que estes dois tipos de carcaça possuem em comum se deve à necessidade de instalação extensa de equipamentos, como reatores e relés fotoelétricos, causando poluição visual devido à exposição da fiação, bem como dificultando a manutenção. [34]



**Figura 2.29 – Luminária com a carcaça tipo Aberta [34].**



**Figura 2.30 – Modelo de luminária fechada sem equipamento [34].**

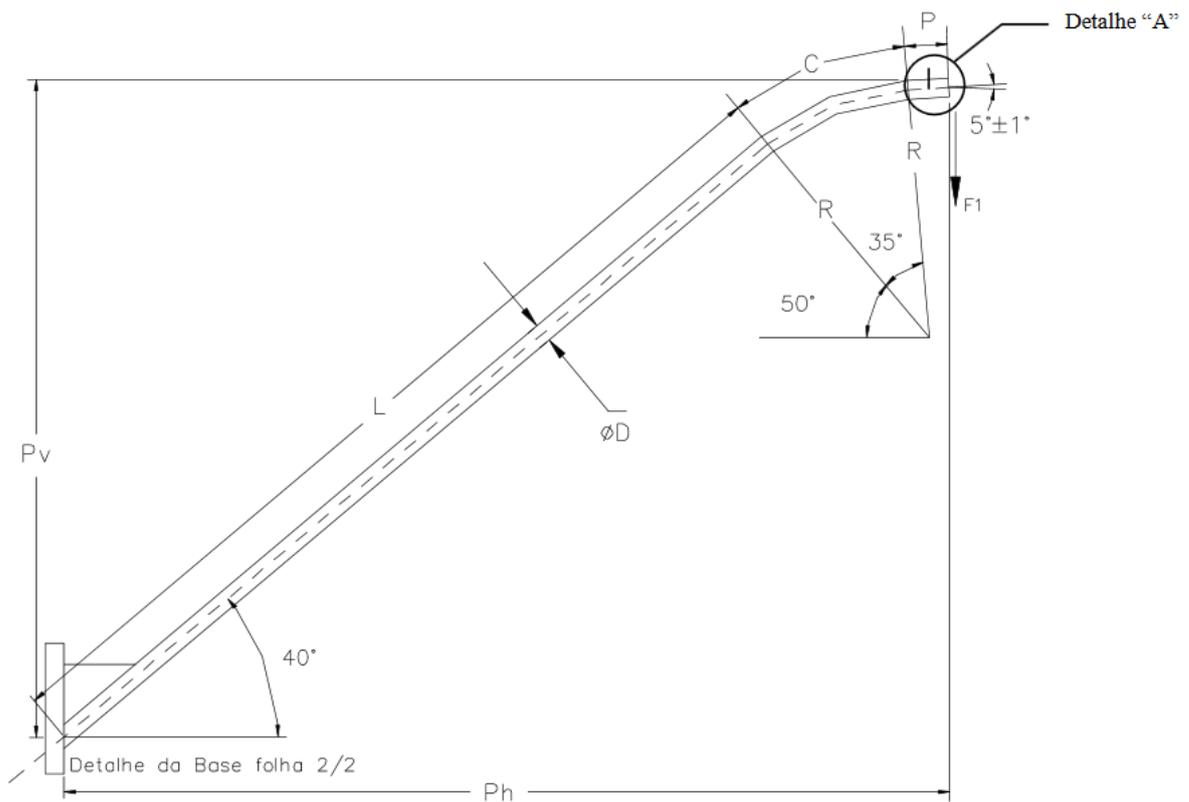
Visando endereçar os problemas citados anteriormente, foram desenvolvidas as luminárias integradas. Um exemplo de luminária integrada pode ser visto na Figura 2.31. Equipadas de conjunto óptico adequado e proteção para lâmpadas, estas luminárias possuem ainda espaço interno adequado para acomodação e instalação de reatores, além de tomada na parte superior para relés fotoelétricos.



**Figura 2.31 – Modelo de luminária integrada [34].**

### 2.3.4 Braços para Iluminação Pública

Os braços são componentes dos conjuntos de Iluminação Pública que realizam a função de sustentar as luminárias e conduzir a fiação, estabelecendo a conexão entre ponto de iluminação e rede elétrica. O ângulo do braço em relação à horizontal é de extrema importância no que diz respeito à distribuição de luminosidade pois pode comprometer a distribuição do fluxo luminoso. [34]



**Figura 2.32 – Especificações dos braços médio e longo utilizados pela CPFL [42].**

Os braços utilizados pela holding CPFL, por exemplo, podem ser classificados em quatro tipos: curto, médio, longo e viela. Nas Figura 2.32, Figura 2.33, Figura 2.34, Figura 2.35, Figura 2.36 e Figura 2.37 e Tabela 2.9, é possível consultar os dados de cada tipo de braço.

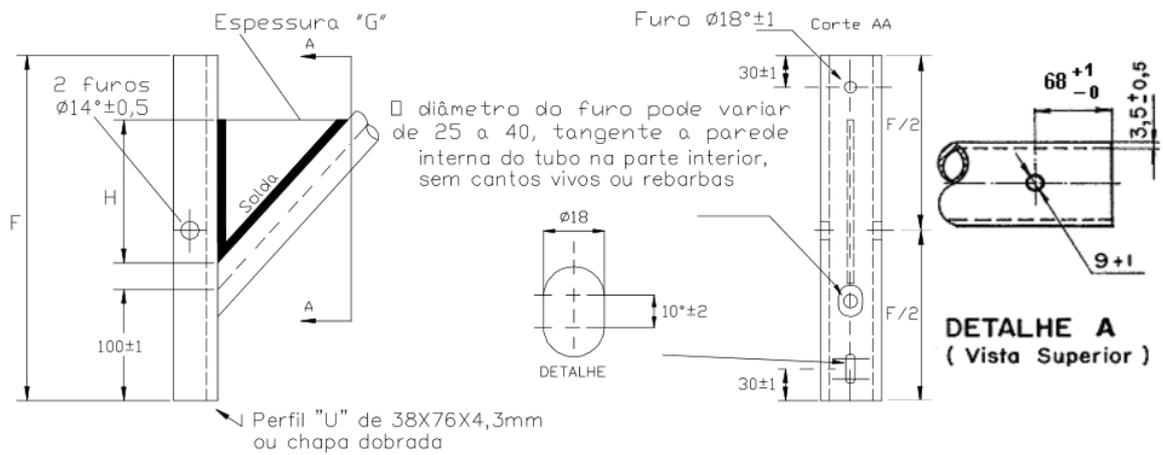


Figura 2.33 – Especificações dos braços médios e longos utilizados pela CPFL [42].

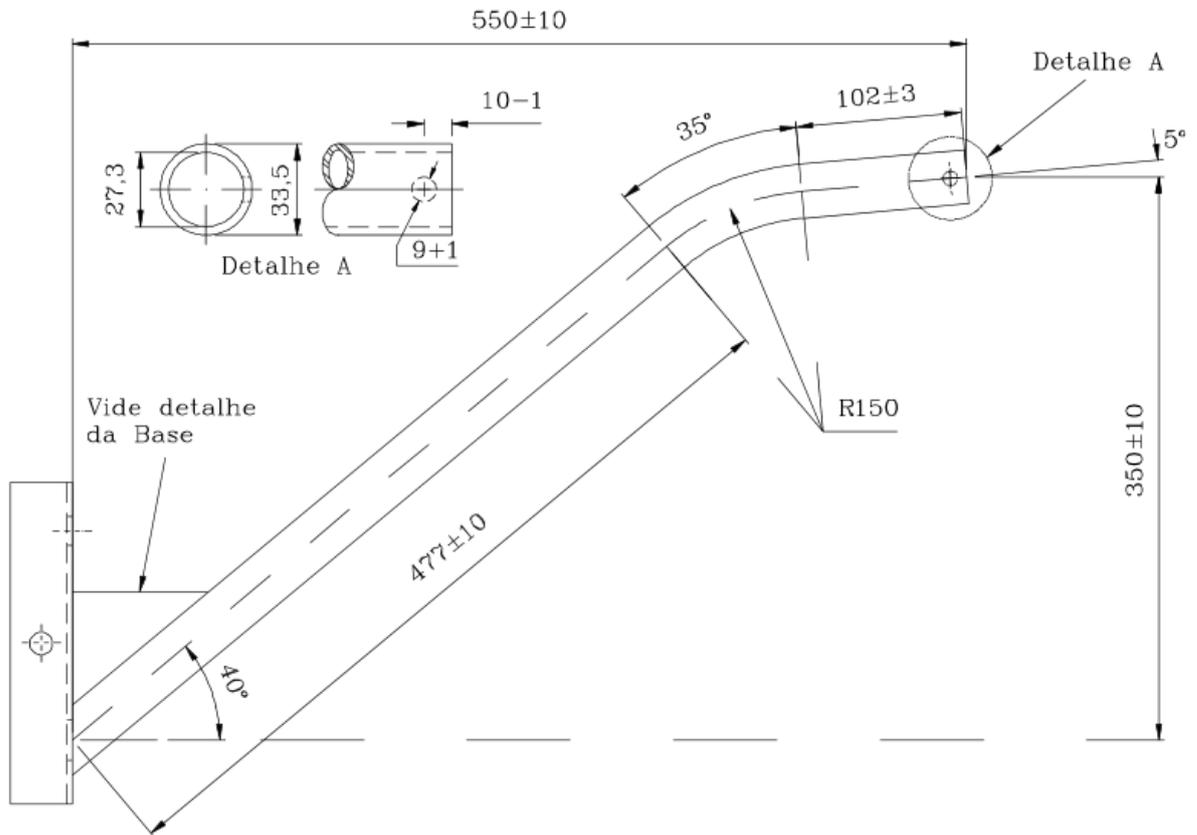


Figura 2.34 – Especificações do braço viela utilizados pela CPFL [43].

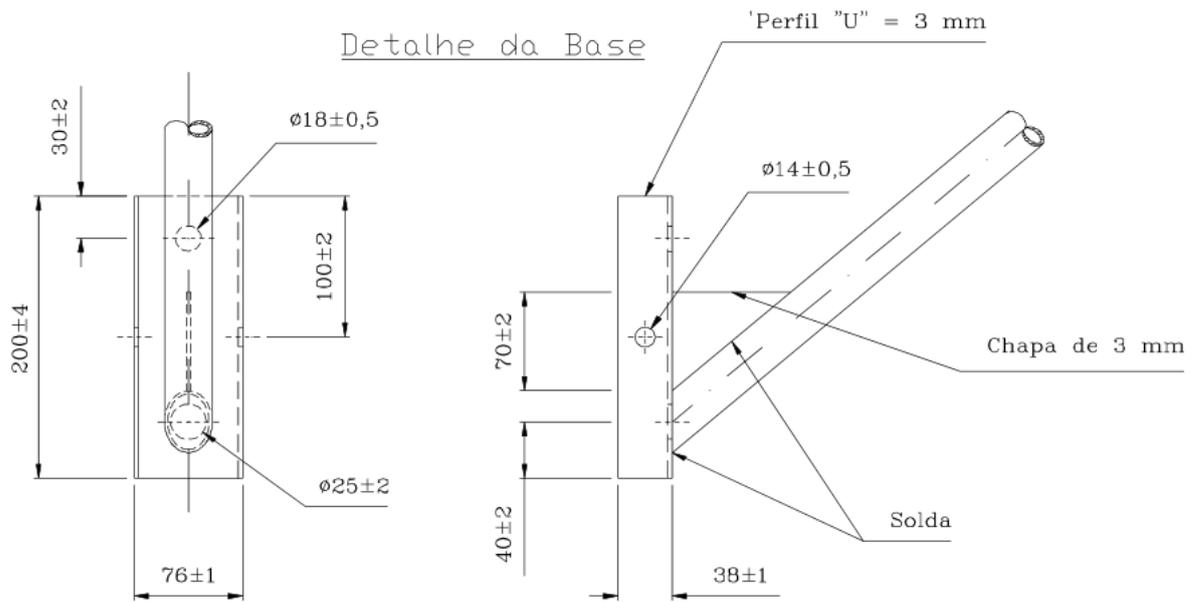


Figura 2.35 – Especificações do braço viela utilizado pela CPFL [43].

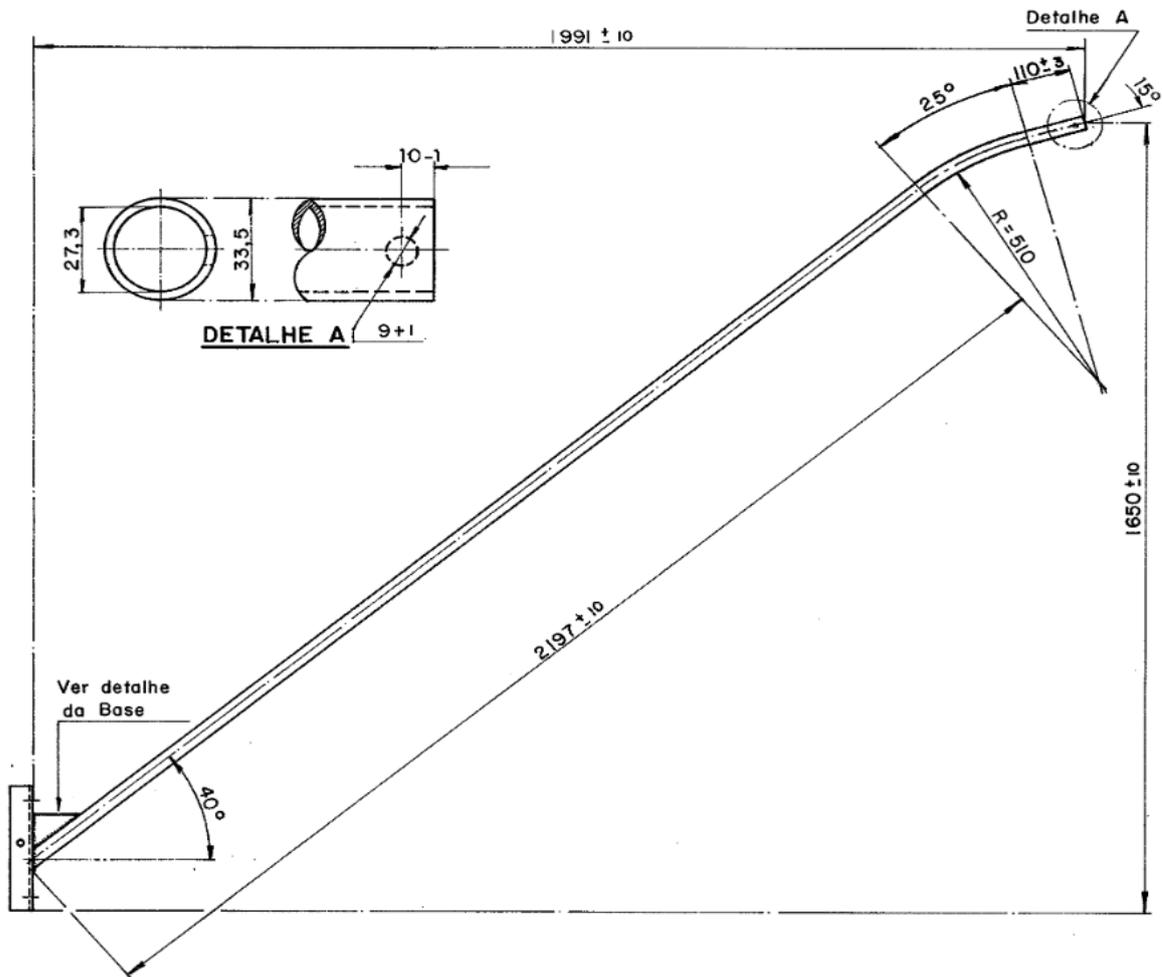


Figura 2.36 – Especificações do braço curto utilizado pela CPFL [44].

Tabela 2.9 – Tabela com valores dos parâmetros destacados nas figuras anteriores [42].

Braço Tipo	$P_v \pm 20$	$P_h \pm 20$	$L \pm 20$	$R \pm 20$	$P \pm 3$	$C \pm 20$	$F \pm 5$	$G \pm 1$	$H \pm 3$	$\varnothing D \pm 1$
Médio	1740	2369	2442	700	110	428	360	4,2	125	48
Longo	2705	3519	3943	700	110	428	360	4,2	160	48

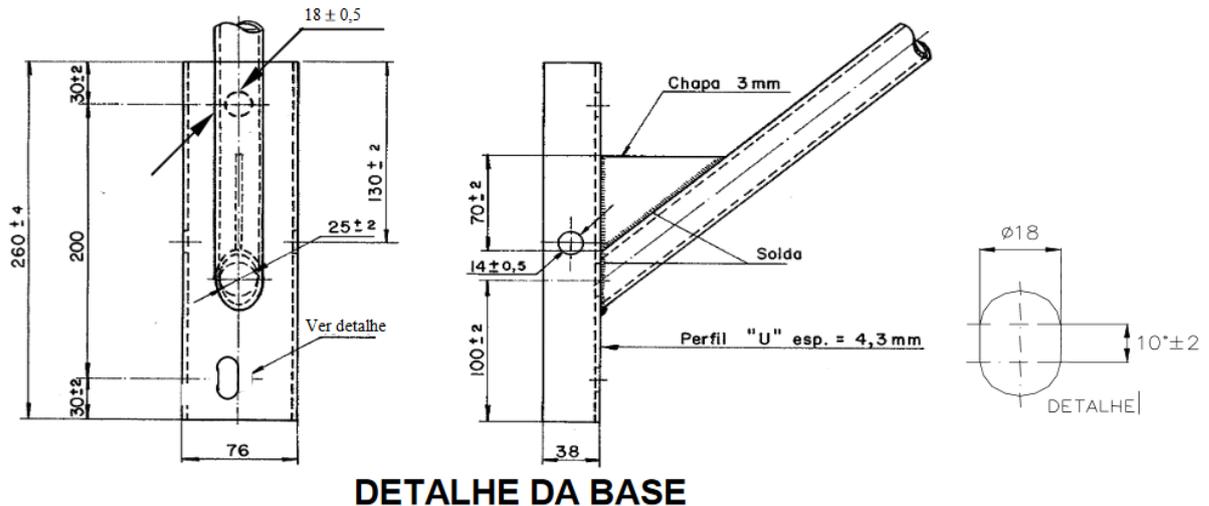


Figura 2.37 – Especificações do braço curto utilizado pela CPFL [44].

## 2.4 Sistemas de iluminação com LED e controle inteligente

O conceito de sistemas de iluminação inteligentes atrela-se ao conceito de cidades inteligentes, que será brevemente explicado adiante.

Devido ao papel central que cidades desempenham na atualidade do ponto de vista social, econômico e ambiental, torna-se impossível planejar e discutir ações de sustentabilidade, eficiência energética e desenvolvimento sem envolvê-las. Responsáveis pelo consumo de cerca de 60 % a 80 % de toda energia elétrica produzida no mundo e onde mais de 50 % da população mundial habita, as cidades devem procurar soluções, atendendo a esta demanda crescente por qualidade de vida, economia, eficiência, entre outros. [45]

O conceito de cidades inteligentes (*smart cities*) se relaciona à ideia de uma cidade “interconectada, inteligente e instrumentalizada” [46], capaz de responder às demandas da sociedade, adaptando seus serviços às necessidades da sociedade e seus habitantes, identificando e solucionando problemas, através de tecnologias, sistemas de comunicação, recebendo, integrando e processando dados em tempo real. Energia, segurança, mobilidade urbana, água e resíduos, seriam algumas das áreas e serviços que poderiam ter melhorias significativas resultantes de uma cidade inteligente. [45]

O serviço de iluminação pública, se administrado de maneira eficaz, pode proporcionar segurança, conforto visual, bem estar social, economia de energia, adequando-se às exigências de transeuntes e veículos, contribuindo para uma cidade verdadeiramente

inteligente. Na Figura 2.38, estão dispostas algumas características de sistemas de iluminação inteligente.

Em [47], define-se iluminação inteligente como a que utiliza dados de seus usuários e sensores para controlar a saída de luz. Um sistema de iluminação inteligente conta com tecnologias de comunicação, monitoramento de energia, desempenho e condições de operação de suas luminárias e pontos de luz em tempo real, controle remoto de luminosidade através da dimerização e pré-agendamento de cronogramas de iluminação, além de alertas de mau funcionamento.



**Figura 2.38 – Algumas características de sistemas de iluminação inteligentes.**

Para [48], um sistema de iluminação inteligente poderia ainda proporcionar vantagens adicionais nas áreas de segurança e emergência. Os pontos de luz próximos a um local onde ocorreu acidentes, por exemplo, poderiam piscar para indicar o caminho a uma ambulância, reduzindo o tempo de resgate. Outra possibilidade seria a colocação de sensores acústicos, capazes de detectar tiros de arma de fogo e enviar alertas às autoridades locais.

A tecnologia LED, em razão de suas particularidades, alta eficiência e baixo consumo, desponta como a mais utilizada em iluminação inteligente. Como já comentado anteriormente, uma das formas de economia de energia de sistemas de iluminação é diminuir o tempo que luminárias operam em máxima potência. A controlabilidade do LED, devido à

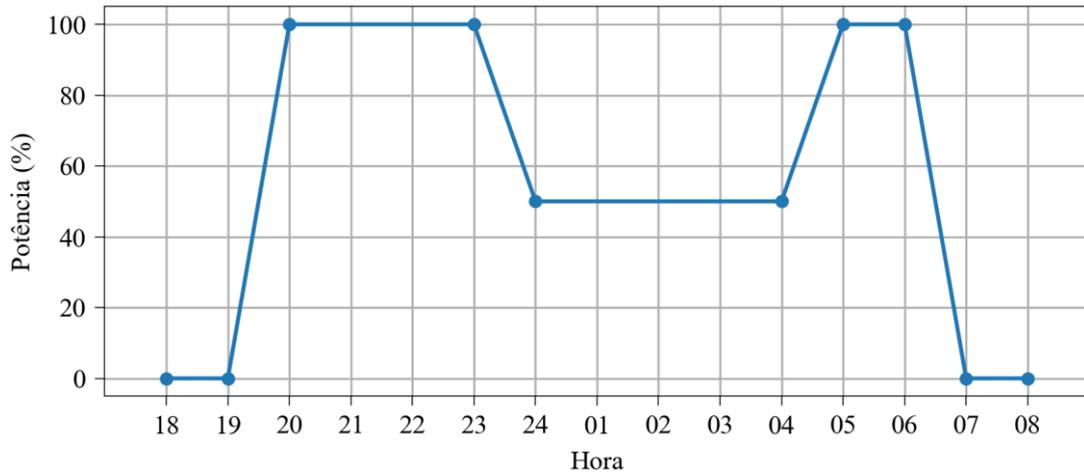
capacidade de dimerizar, é bastante vantajosa e frequentemente explorada em controle de iluminação.

Escolher padrões de dimerização para controle da potência e saída de luz de luminárias, visando diminuir seu consumo, é uma tarefa complexa pois deve levar em conta aspectos relacionados a transeuntes e veículos, questões de segurança e conforto visual. Em [49], comenta-se que os hábitos, rotinas e atividades desempenhadas por pessoas, bem como suas idades, influenciam no tipo de iluminação requerida. Comenta-se ainda que em sistemas de iluminação em ambientes internos que não levam em consideração os fatores citados costumam resultar em desligamento do controle automático pelos usuários.

Adiante, serão abordadas as soluções encontradas na literatura para sistemas de iluminação com controle inteligente.

Através da revisão da literatura científica sobre o tema, este trabalho dividiu as formas de controle de iluminação da seguinte forma: controle liga/desliga, controle estático, controle em tempo real e controle através de modelos preditivos.

A forma mais comum de controle da iluminação é a liga/desliga, podendo ser implementada através de temporizadores, sensores que detectam a ausência/presença de luz solar e relógios astronômicos [50]. Os temporizadores simplesmente ligam e desligam as luzes em determinados horários, enquanto os sensores possuem fotocélulas sensíveis à luz que ligam a luminária quando há luminosidade e desligam quando não há. Esta forma de controle é predominantemente implementada no Brasil, inclusive em projetos que utilizam tecnologia LED em suas luminárias. A terceira forma se utiliza de controladores com GPS que operam ligando e desligando a luminária de acordo com características de localização, como longitude, latitude, horário do nascer do Sol, entre outros.

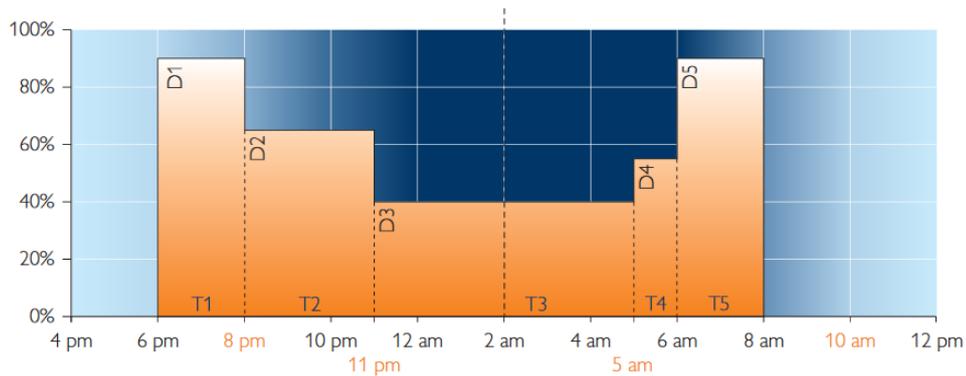


**Figura 2.39 – Perfil típico de um controle estático para o centro da Itália na Primavera [50].**

Ainda em [50], menciona-se os sistemas com controle de luz, que permitem programar o momento de ligar e desligar, além de configurar os níveis de dimerização de luminárias, individual ou coletivamente. O denominado Controle Estático é uma das estratégias de controle mais implementadas nesses sistemas devido a sua simplicidade: tipicamente programa-se para que o nível de dimerização fique em 100 % por metade da noite, e 50 % na metade dela, por exemplo. Um modelo de Controle Estático pode ser visto na Figura 2.39.



**Figura 2.40 – Dynadimmer [51]**



**Figura 2.41 – Exemplo de perfil de controle de luz para o produto Dynadimmer [51].**

A empresa Phillips dispõe de dois sistemas de controle para serem integrados diretamente nas luminárias: Chronosense e Dynadimmer. Estes sistemas permitem que as luzes sejam dimerizadas de acordo com as necessidades de seu usuário, sendo possível ainda a integração com sensores de movimento. O Chronosense, solução destinada às lâmpadas de alta descarga, opera em dois níveis diferentes de dimerização. O Dynadimmer, na Figura 2.40, por sua vez, destina-se às luminárias LEDs e com lâmpadas de alta descarga, provê até cinco níveis diferentes de dimerização, podendo ser utilizado em conjunto com fotocélulas, sensores de movimento e temporizadores [51]. Os perfis de dimerização sugeridos no catálogo de produtos pode ser conferido na Figura 2.41.

Em outro estudo, desta vez realizado na cidade de Comiso, na Itália, foram analisados aspectos econômicos e energéticos de uma possível substituição das luminárias da cidade por luminárias LED e aplicação de um plano de iluminação com controle estático. O plano proposto é semelhante ao citado anteriormente: nas primeiras horas da noite, durante o horário de pico, o nível de dimerização era colocado em 100 %, enquanto que nas horas subsequentes, o nível de dimerização era reduzido para 75 % para, enfim, ser reduzido novamente para 50 % pelo restante da noite, o que atenderia a norma EN 13201. Este plano seria modificado de acordo com a estação do ano, como pode ser visto na Tabela 2.10. [52]

**Tabela 2.10 – Estratégias de dimerização para o verão e inverno para a cidade de Comiso, Itália [52], (adaptado)**

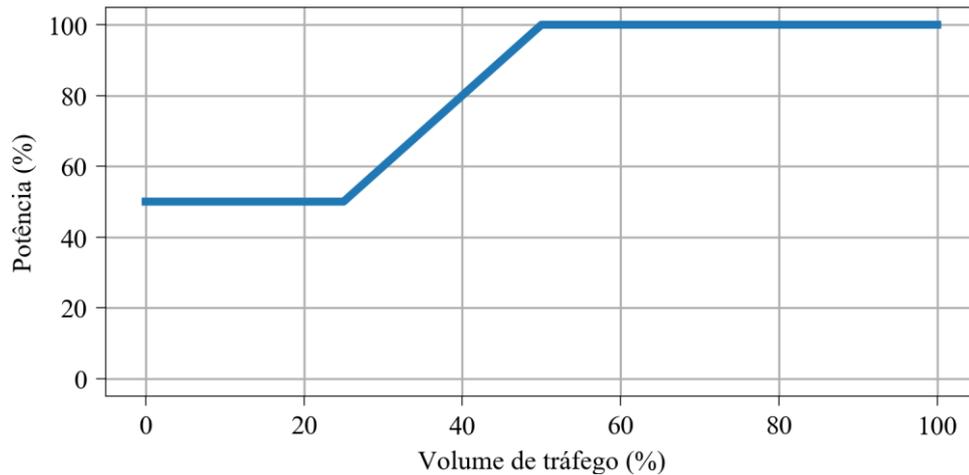
	Nível de Dimerização (%)		
	100	75	50
	Tensão (V)		
	220	200	180
Horas de Operação Equivalentes por mês para o Inverno	93	46,5	108,5
Horas de Operação Equivalentes por mês para o Verão	30	45	90

O estudo analisou três cenários: o primeiro deles levou em consideração apenas a aplicação das estratégias de dimerização no atual sistema de iluminação. Já o segundo cenário analisou a economia de energia obtida apenas com a substituição das luminárias atuais por luminárias LED, enquanto o terceiro combinou os cenários anteriores e avaliou a economia obtida com a aplicação do plano de iluminação em luminárias LED. Os resultados obtidos demonstraram uma redução de mais de 50 % no consumo de energia e de aproximadamente 65 % nas emissões anuais de CO<sub>2</sub>. [52]

Localizado na Inglaterra, o condado de Somerset adota um perfil de iluminação denominado Noite Parcial (*Part-night*). Neste esquema, o sistema de iluminação pública é desativado em algumas áreas no período que compreende entre meia-noite e 05:30 da manhã, visando economizar gastos. Áreas contendo vias de tráfego principais, locais com altos índices de acidentes, criminalidade e com a presença de serviços de emergência, como hospitais, mantiveram seu perfil de iluminação inalterado neste projeto. [53]

Para [50], os sistemas com controle Estático falham ao não levarem em consideração a demanda por iluminação, causando grande ineficiência. Propõe-se então criar uma distribuição preditiva do fluxo de tráfego. O autor utiliza duas formas para construir essa curva preditiva: Modelagem Estatística, Redes Neurais Artificiais e Redes Neurais Artificiais “Ensemble” (combina linearmente saídas de diversos modelos de previsão para produzir uma saída global [54]). Em seguida, o autor compara as previsões realizadas com as duas formas citadas anteriormente com o resultado real e conclui que a curva preditiva baseada em Redes

Neurais Artificiais “Ensemble” é a que se obtém os melhores resultados. Na segunda parte do artigo, comparam-se as possíveis economias de energia obtidas com o Controle Estático e Controle Inteligente com Redes Neurais com o controle liga/desliga. O Controle Estático gerou uma economia média de 25 %, enquanto que o Controle Inteligente com Redes Neurais gerou uma economia média de 43 %. Uma função entre a potência da luminária (Power) e o volume de tráfego (*traffic flow rate*) pode ser vista na Figura 2.42.



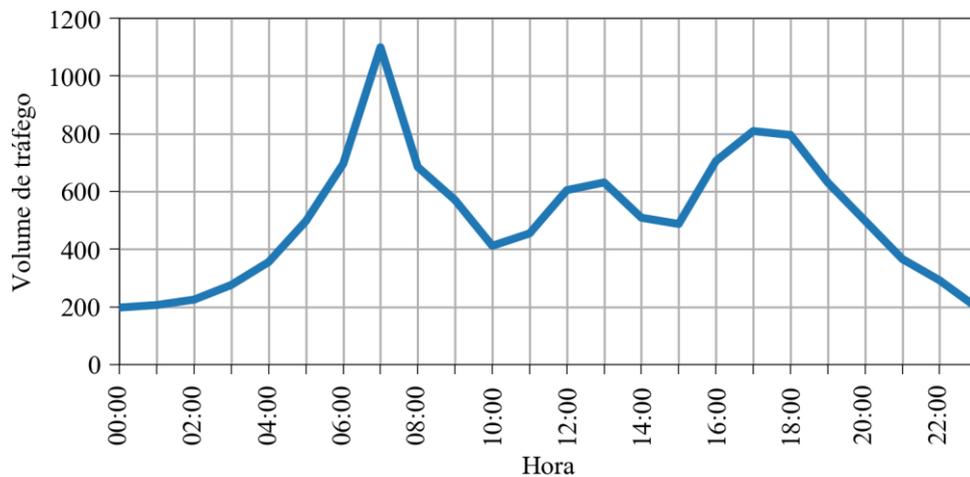
**Figura 2.42 – Perfil de Controle Adaptativo sugerido em [50].**

No presente trabalho, define-se esta forma de gerenciar a iluminação de controle através de modelos preditivos.

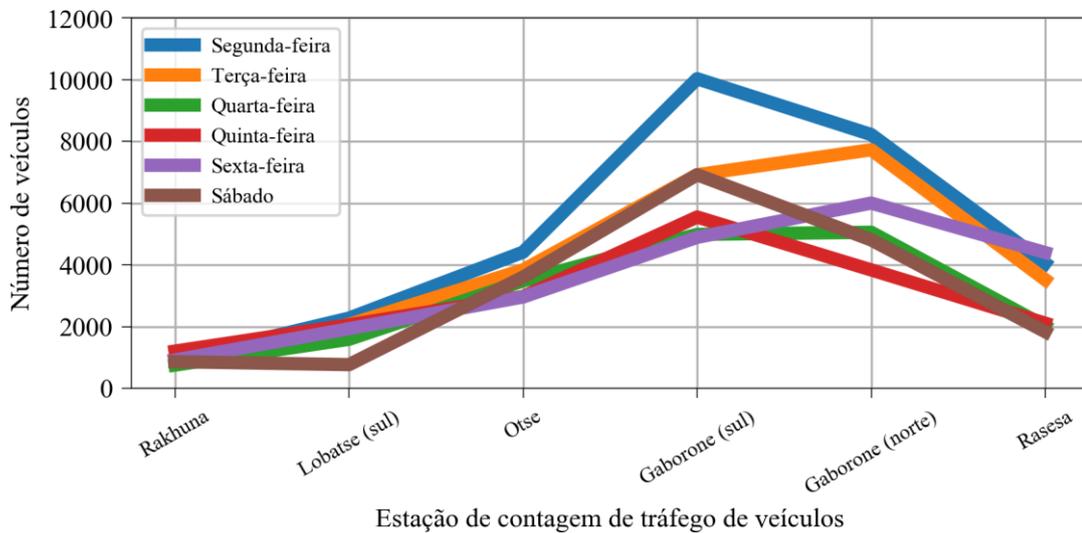
Em [55], um sistema preditivo para centralizar o controle e o gerenciamento inteligente de Iluminação Pública em tempo real foi desenvolvido, visando reduzir custos, mantendo conforto visual máximo nas áreas iluminadas. O sistema, assim como o citado no estudo anterior, também utiliza dados históricos de tráfego de veículos e pedestres para criar um planejamento final de iluminação com base em algoritmos de inteligência artificial. Os autores defendem que é mais barato monitorar o tráfego em uma determinada área por um intervalo de tempo e utilizar um sistema preditivo do que utilizar um sistema reativo com sensores de presença em todas as luminárias.

O uso de dados de volume de tráfego para prever o comportamento de veículos em determinados horários deve ser avaliado com cuidado. De acordo com [56], o volume de tráfego não possui comportamento fixo, variando ao longo do dia, durante a semana, mês, estações e ano.

Pode-se afirmar que o tráfego em áreas urbanas ao longo dos dias segue um comportamento semelhante: pela manhã, por volta das 5 h às 7 h, há um pico de veículos nas vias, seguido de queda abrupta. Por volta do horário de almoço, há um aumento novamente no tráfego, apesar de não atingir os níveis vistos pela manhã e durar um tempo maior. O tráfego cai logo em seguida e por volta das 17h, sobe novamente até atingir outro pico. Após o pico, os valores de tráfego diminuem gradualmente até alcançarem patamares menores [56]. Um comportamento padrão de tráfego ao longo do dia pode ser observado na Figura 2.43.



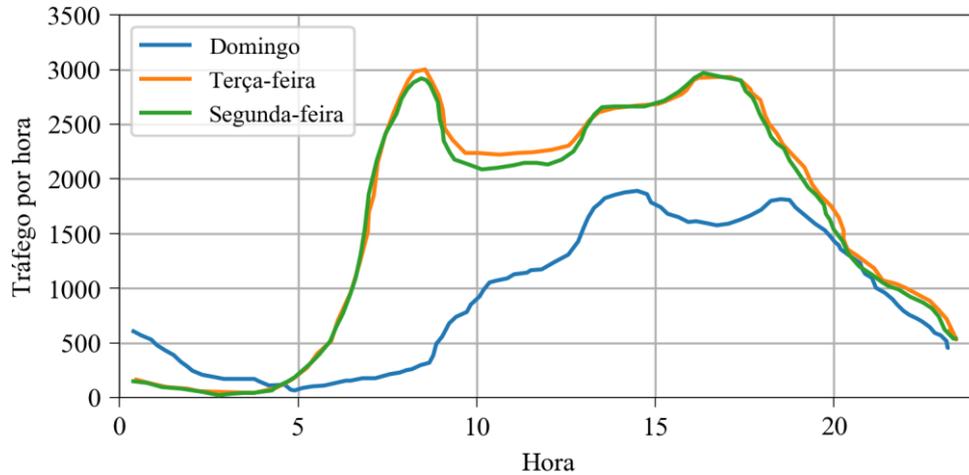
**Figura 2.43 – Comportamento padrão de tráfego [56].**



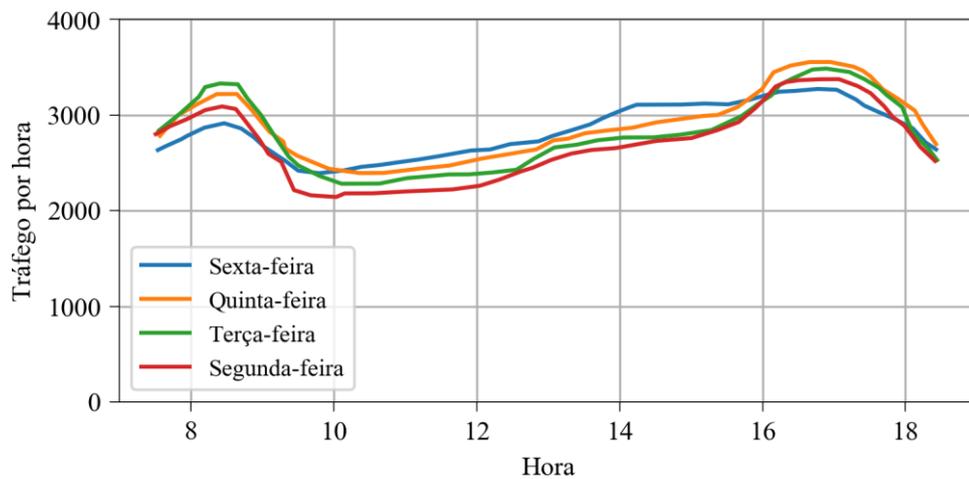
**Figura 2.44 – Volume de tráfego para diferentes dias da semana [56].**

Ainda em [56], são fornecidos exemplos de como o tráfego varia ao longo da semana para diferentes estações de contagem de veículos do país Botswana, na África, como pode ser visto na Figura 2.44.

Estudo feito na Holanda sobre padrões de volume de tráfego ao longo da semana encontrou padrões semelhantes para terça, quarta e quinta. Domingo e sexta, por sua vez, obtiveram seu perfil de tráfego diferente, como pode ser visto nas Figura 2.45 e Figura 2.46.

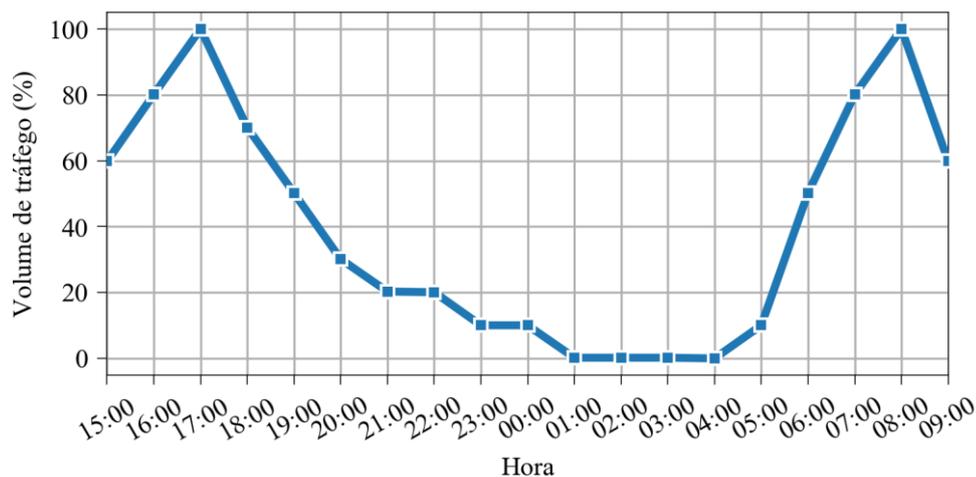


**Figura 2.45 – Perfil de volume de tráfego médio ao longo do dia para Segunda, Terça e Domingo. Dados retirados de [57].**



**Figura 2.46 – Perfil de volume de tráfego médio diário para Segunda, Terça, Quinta e Sexta. Dados retirados de [57].**

Em [58], utiliza-se um perfil de tráfego noturno em simulações de iluminação semelhante ao apresentado em estudos anteriores, como pode ser visto na Figura 2.47.



**Figura 2.47 – Perfil de Volume de Tráfego das 15h às 9h [58].**

Observou-se que o comportamento no período noturno segue um padrão semelhante em todos os estudos: pico no horário entre 17h e 19h e que cai gradualmente até às 21h. Após esse horário, atinge-se valores baixos de tráfego.

Em [59], a *Delft University of Technology* (TU Delft) na Holanda testa um sistema que pode economizar até 80 % da eletricidade comparado com o sistema anterior. Com comunicação sem fio e sensores de movimento, o sistema permite que o fluxo luminoso seja alterado quando não há carros, ciclistas ou pedestres. Um dispositivo eletrônico, que pode ser acoplado em qualquer luminária pública dimerizável, ajusta todas as luminárias para 20 % da potência padrão. A aproximação de veículo, ciclista ou pedestre, reajusta as luminárias para 100 %. O sistema ainda comunica falhas a uma sala de controle, tornando a manutenção mais barata e eficiente. Por utilizar entradas de dados instantâneas, denomina-se neste trabalho este tipo de gerenciamento de luminosidade de controle em tempo real.

A *Tvilight*, empresa spin-off da TU Delft, introduziu o sistema na forma de diversos produtos no mercado, que podem ser conferidos em [60]. Entre os produtos disponíveis, alguns produtos se destacam: *CitySense Plus* e *Skylite*, nas Figura 2.48 e Figura 2.49. O *CitySense Plus* é um sensor de presença com controle de iluminação integrado por internet sem fio. Projetado para ambientes externos, o *CitySense Plus* oferece um controle da iluminação que dimeriza as luzes para níveis mais baixos durante horários que não são de pico. A presença de pedestres, bicicletas e carros é detectada e o brilho de toda a área ao redor é aumentada. É enfatizado pela empresa que uma redução de até 80 % no consumo de energia pode ser obtida sem comprometer a segurança do público e o conforto do cidadão.



**Figura 2.48 – CitySense Plus [60].**

O Skylite é um controlador de Iluminação Pública que monitora e comanda pontos de luz e pode ser programado remotamente. Alerta sobre falhas na luminária ou no driver também são algumas das funcionalidades desse controlador. [60]



**Figura 2.49 – Controlador Skylite [60]**

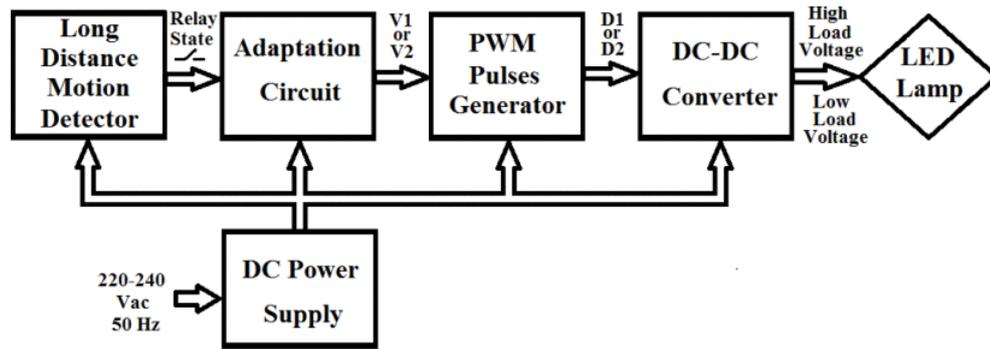


Figura 2.50 – Sistema proposto em [61]

Em [61], propõe-se um sistema de Iluminação Pública que utiliza luminárias LED, dimerizando-as de acordo com as condições de tráfego. Com sensores de movimento infravermelhos de longo alcance (150 metros), o sistema descentralizado, que pode ser visto na Figura 2.50, pretende controlar pontualmente a intensidade de luz quando houver proximidade de veículos, utilizando a infraestrutura pré-existente nas vias.

As simulações realizadas demonstraram economias significativas de energia, de acordo com a taxa de ocupação da via, como pode ser visto na Figura 2.51:

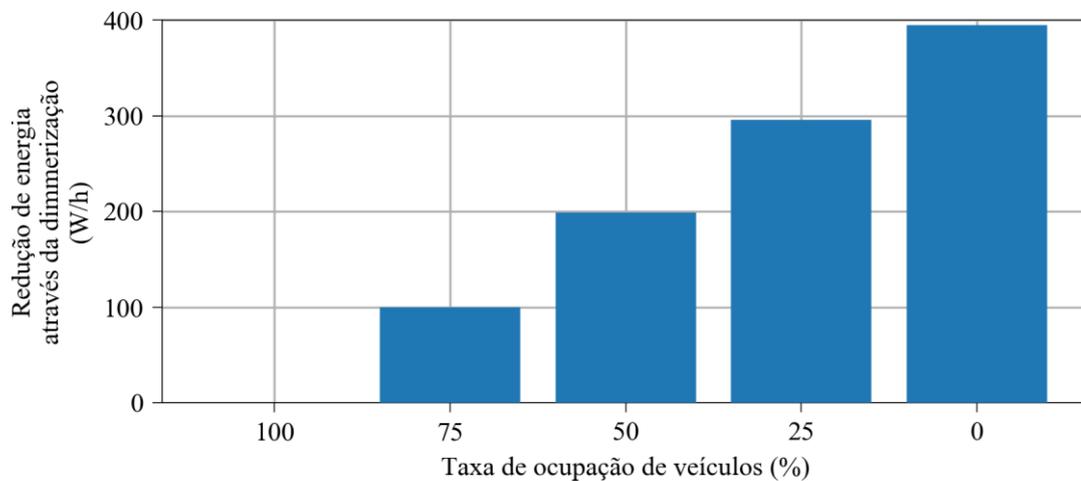


Figura 2.51 – Economia de energia no sistema proposto em [61]

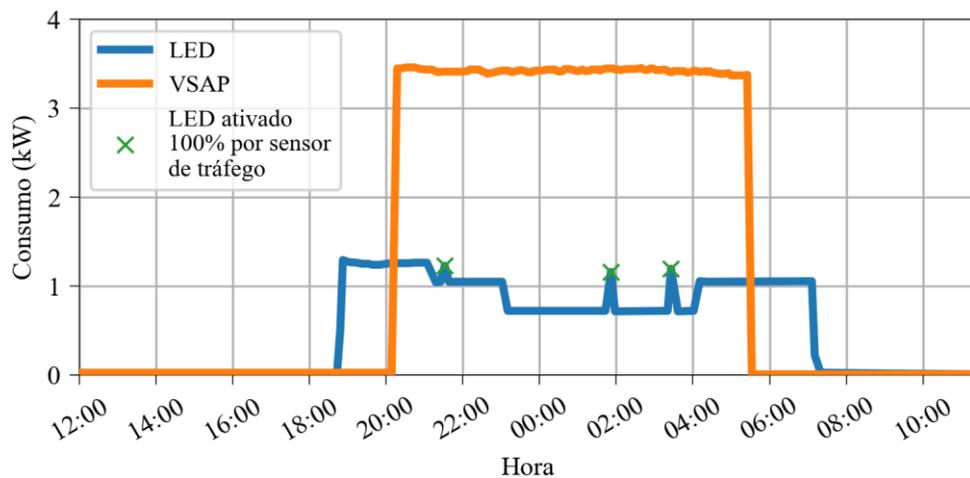
Foram encontrados ainda exemplos na literatura de projetos que utilizam conjuntamente controle liga/desliga e controle em tempo real.

Em [62], é proposta uma tecnologia que utiliza sensores de movimento de tráfego em tempo real juntamente com uma fotocélula e um relógio astronômico para controlar o sistema de Iluminação Pública das ruas de NSW-Carlerock. A fotocélula informa ao sistema o momento em que as luminárias devem ser ligadas. Em caso de falha da fotocélula, o relógio astronômico assume o papel de ligar ou desligar as luminárias LED. Das 21h às 4h, o

sistema opera com nível de dimerização mais baixo e quando os sensores detectam movimento, as luminárias são setadas para operar em 100 % durante 5 minutos. As características de planejamento e operação deste sistema podem ser conferidas na Tabela 2.11 e Figura 2.52.

**Tabela 2.11 – Planejamento estudado em [62] (adaptado)**

	Standby	Com a presença de tráfego de veículos ou pessoas
Crepúsculo – Ocaso	Desligado	Desligado
Ocaso – 21 h	100 %	100 %
21 h – 23 h	80 %	100 % por 5 minutos
23 h – 4 h	60 %	100 % por 5 minutos
4 h - Crepúsculo	100 %	100 %



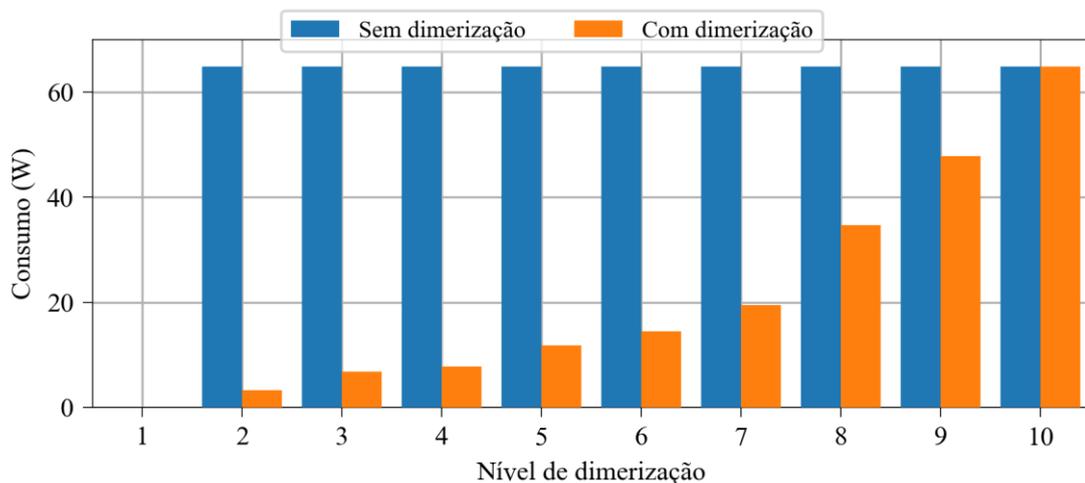
**Figura 2.52 – A operação diária com Luminárias com lâmpadas vapor de sódio e com Luminárias LED utilizando o sistema com fotocélula e sensores de movimento [62]**

Em [63], um sistema de controle para Iluminação Pública também é proposto. Utilizando um microcontrolador 18F4550, um sensor LDR, um sensor de movimento, um driver e um computador, as luminárias são acionadas de acordo com a luminosidade solar. O período que compreende de uma até às cinco da manhã, dimeriza-se as luminárias até que haja movimento de veículos na via, levando a mesma a retornar ao seu valor de brilho total. Neste estudo, as luminárias LED são dimerizadas com o método PWM. Com dez níveis de intensidade, foi possível medir a potência consumida em cada nível de dimerização, como

demonstra a Tabela 2.12 e a Figura 2.53. É possível perceber que há economia de energia significativa utilizando-se a dimerização.

**Tabela 2.12 – Variação de consumo da potência para cada nível de dimerização. Retirado de [63] (adaptado)**

Nível de Intensidade	Tensão de Entrada (V)	Corrente de Entrada (A)	Potência Consumida (W)
0	45,5	0,007	0,318
1	45,4	0,073	3,314
2	47,4	0,147	6,967
3	48,0	0,168	8,064
4	47,0	0,255	11,985
5	45,1	0,327	14,747
6	46,2	0,421	19,452
7	44,8	0,773	34,630
8	44,5	1,077	47,695
9	45,4	1,433	65,085

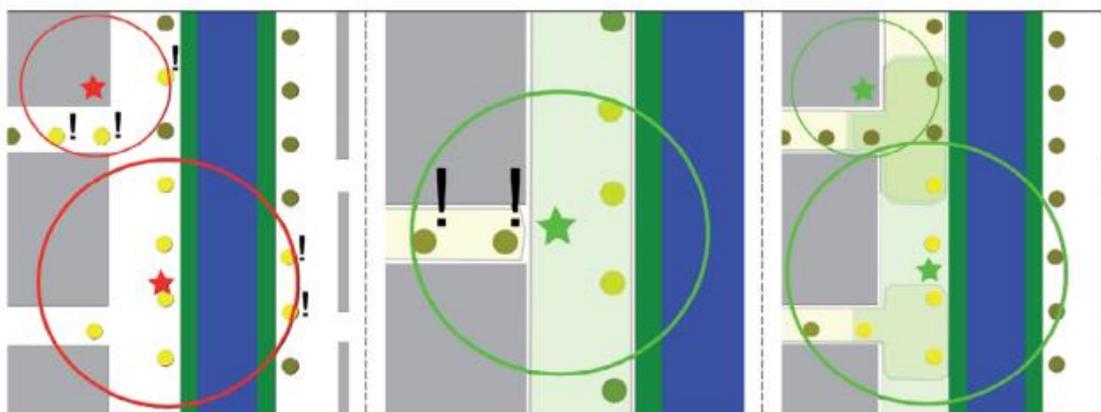


**Figura 2.53 – Potência consumida para cada nível de dimerização comparada ao consumo nominal de potência [63]**

No estudo realizado em [64], propõe-se um sistema de iluminação para áreas em que não há um grande tráfego de pedestres. Este sistema parte da premissa de que nas regiões onde este sistema operará, haverá alta disponibilidade e penetração de smartphones com tecnologia de localização e capacidade da rede de telecomunicação de permitir serviços de

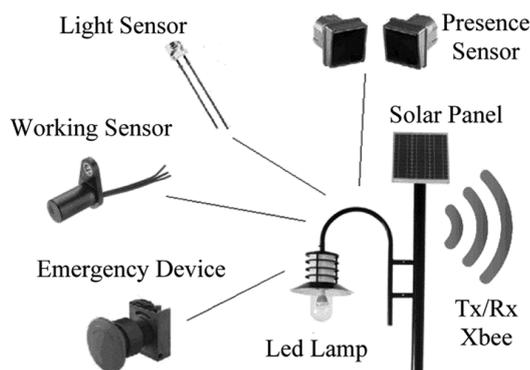
localização. De acordo com os autores, o sistema é constituído de tecnologia ZigBee em todos os postes, um servidor central, uma estação de rádio base, atuando como interface entre o servidor e os postes.

Através da localização de cada usuário, informada por um smartphone, é criada uma zona radial em torno do usuário, onde todas as luminárias dentro dessa zona devem ser ativadas. O próprio estudo, entretanto, levanta as limitações do uso de somente zonas radiais e propõe zonas de infraestrutura poligonais, isto é, zonas de luminárias ativáveis. Na Figura 2.54, tem-se à esquerda, zonas radiais, no centro, tem-se o caso de o limite ser somente as luminárias localizadas nas ruas e, à direita, sobreposição das zonas de infraestrutura poligonais e zonas radiais. Discute-se que as duas primeiras formas de se delimitar zonas não proporcionariam um desempenho satisfatório pois haveria acionamento de luminárias em locais desnecessários.



**Figura 2.54 – Modelos para definição de zonas de ativação de luminárias. As áreas em cinza representam prédios, enquanto círculos amarelos representam pontos de luz acionados e estrelas, a localização dos usuários. [64]**

Em [65], um sistema de IP com LEDs, alimentado por geração fotovoltaica isolada foi implementado e pode ser observado na Figura 2.55. Neste projeto, cada luminária e poste de luz é equipado com um sensor de presença, um sensor de luminosidade, uma chave de emergência e um sensor de falhas. O sensor de presença detecta a passagem de transeuntes e veículos, enquanto o sensor de luminosidade faz medições de luminância, enviando-as ao microcontrolador. Este realiza o processamento de dados, mantendo um nível de iluminação constante. Isso significa que a potência da luminária é ajustada durante a alvorada e o caso, fornecendo apenas uma iluminação auxiliar à luz solar.



**Figura 2.55 – Imagem explicativa do sistema presente em cada poste [65]**

Por se tratar de um sistema isolado, o projeto deste sistema foi minuciosamente elaborado para consumir pouca energia através da utilização de LEDs de alta eficiência e de um circuito de controle de baixo consumo.

Os resultados obtidos demonstram, para os meses de março e abril, uma redução de aproximadamente 66 % e 71 %, respectivamente, no número de horas de operação comparado com o sistema anterior de iluminação.

Quatro cenários foram preparados para a realização de medições no mês de julho, onde é verão no hemisfério norte. O primeiro, utilizando bateria, painéis fotovoltaicos, sensores de presença e luminosidade; o segundo, idêntico ao primeiro porém sem sensor de luminosidade; o terceiro, sem a utilização do sensor de presença e alimentado pela rede elétrica. Já o quarto, utilizou uma lâmpada Vapor de Mercúrio sem sensor de presença e alimentada pela rede elétrica. Os resultados obtidos para o primeiro caso demonstram uma grande economia de energia, como pode ser verificado na Tabela 2.13.

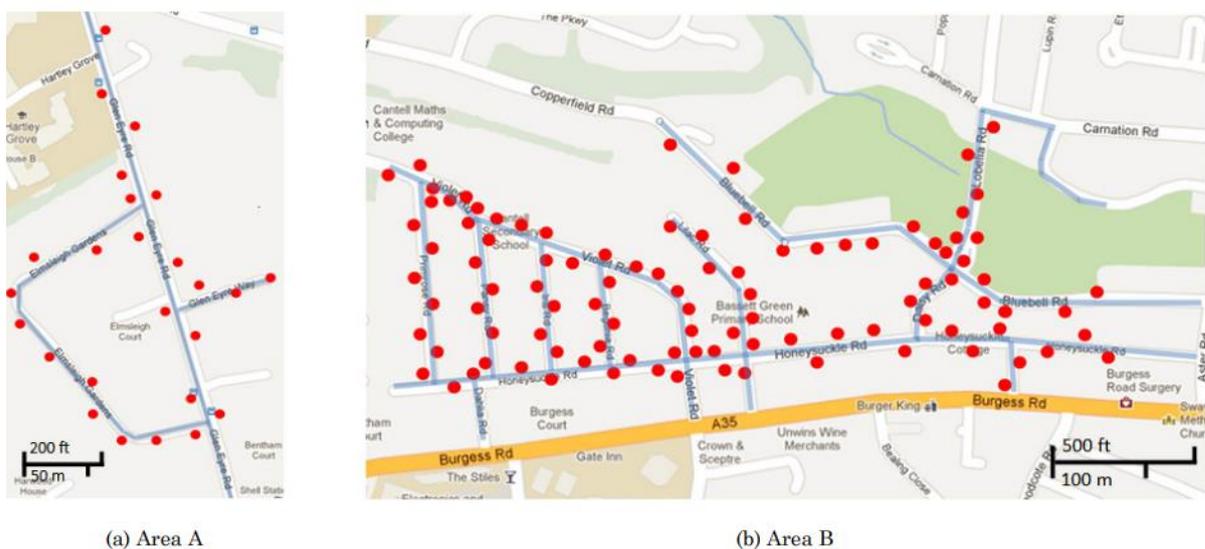
**Tabela 2.13 – Energia consumida nos quatro cenários apresentados. Adaptado de [65]**

Cenário	Energia consumida (kWh)
1°	1334
2°	4702
3°	5260
4°	13155

Um sistema de iluminação pública com tecnologia LED alimentado por energia solar com controle em tempo real também é apresentado em [66]. O estudo propõe um sistema multi-sensor com reconhecimento de sinais acústicos e radiação infravermelha

emitidos pelo ser humano. Através da medição da tensão nos terminais dos painéis, o sistema reconhece o momento que não há luminosidade e ativa o sistema, utilizando os sinais recebidos apenas para ajustar a potência da luminária, diminuindo o consumo da bateria. Os testes realizados indicaram economias de energia da ordem de 30 % e 40 % em vias públicas e no campus, respectivamente.

Um algoritmo de controle de iluminação com sensores de presença foi proposto em [58]. Visando comprovar que seu algoritmo possuía desempenho superior, simulações com o software SUMO (*Simulation of Urban Mobility* – Simulação de Mobilidade Urbana) e plataforma OMNeT++ (simulador de eventos discretos modular usado para analisar redes de comunicação), uma comparação entre o algoritmo proposto e diversas formas de controle de iluminação foram realizadas. A elaboração de seu algoritmo levou em consideração os resultados obtidos em [67] e [68]. Duas localidades diferentes foram utilizadas nas simulações e podem ser vistas na Figura 2.56.



**Figura 2.56 – Posição dos pontos de luz (círculos vermelhos) e ruas (linhas azuis) usadas na simulação. Retirado de [58]**

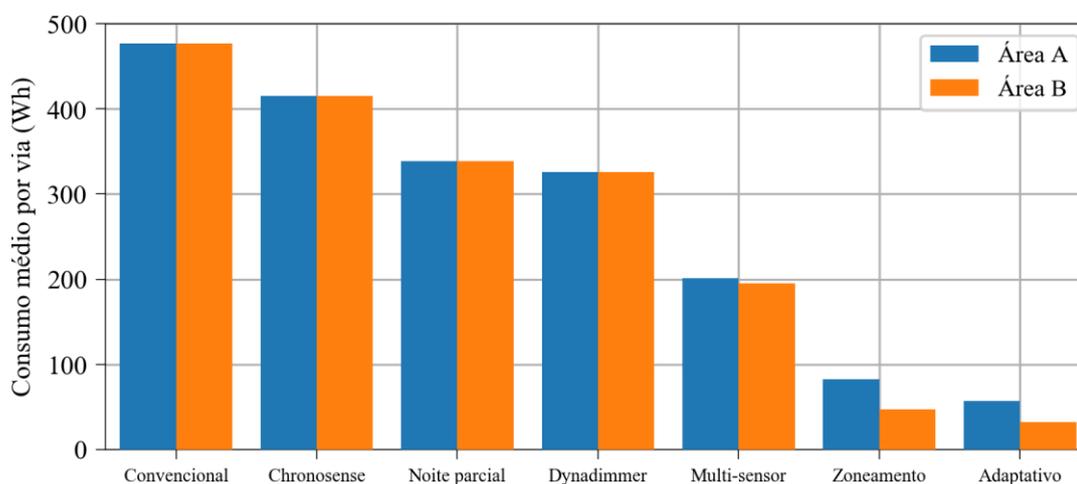
Em [67], obteve-se que a iluminação com distribuição descendente a partir de onde se localiza o pedestre despertava mais sensação de segurança ao mesmo. O algoritmo, portanto, prioriza a iluminação de pontos de luz próximos ao usuário. Já em [68], é considerado que a iluminação satisfatória de uma via é a que permite que o motorista possa identificar um objeto a uma distância de no mínimo 83 metros.

Vários valores de volume de tráfego e velocidade foram usados, visando simular pedestres e veículos, bem como os fluxos de tráfego de ruas residenciais e avenidas

movimentadas. Utilizou-se ainda um perfil de tráfego realista, já apresentado anteriormente na Figura 2.47, para a realização das simulações. Para todas as simulações, considerou-se que a tecnologia empregada é a LED e a potência consumida da luminária varia proporcionalmente com o nível de dimerização.

Sete formas de controle são simuladas: a convencional, onde o sistema de Iluminação comporta-se como um sistema tradicional, como na curva de carga em Figura 2.2; Chronosense e Dynadimmer [51], citado anteriormente, podendo ser verificado na Figura 2.40; Noite Parcial (*Part-night*) [53], explicado anteriormente e aplicado na cidade de Somerset, Reino Unido; Multi-sensor [66], também explicitado anteriormente; Zoneamento (*Zoning*) [64], citado anteriormente e podendo ser observado na Figura 2.54; e Adaptativo, proposto pelo próprio autor como a melhor alternativa.

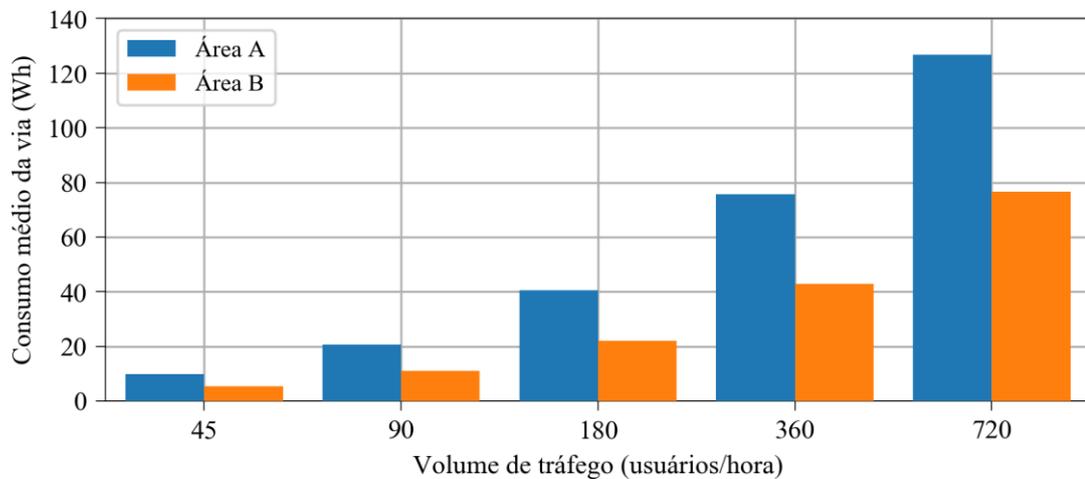
O modelo proposto em [66] foi simulado da seguinte forma: a dimerização sempre se encontra em 40 %, aumenta para 70 % ou 100 % quando a distância do usuário é de 20 ou 10 metros, respectivamente. Para simular o proposto em [64], o raio da zona estipulada foi 100 metros. Em todas as simulações, luminárias LED de 25 W de potência nominal foram usadas. Ainda de acordo com o estudo, o período simulado foi de 19 horas, com repetições de 10 vezes. O desvio padrão obtido foi de menos de 4 %.



**Figura 2.57 – Consumo de energia de vários tipos de controle de iluminação em duas áreas geográficas diferentes. Adaptado de [58]**

Primeiramente, foram testados os sete métodos para duas localidades diferentes, denominadas no estudo de áreas A e B, como pode ser visto na Figura 2.57. Vários valores de volume e velocidade de tráfego realistas foram utilizados na simulação.

Como pode ser observado na Figura 2.57, os modelos em tempo real (Multi-sensor, Zoneamento e Adaptativo) proporcionam mais economia de energia que os modelos de tempo fixo e podem proporcionar economia de acordo com a área a ser iluminada, isso devido aos diferentes volumes de tráfego encontrados em cada local. Já na Figura 2.58, é possível observar como o modelo Adaptativo proposto pelo autor de fato se ajusta a áreas com diferentes características como diferentes perfis de tráfego, por exemplo, proporcionando mais economia.



**Figura 2.58 – Consumo de energia do modelo Adaptativo com vários valores de volume de tráfego. Adaptado de [58]**

# CAPÍTULO 3:

## MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo apresentam-se os principais materiais empregados e preparados para realização das simulações do alimentador estudado.

O alimentador da rede de distribuição estudado é apresentado, com ênfase nas características do seu sistema de iluminação pública associado. As diversas curvas utilizadas nas análises são listadas, detalhando sua confecção, quando necessário. Informações gerais do software de fluxo de potência são fornecidas, assim como os modelos e parâmetros das luminárias. Por fim, apresenta-se uma visão geral do processamento de dados envolvido para criação dos casos estudados, cujos resultados são analisados no Capítulo 4.

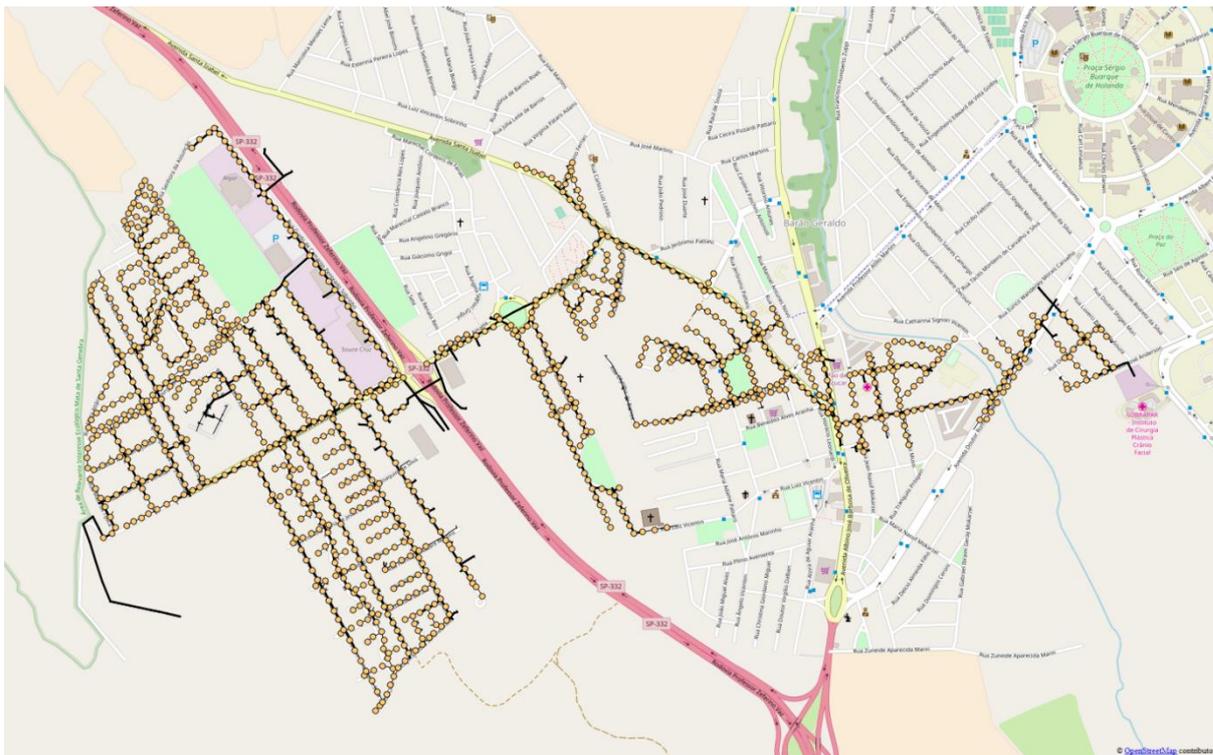
### 3.1 Alimentador estudado

Para o estudo dos sistemas de IP, escolheu-se o maior dos seis distritos da cidade de Campinas, no estado de São Paulo: Barão Geraldo. Criado em 1953 pela Lei Estadual 2456 e localizado a doze quilômetros do centro de Campinas, Barão Geraldo possui 67 km<sup>2</sup> e sedia, além de áreas residenciais e comerciais, diversas instituições de ensino públicas e privadas (Universidade Estadual de Campinas – Unicamp; Pontifícia Universidade Católica de Campinas – PUCCAMP; Faculdades de Campinas – FACAMP), importantes centros nacionais de pesquisa (Centro de Pesquisa e Desenvolvimento em Telecomunicações – CPqD; Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais – CNPEM; entre outros), centros hospitalares de pesquisa médica (Hospital de Clínicas da Unicamp, Centro Infantil Boldrini, entre outros) e indústrias ligadas ao ramo de alta tecnologia. De acordo o senso de 2010, o

distrito possuía quase 56 mil habitantes fixos, cerca de 18 mil domicílios e, segundo listagem da Prefeitura de Campinas, mais de 60 bairros. [69, 70]

O abastecimento de energia de Campinas é de responsabilidade da holding CPFL Energia (Companhia Paulista de Força e Luz), que atua nas áreas de distribuição, geração e comercialização de energia elétrica e outros serviços de valor agregado. No segmento de distribuição, a CPFL é líder de mercado com participação de 14,3 %, atendendo cerca de 9,1 milhões de clientes em 679 municípios espalhados nos estados de Minas Gerais, São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul. [71]

A subestação Barão Geraldo é constituída de 10 alimentadores, metade deles atende somente a Unicamp. A outra metade atende o restante do distrito, fornecendo energia para um total de 2822 pontos de luz. O alimentador escolhido para análise é o BGE-09, que contém 1134 conjuntos de iluminação que, por sua vez, estão dispostas geograficamente como mostrado na Figura 3.1. É importante ressaltar que a maior parte do sistema de IP deste alimentador encontra-se em áreas residenciais e, dos 1134 conjuntos de iluminação, a grande maioria (1127) estão instalados em logradouros — os sete restantes estão instalados em praças públicas. Na Figura 3.1, o circuito primário está representado com linha preta mais espessa, enquanto os circuitos secundários em linha preta mais fina. Nota-se que a IP está presente na quase totalidade da rede secundária, com notáveis exceções para alguns condomínios residenciais fechados ao acesso público.



**Figura 3.1 – Disposição geográfica das luminárias (círculos laranjas) do alimentador BGE-09 no distrito de Barão Geraldo. Dados elétricos da CPFL Energia (2016), mapa de fundo de [72].**

**Tabela 3.1 – Número de transformadores com cargas de IP por potência**

Potência nominal (kVA)	Número de transformadores
15	1
30	12
45	35
75	41
112,5	17
150	2

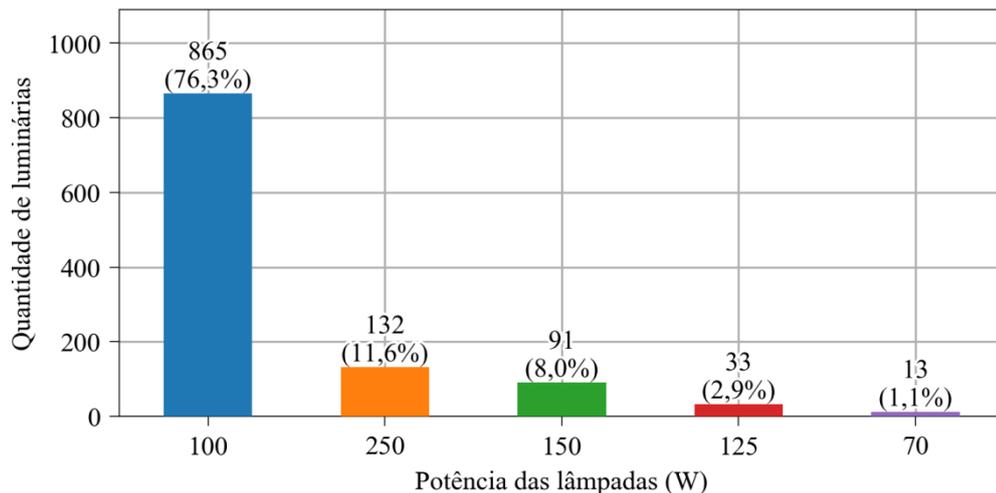
A rede do alimentador BGE-09 contém 141 transformadores, dos quais 108 possuem cargas de iluminação pública. A distribuição dos transformadores de acordo com a sua potência nominal pode ser vista na Tabela 3.1. É possível observar que a maior parte destes transformadores possuem potência nominal de 45 e 75 kVA.

Em relação ao tipo de tecnologia, 97 % (1.101) dos conjuntos de luminárias empregam lâmpadas de vapor de sódio, enquanto os 3 % (33) restantes usam lâmpadas de vapor de mercúrio.

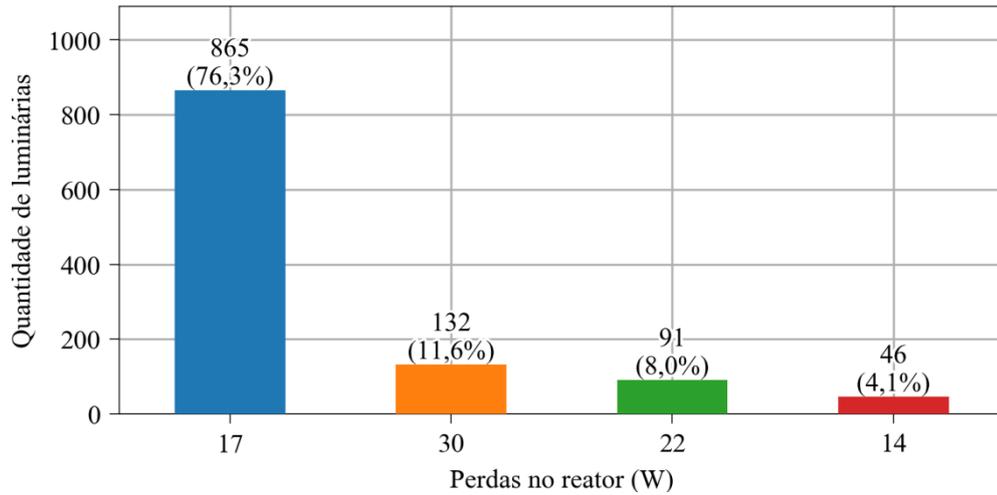
Na Figura 3.2, é possível observar a quantidade de luminárias com uma determinada potência. As lâmpadas de 100 W são as mais utilizadas no sistema de iluminação pública desse alimentador, seguidas das lâmpadas de 250 W. Na Figura 3.3, os reatores são separados de acordo com suas perdas, sendo observado que os reatores com perdas ôhmicas de 17 W são os mais comuns nesse sistema.

A forma como cada luminária está conectada ao sistema elétrico pode ser observada na Figura 3.4. É possível observar que as cargas de iluminação não estão distribuídas simetricamente entre as fases. As fases A e B contém uma quantidade maior de luminárias conectadas entre elas, seguidas das conexões entre as fases B e C, e, por último, entre as fases A e C. As duas luminárias trifásicas presentes estão localizadas em praças e a única luminária monofásica pode representar apenas um erro de cadastro, visto que há mais fases disponíveis em seu ponto de conexão na rede.

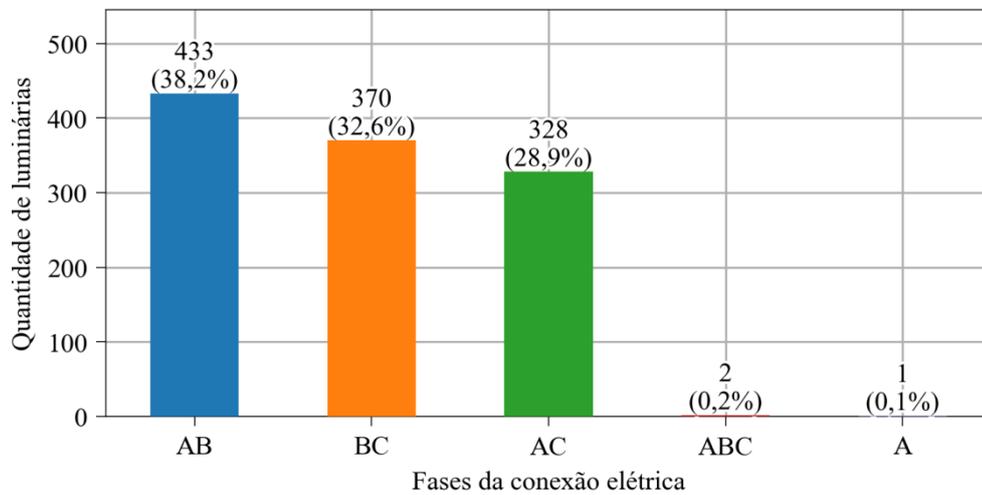
A quantidade de luminárias com determinada configuração está na Figura 3.5. Como é possível perceber, as configurações fechada e aberta são as mais comuns nesse sistema, totalizando 94,2 % das luminárias. Já o tipo de braço de suporte das luminárias, Figura 3.6, é em sua maioria curto (62 %), com uma boa presença (30 %) de braços do tipo longo paulista.



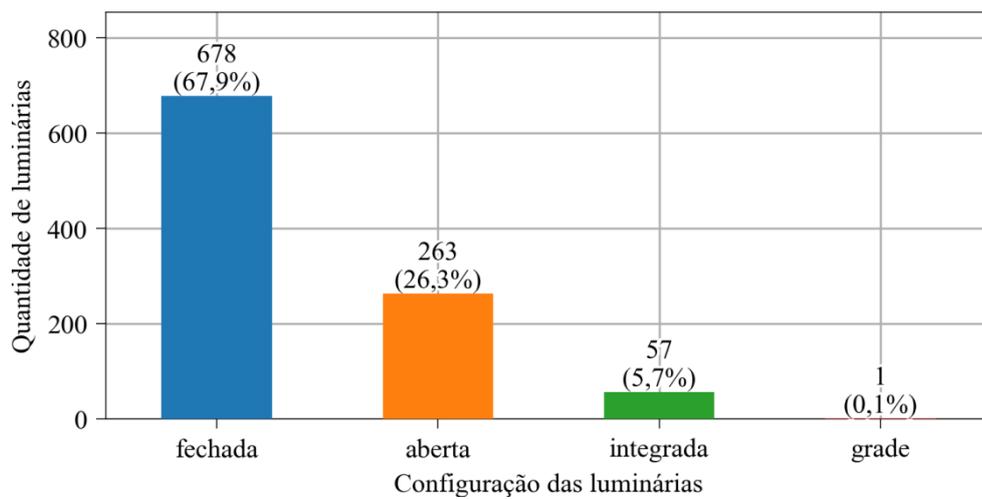
**Figura 3.2 – Quantidade de luminárias com determinada potência**



**Figura 3.3 – Reatores divididos por suas perdas ôhmicas**



**Figura 3.4 – Arranjo de fases da conexão elétrica das luminárias**



**Figura 3.5 – Quantidade de luminárias por configuração**

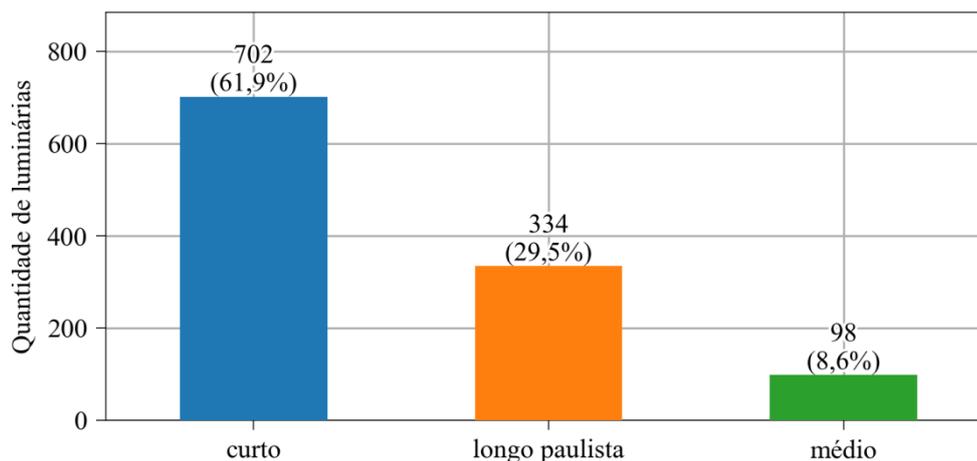


Figura 3.6 – Tipo de suporte das luminárias

## 3.2 Curvas de carga para iluminação pública

Através da revisão bibliográfica, foram levantadas curvas de carga para iluminação pública, caso a utilização de gestão inteligente fosse aplicada.

Devido à inexistência de dados de tráfego reais para a cidade de Campinas, foi possível simular apenas controle estático para iluminação pública, isto é, quando se pré-programa como será a curva de carga ao longo do período noturno.

### 3.2.1 Curvas estáticas

Foram utilizadas sete curvas de carga estáticas, conforme descrito a seguir. Cada curva tem sua representação visual mostrada na Figura 3.7, com seus valores numéricos listados na Tabela 3.2.

Para avaliar diferentes formas de controle estático, foram selecionadas sete curvas de carga: Convencional, Chronosense, Dynadimmer, Comiso, Itália, Noite Parcial, e Volume de Tráfego.

**Convencional:** Curva de carga convencional do sistema de IP: permanece em 100 % durante todo período noturno e desliga completamente ao amanhecer. A curva de carga **Convencional**, utilizada como base para comparação em um sistema onde o acionamento das luminárias se dá de forma convencional, consistindo na ativação das luminárias em 100 % da potência no período noturno. Foi estabelecido um período de funcionamento de 12 horas, onde o sistema é acionado às 18 h e desligado às 6 h.

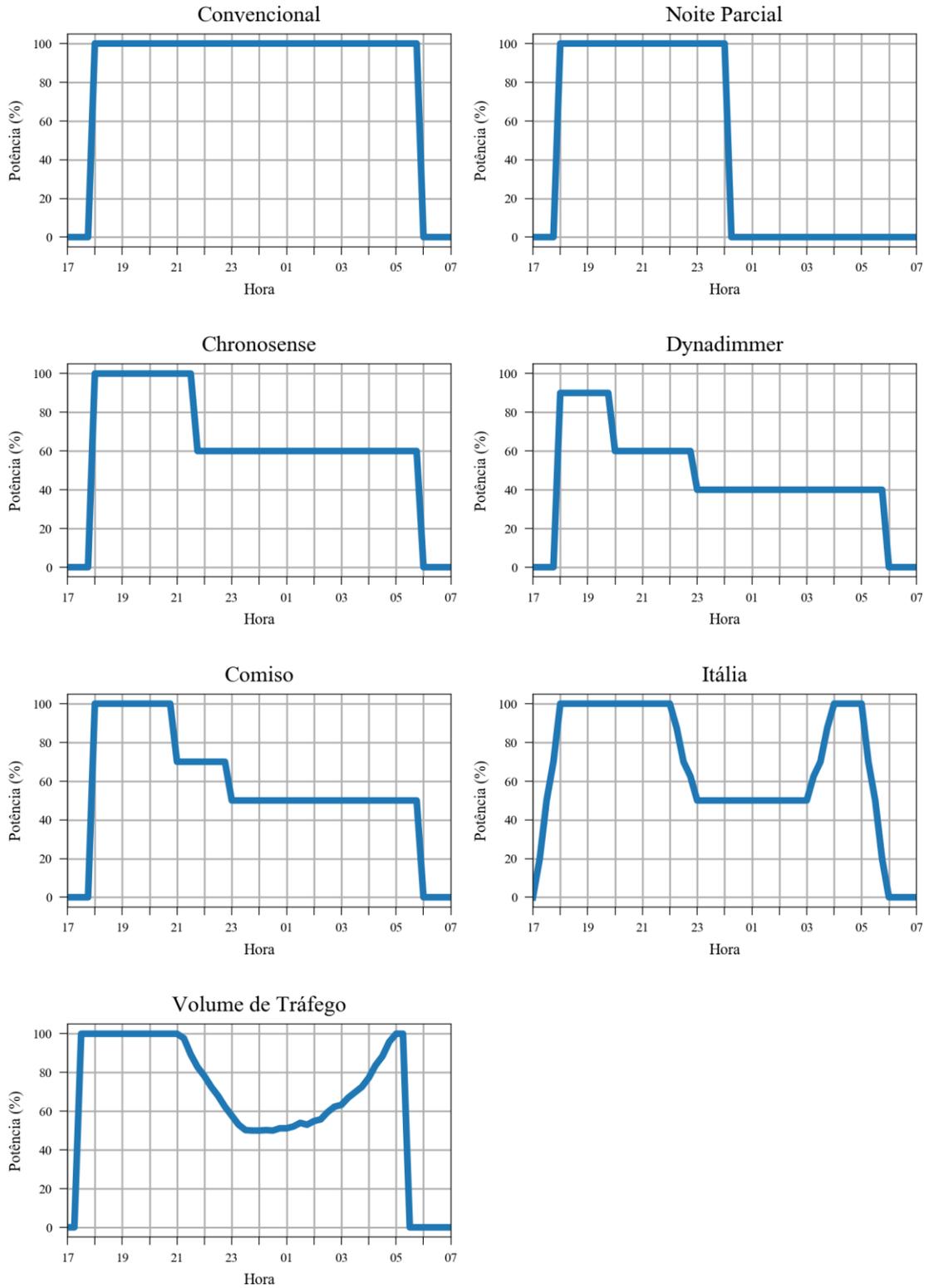
Noite Parcial: Refere-se à curva de carga de IP utilizada na cidade Sormerset, no Reino Unido [53], na qual a IP é mantida ligada apenas num período da noite. A curva de carga **Noite Parcial** (*part-night*) pode ser vista na Figura 3.7. Nesta curva, o sistema é acionado às 18 h e desligado à 0 h.

Chronosense e Dynadimmer: Para simular a utilização dos equipamentos Philips **Chronosense** e Philips **Dynadimmer**, utilizaram-se as curvas disponíveis como exemplo em [51] com algumas modificações, já que os dois equipamentos permitem que sejam configuradas diversas curvas de cargas.

Comiso: Refere-se à curva de carga utilizada para estudo na cidade Comiso, na Itália. [52] A curva de carga **Comiso** é utilizada no estudo de [52], como uma alternativa à curva de carga *Itália*, dada como um exemplo típico de controle estático em [50] também foi utilizada nas simulações e pode ser vista na Figura 3.7.

Itália: Refere-se à curva de carga utilizada para Itália Central em [50]. Uma pequena modificação foi realizada, deslocando a curva de uma hora, de forma que o valor de 100 % é atingido às 18 h e não às 19 h como na referência.

Volume de Tráfego: Refere-se à combinação de um perfil de volume de tráfego típico, descrito em [56] e o perfil adotado entre potência e volume de tráfego em [50]. Visando simular uma curva de carga utilizando controle preditivo, utilizou-se o gráfico disposto na Figura 2.43 como volume de tráfego de uma via e o modelo de controle adaptativo da Figura 2.42. Foi feita uma normalização desta curva em relação ao valor máximo de tráfego e aplicada o modelo de controle adaptativo já citado. A curva de carga obtida é a curva **Volume de Tráfego**.



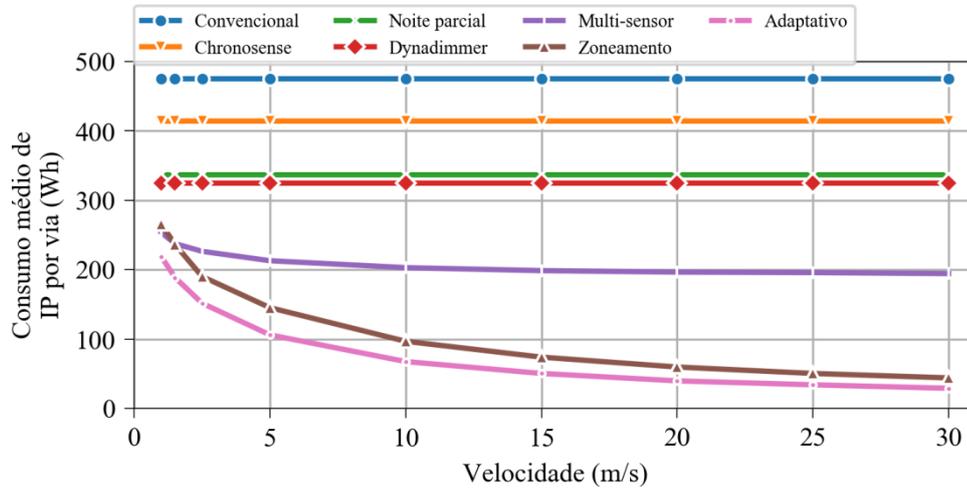
**Figura 3.7 – As sete curvas de carga estáticas utilizadas.**

Tabela 3.2 – Valores de dimerização (%) para cada curva – valores não representados são nulos.

Hora	Convencional	Noite Parcial	Chronosense	Dynadimmer	Itália	Comiso	V. de Tráfego
17:15					20		
17:30					50		100
17:45					70		100
18:00	100	100	100	90	100	100	100
18:15	100	100	100	90	100	100	100
18:30	100	100	100	90	100	100	100
18:45	100	100	100	90	100	100	100
19:00	100	100	100	90	100	100	100
19:15	100	100	100	90	100	100	100
19:30	100	100	100	90	100	100	100
19:45	100	100	100	90	100	100	100
20:00	100	100	100	60	100	100	100
20:15	100	100	100	60	100	100	100
20:30	100	100	100	60	100	100	100
20:45	100	100	100	60	100	100	100
21:00	100	100	100	60	100	70	100
21:15	100	100	100	60	100	70	97,7
21:30	100	100	100	60	100	70	89,3
21:45	100	100	60	60	100	70	82,8
22:00	100	100	60	60	100	70	78,1
22:15	100	100	60	60	87,5	70	72,6
22:30	100	100	60	60	70	70	67,9
22:45	100	100	60	60	62,5	70	62,3
23:00	100	100	60	40	50	50	57,7
23:15	100	100	60	40	50	50	53
23:30	100	100	60	40	50	50	50,2
23:45	100	100	60	40	50	50	50
00:00	100	100	60	40	50	50	50
00:15	100		60	40	50	50	50,2
00:30	100		60	40	50	50	50
00:45	100		60	40	50	50	51,2
01:00	100		60	40	50	50	51,2
01:15	100		60	40	50	50	52,1
01:30	100		60	40	50	50	54,0
01:45	100		60	40	50	50	53
02:00	100		60	40	50	50	54,9
02:15	100		60	40	50	50	55,8
02:30	100		60	40	50	50	59,5
02:45	100		60	40	50	50	62,3
03:00	100		60	40	50	50	63,3
03:15	100		60	40	62,5	50	67,0
03:30	100		60	40	70	50	69,8
03:45	100		60	40	87,5	50	72,6
04:00	100		60	40	100	50	77,2
04:15	100		60	40	100	50	83,7
04:30	100		60	40	100	50	88,4
04:45	100		60	40	100	50	95,8
05:00	100		60	40	100	50	100
05:15	100		60	40	70	50	100
05:30	100		60	40	50	50	
05:45	100		60	40	20	50	

### 3.2.2 Curvas por tipo de via

Para simular o impacto de um controle em tempo real a partir do tráfego nas vias, utilizou-se os resultados obtidos em [58], na Figura 3.8.



**Figura 3.8 – Influência da velocidade de viagem no consumo de energia médio pelo sistema de iluminação pública. Adaptado de [58]**

Em seguida, classificaram-se as vias do sistema de iluminação pública de acordo com a utilizada no Código Brasileiro de Trânsito. Para cada via, associou-se uma velocidade média, utilizando a média aritmética entre a velocidade mínima e máxima de cada via, como pode ser visto na Tabela 3.3.

**Tabela 3.3 – Velocidade média atribuída a cada tipo de via**

Tipo de via	Velocidade média (km/h)	Velocidade média (m/s)
Trânsito Rápido	60	16,67
Arterial	45	12,5
Coletora	30	8,33
Local	22,5	6,25

Os valores de consumo dos métodos de controle em tempo real foram extraídos do gráfico apresentado na Figura 3.8: Multi-sensor, Zoneamento e Adaptativo para cada velocidade de via. Estes valores foram normalizados em relação ao consumo do convencional, como pode ser visto na Tabela 3.4. Estes valores normalizados foram utilizados para construir curvas de carga que foram aplicadas em cada tipo de via e simuladas.

**Tabela 3.4 – Valores de consumo normalizados para cada método de controle**

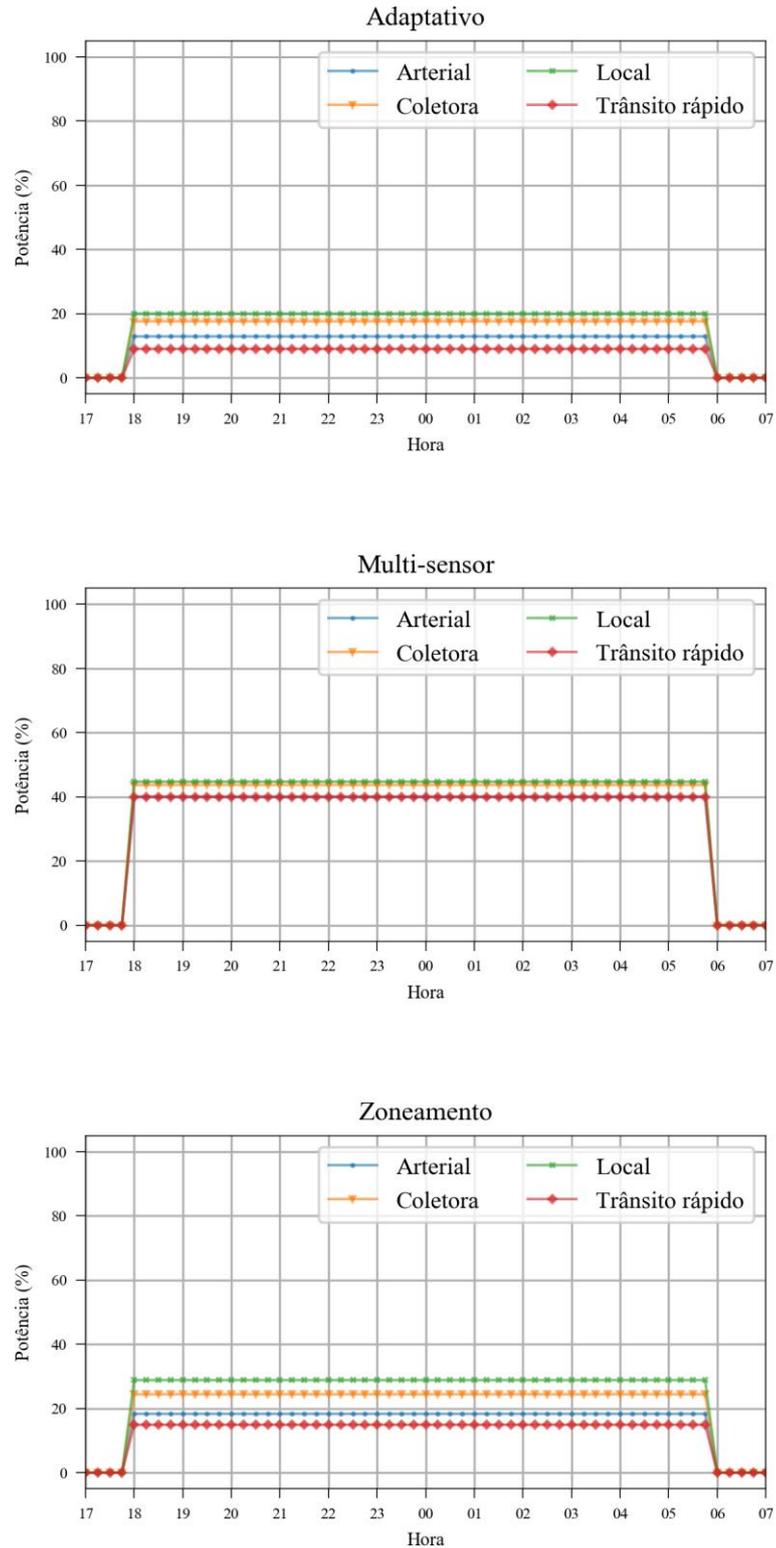
Tipo de via	Velocidade média (m/s)	Adaptativo (Wh)	Adaptativo (%)	Zoneamento (Wh)	Zoneamento (%)	Multi-sensor (Wh)	Multi-sensor (%)
Trânsito Rápido	16,67	46,77	9,83	70,97	14,92	200,00	42,03
Arterial	12,5	61,29	12,88	87,10	18,30	200,00	42,03
Coletora	8,33	83,87	17,63	116,13	24,41	208,06	43,73
Local	6,25	95,16	20,00	137,10	28,81	212,90	44,75

As curvas de carga para cada um dos métodos de controle acima podem ser conferidas na Figura 3.9.

#### ***A.1.1.3 Mapeamento de vias para curvas***

Mesmo empregando valores médios de velocidade por tipo de via, ainda é necessário mapear cada via a um tipo. Para alcançar esse mapeamento, além das coordenadas geográficas de cada conjunto de luminárias, foram empregados os dados abertos do OpenStreetMap. Lançado em 2004, o OpenStreetMap é um projeto que visa disponibilizar um mapa de vias mundial, gratuito, e editável de forma colaborativa [72]. É possível exportar os dados de uma região, como Barão Geraldo, para uso em diversas ferramentas de tratamento de dados georreferenciados.

Empregando os dados de posições geográficas das luminárias no alimentador em conjunto aos dados das vias de acordo com o OpenStreetMap, a associação foi realizada com o auxílio do software open-source QGIS [73]. O QGIS representa uma plataforma de GIS (*geographic information system*) completa, permitindo o tratamento de dados georreferenciados de diversas fontes, como arquivos, bancos de dados, e sites, através de sua interface gráfica ou de scripts em linguagem Python.



**Figura 3.9 – Curvas de carga utilizadas para simular os métodos de controle preditivo**

Para cada luminária, é selecionada a via mais próxima através de um processo KNN, *K-nearest neighbors* [74]. Efetuada a associação, pode-se selecionar a curva de carga

da luminária de acordo com o tipo de via associado à luminária. O processo como um todo é representado em forma de diagrama na Figura 3.10.

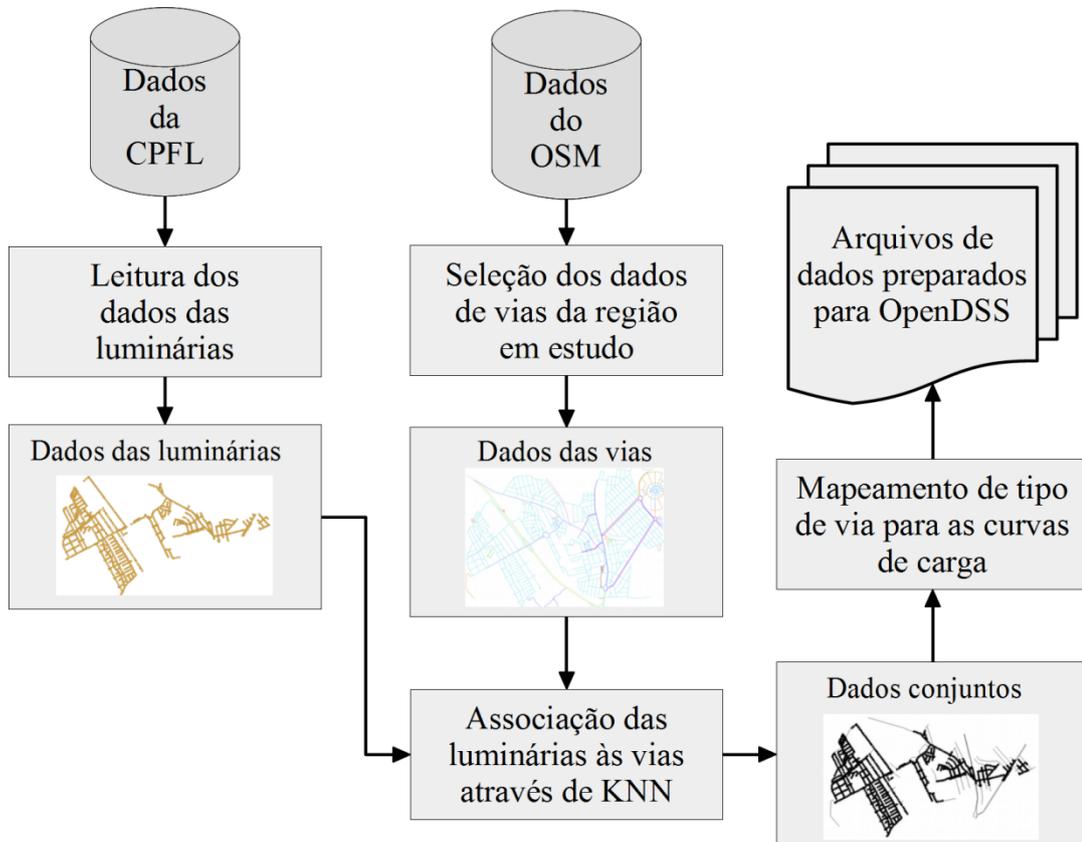


Figura 3.10 – Processo de associação de luminárias aos tipos de vias.

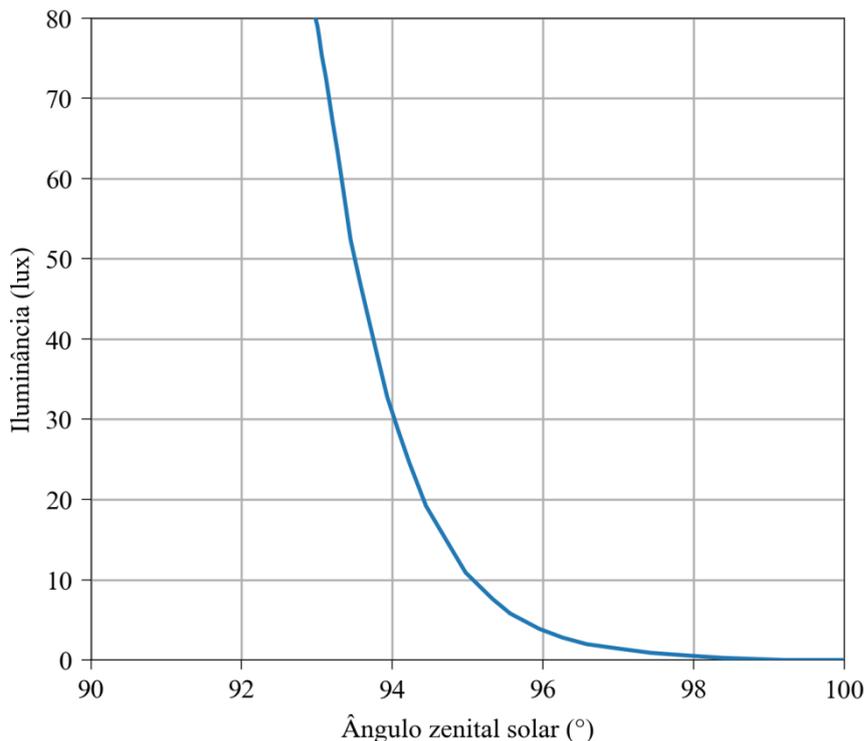
### 3.2.3 Efeitos da iluminação natural

Avaliou-se ainda a possibilidade de analisar curvas de carga que levassem o sistema de iluminação pública a compensar a luminosidade crescente ou decrescente no nascer e pôr do sol. Uma breve análise foi feita para determinar se a adoção deste critério impactaria nas curvas de carga.

Para estabelecer os limites de quando a iluminação pública deveria ser acionada ou desligada, para compensar a iluminação natural, a norma ABNT NBR 5123 foi consultada. A Tabela 2.6, retirada desta norma, indica os níveis pré-determinados de iluminância que o relé fotocontrolador, a depender de seu tipo, deve acionar ou desligar. Por simplicidade, foram escolhidos os valores de 20 lux para acionamento dos relés e 40 lux, para desligamento, utilizando os limites do relé fotocontrolador T1.

Utilizou-se ainda o conceito de crepúsculo civil que, como explicado anteriormente, é considerado um ângulo limite: até o momento que o Sol o atinja, é possível

realizar atividades externas sem a presença de iluminação artificial. Em [75, 76], apresenta-se o comportamento da Iluminância após o sol estar abaixo do horizonte, ou seja, ângulo de altura solar acima de  $90^\circ$ , como pode ser visto na Figura 3.11. Percebe-se que em torno do ângulo zenital solar  $96^\circ$ , ou  $-6^\circ$ , a iluminância está em patamares próximos de zero, em torno de 4 lux. Estabeleceu-se, portanto, que a iluminação pública deve ser acionada e desligada entre os intervalos entre o crepúsculo civil e os limites determinados pela norma ABNT NBR 5123.



**Figura 3.11 – Iluminância durante o crepúsculo. Dados retirados de [75, 76].**

O objetivo, portanto, desta breve análise é determinar o intervalo de tempo entre a ocorrência dos valores mínimos de iluminância considerados na norma e o crepúsculo civil.

Aplicando-se os valores de altura solar ao longo do dia para Campinas às equações de Seidelman, explicitadas na seção A.2, foi possível calcular os valores de iluminância ao longo do dia para a cidade de Campinas. O dia escolhido para efetuar estes cálculos foi 21 de março de 2017 devido ao fato deste dia possuir aproximadamente 12 horas de período noturno. Os valores de altura solar foram retirados de website disponível em [77] e podem ser conferidos na Tabela 3.5. O comportamento de iluminância obtido pode ser visto na Figura 3.12.

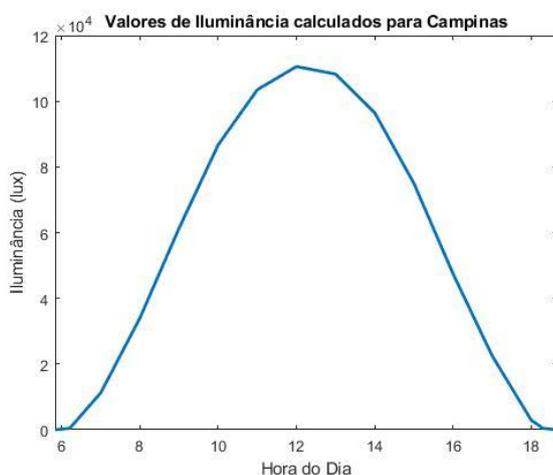
**Tabela 3.5 – Altura solar ao longo do dia. Calculado para Campinas, São Paulo, dia 21 de março de 2017. Retirado de [77].**

Hora (hh:mm)	Altura solar (°)
05:49	-6
06:12	-0,833
07:00	10,1
08:00	23,78
09:00	37,1
10:00	49,64
11:00	60,3
12:00	66,32
13:00	64,2
14:00	55,41
15:00	43,61
16:00	30,6
17:00	17,06
18:00	3,29
18:17	-0,833
18:40	-6

Os resultados obtidos indicaram que, pela manhã, o valor de 40 lux de iluminância é atingido em torno das 6 horas 15 minutos. De acordo com a Tabela 3.5, o crepúsculo civil ocorreu às 5 horas e 49 minutos. Ao anoitecer, os resultados indicaram que o valor de 20 lux é obtido às 18 horas e 14 minutos aproximadamente, enquanto o crepúsculo civil ocorre às 18 horas e 40 minutos. Isso significaria que os níveis de dimerização das luminárias do sistema de iluminação pública iriam de seu valor na madrugada até 0 % em 26 minutos.

Considerando a simulação de um dia típico, como proposto neste trabalho, a diferença de 26 minutos encontrada entre os limites de acionamento e desligamento dos relés e o crepúsculo civil foi considerada pouco impactante, principalmente levando-se em consideração que as curvas de carga das unidades consumidoras empregam passos de 15

minutos. Como consequência, as simulações realizadas no OpenDSS com as curvas de carga foram realizadas em passos de 15 minutos. Logo, descartou-se utilizar o sistema de IP como compensador para iluminação externa.



**Figura 3.12 – Valores de iluminância calculados para a cidade de Campinas de acordo com as equações de Seidelman.**

### 3.3 Fluxo de potência via OpenDSS

Com o objetivo de calcular fluxos harmônicos relacionados com a conexão de geração distribuída às redes de distribuição, em 1997, a empresa *Electrotek Concepts* desenvolveu a primeira versão do software OpenDSS. Em 2004, a organização norte-americana sem fins lucrativos EPRI (*Electric Power Research Institute*), adquiriu a ferramenta, acoplando um módulo para solução de cálculo de fluxo de carga. Em 2008, a licença de código aberta foi lançada visando impulsionar os projetos de pesquisa e desenvolvimento nas áreas de redes inteligentes e geração distribuída em todo o mundo [78].

Tradicionalmente, a execução dos estudos pode ser realizada através de uma interface COM (*Component Object Model*, uma tecnologia da Microsoft), e complementada pela entrada de comandos através de sua linguagem própria de entrada de dados e script. Em ambiente Windows, o uso da interface COM do OpenDSS pode ser realizado em qualquer software com suporte à tecnologia, desde programas em C++, C#, Python e MATLAB, a softwares mais gerais como o Microsoft Office. Devido à sua versatilidade, é possível modelar uma grande variedade de componentes e, portanto, simular sistemas de distribuição com diversas configurações. [78, 79]

A linguagem empregada para controlar a execução do OpenDSS, assim como realizar o processamento dos dados de entrada, foi a linguagem Python, versão 3.6. Ao final de 2017, tornou-se possível a execução do OpenDSS em ambientes Linux e uma interface em Python alternativa, compatível com a interface COM, porém com melhor desempenho em muitos cenários, foi desenvolvido [80]. Utilizou-se o trabalho desenvolvido nesta dissertação para validação inicial desta nova interface e, confirmado correto funcionamento, para os estudos finais apresentados no próximo capítulo.

A simulação de cada caso estudado usa o período de um dia, com passos de 15 minutos. Para coletar valores de interesse nos transformadores, são inseridos monitores em cada um deles. As grandezas gerais do alimentador são coletadas pelo próprio componente *Circuit*, necessário para qualquer estudo no OpenDSS.

## **3.4 Luminárias**

### **3.4.1 Características das luminárias escolhidas**

Para a realização das simulações, as características elétricas de luminárias LED a serem utilizadas precisavam ser levantadas.

De acordo com os dados obtidos sobre a rede do alimentador BGE-09, as potências de lâmpadas que são utilizadas no sistema de iluminação pública podem ser conferidas na Tabela 3.6.

Através do relatório do Selo Procel [81] para lâmpadas de vapor de sódio (VSAP), fez-se uma lista destas lâmpadas para as potências de 70 W, 100 W, 150 W e 250 W. Após o levantamento, obteve-se que o fluxo luminoso médio para uma lâmpada de Vapor de Sódio em Alta Pressão para cada potência. Para lâmpadas de vapor de mercúrio de 125 W, foi feita uma pesquisa de mercado onde se identificou as características deste tipo de luminária, conforme a Tabela 3.7, obtendo-se uma média para fluxo luminoso de 6266,67 lm. Os resultados médios de fluxo luminoso se encontram na Tabela 3.8.

**Tabela 3.6 – Tipos de lâmpadas e suas respectivas potências utilizadas no sistema de IP do alimentador BGE-09.**

Lâmpada	Potência (W)
Vapor de sódio em alta pressão (VSAP)	70
	100
	150
	250
Vapor de mercúrio	125

**Tabela 3.7 – Características de lâmpadas de vapor de mercúrio de 125W de três fabricantes diferentes.**

Fabricante	A	B	C
Tensão (V)	125	125	125
Fluxo luminoso (lm)	6200	6300	6300
Eficiência luminosa (lm/W)	50	50	50
Vida útil (h)	16.000	24.000	24.000

**Tabela 3.8 – Valores de fluxo luminoso médio para cada potência e tipo de luminária.**

Lâmpada	Potência (W)	Fluxo luminoso médio (lm)
Vapor de sódio em alta pressão	70	6354
	100	10248
	150	17117
	250	30752
Vapor de mercúrio	125	6267

O levantamento do fluxo luminoso médio para cada tipo de potência foi realizado para permitir a escolha de luminárias LEDs com um perfil equivalente ao utilizado no sistema de IP. Como não há disponibilidade de dados reais de luminárias LEDs e o fluxo luminoso é a única característica luminotécnica disponível nos catálogos de fabricantes, utilizou-se esse parâmetro para selecionar as luminárias LED equivalentes.

Após pesquisa no mercado de luminárias disponíveis, escolheram-se as luminárias LED que se encaixavam nos requisitos adequados de fluxo luminoso e com o menor consumo de potência. Os resultados obtidos podem ser vistos na Tabela 3.9.

**Tabela 3.9 – Características das luminárias LED equivalentes à luminária originais.**

Luminária original	Características das luminárias LED equivalentes					
	Fabricante	Potência (W)	Fluxo Luminoso (lm)	Fator de Potência	Tensão de Alimentação	THD
VSAP 70W	D	54	6000	>0,95	12VDC / 110VAC / 220VAC	<10 % em 230V a 100 % da carga
Vapor de mercúrio 125W	E	50	6500		100-240VAC / 277VAC	Não informado
VSAP 100W	F	80	9440		110 / 220VAC	<10 %
VSAP 150W	G	120	15600		100-240VAC / 277VAC	Não informado
VSAP 250W	H	210	27964	>0,98	120-270VAC	<10 %

### 3.4.2 Modelagem das luminárias no fluxo de potência

Para modelagem das luminárias no OpenDSS, utilizou-se o modelo polinomial, também conhecido como modelo ZIP. De acordo com este modelo clássico [82], disponível em diversos softwares de fluxo de potência, as equações para potência ativa e reativa do modelo ZIP podem ser conferidas em (3.1) e (3.2):

$$P = P_0 \left[ Z_P \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^2 + I_P \frac{V_i}{V_0} + P_P \right] \quad (3.1)$$

$$Q = Q_0 \left[ Z_Q \left( \frac{V_i}{V_0} \right)^2 + I_Q \frac{V_i}{V_0} + P_Q \right] \quad (3.2)$$

Ou seja, cada componente da potência é composto por uma parcela que representa um elemento de impedância constante, uma parcela que representa um elemento de corrente constante, e uma parcela de potência constante. Os coeficientes utilizados para a modelagem das luminárias no fluxo de potência foram retirados do trabalho de [83] e podem ser

conferidos na Tabela 3.10. O principal diferencial do trabalho de Bokhari é a representação da tensão de corte real dos equipamentos, estendendo a faixa na qual o modelo é válido.

**Tabela 3.10 – Coeficientes ZIP para as luminárias empregadas.**

Luminária	$V_{corte}$ (V)	$V_0$ (V)	$P_0$ (W)	$Q_0$ (var)	$Z_P$	$I_P$	$P_P$	$Z_Q$	$I_Q$	$P_Q$
VSAP	62	120	276,09	52,65	-0,16	1,20	-0,04	3,26	-4,11	1,85
Vapor de mercúrio	88	120	268,27	77,66	-0,16	2,33	-1,17	0,42	-1,01	1,59
LED	81	120	3,38	5,85	0,69	0,92	-0,61	1,84	-0,91	0,07

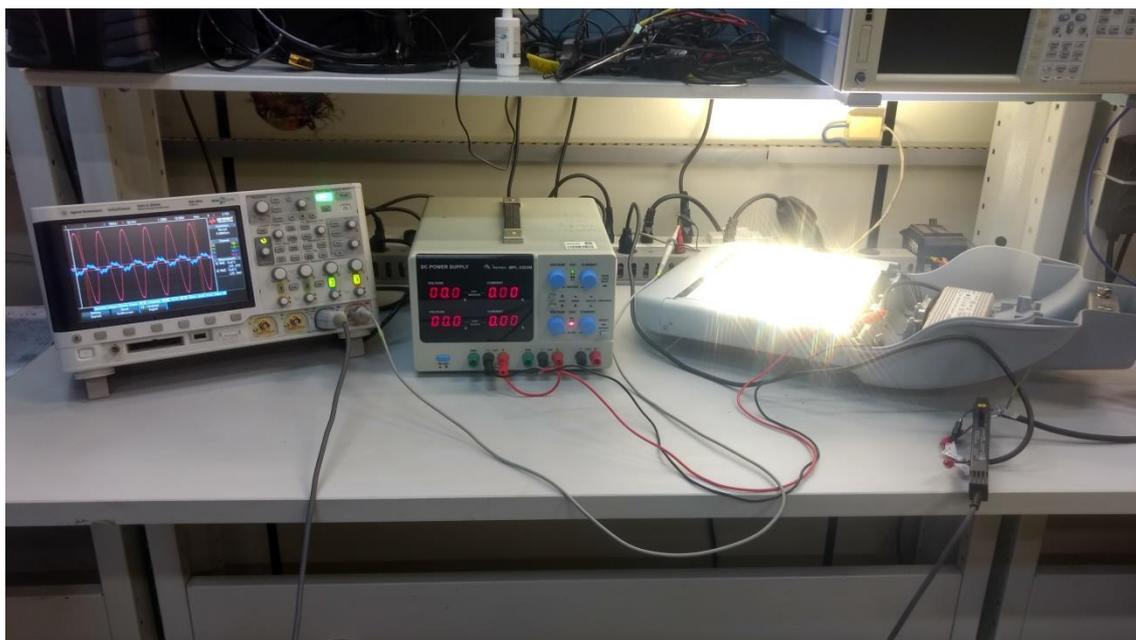
Todos os parâmetros listados, incluindo o valor da tensão de corte, são usados para alimentar o modelo de carga no OpenDSS, ajustados de acordo com a tensão e potência de cada luminária.

### 3.4.3 Comportamento do consumo da luminária LED em relação à dimerização

Para este estudo, considerou-se que a relação entre a potência consumida pela luminária LED e o seu nível de dimerização é linear, isto significa que, caso o nível de dimerização esteja em 50 %, por exemplo, a potência consumida pela luminária também está em 50 % de seu valor nominal.

Em [52], subentende-se que a dimerização e a potência consumida possuem uma relação linear ao se analisar a forma como a economia de energia foi calculada. Em [58], também se considera uma relação linear entre potência consumida e dimerização.

Através da montagem de um experimento simples, utilizou-se uma luminária LED para verificar rapidamente sua relação entre potência e dimerização. Através da conexão da entrada da luminária com um osciloscópio, mediu-se a potência média da luminária, a tensão e corrente RMS. Utilizou-se ainda uma fonte de tensão contínua nos terminais estabelecidos pelo fabricante para controle de dimerização. A fonte teve sua tensão variada de 0 V a 10 V. A montagem pode ser conferida na Figura 3.13.



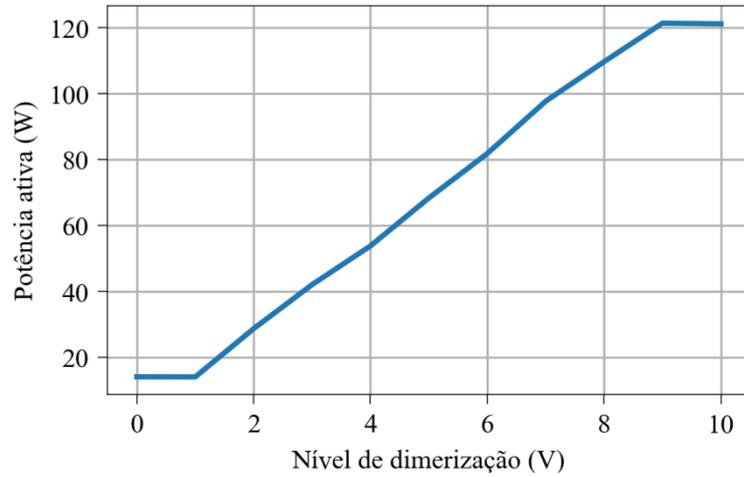
**Figura 3.13 – Bancada de ensaios da luminária.**

**Tabela 3.11 – Resultados obtidos no ensaio da luminária NVC.**

Tensão de dimerização (V)	Potência média (W)	Potência média (pu)	Tensão RMS (V)	Corrente RMS (mA)	Potência aparente (VA)	Fator de potência
0	13,97	0,116	129,85	125,30	16,27	0,86
1	13,98	0,116	129,70	125,30	16,25	0,86
2	28,63	0,239	129,72	218,70	28,63	1,00
3	41,99	0,350	129,40	328,70	42,53	0,99
4	53,75	0,448	129,40	420,80	54,45	0,99
5	68,30	0,569	129,47	535,50	69,33	0,98
6	81,80	0,682	129,70	630,50	81,80	1,00
7	97,67	0,814	129,50	738,70	97,67	1,00
8	109,67	0,914	129,60	847,50	109,84	1,00
9	121,38	1,012	129,52	946,80	122,63	0,99
10	121,18	1,010	129,41	945,50	122,36	0,99

A luminária é do fabricante NVC e possui potência nominal de 120 W. Os resultados obtidos podem ser conferidos na Tabela 3.11 e na Figura 3.14. Para potência média no sistema por unidade, empregou-se a potência nominal da luminária como base.

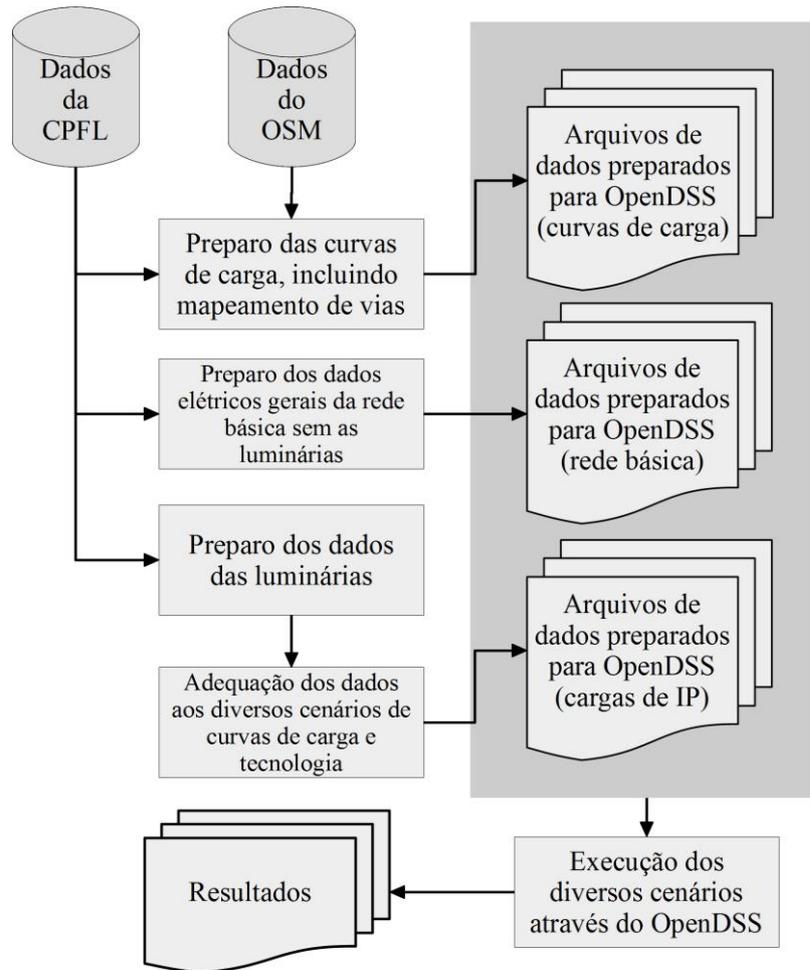
Observa-se que o comportamento da potência em relação à dimerização é aproximadamente linear na faixa de níveis entre 1 e 9, como pode ser visto na Figura 3.14, saturando para níveis fora desta faixa.



**Figura 3.14 – Potência média em relação ao nível de dimerização.**

### 3.5 Resumo geral

Ilustra-se todo o processamento dos dados empregados para a preparação da simulação de fluxo de potência na Figura 3.15. Os resultados das simulações que empregam esses dados são avaliados no Capítulo 4.



**Figura 3.15 – Processo de preparação dos dados.**

# CAPÍTULO 4:

## SIMULAÇÕES E RESULTADOS

Com a rede de distribuição e os cenários estudados introduzidos no Capítulo 3, neste capítulo apresentam-se os resultados para os diversos casos de simulação. De acordo com os cenários e parâmetros analisados, as simulações foram divididas em três seções:

- **4.1 Cenário atual:** Avaliação dos impactos das cargas de Iluminação Pública no consumo de energia ativa e reativa, demanda no horário de ponta, perdas, afundamento e desequilíbrio de tensão na rede analisada, e nos transformadores com cargas de IP;
- **4.2 Substituição por luminárias LED:** Impactos da substituição das atuais luminárias por luminárias LED no consumo de energia ativa e reativa, demanda no horário de ponta e perdas;
- **4.3 Simulação dos métodos de controle:** Assumindo o cenário de substituição por luminárias LED, avaliam-se os impactos da introdução de métodos de gestão e controle de iluminação pública no consumo de energia ativa e reativa, demanda no horário de ponta, perdas, afundamento e desequilíbrio de tensão na rede analisada.

Uma síntese dos resultados é apresentada na seção 4.4.

## 4.1 Cenário atual

Para avaliar como um sistema de IP inteligente poderia afetar a rede elétrica, faz-se necessário inicialmente um estudo do impacto que as atuais cargas de IP possuem na rede elétrica, assim seria possível mensurar o que estas cargas efetivamente representam.

Na Figura 4.1, simulações do fluxo de potência do alimentador BGE-09 podem ser observadas. É possível notar graficamente o impacto que as cargas de iluminação pública possuem no sistema, iniciando-se em torno das 18 h e se estendendo até às 6 h. Para facilitar a leitura dos gráficos deste capítulo, apenas os resultados em torno do período de interesse serão representados, mais especificamente das 17 h às 7 h, como na Figura 4.2. A Tabela 4.1 contém informações da rede com e sem as cargas de IP.

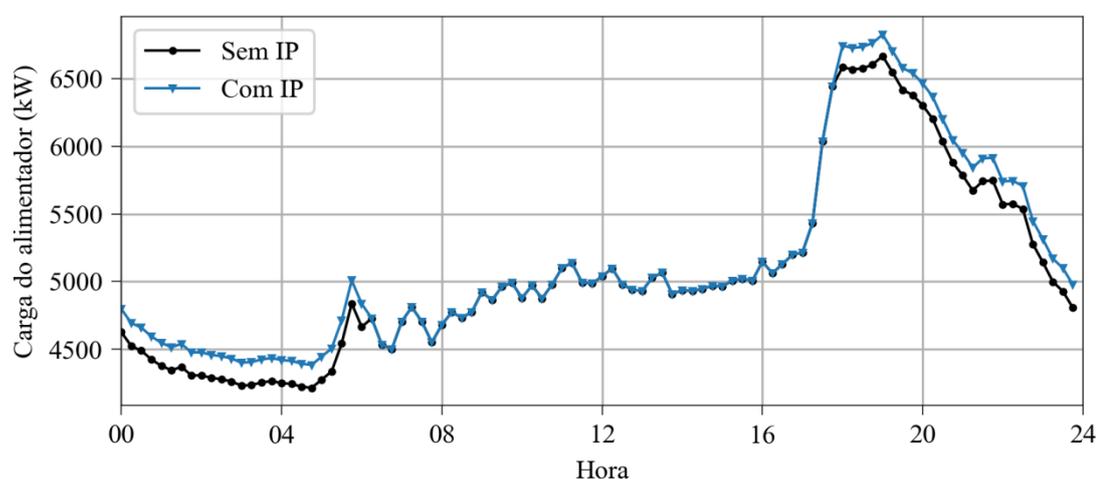


Figura 4.1 – Curvas de carga do sistema elétrico alimentado por BGE-09 com iluminação pública e sem iluminação

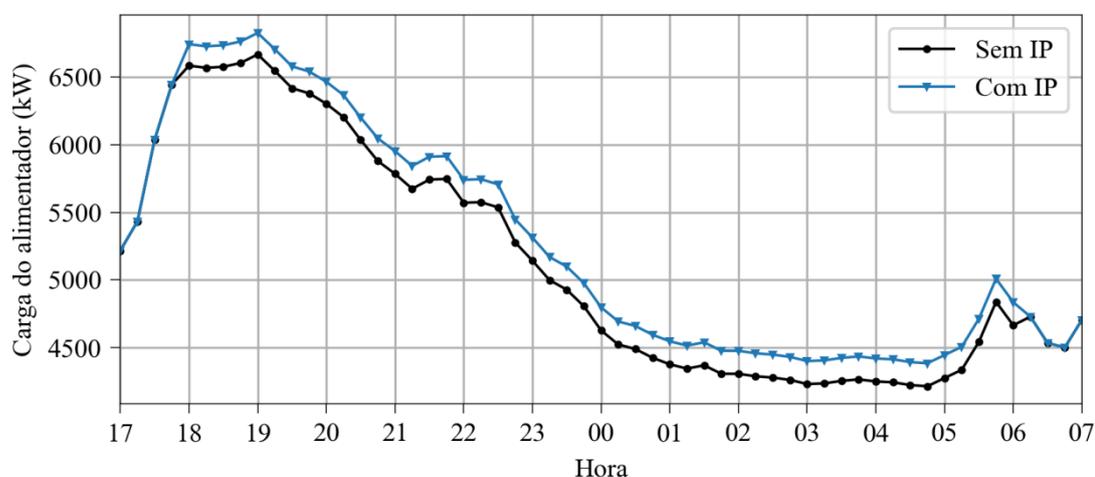


Figura 4.2 – Curvas de carga do sistema elétrico alimentado por BGE-09 com iluminação pública e sem iluminação – restrição ao período de interesse.

**Tabela 4.1 – Comparação entre a rede com as cargas de iluminação pública e sem as cargas de iluminação pública.**

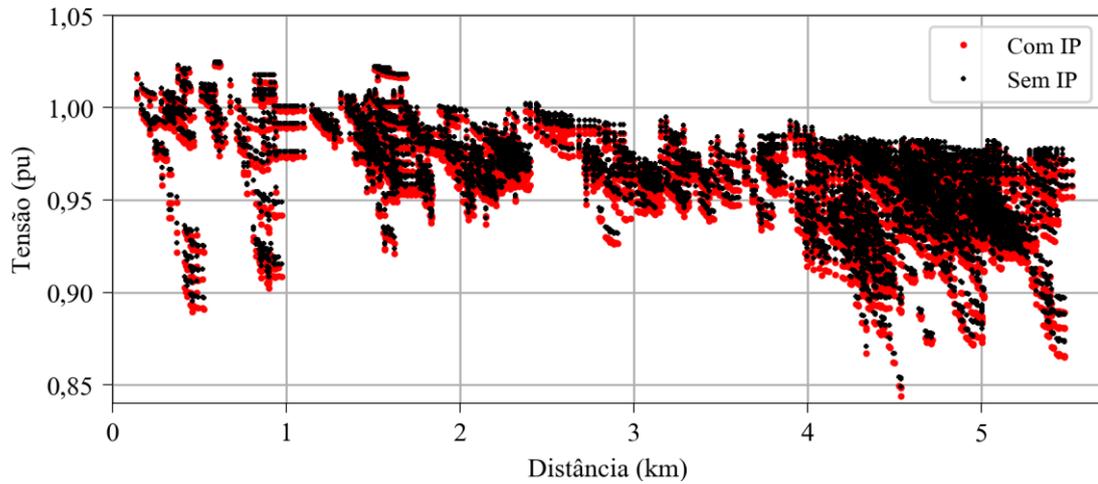
	Energia ativa (kWh)	Energia reativa (kvarh)	Demanda de pico (kW)	Demanda de pico total (kVA)	Perdas ôhmicas (kWh)	Perdas reativas (kvarh)	Perda ôhmica no pico (kW)
Com IP	493473	139649	6830,0	7321,2	16906,7	27875,5	336,83
Sem IP	485322	137366	6669,2	7154,2	16445,5	27126,8	323,29

Através dos dados disponibilizados na Tabela 4.2, é possível perceber que as cargas de iluminação representam 1,65 % do consumo total de energia ativa e 2,35 % da demanda no horário de pico. As cargas de iluminação compreendem ainda 2,46 % do total do consumo entre os horários de pico (18h às 21h) e 3,14 % do total de energia consumido no período noturno (18h às 6h). Como observado, as cargas de IP representam 1,63 % do consumo de energia reativa, 2,28 % da demanda de pico total, 2,73 % das perdas ôhmicas, 2,69 % das perdas reativas e 4,02 % das perdas ôhmicas no pico. Estas informações estão resumidas na Tabela 4.2.

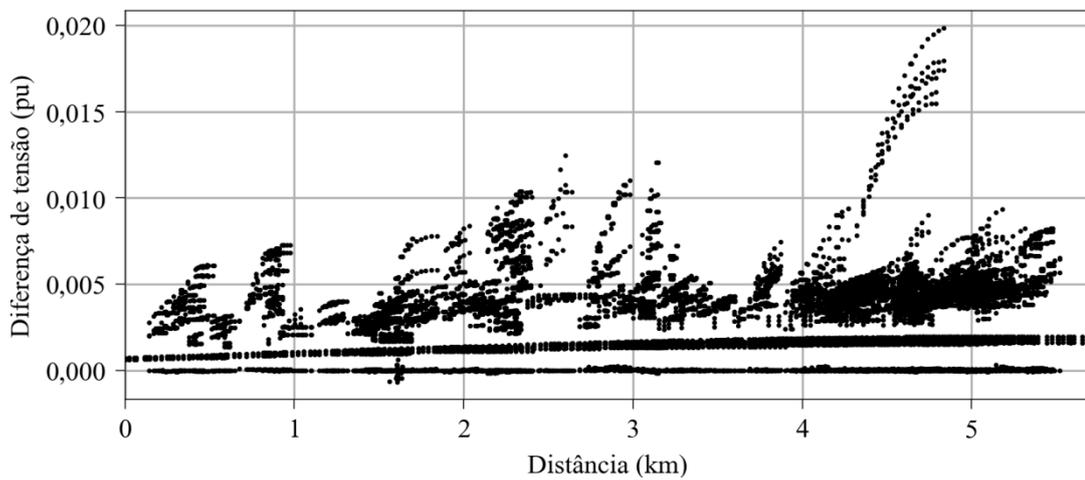
**Tabela 4.2 – Porcentagem que as cargas de IP representam do total de cada grandeza.**

	Energia ativa (kWh)	Energia reativa (kvarh)	Energia ativa no horário de pico (kWh)	Energia ativa no período noturno	Demanda de pico (kW)	Demanda de pico total (kVA)	Perdas ôhmicas (kWh)	Perdas reativas (kvarh)	Perda ôhmica no pico (kW)
Parcela que as cargas de IP representam do total ( %)	1,65	1,63	2,46	3,14	2,35	2,28	2,73	2,69	4,02

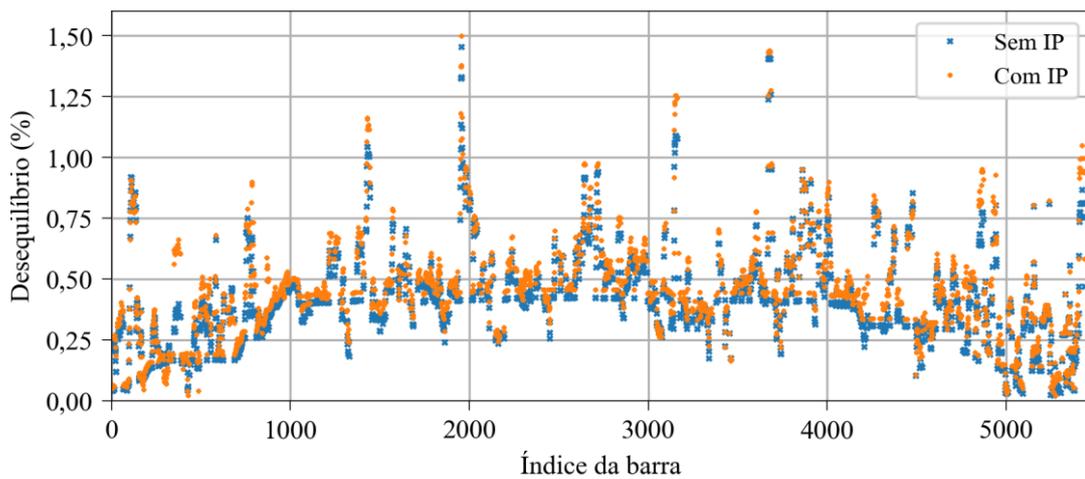
Na Figura 4.3, está mostrado o impacto que as cargas de iluminação pública possuem nas tensões no pico de demanda do sistema.



**Figura 4.3 – Tensões no pico de demanda com as cargas de iluminação pública (com IP) e sem as cargas de iluminação pública (sem IP)**

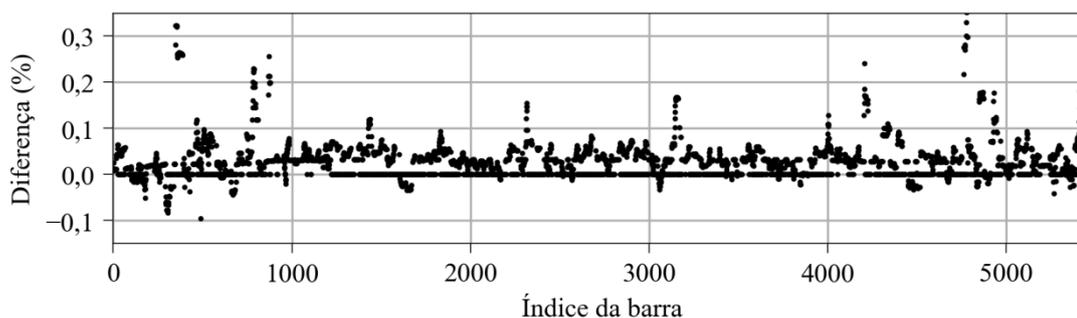


**Figura 4.4 – Diferença de tensão no pico (em pu) ocasionada pelas cargas de IP.**



**Figura 4.5 – Desequilíbrio percentual por barra com as cargas de iluminação pública (com IP) e sem as cargas de iluminação pública (sem IP).**

Na Figura 4.5, o desequilíbrio percentual em cada barra com a presença das cargas de Iluminação Pública e sem as cargas de Iluminação Pública pode ser visto. Já na Figura 4.6, é demonstrado o quanto percentualmente as cargas de IP contribuem para o aumento do desequilíbrio de tensão em cada barra do sistema. De acordo com [84], desequilíbrios de tensão produzem efeitos indesejáveis nos sistemas de distribuição, afetando diretamente o desempenho de equipamentos e possivelmente aumentando perdas elétricas.



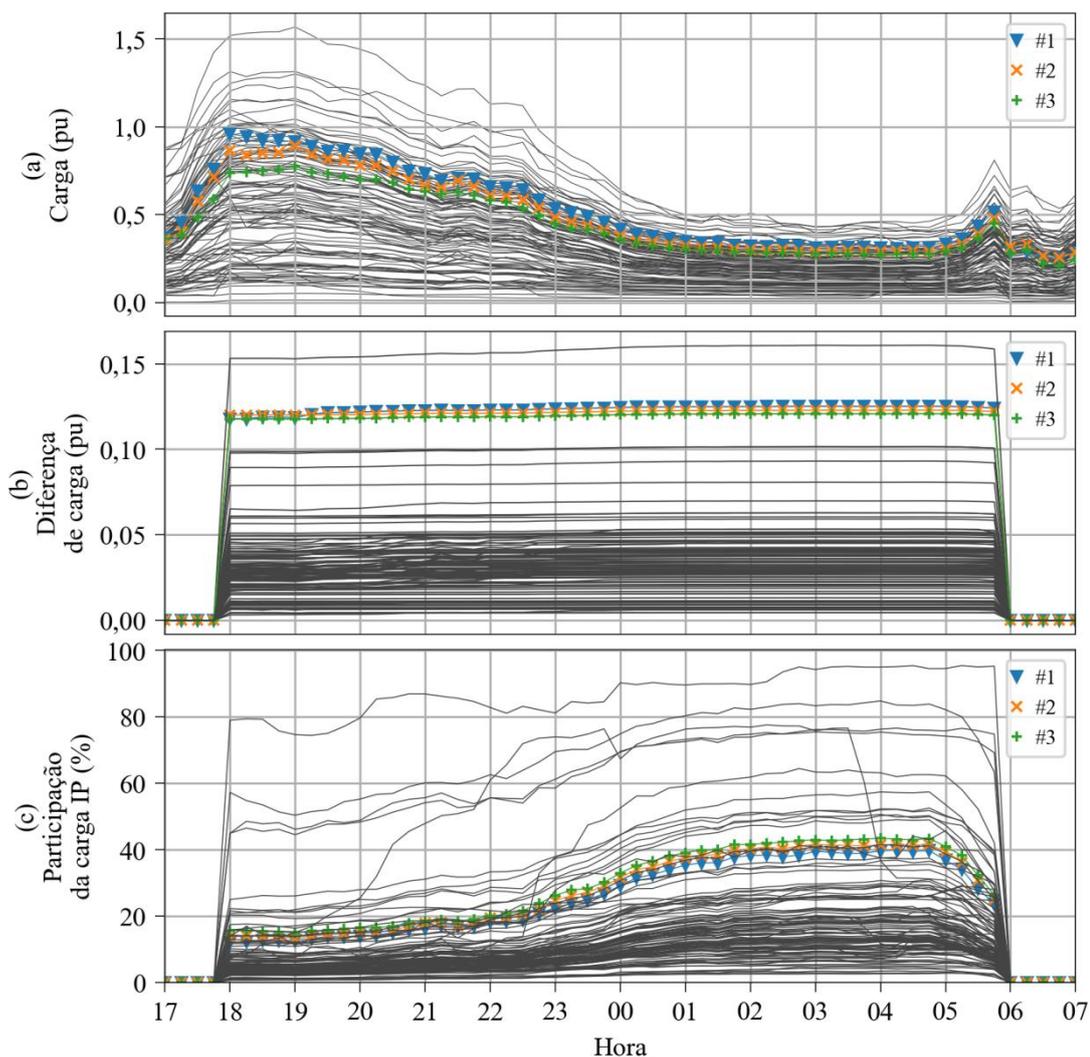
**Figura 4.6 – Diferença entre o desequilíbrio com as cargas de IP e sem as cargas de IP**

Conforme especificado no Módulo 8 do Prodist [85], os limites para os desequilíbrios de tensão são de 3,0 % para redes com tensão nominal igual ou inferior a 1,0 kV. Observando as figuras e tabela anteriores, percebe-se que os valores de desequilíbrio de tensão da rede elétrica do alimentador estão dentro dos limites do Prodist e que, em geral, as cargas de IP contribuem pouco para o desequilíbrio de tensão.

Na Figura 4.7, encontram-se alguns gráficos utilizados para análise do impacto da iluminação pública nos transformadores. Na figura, são observados três gráficos: (a), (b), (c). O primeiro deles contém as curvas de carga dos transformadores que contém cargas de IP, enquanto o segundo demonstra a diferença de carga causada nos transformadores pelas cargas de IP. Já o terceiro gráfico aponta a participação percentual das cargas de IP no total da carga de cada transformador. Os valores no sistema por unidade (pu) estão na base de cada transformador. No gráfico (a), nota-se que mais de 9 % dos transformadores (10 transformadores) apresentam sobrecarga no horário de pico. No gráfico (b), percebe-se que o real impacto das cargas de IP nas curvas: as cargas de IP chegam a representar até 15 % da carga nominal do transformador. No gráfico (c), a participação percentual da maior parte dos transformadores se encontra abaixo de 40 %.

Foram destacadas as curvas de três transformadores na Figura 4.7, denominados #1, #2 e #3, representando 3 transformadores com potências de 30, 45 e 75 kVA, respectivamente. Como pode ser observado, a carga de IP nestes transformadores, conforme

gráfico (b), representa 12 % da capacidade nominal de cada um. Vale ressaltar que do horário das 0 h às 6 h, a participação das cargas de IP é de 25 a 45 % no total da carga destes transformadores, decaindo para em torno de 10 a 15 % no horário de ponta, como pode ser visto no gráfico (c). Observa-se também que os transformadores selecionados trabalham com capacidade ociosa, operando com menos de 40 % de carga durante grande parte do período analisado. No horário de ponta do gráfico (a), há um aumento na carga que chega a ultrapassar 90 % da potência nominal.



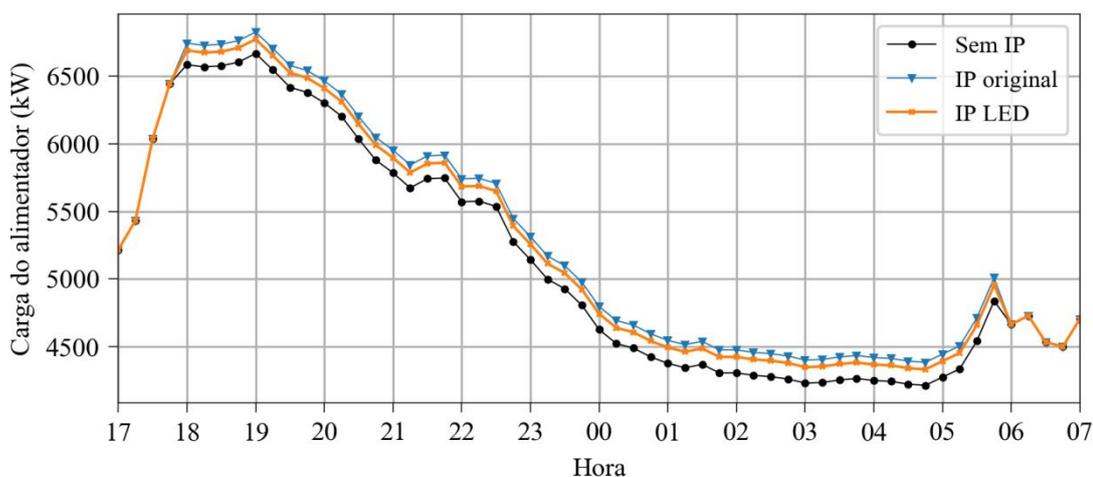
**Figura 4.7 – (a) Curvas de carga dos transformadores do alimentador com cargas de IP; (b) Diferença causada pelas cargas de IP na carga dos transformadores do alimentador; (c) Participação da IP na carga total de cada transformador em cada instante de carga.**

## 4.2 Substituição por luminárias LED

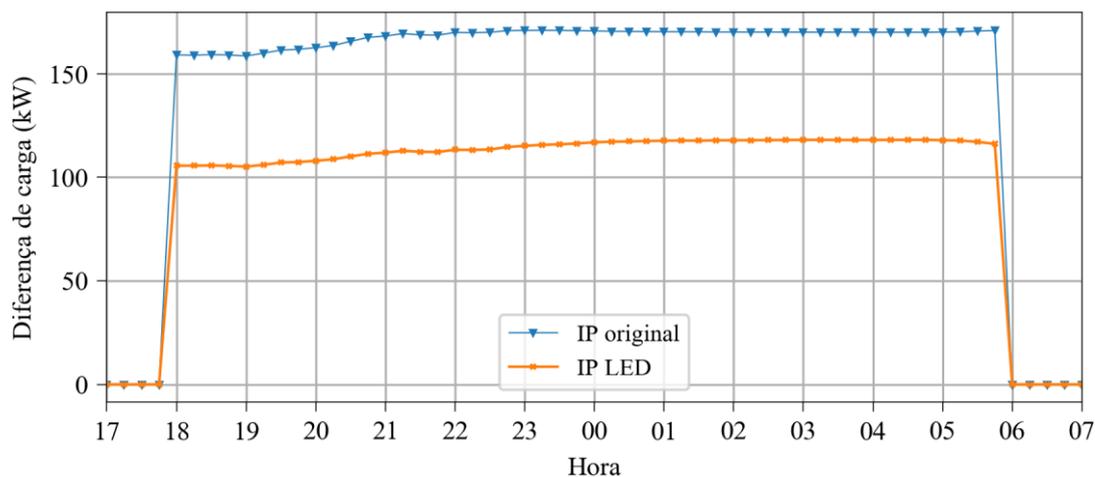
Nesta etapa, foram verificados os impactos que uma substituição completa de todas as luminárias vapor de sódio e de vapor de mercúrio por luminárias LED resultaria no consumo, demanda e perdas na rede.

Na Figura 4.8, estão dispostas três curvas que demonstram o impacto da substituição de todas as luminárias por luminárias LED na curva de carga da rede elétrica do alimentador BGE-09. Na Tabela 4.3, estão dispostos dados numéricos das situações representadas na figura.

Em relação ao sistema original de IP, a substituição por luminária LED proporcionou economia de 2.639 kWh de energia ativa, significando redução de consumo de 32 %. Também foram obtidas reduções de cerca de 6.500 kvarh na energia reativa, 317,5 kWh nas perdas ôhmicas, e 510,4 kvarh nas perdas reativas, levando à reduções de 73 %, 49 % e 49 %, respectivamente. Outras reduções absolutas e percentuais podem ser conferidas na última linha da Tabela 4.3. Percebe-se que todos os valores de consumo, demanda e perdas obtiveram reduções significativas comparadas ao sistema original, confirmando que a tecnologia LED de fato proporciona economia e qualidade de energia. A redução de consumo pode ser mais bem percebida na Figura 4.9, onde a diferença entre cada curva de carga (curva de carga do sistema de IP original e curva de carga do sistema de IP com luminárias LED) e a curva de carga da rede sem cargas de IP está plotada, demonstrando graficamente o melhor desempenho do sistema com luminárias LED.



**Figura 4.8 – Curvas de carga da rede do alimentador BGE-09 sem cargas de IP (sem IP), com as cargas convencionais de IP (IP original) e com a substituição das luminárias atuais por luminárias LED (IP LED).**



**Figura 4.9 – Diferença entre cargas do sistema de IP original e com luminárias LED em relação à carga total da rede elétrica sem IP.**

**Tabela 4.3 – Dados de consumo, demanda e perdas para rede elétrica do alimentador BGE-09 sem cargas de IP, com as cargas originais de IP e com a substituição das luminárias atuais por luminárias LED.**

Caso	Energia ativa (kWh)	Energia reativa (kvarh)	Demanda de pico (kW)	Demanda de pico total (kVA)	Perdas ôhmicas (kWh)	Perdas reativas (kvarh)	Perda ôhmica no pico (kW)
(a) Sem as cargas de IP	485322,9	137366,7	6669,2	7154,2	16445,5	27126,8	323,3
(b) Com as cargas de IP originais	493557,6	146205,8	6827,8	7364,6	17089,7	28168,79	342,0
(c) Com as cargas de IP com luminárias LED	490918,6	139702,9	6774,4	7268,7	16772,2	27658,4	332,6
<b>Comparação (b) vs. (c)</b> Redução na carga de IP proporcionada pelo uso de luminárias LED							
	2639,0 [32 %]	6499,9 [74 %]	53,4 [34 %]	95,9 [46 %]	317,5 [49 %]	510,4 [49 %]	9,4 [50 %]

Na Tabela 4.4, tem-se os valores que cada parâmetro dos sistemas com luminárias LED e com iluminação original representam em relação aos parâmetros do sistema com carga total. Observa-se que o sistema de IP com luminárias LED passa a representar uma parcela menor do consumo, demanda e perdas, como já concluído anteriormente, com destaque para a parcela de energia reativa que passa a representar 1,7 % de toda energia reativa do sistema com carga total. Esta redução se deve ao fato de que o consumo de energia reativa dos reatores das luminárias VSAP ter sido eliminado. Outros parâmetros que apresentam reduções significativas são: as perdas ôhmicas no pico que caem a aproximadamente metade do valor anterior, as perdas ôhmicas e reativas que se reduzem em quase 50 %.

**Tabela 4.4 – Percentual que os sistema de IP com luminárias LED original representam em relação ao sistema com carga total.**

	Energia ativa (%)	Energia reativa (%)	Demanda de pico (kW)	Demanda de pico total (kVA)	Perdas ôhmicas (kWh)	Perdas reativas (kvarh)	Perdas ôhmicas no pico (kW)
IP LED	1,15	1,70	1,58	1,60	1,99	1,96	2,87
IP original	1,70	6,43	2,38	2,94	3,92	3,84	5,79

### 4.3 Simulação dos métodos de controle

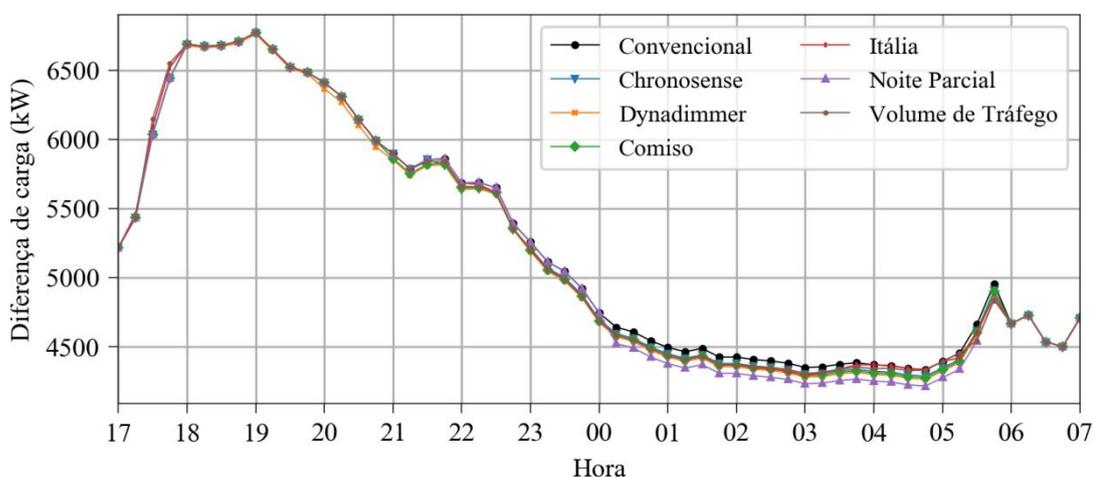
Nesta etapa, simulações foram feitas visando medir o impacto que novas técnicas de gestão produziram na rede elétrica do alimentador BGE-09.

Os métodos de controle e gestão de IP foram divididos em: controle estático, controle em tempo real e controle através de modelos preditivos. Como explicitado anteriormente, a ausência de dados de tráfego para a região onde se localiza a rede estudada impossibilita simulações de controle em tempo real e através de modelos preditivos, levando a algumas aproximações para tentar medir o impacto de todas as formas de controle na rede.

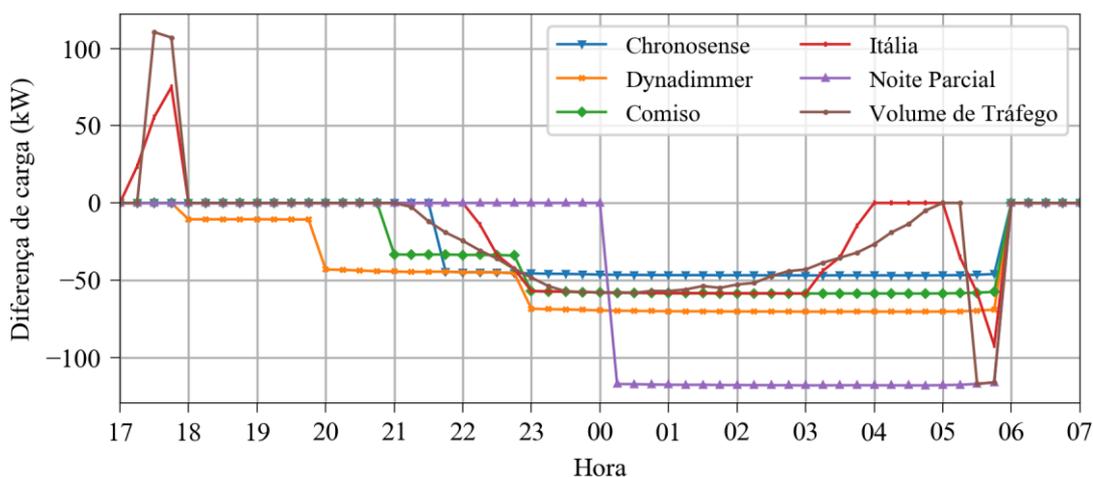
Os nomes de cada caso são baseados nos nomes das curvas utilizadas na seção 3.2, que também lista os dados e em quais estudos as curvas são baseadas. Todas essas curvas de carga foram simuladas já considerando a tecnologia LED empregada nos sistemas de iluminação.

Na Figura 4.10, tem-se as curvas de carga baseadas em método de controle estático e baseada em modelos preditivos, comparadas com a curva de carga convencional. Devido ao fato de considerarem que no horário de ponta o tráfego é máximo, o nível de potência está em 100 % neste intervalo, coincidindo com a curva convencional. Na Figura 4.12, tem-se as curvas de carga baseadas em método de controle em tempo real comparadas com a curva de carga convencional. Na Figura 4.11, tem-se a diferença de carga entre cada uma das curvas simuladas baseadas em método de controle estático e através de modelos preditivos e a curva de carga convencional. Observa-se que no período que se inicia às 0 h até o início da manhã, a curva de carga Noite Parcial gera a maior diferença de carga de todas as curvas, como esperado, já que o nível de dimerização é configurado para 0 % a partir deste horário. No período que compreende das 18 h à 0 h, a curva Dynadimmer apresenta a menor

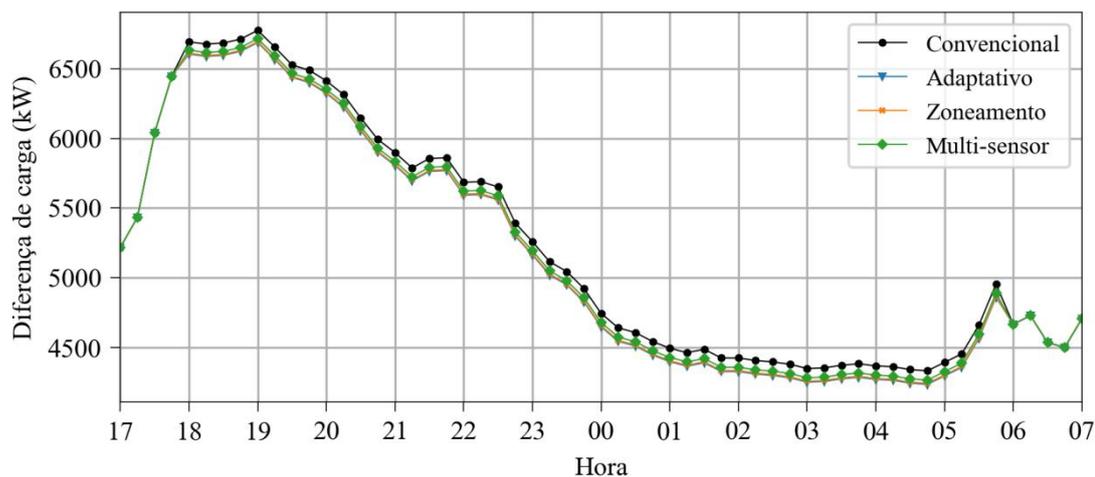
diferença de carga, entre todas as curvas. À partir das 0 h, a curva Dynadimmer apresenta a segunda menor diferença de carga. As curvas Comiso e Chronosense apresentaram comportamentos para os valores de diferença de carga relativamente semelhantes, bem como Itália e Volume de Tráfego, que também apresentaram comportamentos semelhantes entre si. Já na Figura 4.13, tem-se a diferença de carga entre as curvas de carga baseadas em tempo real e curva de carga convencional. Ressalta-se, neste caso, que como estas curvas são apenas uma média aproximada do comportamento obtido em [58], os valores obtidos na Figura 4.13 podem não apresentar aproximação com a realidade em alguns pontos, especialmente nos períodos de pico de demanda, mas auxiliam a evidenciar o potencial de economia de energia de cada uma dessas curvas.



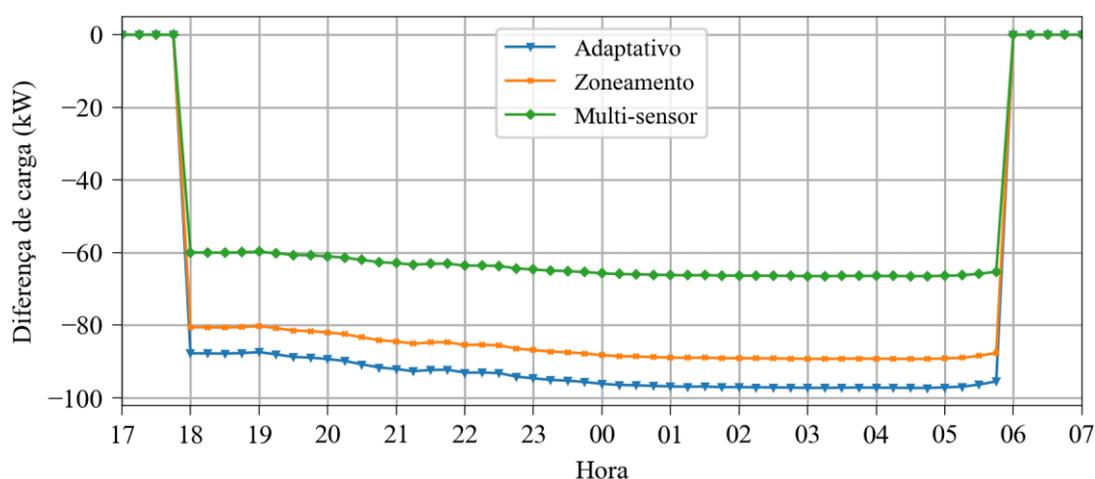
**Figura 4.10 – Curvas de carga baseadas em método de controle estático e em modelos preditivos comparadas à curva de carga convencional.**



**Figura 4.11 – Diferença da carga entre cada método e a curva convencional — curvas baseadas em método de controle estático e modelos preditivos.**



**Figura 4.12 – Curvas de carga baseadas em método de controle em tempo real comparadas à curva de carga convencional.**



**Figura 4.13 – Diferença da carga entre cada método e a curva convencional — curvas baseadas em método de controle em tempo real.**

Na Tabela 4.5, estão listados os valores absolutos de cada métrica do sistema para cada caso. Para comparação, foram incluídos os valores para o cenário original, com curva Convencional e lâmpadas de vapores metálicos, e também o sistema sem IP. Como observado anteriormente, apesar de os parâmetros estarem listados para as curvas de carga baseadas em métodos de controle em tempo real, pode haver um distanciamento de valores reais, visto que foi modelado apenas o comportamento médio das cargas.

Como visto na seção anterior, as alterações percentuais nos valores de energia são baixos, o que dificulta uma análise rápida dos resultados. Assim, decidiu-se omitir esta análise considerando o sistema do alimentador como um todo. Em seu lugar, como tentativa de facilitar a interpretação dos dados devido às mudanças no sistema de IP, e visto que houve

redução de quase todos os valores de perdas e energia no sistema com a substituição por LEDs, os dados foram tratados como segue.

Inicialmente, cada valor é subtraído do caso base sem IP e, como segundo passo, analisa-se a redução que cada método de controle proporciona frente ao caso em comparação. Realizando o tratamento frente ao caso de controle das luminárias LED pela curva Convencional, são obtidos os resultados mostrados na Figura 4.14 e, para ilustrar o impacto frente ao cenário atual, empregando a curva Convencional e luminárias de vapores metálicos, confeccionou-se a Figura 4.15.

**Tabela 4.5 – Resultados gerais do alimentador para cada caso analisado.**

Caso	Energia ativa (kWh)	Energia reativa (kvarh)	Demanda de pico IP (kW)	Demanda de pico total (kVA)	Perdas ôhmicas (kWh)	Perdas reativas (kvarh)	Perda ôhmica no pico (kW)
Noite Parcial	488.093	138.543	6.774,4	7.268,7	16.646,8	27.447,8	332,6
Dynadimmer	488.226	139.455	6.763,9	7.258,5	16.648,2	27.455,0	331,8
Comiso	488.901	139.513	6.774,4	7.268,7	16.684,4	27.513,4	332,6
Chronosense	489.272	139.541	6.774,4	7.268,7	16.700,3	27.539,8	332,6
Itália	489.598	139.678	6.774,4	7.268,7	16.722,4	27.575,3	332,6
Volume de Tráfego	489.539	139.558	6.774,4	7.268,7	16.717,7	27.567,5	332,6
Convencional (LED)	490.802	139.655	6.774,4	7.268,7	16.766,4	27.648,7	332,6
Adaptativo	486.286	139.253	6.687,0	7.183,7	16.538,3	27.277,8	326,0
Zoneamento	486.656	139.314	6.694,1	7.190,9	16.557,4	27.309,1	326,6
Multi-sensor	487.715	139.400	6.714,6	7.210,7	16.610,0	27.394,9	328,1
Convencional (vapores metálicos)	493.387	146.023	6.827,8	7.364,6	17.078,3	28.149,9	342,0
Sem IP	485.323	137.367	6.669,2	7.154,2	16.445,5	27.126,8	323,3

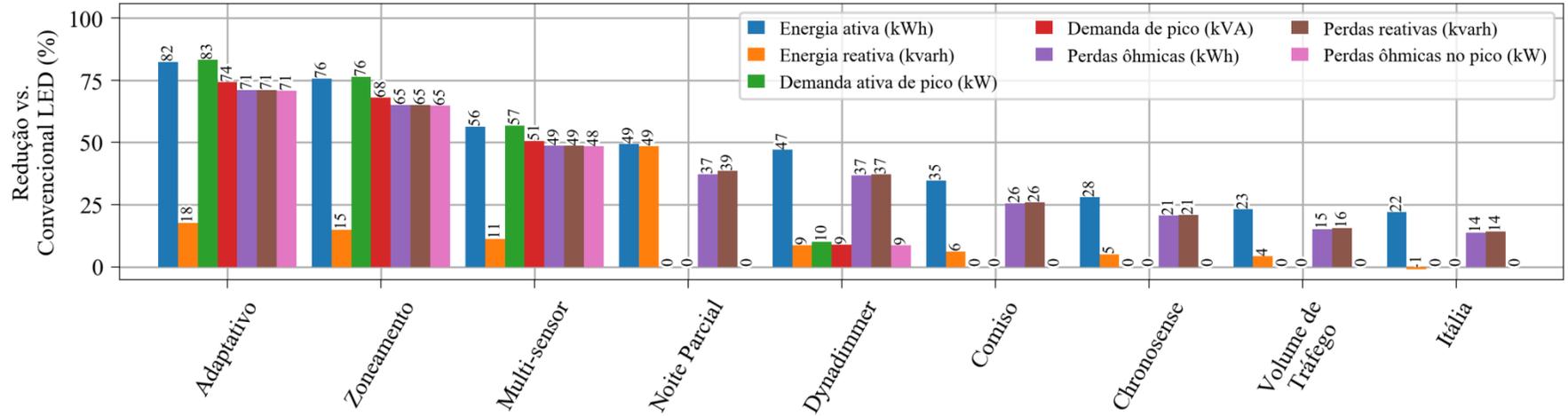


Figura 4.14 – Redução percentual dos diversos valores medidos frente ao caso Convencional com IP LED.

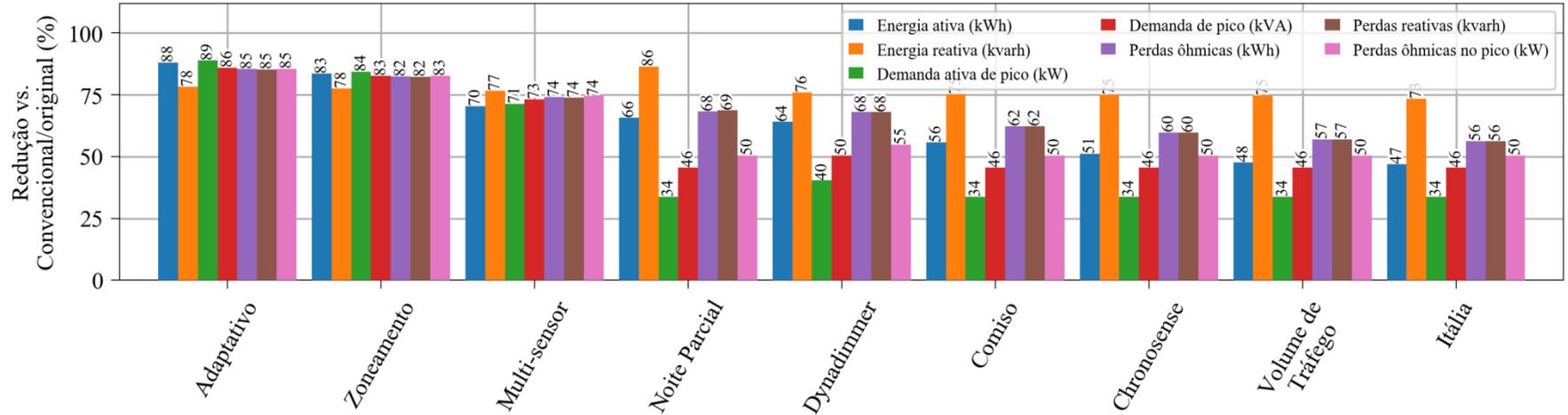


Figura 4.15 – Redução percentual dos diversos valores medidos frente ao caso Convencional com IP original de vapores metálicos.

Na Figura 4.14, tem-se que a economia proporcionada por cada curva de carga em relação à curva convencional utilizando as luminárias LED. É possível observar que muitos parâmetros medidos em relação ao pico são nulos ou com valores muito pequenos. Isso porque, como dito anteriormente, foi estabelecido que mesmo as curvas estáticas acompanhariam a projeção típica de tráfego que, por sua vez, possui picos coincidentes aos picos de carga do sistema elétrico. Observa-se que entre as curvas baseadas em controle em tempo real, reduções significativas em diversos parâmetros foram obtidas, com reduções mínimas de energia ativa de 56 %, de 11 % no consumo de energia reativa e de 49 % nas perdas ativas e reativas. O método Adaptativo obteve melhor desempenho entre todos os métodos, com redução de 82 % do consumo de energia ativa, 15 % no consumo de energia reativa, 71 % de redução em perdas ôhmicas e reativas. Como indicado anteriormente, devido à forma como foram modeladas as curvas baseadas em controle em tempo real, os valores de pico obtidos podem não se aproximar da realidade e por isso, não serão considerados nesta análise.

Em relação às curvas baseadas em controle estático e através de modelos preditivos, os resultados apontam que a curva Noite Parcial apresenta as maiores economias de energias ativa e reativa, com reduções de 49 % para os dois parâmetros. Este resultado era esperado devido ao fato da inexistência de consumo após às 0h, levando a reduções de aproximadamente 50 % em seus resultados. Foram obtidas ainda reduções de 37 % e 39 % nas perdas ôhmicas e reativas, respectivamente. A curva Dynadimmer também apresentou reduções significativas: 47 % no consumo de energia ativa, 9 % no consumo de energia reativa e 37 % nas perdas ativa e reativa. Dynadimmer, entre as curvas baseadas em controle estático e preditivo, foi a única a apresentar reduções nos parâmetros de pico relevantes: 10 % na demanda ativa de pico, 9 % na demanda de pico e 9 % nas perdas de pico. Para as outras curvas, os valores de redução nas perdas ativas e reativas variaram entre 14 % e 26 %, entre 35 % e 22 % para consumo de energia ativa e entre 1 % e 6 % para o consumo de energia reativa. Os resultados demonstram que, mesmo em um sistema com tecnologia econômica, como a tecnologia LED, o controle inteligente de IP pode levar a reduções de consumo expressivas, além de reduções em outros parâmetros da rede.

Já na Figura 4.15, a redução percentual de cada uma das grandezas para cada curva de carga em relação à curva de carga convencional com luminárias de vapores metálicos é apresentada. Percebe-se que todos os métodos proporcionam redução de energia ativa consumida entre 47 % e 88 %, e entre 56 % e 85 % nos valores de perdas ôhmicas e

reativas. Entre as curvas baseadas em controle estático e controle através de métodos preditivos, a curva de carga Noite Parcial gera a maior economia de energia ativa e reativa, seguida da curva Dynadimmer. Com relação às perdas ôhmicas e reativas, ambas as curvas levaram à redução de quase 70 % nestes dois parâmetros. Já para as curvas baseadas em método de controle em tempo real, a curva de carga Adaptativo teve o melhor desempenho, seguido de perto pela curva Zoneamento. As curvas baseadas em controle em tempo real apresentam reduções entre 88 % e 70 % no consumo de energia ativa, 77 % no consumo de energia reativa e 74 % nas perdas ativas e reativas, evidenciando economias significativas em relação a um sistema com as atuais luminárias e curva de carga convencional.

A curva de carga Noite Parcial gera mais reduções no consumo de energia ativa e reativa, mas deve ser observado que sua aplicação é bastante restrita devido ao fato de que, por questões de segurança, seria inviável desligar o sistema de IP durante metade do período noturno. Em regiões de baixa densidade populacional, este método pode ser uma alternativa interessante para economizar energia. A curva de carga Dynadimmer, por sua vez, demonstra-se bastante viável, com alguns valores de redução obtidos semelhantes aos obtidos com a curva de carga Noite Parcial, e com iluminação para todo período noturno. Deve-se atentar, entretanto, para o fato de que, no Brasil, a norma que regula este setor, ABNT NBR 5101 não prevê regras para casos em que há possibilidade de controlar o fluxo luminoso. Devido a isso, as reduções no fluxo luminoso da luminária ainda assim devem atender os critérios mínimos estabelecidos pela norma, o que pode limitar a redução do fluxo luminoso total e conseqüentemente as reduções nos parâmetro da rede.

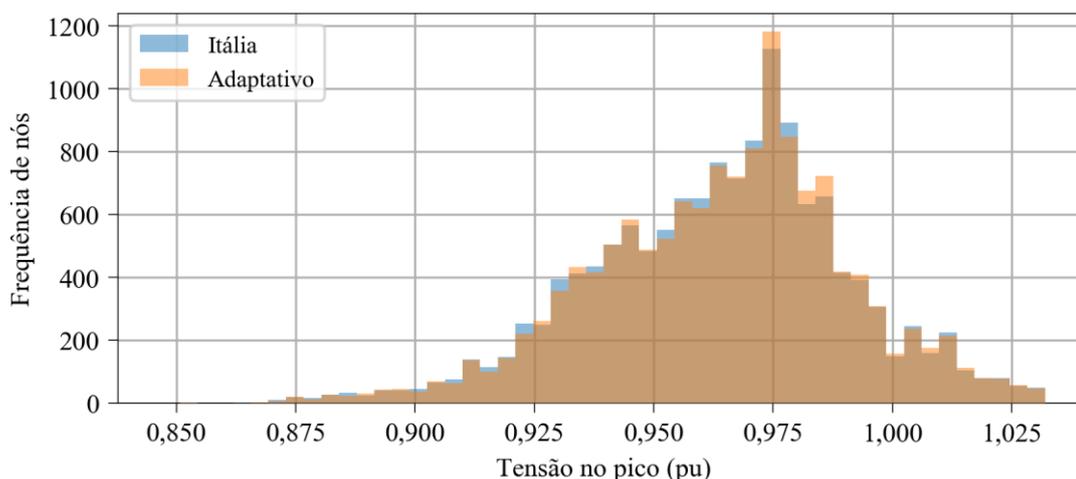
As curvas de carga baseadas em métodos de controle estático e em modelos preditivos foram concebidas levando-se em consideração um perfil de volume de tráfego ao longo do dia, como o mostrado na Figura 2.44, onde há um fluxo alto de tráfego nas primeiras horas do período noturno. Este fluxo alto leva a maiores níveis de dimerização das luminárias. Exatamente por isso, percebe-se que não há uma diminuição nos valores de demandas de pico e perdas de pico. Essa redução, entretanto, poderia ocorrer em regiões em que o volume de tráfego é menor ou que possuam outro perfil de tráfego, permitindo diminuir o nível de dimerização do sistema de IP.

#### **4.3.1 Efeitos nas tensões do sistema**

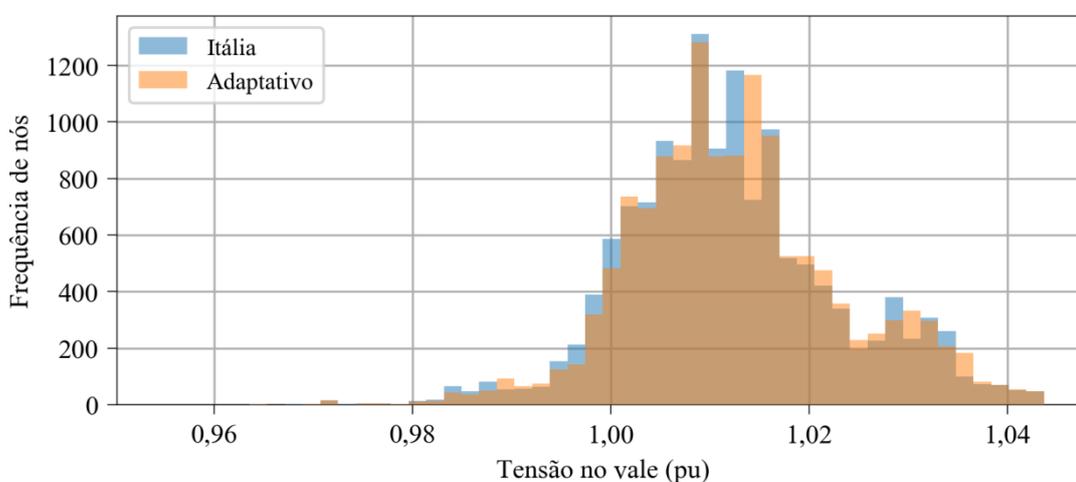
Como já explorado na seção 4.1, especialmente como mostrado na Figura 4.4, o impacto das cargas de IP nas tensões do sistema é baixo. Como consequência, a alteração de

modo de controle também tem efeitos limitados à mesma ordem de grandeza, especialmente considerando que a carga total de IP é reduzida ao substituir as luminárias de vapores metálicos por LEDs. Para exemplificar o impacto geral, foram selecionados os casos Adaptativo e Itália, que representam os dois extremos da Figura 4.14, e selecionou-se dois momentos do dia simulado para comparação, o pico e o vale de demanda, que por sua vez representam os extremos de carregamento do alimentador.

Na Figura 4.16, os histogramas das tensões no pico de demanda para os casos Adaptativo e Itália estão reproduzidos. A forma geral é a mesma para ambos os casos e nota-se que uma pequena parcela de nós apresenta tensão um pouco mais alta para o caso Adaptativo, o que é esperado visto que, como modelada neste trabalho, a curva do método Adaptativo apresenta valores de carga de IP baixos, inclusive no pico.



**Figura 4.16 – Histogramas sobrepostos das tensões no pico de demanda para os casos Itália e Adaptativo.**



**Figura 4.17 – Histogramas sobrepostos das tensões no vale de demanda para os casos Itália e Adaptativo.**

Já na Figura 4.17, apresentam-se os histogramas das tensões no vale de demanda para os dois casos. Novamente, a forma geral é a mesma para ambos os casos, porém observa-se um número maior de nós com tensão mais alta para o caso Adaptativo. Isso se deve ao fato de, no vale, a participação da carga de IP ser bem maior que no pico. Mesmo assim, a amplitude de variação de tensão devido aos diferentes controles de dimerização não é significativa.

#### 4.4 Síntese dos resultados

Através da simulação do fluxo de potência na rede de distribuição introduzida no Capítulo 3, foi possível observar os efeitos da estrutura de iluminação pública no sistema elétrico em diversos cenários.

Para o cenário atual, obteve-se que as cargas de IP representam 1,6 % do consumo total de energia ativa, 2,35 % da demanda no horário de pico, 2,46 % do consumo no horário de ponta, 3,14 % do total de energia consumida no período noturno, 1,63 % do consumo de energia reativa, 2,28 % da demanda de pico total, 2,73 % das perdas ôhmicas, 2,69 % das perdas reativas e 4,02 % das perdas ôhmicas no pico. O impacto no desequilíbrio de tensão e magnitudes de tensões no pico não foi considerado significativo.

A substituição por luminárias LED resultou em uma redução de 32 % no consumo de energia ativa, 73 % no consumo de energia reativa, 49 % em perdas ôhmicas e reativas, comparado às cargas de IP do sistema original. Com relação às cargas totais do sistema, a adoção de luminárias LED ocasionou: redução de 1,70 % para 1,15 % no consumo de energia ativa; redução de 2,38 % para 1,58 % na demanda ativa de pico; redução de 2,94 % para 1,6 % na demanda de pico total; redução de 3,92 % para 1,99 % nas perdas ôhmicas; redução de 3,84 % para 1,96 % nas perdas reativas; redução de 5,79 % para 2,87 % nas perdas ôhmicas de pico.

Através da simulação das diferentes propostas de métodos de controle da dimerização, obteve-se os seguintes resultados na comparação entre desempenho do sistema com luminárias LED e a implementação de métodos de controle: para curvas de carga baseadas em controle em tempo real, houve reduções mínimas de 56 % no consumo de energia reativa, 49 % em perdas ativas e reativas. Para curvas de carga baseadas em controle estático e através de modelos preditivos, obteve-se que a curva Noite Parcial apresentava as

maiores reduções: 49 % no consumo de energia ativa e reativa, 37 % nas perdas ôhmicas e 39 % nas perdas reativas. A curva Dynadimmer apresentou a segunda menor redução: 47 % no consumo de energia ativa, 9 % no consumo de energia reativa, 37 % nas perdas ativa e reativa, 10 % na demanda ativa de pico, 9 % na demanda de pico e 9 % nas perdas de pico. As outras curvas baseadas em controle estático e através de modelos preditivos apresentaram reduções nas perdas ativas e reativas entre 14 % e 26 %, entre 22 % e 35 % no consumo de energia ativa e entre 1 % e 6 % no consumo de energia reativa .

Na comparação entre um sistema de IP inteligente com luminárias LED e o sistema com as atuais luminárias, obteve-se reduções mínimas de 47 % no consumo de energia ativa, 56 % nas perdas ôhmicas e reativas para as curvas de carga baseadas em controle estático e preditivo. Para as curvas de carga baseadas em controle em tempo real, reduções de 70 % a 88 % no consumo de energia e de 74 % a 85 % nas perdas reativas e ativas foram obtidas.

Com relação à influência das curvas de controle inteligente nas tensões de pico e vale das curvas de carga, obteve-se que as mesmas não influem significativamente nestes parâmetros.

Apesar de as cargas de IP representarem parcela relativamente pequena da carga total do sistema, em redes em que a Iluminação Pública represente uma fração maior da carga, a economia proporcionada pela modernização com luminárias LED e aplicação de métodos de controle inteligente poderá gerar impactos mais expressivos nesta rede.

# CAPÍTULO 5:

## CONCLUSÕES

Com o surgimento de novas tecnologias, novas perspectivas se tornam possíveis no gerenciamento de energia, permitindo diminuição de gastos e ganho de eficiência. No atual panorama de iluminação pública, a tecnologia LED assume esse papel, apresentando múltiplas possibilidades, oportunidades e abordagens e com potencial de causar impactos nos sistemas elétricos de iluminação e também aos usuários. Visando mensurar esses impactos, a rede elétrica de distribuição do alimentador BGE-09, localizado em Barão Geraldo, foi utilizada para simulação de vários cenários.

Primeiramente, as características do sistema de IP estudado foram levantadas: o alimentador BGE-09 é responsável por um sistema com 1134 luminárias, em que a grande maioria das lâmpadas são de Vapor de Sódio de Alta Pressão, com potência de 100 W, luminárias.

Para a realização das simulações, três cenários foram estabelecidos. No primeiro cenário, denominado “Cenário Atual”, o objetivo das simulações foi primeiramente obter os impactos que as cargas de IP possuem no sistema atual. As simulações realizadas permitiram concluir as cargas de IP representam 1,65 % do consumo de energia ativa, 2,35 % da demanda de energia no pico, 2,46 % da energia consumida no horário de pico, 3,14 % da energia consumida no período noturno e responsável por 4,02 % das perdas ôhmicas no pico. Foram observados ainda os impactos dessas cargas no desequilíbrio de tensão e nas tensões ao longo da rede. Concluiu-se que a iluminação pública não impacta significativamente no desequilíbrio e na tensão no pico de demanda do sistema.

No segundo cenário, a substituição por luminárias LED foi analisada. Em relação ao atual sistema de IP, com luminárias de vapores metálicos, obteve-se reduções de 32 % no consumo de energia ativa, de 73 % no consumo de energia reativa, de 49 % nas perdas ôhmicas e reativas. A substituição proporcionou ainda, desta vez em relação ao sistema total, reduções de 1,70 % para 1,15 % no consumo total de energia reativa, 6,43 % para 1,70 % no consumo total de energia reativa. Reduções de 3,84 % para 1,96 % e de 5,79 % para 2,87 % foram obtidas para perdas reativas e perdas ôhmicas no pico, respectivamente.

O terceiro cenário simulado aplicou curvas de carga baseadas em controle inteligente. Para as curvas de carga com controle em tempo real, a curva Adaptativo obteve melhor desempenho, apresentando economia de 82 % de energia ativa, 18 % de energia reativa e 71 % de perdas ôhmicas e reativas ao comparar o sistema de IP inteligente com luminárias LED. Obteve-se ainda entre todas as curvas baseadas em controle em tempo real, reduções mínimas de 56 % no consumo de energia ativa, 11 % no consumo de energia reativa e 49 % nas perdas de energia ativa e reativa. Para as curvas de carga com controle estático e através de modelos preditivos, as curvas Noite Parcial e Dynadimmer obtiveram os melhores resultados quanto à redução de energia ativa e reativa: em Noite Parcial, a redução foi de 49 % para os dois parâmetros, enquanto para Dynadimmer, as reduções foram de 47 % e 9 %, respectivamente. A curva Dynadimmer obteve maiores reduções nos parâmetros de pico: 10 % na demanda ativa de pico, 9 % na demanda de pico e 9 % nas perdas ôhmicas de pico.

Na comparação entre o sistema com luminárias originais e aplicação de controle inteligente, foram obtidas reduções mínimas de 47 % no consumo de energia ativa e 56 % nas perdas ôhmicas e reativas para as curvas de carga baseadas em controle estático e através de modelos preditivos. Para as curvas de carga baseadas em controle em tempo real, foram obtidas reduções entre 70 % e 88 % no consumo de energia ativa e em torno de 77 % no consumo de energia reativa.

Os resultados obtidos indicam ainda desempenho superior do sistema de IP com tecnologia LED e controle inteligente em relação ao sistema de IP convencional, reduzindo consumo de energias ativa e reativa, demanda no pico, perdas, entre outros parâmetros. Ao se implementar conjuntamente técnicas de controle inteligente, as reduções aumentam significativamente de acordo com o método utilizado.

## 5.1 Trabalhos futuros

Para pesquisas futuras, vê-se potencial de estudo e aprofundamento nos seguintes itens:

- Simulação mais detalhada:
  - Em modelo de agentes para pedestres e veículos, utilizando dados de fluxo de carga reais em softwares de simulação de tráfego;
  - Na avaliação com curvas de radiação solar reais, incluindo efeito de nuvens, entre outros;
- Avaliação de poluição luminosa;
- Estudo dos impactos da tecnologia LED na rede de distribuição através da análise de componentes harmônicos;
- Replicação dos estudos para uma grande quantidade de redes visando maior abrangência e confiabilidade dos resultados;
- Implantação de projeto piloto para teste das técnicas de gestão em campo.

## 5.2 Publicação dos resultados

- Avaliação dos impactos da Iluminação Pública em uma Rede de Distribuição Real, Lia Farias Pinto, Luiz Carlos Pereira da Silva, Paulo César Magalhães Meira, Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), Porto Alegre, 2017.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Balanço Energético Nacional, “BEN (Ano Base 2014),” 2015. [Online]. Available: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf). [Acesso em 12 06 2016].
- [2] C. Dantas e F. K. Junior, “Iluminação Pública e Eficiência Energética,” 2015. [Online]. Available: [www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/1766-iluminacao-publica-e-eficiencia-energetica.html](http://www.osetoreletrico.com.br/web/a-revista/edicoes/1766-iluminacao-publica-e-eficiencia-energetica.html).
- [3] R. Barbosa, “A Gestão e o Uso eficiente da Energia Elétrica nos Sistemas de Iluminação Pública,” *Universidade de São Paulo (USP)*, 2000.
- [4] C. R. B. Rodrigues, P. S. Almeida, G. M. Soares, J. M. Jorge, D. P. Pinto e H. A. C. Braga, “Um estudo comparativo de Sistemas de Iluminação Pública: Estado Sólido e Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão,” *Induscon*, 2010.
- [5] Eletrobrás, “Eletrobrás,” 2014. [Online]. Available: <http://www.eletrobras.com/elb/main.asp?TeamID={EB94AEA0-B206-43DE-8FBE-6D70F3C44E57}>. [Acesso em 13 07 2014].
- [6] L. L. F. Silva, “Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais,” 2006.
- [7] L. Mascaró, “Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS),” 2006. [Online]. Available: [http://www.ufrgs.br/propar/publicacoes/ARQtextos/PDFs\\_revista\\_8/8\\_Lucia%20Mascar%C3%B3.pdf](http://www.ufrgs.br/propar/publicacoes/ARQtextos/PDFs_revista_8/8_Lucia%20Mascar%C3%B3.pdf). [Acesso em 2017].
- [8] Procel, “Resultados Procel 2017 - Ano base 2016,” Procel, 2017.
- [9] A. A. Francisquini, “Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e em Transformadores de Distribuição. (Dissertação de Mestrado),” *Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"*, 2006.

- [10] A. F. Cabello e F. M. Pompermayer, “Energia Fotovoltaica ligada à Rede Elétrica: Atratividade para o Consumidor Final e Possíveis Impactos no Sistema Elétrico,” Brasília, 2013.
- [11] U.S. Department of Energy, “Solid-State Lighting Research and Development: Multi Year Program Plan,” 2012.
- [12] F. J. Nogueira, E. Silva, M. F. C. Campos, T. R. A. Carreira, L. H. Gouveia, C. G. Casagrande e H. A. C. Braga, “Projeto Piloto de Iluminação Pública empregando LEDs em substituição a Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão,” em *XX Congresso Brasileiro de Automática*, Belo Horizonte, Minas Gerais, 2014.
- [13] GE, “GE Lighting,” 2015. [Online]. Available: [www.gelighting.com](http://www.gelighting.com). [Acesso em 2017].
- [14] R. E. Ascurra, “Eficiência Elétrica em Iluminação Pública utilizando Tecnologia LED: Um Estudo de Caso,” *Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT)*, 2013.
- [15] Alper, “Alper,” Maio 2015. [Online]. Available: [www.alper.com.br/project/usp](http://www.alper.com.br/project/usp). [Acesso em 2017].
- [16] M. SIDNEI, “O novo sistema de iluminação pública dos campi da USP (apresentação),” 2013. [Online]. Available: <http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/eventos/seminarioportugalbrasil/apresentacoes/sidneimartini.pdf>. [Acesso em 2017].
- [17] R. Fehr, “Lighting Systems - Chapter 10,” Wiley - IEEE Press, 2016.
- [18] W. Goeking, “Lâmpadas e Leds,” 2009. [Online]. Available: <https://www.osetoreletrico.com.br/lampadas-e-leds/>. [Acesso em 2014].
- [19] J. M. Novicki e R. Martinez, “LEDs para Iluminação Pública,” *Universidade Federal do Paraná*, 2008.
- [20] Wikimedia, “Wikimedia,” 2008. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DIODO\\_CURVA.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:DIODO_CURVA.jpg). [Acesso em 2014].
- [21] J. Stocko, J. Lazzaretti e M. W. C. Santos, “Estudo de Caso Comparativo entre uma Luminária LED e uma Luminária convencional à Vapor de Sódio,” *Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)*, Curitiba, 2013.
- [22] F. J. Nogueira, “Avaliação Experimental de Luminárias empregando LEDs orientadas à Iluminação Pública (Dissertação de Mestrado),” *Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)*, 2013.
- [23] W. A. Rodrigues, L. M. F. Morais, P. F. Donoso-Garcia, P. C. Cortizo e S. I. JR Seleme, “Comparative Analysis of Power LEDs Dimming Methods,” *Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)*, 2011.

- [24] F. J. Nogueira, E. S. Silva, C. R. B. S. Rodrigues, M. F. C. Campos, D. P. Pinto e H. A. C. Braga, "Influência da Temperatura no Desempenho de Luminárias LED.," *Núcleo de Iluminação Moderna. Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF)*, 2012.
- [25] E. M. S. Junior, "Estudo de Estruturas de Reatores Eletrônicos para LEDs de Iluminação (Tese de Doutorado)," *Universidade Federal de Santa Catarina*, 2010.
- [26] W. RODRIGUES e L. MORAIS, "Análise Comparativa dos Métodos de Dimerização de LEDs de Potência. Capítulo IX," *Fascículo Iluminação, Edição 80*, Outubro 2012.
- [27] M. Dyble, N. Narendran, A. Bierman e T. Klein, "Impact of Dimming White LEDs: Chromaticity Shifts due to Different Dimming Methods," 2005. [Online].
- [28] S. C. Hsia e J. Ciou, "High power LED dimming driver with multi-level current for smart street lighting system," *Energy Efficient and Green Networking, IEEE*, 2013.
- [29] D. Camponogara, D. R. Vargas, M. A. D. Campos, T. B. Marchesan e J. M. Alonso, "Minimização de Capacitância em Luminárias a LED baseada na conexão otimizada de Conversores Estáticos," 2013.
- [30] C. Gobbato, G. W. Denardin e J. P. Lopes, "Comparison between stages connections of DC converters for street lighting system based on LED," *Power Electronics for Distribution, IEEE*, Abril 2017.
- [31] 1000 Bulbs, "Understanding LED Drivers," Maio 2014. [Online]. Available: [www.1000bulbs.com](http://www.1000bulbs.com). [Acesso em Novembro 2017].
- [32] M. Arias, D. G. Lamar, J. Sebastian, D. Balocco e A. A. Diallo, "High Efficiency LED Driver without electrolytic capacitor for Street Lighting," *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2013.
- [33] D. O. Wharmby, "Electrodeless lamp for lighting: a review.," *IEE Proceedings-A, Vol. 140. Nº 6*, Novembro 1993.
- [34] COPEL, "Manual de Iluminação Pública," 2012. [Online]. [Acesso em Fevereiro 2017].
- [35] Ministério de Minas e Energia, "Portaria Interministerial número 959," 9 dezembro 2010. [Online].
- [36] H. V. D. Broeck, G. Sauerländer e M. Wendt, "Power driver topologies and control schemes for LEDs.," *Cologne University of Applied Sciences, Faculty IME. Philips Research Europe Laboratories.*, 2007.
- [37] A. K. Fayaz, C. Karimi e D. Sadarnac, "A new, simple, "universal", Low Cost LED Driver and Controller," *SUPELEC - Systems Sciences. IEEE Electrical Power and Energy Conference*, 2012.
- [38] A. A. A. Souza, R. P. Costa, C. C. B. Oliveira, J. M. J. Junior e L. M. Sobrinho, "Estudo da viabilidade econômica na substituição de Relés Eletromecânicos por Relés Eletrônicos no Sistema de Iluminação

- Pública,” *Companhia Paranaense de Energia Elétrica (COPEL). Universidade Estadual de São Paulo (USP)*, 2010.
- [39] ABNT, “ABNT NBR 5123 - Relé fotocontrolador intercambiável e tomada para iluminação - Especificação e ensaios,” *Associação Brasileira de Normas Técnicas ABNT*, p. 38, 2016.
- [40] M. V. Lomelino, “Estudo do impacto de desempenho de relés fotocontroladores sobre o consumo da iluminação pública,” *Universidade Federal de Itajubá*, 2016.
- [41] A. M. Theisen, “Avaliação de sistema de iluminação pública do Procel Reluz.,” 2013.
- [42] CPFL Energia, “Iluminação Pública - Braços Médio e Longo. Padrão Técnico. Distribuição,” 2009.
- [43] CPFL Energia, “Iluminação Pública - Braço Viela. Padrão Técnico Distribuição.,” 2007.
- [44] CPFL Energia, “Iluminação Pública - Braço Curto. Padrão Técnico. Distribuição.,” 2009.
- [45] V. Albino, U. Berardi e R. M. Dangelico, “Smart Cities: Definitions, Dimensions, Performance and Initiatives,” *Journal of Urban Technology*, 2015.
- [46] C. Harrison, B. Eckman, R. Hamilton, P. Hartswick, J. Kalagnanam, J. Paraszczack e P. Williams, “Foundations for Smarter Cities,” *IBM Journal of Research and Development*, pp. 1-16, 2010.
- [47] I. Chew, D. Karunatilaka, C. P. Tan e V. Kalavally, “Smart lighting: The way forward? Reviewing the past to shape the future,” *Energy and Buildings, Elsevier*, 2017.
- [48] M. Shahidehpour, C. Bartucci, N. Patel, T. Hulsebosch, P. Burgess e N. Buch, “Streetlights are getting smarter: Integrating an Intelligent Communications and control system to the current infrastructure,” *IEEE power & energy magazine*, pp. 67-80, Maio 2015.
- [49] A. Farahat, A. Florea, J. L. M. Lastra, C. Brañas e F. J. A. Sánchez, “Energy Efficiency Considerations for LED-based Lighting of Multipurpose Outdoor Environments,” *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2014.
- [50] F. Moretti, M. Annunziato e S. Pizzuti, “Smart street lighting management,” *University RomaTre, Automation and Computer Science Department*, Agosto 2013.
- [51] Philips, “Philips outdoor lighting control solutions. Intelligent control and management of outdoor lighting,” 2012.
- [52] M. Beccali, M. Bonomolo, G. Ciulla, A. Galatiolo e V. Lo Brano, “Improvement of Energy Efficiency and Quality of Street lighting in South Italy as an action of Sustainable Energy Action Plans. The case study of Comiso (RG).,” *Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems.*, December 2015.

- [53] Somerset County Council, "Somerset County Council: Reduction of Street Lighting in Somerset," 2011. [Online]. Available: <http://www.somerset.gov.uk/policies-and-plans/schemes-and-initiatives/reduction-of-street-lighting-in-somerset/>. [Acesso em 2017].
- [54] C. L. Castro, A. Braga e A. Andrade, "Aplicação de um Método Ensemble de Redes Neurais Artificiais para Previsão de Séries Temporais não Estacionárias.," *Centro Universitário de Belo Horizonte (Uni-BH); Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)*, 2016.
- [55] J. F. D. Paz, J. Bajo, S. Rodríguez, G. Viillarrubia e J. M. Corchacho, "Intelligent system for lighting control in smart cities," *Information Sciences, volume 372. Elsevier*, pp. 241-255, 2016.
- [56] Ministry of Works and Transport, "Traffic Data Collection and Analysis," 2004.
- [57] W. A. M. Weijermars e E. C. Van Berkum, "Daily flow profiles of urban traffic," Wit Press, 2004.
- [58] S. P. Lau, G. V. Merrett e N. M. White, "Energy-Efficient Street Lighting through Embedded Adaptive Intelligence," *IEEE*, 2013.
- [59] TU Delf, "TU Delf," 11 julho 2011. [Online]. Available: [www.tudelft.nl/en/current/latest-news/article/detail/intelligente-straatverlichting-tu-delft-bespaart-tot-80-energie/](http://www.tudelft.nl/en/current/latest-news/article/detail/intelligente-straatverlichting-tu-delft-bespaart-tot-80-energie/). [Acesso em 2017].
- [60] Tvilight, "Tvilight, Empowering Intelligence.," 2017. [Online]. Available: [www.tvilight.com](http://www.tvilight.com). [Acesso em 2017].
- [61] H. Attia, A. Omar e M. Takruri, "Design of decentralizes street LED light dimming system," *Electronic Devices, Systems and Applications (ICEDSA), IEEE.*, 2016.
- [62] M. Pipattanasomporn, S. Rahman, I. Flory e Y. Teklu, "Engineering design and assessment of a demand-sensitive LED streetlighting system," *Sustainable Energy Technologies and Assessments. Volume 7. Elsevier.*, pp. 136-146, 2014.
- [63] V. K. Bhangdiya, "Low power consumption of LED street light based on smart control system," *Global Trends in Signal Processing, Information Computing and Communication, IEEE*, 2016.
- [64] R. Mullner e A. Riener, "An energy efficient pedestrian aware Smart Street Lighting System," *International Journal of Pervasive Computing and Communications*, pp. 147-161, 2011.
- [65] F. Leccese, "Remote-Control System of High Efficiency and Intelligent Street Lighting using a Zigbee Network of Devices and Sensors," *IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 28*, pp. 21-28, Janeiro 2013.
- [66] J. Sun, J. Su, G. Zhang, Y. Li e C. Zhao, "An energy-saving control method based on multi-sensor system for solar street lamp," *2010 International Conference on Digital Manufacturing & Automation*, pp. 192-

- 194, 2010.
- [67] A. Haans e Y. A. W. Kort, “Light distribution in dynamic street lighting: two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment and escape”,” *Journal of Environmental Psychology*, pp. 342-352, 2012.
- [68] A. Mayeur, R. Brémond e J. M. C. Bastien, “Effects of the viewing context on target detection. Implications for road lighting design,” *Applied Ergonomics*, volume 41, number 3, pp. 461-468, 2010.
- [69] IBGE, “Sinopse do Censo Demográfico 2010,” 2011. [Online]. Available: [https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse/sinopse\\_tab\\_rm\\_zip.shtm](https://ww2.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/censo2010/sinopse/sinopse_tab_rm_zip.shtm).
- [70] Prefeitura de Campinas, “Região Norte: Subprefeitura de Barão Geraldo,” 2017. [Online]. Available: <http://www.campinas.sp.gov.br/governo/servicos-publicos/regioes/norte/bairros.php>. [Acesso em 2017].
- [71] CPFL Energia, “CPFL Energia,” 2017. [Online]. Available: [www.cpfl.com.br/institucional](http://www.cpfl.com.br/institucional). [Acesso em 12 Fevereiro 2017].
- [72] “OpenStreetMap,” 09 2017. [Online]. Available: <https://www.openstreetmap.org/#map=15/-22.8265/-47.0839>.
- [73] QGIS Development Team, “QGIS,” 2017. [Online]. Available: <https://www.qgis.org/>.
- [74] A. Furiéri, “VirtualKNN: a quick intro,” 2015. [Online]. Available: <https://www.gaia-gis.it/fossil/libspatialite/info/eb42d6f232949205>.
- [75] F. R. Martins, E. B. Pereira e K. Longo, “Níveis de Iluminância no Céu no Alvorecer e no Ocaso,” em *XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia*, Fortaleza, 2004.
- [76] P. K. Seidelman, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac.*, University Science Books, 1992.
- [77] Sun Earth Tools, “Sun Earth Tolls,” 2017. [Online]. Available: [www.sunearthtools.com](http://www.sunearthtools.com). [Acesso em novembro 2017].
- [78] R. C. Dugan e T. E. McDermott, “An open source platform for collaborating on smart grid research,” *Power and Energy Society General Meeting. IEEE.*, 2011.
- [79] I. O. Barouche, “Análise Comparativa e Proposições de Metodologias de Cálculo de Perdas Técnicas,” Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2017.
- [80] P. Meira, “Python bindings and misc tools for OpenDSS (EPRI Distribution System Simulator). Based on CFFI and dss\_capi, aiming for full COM compatibility on Windows and Linux.,” 2017. [Online]. Available: [https://github.com/PMeira/dss\\_python](https://github.com/PMeira/dss_python).

- [81] Procel, “Selo Procel. Lâmpadas a Vapor de Sódio. Atualizado no dia 02 de agosto de 2017,” 2017.
- [82] K. Hatipoglu, I. Fidan e G. Radman, “Investigating effect of voltage changes on static ZIP load model in a microgrid enviroment,” *North American Power Symposium*, 2012.
- [83] A. Bokhari, A. Alkan, R. Dogan, M. Diaz-aguiló, F. León, D. Czarkowski, Z. Zabar, L. Birenbaum, A. Noel e R. E. Uosef, “Experimental Determination of ZIP Coefficients for Modern Residential, Commercial, and Industrial Loads,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2014.
- [84] S. C. Santos, T. G. Almeida, M. C. L. Pereira, L. Araujo e D. R. R. P. Araujo, “Análise do Impacto da Inserção de Capacitores no Desequilíbrio de Tensão em Sistemas de Distribuição,” em *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos*, 2016.
- [85] PRODIST, “Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST. Módulo 8 - Qualidade de Energia Elétrica,” 2016. [Online]. [Acesso em 19 fevereiro 2017].
- [86] R. McCluney, “Radiometry and Photometry.,” em *Encyclopedia of Physical Science and Technology (Terceira Edição)*, Academic Press, 2003, pp. 731-758.
- [87] L. B. Sotts, *Free Space Optical Systems Engineering: Design and Analysis* (Primeira Edição), John Wiley & Sons, Inc., 2017.
- [88] R. P. Teele, *Photometry and Brightness Measurements*, Washington, D. C.: Bureau of Standards, 1936.
- [89] Wikimedia, “Wikimedia,” 2013. [Online]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic\\_diagram\\_of\\_the\\_human\\_eye\\_horizontal\\_pt.svg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Schematic_diagram_of_the_human_eye_horizontal_pt.svg).
- [90] E. Hecht, *Optics* (Segunda Edição), Massachusetts: Addison Wesley, 1987.
- [91] Wuppertal, “Rods and Cones,” [Online]. Available: <http://hydrogen.physik.uni-wuppertal.de/hyperphysics/hyperphysics/hbase/vision/rodcone.html>.
- [92] J. D. Bullough e M. S. Rea, “Visual Performance under Mesopic Conditions,” 2004.
- [93] G. Wyszecki e W. S. Stiles, “Colour science: concepts and methods,” 1967.
- [94] J. Josefowicz e D. Ha, “Vision and Exterior Lighting: Shining some light on Scotopic and Photopic Lumens in Roadway Conditions,” 2008.
- [95] Solar Light Australia, “Solar Light Australia,” 2013. [Online]. Available: [www.solarlightaustralia.com.au/2013/05/30/photopic-scotopic-and-mesotopic-lumens/](http://www.solarlightaustralia.com.au/2013/05/30/photopic-scotopic-and-mesotopic-lumens/). [Acesso em 2014].
- [96] A. R. Pinto, “Sistemas Eletrônicos para Iluminação de Exteriores empregando Diodos Emissores de Luz (LEDs) alimentados pela Rede Elétrica e por Baterias (Tese de Doutorado),” Universidade Federal de

- Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2012.
- [97] C. C. Ferreira, “Desenvolvimento de Modelos Matemáticos para a Determinação da Disponibilidade de Luz Natural no Crepúsculo para a cidade de Belo Horizonte,” *Escola de Arquitetura da UFMG*, 2010.
- [98] S. J. Garrocho, “Luz Natural e Projeto de Arquitetura - Estratégias para Iluminação Zenital em Centros de Compras (Dissertação de mestrado),” 2005.
- [99] R. V. G. d. Souza e F. O. R. Pereira, “Primeira estação de medição de iluminação natural em território brasileiro: análise dos dados dos primeiros anos de funcionamento,” Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2004.
- [100] P. Seidelman, *Explanatory Supplement to the Astronomical Almanac. Second Edition*, University Science Books, 2006.
- [101] T. Munner, “Solar Radiation and Daylight Models. Second edition.,” Great Britain: Elsevier, 2004.
- [102] Osram, “Manual Luminotécnico Prático,” [Online]. Available: [www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/ManualOsram.pdf](http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/ld/Livros/ManualOsram.pdf).
- [103] W. Rodrigues e L. Morais, “Análise Comparativa dos Métodos de Dimerização de LEDs de Potência. Capítulo IX,” *Fascículo Iluminação, Edição 80*, Outubro 2012.
- [104] Empalux, “Informações Luminotécnicas,” 2018. [Online]. Available: <http://www.empalux.com.br/?a1=1>. [Acesso em março 2018].
- [105] N. R. Prado, A. R. Seidel e R. A. Pinto, “Sistemas Eletrônicos para Iluminação,” 10th COBEP, Bonito (MS), 2009.
- [106] ABNT, “Associação Brasileira de Normas Técnicas,” 2014. [Online]. Available: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). [Acesso em 2017].
- [107] ABNT, “ABNT NBR 5101:2012 Iluminação Pública - Procedimento,” ABNT, 2012.
- [108] ABNT, “ABNT NBR 5181:2013 Sistemas de Iluminação de Túneis - Requisitos,” ABNT, 2013.
- [109] IES, “Illuminating Engineering Society (IES),” 2017. [Online]. Available: <http://www.ies.org/store/recommended-practices-and-ansi-standards/roadway-lighting>.
- [110] “ANEEL,” 02 12 2014. [Online]. Available: [http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output\\_Noticias.cfm?Identidade=8276&id\\_area=90](http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=8276&id_area=90). [Acesso em 2017].

- [111] Procel, “PROCEL,” 2014. [Online]. Available: [www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2014/lei.pdf](http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2014/lei.pdf). [Acesso em 25 11 2017].
- [112] SAGE, “Diferença entre etiqueta ENCE, Selo PROCEL e Selo CONPET,” 2016. [Online]. Available: <http://www.e-sage.com.br/diferenca-entre-etiqueta-ence-selo-procel-e-selo-conpet/>. [Acesso em 2017].
- [113] Eletrobrás, “Eletrobrás,” 2017. [Online]. Available: [www.eletrobras.com/](http://www.eletrobras.com/).
- [114] ABNT, “Associação Brasileira de Normas Técnicas,” [Online]. Available: [www.abnt.org.br](http://www.abnt.org.br). [Acesso em 2017].
- [115] CIE, “Commission Internationale de l'Eclairage (CIE),” [Online]. Available: [www.cie.co.at/index.php?i\\_ca\\_id=780](http://www.cie.co.at/index.php?i_ca_id=780). [Acesso em 2017].
- [116] Illuminating Engineering Society of North America, “ANSI/IESNA RP-8,” 1999.
- [117] Laboratório de Iluminação, “Laboratório de Iluminação na Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP),” [Online]. Available: [www.iar.unicamp.br/lab/luz/dicasemail/led/dica36.htm](http://www.iar.unicamp.br/lab/luz/dicasemail/led/dica36.htm). [Acesso em 2014].
- [118] CPFL Energia, “Norma Técnica GED-3670. Projeto - Iluminação Pública,” [Online]. Available: [sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-3670.pdf](http://sites.cpfl.com.br/documentos-tecnicos/GED-3670.pdf). [Acesso em Fevereiro 2017].
- [119] M. Sidnei, “O novo sistema de iluminação pública dos campi da USP (apresentação),” 2013. [Online]. Available: <http://www.nuca.ie.ufrj.br/gesel/eventos/seminarioportugalbrasil/apresentacoes/sidneimartini.pdf>. [Acesso em 2017].
- [120] Testtech, “Análise de viabilidade e impactos da implementação de um Programa de Eficiência Energética para relés fotocontroladores,” 2012.

# APÊNDICE A:

## CONCEITOS BÁSICOS

Nesta seção, apresentam-se alguns conceitos básicos de fotometria que auxiliarão na compreensão dos próximos tópicos.

De acordo com [86], a radiometria é definida como “um sistema de linguagem, formulações matemáticas e metodologias instrumentais para descrever e medir a propagação da radiação pelo espaço e materiais.” A radiometria e a fotometria, são áreas da ótica e podem ser definidas como técnicas de medição de radiação eletromagnética, incluindo a faixa de luz visível. É possível afirmar que as faixas de radiação estudadas dentro da radiometria costumam estar dentro das regiões de radiação ultravioleta, visível e infravermelho, mas seus princípios se aplicam também a outras partes do espectro eletromagnético, bem como radiação composta de partículas, desde que suas trajetórias obedeçam às leis da ótica geométrica. Enquanto a radiometria se ocupa da radiação eletromagnética em todas as faixas do espectro, buscando caracterizar a distribuição de potência e energia ótica no espaço, a fotometria trata apenas da radiação capaz de sensibilizar o olho humano, sendo uma subárea da radiometria. [86, 87]

Algumas das grandezas radiométricas fundamentais estão listadas na Tabela A.1.

Devido ao fato de a fotometria se focar somente na faixa da radiação visível capaz de produzir a sensação de visão, o entendimento básico do olho humano é de fundamental importância para entender alguns dos principais conceitos presentes nessa área da ótica. Em seguida, alguns conceitos de fotometria serão apresentados.

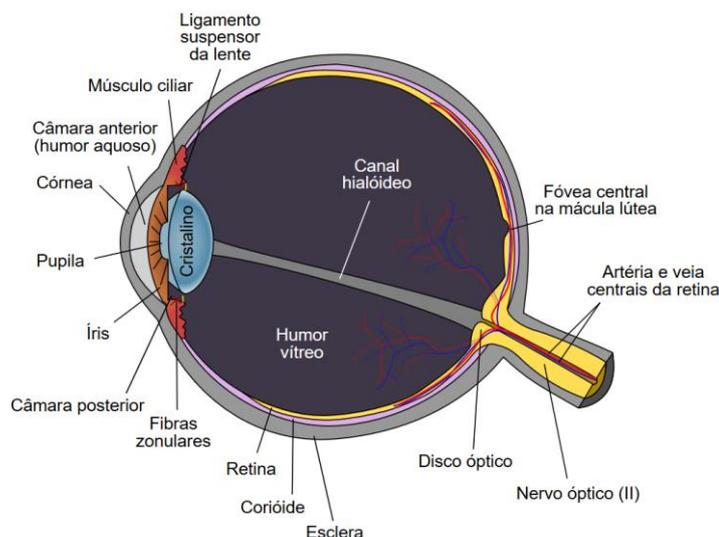
**Tabela A.1 – Lista de grandezas radiométricas fundamentais [86, 87]**

Grandeza	Definição	Unidade
Energia Radiante	Energia transportada por qualquer campo eletromagnético	joule (J)
Fluxo Radiante	Energia radiante por unidade de tempo pelo espaço, também chamada de Potência Radiante.	watt (W)
Intensidade Radiante	Fluxo radiante emitido por uma fonte pontual por unidade de ângulo sólido.	watt por esterradiano (W/sr)
Irradiância	Fluxo radiante emitido de uma fonte estendida por unidade de área alcançada.	watt por metro quadrado (W/m <sup>2</sup> )
Radiância	Fluxo radiante emitido de uma fonte estendida por unidade de área alcançada.	watt por esterradiano por metro quadrado (W/sr m <sup>2</sup> )

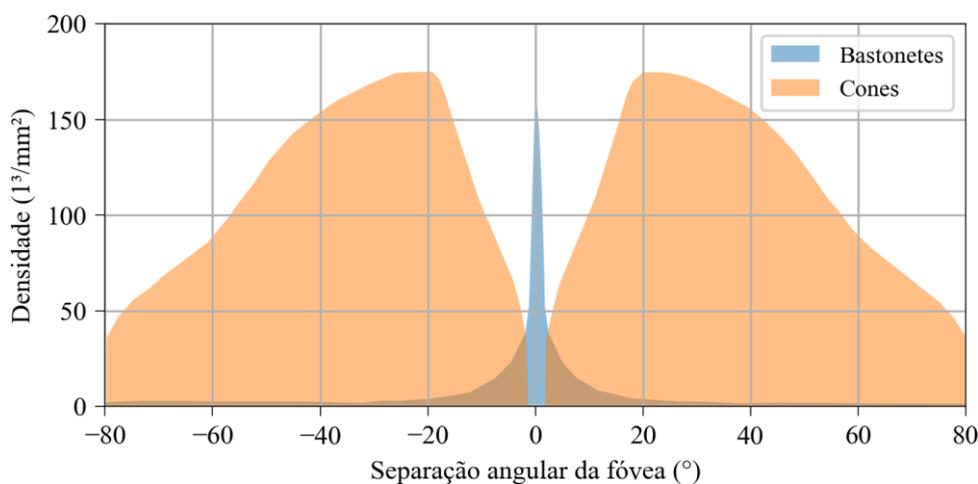
## A.1 Olho humano

Com aproximadamente 23 milímetros de diâmetro e formato elipsoidal, o olho é envolvido em uma camada de pele exterior resistente e opaca à luz, denominada esclera. Sob a esclera, encontra-se a coróide, composta basicamente de vasos sanguíneos e nervos. Em sua parte frontal, a esclera é substituída pela córnea, uma lâmina cartilaginosa e transparente. Logo abaixo está íris, que funciona como um obturador, controlando a exposição do interior do olho à luz. A retina, localizada na parte mais interna, é um revestimento do interior do olho com fibras nervosas que se espalham desde o nervo ótico. Três meios transparentes preenchem o interior do olho: humor aquoso, que ocupa o espaço entre a córnea e o cristalino; cristalino, lente biconvexa situada atrás da íris; humor vítreo, substância gelatinosa que preenche o espaço entre o cristalino e a retina [88]. Os componentes do olho humano podem ser vistos na Figura A.1.

Composta basicamente por dois tipos de células, os cones e os bastonetes, a retina humana é a área responsável pela formação, retenção e transmissão das imagens através do nervo ótico. Através das células cones, localizadas na região central da retina, o olho humano é capaz de interpretar as cores. Já os bastonetes fornecem a capacidade de distinguir entre diversos níveis de iluminação, detectando, porém, somente tons de cinza. Os bastonetes ficam localizados na região periférica da retina [17]. Na Figura A.2, pode-se observar a densidade de cada célula ao longo da retina.



**Figura A.1 – Partes constituintes do olho humano [89].**



**Figura A.2 – Densidade de cones e bastonetes em torno da retina. Dados retirados de [90], [91]**

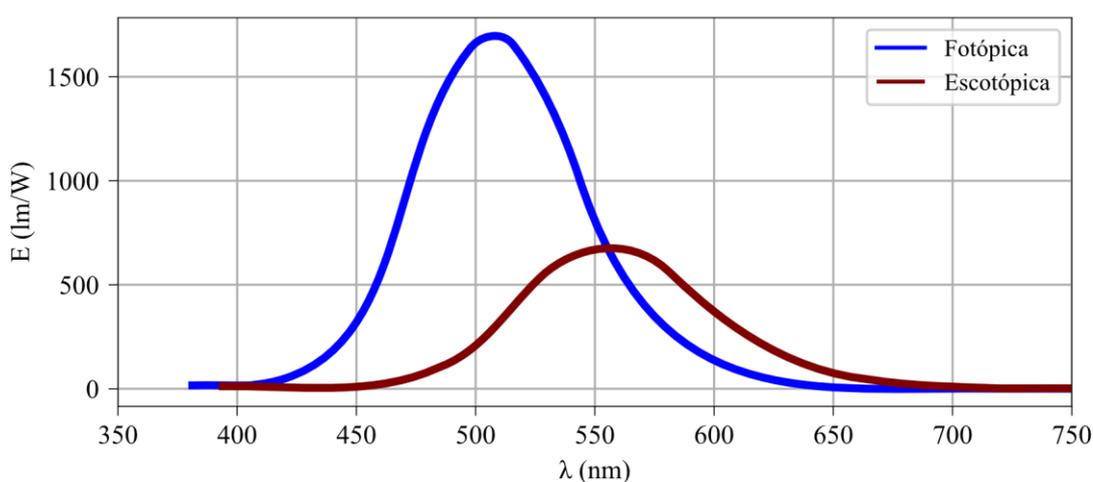
Em ambientes com grandes níveis de luminância (acima de  $3 \text{ cd/m}^2$ ), a pupila se contrai e a formação da imagem ocorre na região central da retina (fóvea), estimulando os cones. Esta situação relaciona-se com a condição fotópica [17]. Os cones são sensíveis aos comprimentos de onda que variam entre  $450 \text{ nm}$  e  $675 \text{ nm}$  (entre azul e vermelho) [92].

Ambientes com baixos níveis de luminância (abaixo de  $0,1 \text{ cd/m}^2$ ), por sua vez, levam à dilatação da pupila e aumentam, conseqüentemente, a área de formação da imagem, estimulando bastonetes. Esta situação relaciona-se com a condição escotópica [4, 17]. Os bastonetes são sensíveis aos comprimentos de onda que variam entre  $400 \text{ nm}$  e  $610 \text{ nm}$  (entre violeta e laranja) [90, 93]. Destaca-se que os bastonetes desempenham papel essencial na formação da imagem, já que são os níveis de luminância escotópica que determinam o

tamanho da pupila que, por sua vez, influencia na resolução da imagem, na visualização de pequenos detalhes e profundidade.

Entre as condições fotópica e escotópica, encontra-se a condição mesópica (entre  $0,1 \text{ cd/m}^2$  e  $3 \text{ cd/m}^2$ ), onde ambas as células, cones e bastonetes, contribuem para a formação das imagens. Para grande parte das aplicações para iluminação pública, recomenda-se que a referência de luminância seja a condição mesópica.

Sabe-se que objetos localizados na visão central da retina são melhor discernidos pelo olho humano independentemente das condições de luminância do ambiente exterior. [94] Isso se deve ao fato de que, como já dito, a região central do olho, a fóvea, esteja densamente ocupada por cones. O reconhecimento de objetos imediatamente à frente do sujeito está, portanto, relacionada à função espectral fotópica e, por isso, a definição de fluxo luminoso é baseada na resposta fotópica do olho. [4, 94]

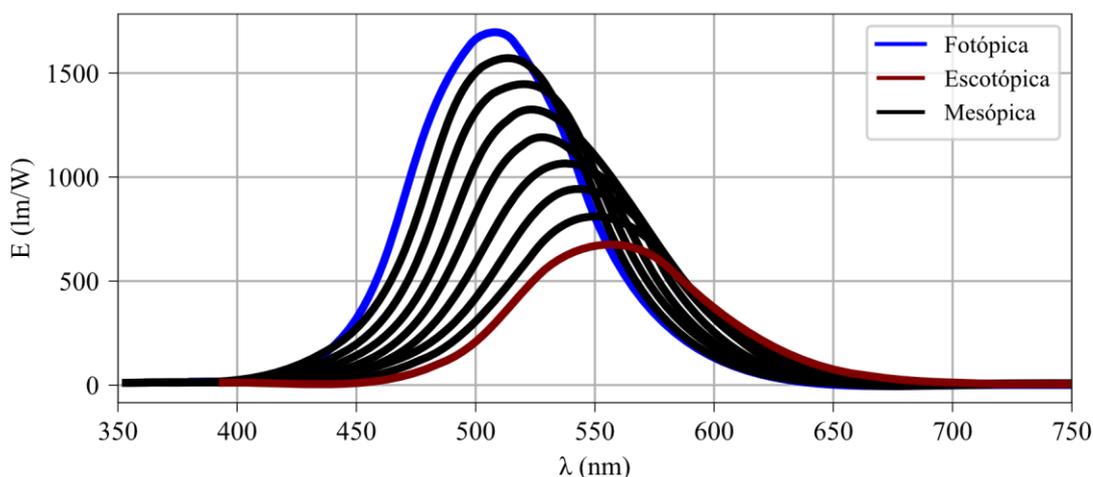


**Figura A.3 – Curva de sensibilidade do olho humano [4]**

A percepção espacial, por sua vez, está relacionada aos estímulos de ambas as áreas da retina, central e periférica, tanto em ambientes internos, quanto em ambientes externos no período noturno, como rodovias e etc. Exatamente por isso, recomenda-se que ambos os espectros de sensibilidade fotópica e escotópica sejam levados em consideração, ou seja, que também se utilize a condição mesópica na iluminação de rodovias e espaços públicos. [94]

Quando se olha um objeto, a luz proveniente de vários pontos da cena observada se insere no olho, refratando-se ao passar pelos meios que constituem o olho até se formar na retina. A interpretação da imagem dependerá de cada observador, já que envolverá também o

aspecto mental e psíquico do indivíduo, sendo a combinação de um processo fisiológico e psicológico. Exatamente por isso, a resposta espectral do olho humano em condições fotópicas foi padronizada em 1924 pela *Commission International de l'Eclairage* (CIE). [86, 88]



**Figura A.4 – Curvas de sensibilidade mesópicas do olho humano [95]**

A Figura A.3 demonstra a Curva de Sensibilidade do Olho Humano às condições escotópicas e fotópicas. Pode-se perceber que a escolha do método de iluminação deve ser criteriosa, pois a diminuição dos níveis fotópicos, por exemplo, abaixo de níveis aceitáveis<sup>1</sup>, pode prejudicar a detecção de objetos na linha central da visão, tais como pedestres atravessando a rodovia. [94]

Através da Figura A.4, deve-se atentar para o fato de que a produção de uma grande quantidade de fluxo luminoso em qualquer comprimento de onda não necessariamente faz daquela fonte de luz a mais apropriada para aplicações de Iluminação Pública. O critério para avaliar o que torna uma fonte de luz eficaz para iluminação, tanto de ambientes internos, quanto externos, é a emissão de luz em comprimentos de onda na faixa fotópica e escotópica.

De acordo com [4], as eficácias médias em condições fotópicas e escotópica esperados para diferentes tipos de fontes de luz podem ser observados na Tabela A.2.

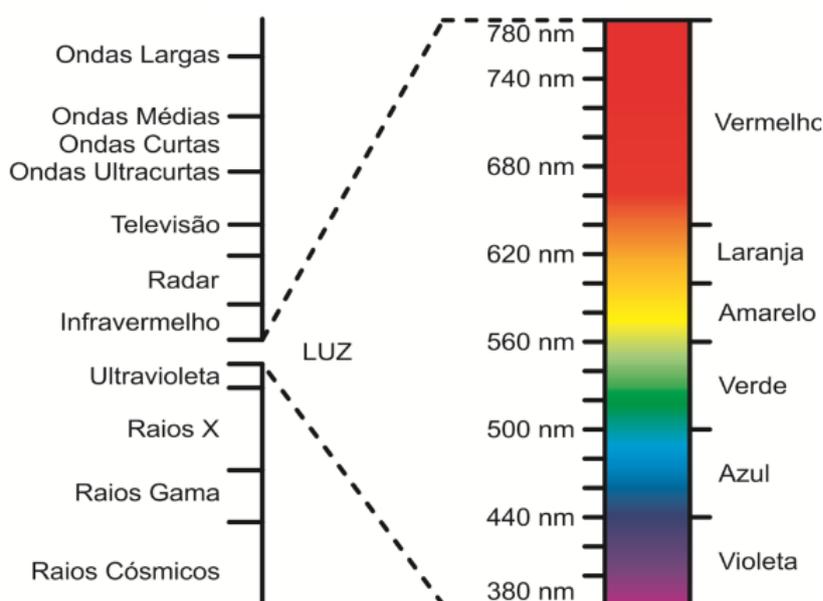
<sup>1</sup> A *Illuminating Engineering Society of North America* (IESNA) recomenda que a luminância fotópica esteja entre 0,3 e 1,2 cd/m<sup>2</sup> em rodovias. [115]

**Tabela A.2 – Eficácia Luminosa para Condições Fotópica e Escotópica de Diferentes Fontes Luminosas [4]**

Fonte de Luz	Condição Fotópica (lm/W)	Condição Escotópica (lm/W)
Incandescente	14,7	20,3
Fluorescente (3500 K)	84,9	115,9
Sódio em Alta Pressão	126,9	80,5
Sódio em Baixa Pressão	180,0	40,8
Mercúrio em Alta Pressão	52,3	66,8
Multi-Vapores Metálicos	107,0	181,0
LED (Branco Frio)	93,3	156,0

## A.2 Luz

Trata-se da radiação eletromagnética que se encontra dentro da faixa sensível ao olho humano. Como toda onda eletromagnética, a luz possui amplitude, frequência e polarização. O brilho está associado com a amplitude de uma determinada onda, enquanto a frequência desta radiação relaciona-se com a cor percebida pelo cérebro humano.

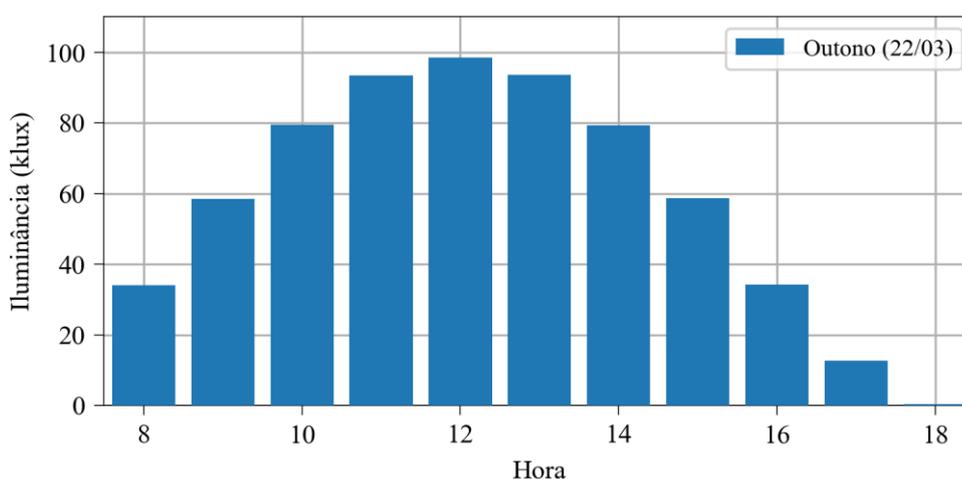


**Figura A.5 – Comprimento de onda e frequência do espectro eletromagnético [96]**

A luminosidade proveniente do Sol, isto é, raios solares que se encontram na faixa visível do espectro, representa apenas 40 % de toda radiação que atinge a Terra e apenas uma parcela pequena do espectro eletromagnético total, como pode ser visto na Figura A.5. De acordo com as condições do céu, poluição, época do ano e posição no globo, variações no espectro da radiação visível serão percebidas. À parcela de radiação recebida do Sol, dá-se o nome de radiação direta. A outra parcela da radiação, que se espalha pela atmosfera e é também responsável por parte da luminosidade, recebe o nome de radiação difusa.

Define-se o nascer e o pôr do sol como o momento em que a parte superior do Sol está visível no horizonte. Neste instante, a altura solar, ângulo entre o Sol e o horizonte, é de zero grau. Vale ressaltar que, devido à refração da luz ao adentrar a atmosfera, o nascer e pôr do sol reais acontecem ligeiramente antes do nascer do sol astronômico e depois do pôr do sol astronômico, respectivamente. [97]

Em estudo realizado na Universidade de Brasília (UnB), foram medidos os valores de iluminância ao longo do dia em quatro dias no ano: 22 de março (equinócio de outono), 22 de junho (solstício de inverno), 23 de setembro (equinócio de primavera) e 22 de dezembro (solstício de verão). As medições feitas no equinócio de outono podem ser vistas na Figura A.6.



**Figura A.6 – Valores de Iluminância para cada hora do dia no outono para Brasília. Dados retirados de [98]**

Outro estudo encontrou um comportamento semelhante para Iluminância ao longo do dia e do ano para a cidade de Florianópolis, Santa Catarina, como pode ser visto na Figura A.7. Alguns modelos matemáticos se propõem a descrever o comportamento da iluminância

ao longo do dia. Um desses modelos é apresentado no Guia Explicativo do Almanaque Astronômico e pode ser conferido em (A.1):

$$\log E = I_0 + I_1x + I_2x^2 + I_3x^3 \quad (\text{A.1})$$

Em (A.1),  $E$  representa a iluminância,  $x$  é a altura solar em graus dividida por 90. Os coeficientes  $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  e  $I_3$  possuem valores de acordo com a Tabela A.3.

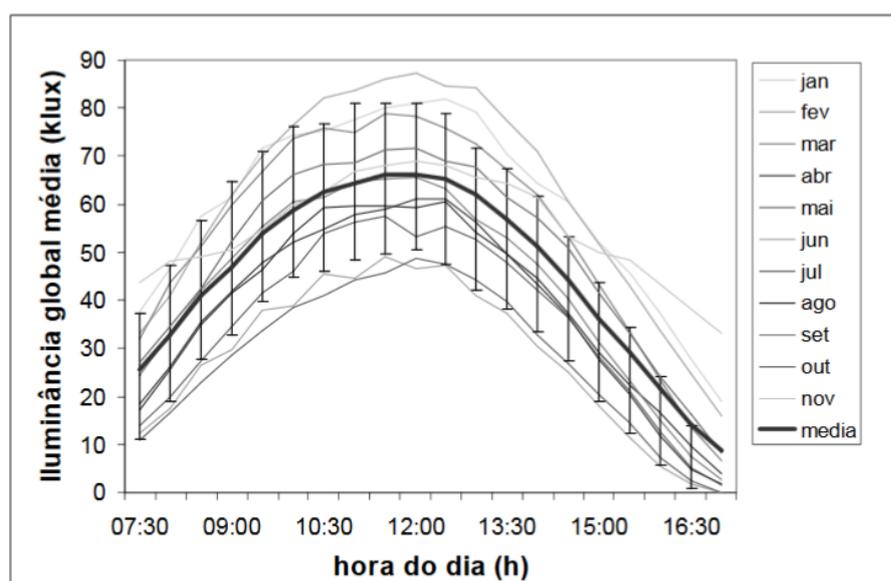


Figura A.7 – Iluminância média global mensal para Florianópolis [99]

**Tabela A.3 – Coeficientes para cálculo da iluminância da luz solar [97, 100]**

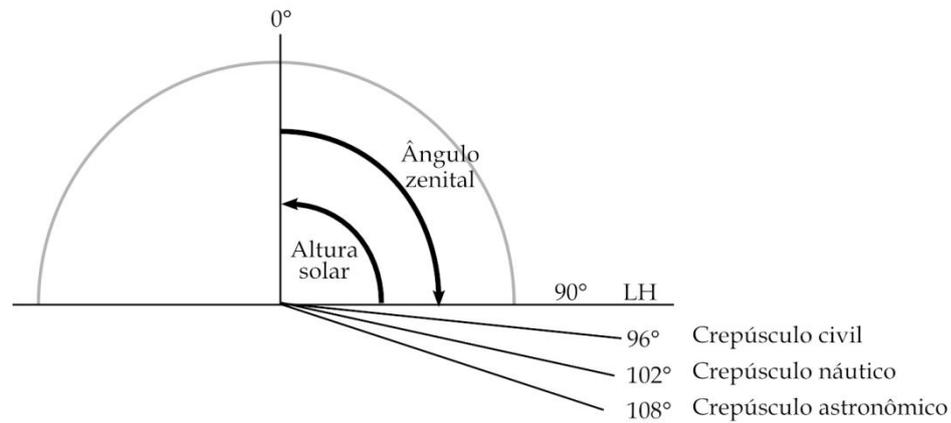
Altura Solar	Coeficientes				Erro Máximo
	$I_0$	$I_1$	$I_2$	$I_3$	
Entre 20° e 90°	3,74	3,97	-4,07	1,47	0,02
Entre 5° e 20°	3,05	13,28	-45,98	64,33	0,02
Entre -0,8° e 5°	2,88	22,96	-207,64	1034,3	0,02
Entre -0,8° e -5°	2,88	21,81	-258,11	-858,36	0,02
Entre -5° e -12°	2,70	12,17	-431,69	-1899,83	0,01
Entre -12° e -18°	13,84	262,72	1447,42	2797,93	0,01

### A.3 Crepúsculo

Define-se crepúsculo como o intervalo de tempo em que há luz natural na atmosfera mais baixa da Terra, consequência da dispersão e reflexão da luz.

Podem-se distinguir três períodos entre o pôr do sol e a completa escuridão. O primeiro período é denominado crepúsculo civil e se estabelece quando a altura solar se encontra entre 0 e -6°. Durante este intervalo, é possível realizar atividades externas sem a necessidade de iluminação artificial. Já o segundo período, denominado crepúsculo náutico, a altura solar está entre -6° e -12° e possibilita que, na ausência de iluminação artificial e na presença de boas condições atmosféricas, seja possível distinguir contornos de objetos e do horizonte do mar. O crepúsculo astronômico, por sua vez, dá-se quando a altura solar está entre -12° e -18°. Quando se atinge -18°, não há mais luminosidade solar. Os crepúsculos podem ser observados na Figura A.8. É importante observar que durante a manhã, o crepúsculo astronômico é o primeiro a ocorrer, seguido do náutico e civil, respectivamente.

[101]



**Figura A.8 – Crepúsculo civil, náutico e astronômico (baseado em [97, 100])**

Ressalta-se que os valores de alturas solares utilizados para classificar os períodos do crepúsculo não são fixos. De acordo com a localidade, altitude, condições climáticas e tipo de céu, estes valores podem variar.

#### **A.4 Fluxo Luminoso $\phi$ (lúmens)**

O fluxo luminoso é a quantidade total de luz emitida por uma fonte dentro da faixa de comprimento de onda entre 380 nm e 780 nm, ou seja, toda a radiação emitida que sensibiliza o olho humano. A unidade de fluxo luminoso é lumen (lm) [22]. A definição de fluxo luminoso está em (A.2):

$$\phi = k_n \int_{380}^{780} V_n(\lambda) \cdot J(\lambda) d\lambda \quad (\text{A.2})$$

A constante  $k_n$  e a distribuição  $V_n(\lambda)$  dependem do modo de operação do sistema visual.  $k_n$  é o valor máximo do pico de sensibilidade visual em cada modo de operação, valendo, por exemplo, em condições fotópicas, 683 lm/W. A distribuição espectral de potência  $J(\lambda)$ , por sua vez, depende apenas da fonte luminosa. Como a radiação considerada é apenas a sensível ao olho humano, os limites de integração são de 380 a 780 nm.

### A.5 Intensidade luminosa I (candela)

A energia luminosa que incide na direção radial, tomada a partir de um ponto de partida é denominada intensidade luminosa. Para medição desta grandeza vetorial, a fonte de luz é considerada puntiforme, sendo, portanto, recomendado que a distância de medição seja no mínimo cinco vezes maior que o comprimento da fonte. [22]

A intensidade luminosa pode ser definida como disposto em (A.3):

$$I_{\alpha} = \lim_{\omega \rightarrow 0} \frac{\phi}{\omega} = \frac{d\phi}{d\omega} \quad (\text{A.3})$$

Na definição acima,  $I_{\alpha}$  representa a intensidade luminosa em candelas (cd) na direção de propagação  $\alpha$ ,  $\phi$  é o fluxo luminoso e  $\omega$  é o ângulo sólido.

### A.6 Iluminância ou iluminamento E (lux)

Para que projetos de iluminação pública estejam em conformidade com a norma ABNT NBR 5101, faz-se uso de medições de iluminância em uma malha de inspeção disposta em vias e calçadas. Além da verificação de iluminância através de malhas, a norma estabelece valores mínimos de iluminância para diversos tipos de vias. Esta grandeza é, portanto, de fundamental importância para projetos e estudos na área de iluminação. [22]

A iluminância  $E$  é definida como a componente do fluxo luminoso perpendicular a uma superfície por unidade de área, como visto em (A.4).

$$E = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta\phi}{\Delta A} = \frac{d\phi}{dA} \quad (\text{A.4})$$

Nesta equação,  $\phi$  é o fluxo luminoso, enquanto  $A$  é área da superfície que, por sua vez, tende a zero.

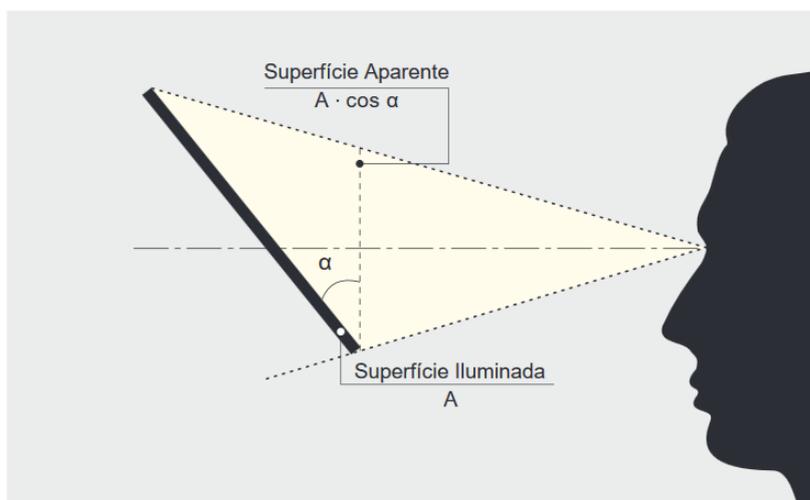


Figura A.9 – Representação da área perpendicularmente projetada ao eixo de observação. Adaptado de [102]

### A.7 Luminância $L$ ( $\text{cd}/\text{m}^2$ )

A luminância é definida como a quantidade de fluxo luminoso passando por uma área em uma superfície, por unidade de ângulo sólido em uma determinada direção, ou seja, a razão entre a intensidade luminosa e a área projetada perpendicularmente ao eixo de observação, como mostrada na Figura A.9. A Figura A.10 relaciona a sensação de brilho emanado de uma superfície com a luminância, além de demonstrar as diferenças entre esta grandeza e a iluminância. [102]

A luminância é definida como em (A.5):

$$L = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta I}{\Delta A \cos \alpha} = \frac{dI}{dA \cos \alpha} \quad (\text{A.5})$$

As medições desta grandeza, bem como a Iluminância, são utilizadas para verificar a conformidade de projetos às normas de iluminação pública. A norma nacional ABNT NBR 5101 e as normas internacionais CIE – 115 e a IESNA RP-8-14 exigem níveis mínimos de luminância nas vias.

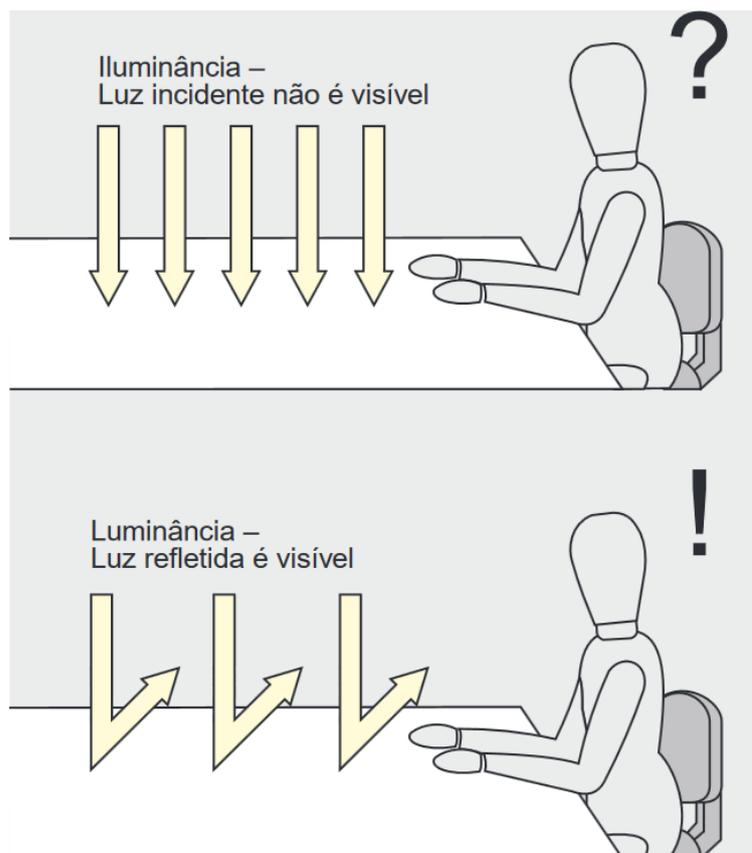


Figura A.10 – Diferença entre iluminância e luminância. Adaptado de [102]

## A.8 Eficácia luminosa $\eta$

A razão entre o fluxo luminoso  $\phi$  irradiado por uma fonte de luz e sua potência consumida  $P$  é definida como eficácia luminosa  $\eta$  e pode ser vista na (A.6). [22]

$$\eta = \frac{\phi}{P} \quad (\text{A.6})$$

A eficácia luminosa permite avaliar a eficiência de uma determinada fonte de luz em converter energia em luz, bem como comparar fontes de luz entre si.

## A.9 Refletância

A refletância é definida como a razão entre a quantidade de fluxo luminoso  $\phi_I$  que incide em uma superfície e a quantidade de fluxo luminoso  $\phi_r$  refletida. Aspectos como textura, cor, material, rugosidade, entre outros, determinarão a refletância de uma determinada superfície. [22] Pode ser expressa por (A.7):

$$\rho = \frac{\phi_r}{\phi_l} \cdot 100 \% \quad (\text{A.7})$$

## A.10 Temperatura de cor (Kelvin)

A Temperatura de Cor é um critério estabelecido para auxiliar na determinação da “tonalidade da cor” de cada luminária. Relaciona-se com a temperatura e a cor apresentadas por um corpo metálico em aquecimento: entre o vermelho e o branco. A luz amarela de uma lâmpada incandescente, por exemplo, possui temperatura de cor de 2700 K, enquanto a luz branca, próxima da luz diurna ao meio-dia, possui temperatura de cor em torno de 6500 K. Quanto maior a temperatura de uma lâmpada, mais fria é considerada a luz que irradia. [22, 103]



Figura A.11 – Temperatura de cor e as diferentes percepções de cores relacionadas. Adaptado. [104]

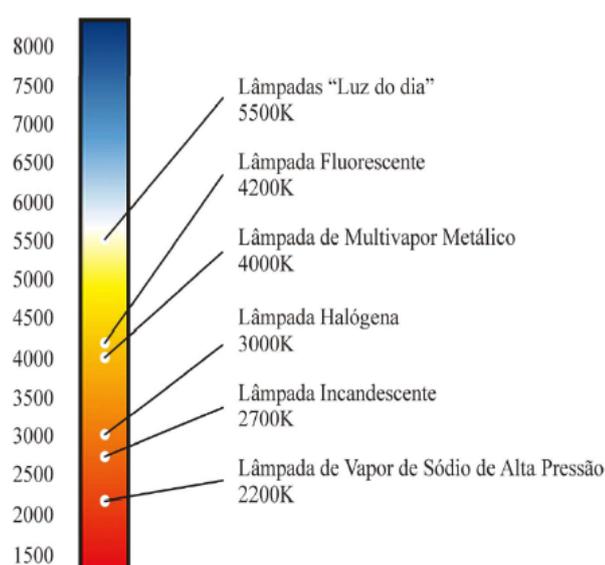


Figura A.12 – Alguns tipos de fontes de luz e suas respectivas temperaturas de cor [22, 105]

A escolha de uma determinada lâmpada ou tecnologia de iluminação deve levar em consideração a temperatura de cor da fonte de luz devido ao fato de que diferentes temperaturas despertam percepções e sensações distintas no ser humano. De acordo com [102], em ambientes de trabalho em que se deseja estimular a produtividade, por exemplo, utilizam-se fontes de luz com temperatura fria.

Na Figura A.11, observa-se a diferença que fontes de luz com diferentes temperaturas de cor provocam na mesma imagem. Já na Figura A.12, são demonstradas algumas tecnologias de iluminação e suas respectivas temperaturas de cor.

### A.11 Índice de Reprodução de Cores (IRC)

Calculando-se a curva espectral da luz emitida por determinada fonte e comparando-a com a curva espectral do Sol, obtém-se o *Índice de Reprodução de Cores* (IRC). O IRC pode variar de 0 % a 100 %, sendo 100 %, o melhor IRC possível. Luminárias com IRC entre 60 e 70 % são consideradas ideais para áreas de circulação, enquanto que aquelas que apresentam IRC acima de 80 % são recomendadas para aplicações onde a cor é relevante como em floriculturas, lojas, entre outras. Na Figura A.13, é possível observar o efeito que diferentes Índices de Reprodução de Cores causam na imagem.

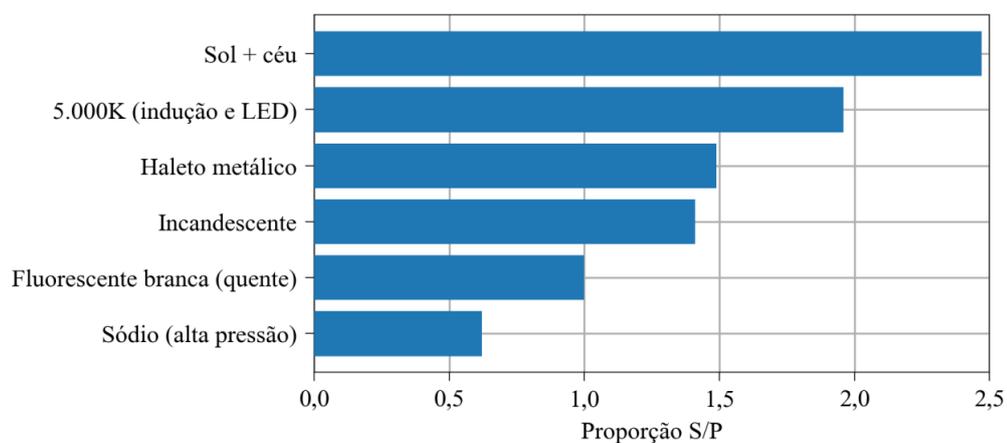


**Figura A.13 – Variação na reprodução de cores de diferentes tipos de fonte de luz [104]**

### A.12 Proporção S/P

Como já citado anteriormente, a maior parte das medições de fluxo luminoso baseia-se somente na medição de fluxo luminoso em condições fotópicas, possivelmente levando a conclusões errôneas quanto à capacidade da luminária de oferecer boa visibilidade ao olho humano. Despreza-se nesse caso, a contribuição dos níveis escotópicos para formação da imagem. Cientistas do *Lawrence Berkley Laboratory* (LBL) introduziram então o conceito

de *S/P ratio* (proporção S/P), permitindo assim que o fluxo luminoso escotópico também faça parte da avaliação das características luminosas de uma luminária.



**Figura A.14 – Proporção S/P para alguns tipos comuns de luminárias. Dados retirados de [95]**

A proporção S/P, como o próprio nome sugere, é a relação entre fluxo escotópico e fotópico. Fontes de luz com maiores proporções S/P produzem a sensação de ambientes mais brilhantes ao olho humano [95]. Na Figura A.14, há algumas fontes de luz e seus valores S/P.

# APÊNDICE B:

## NORMAS

Nesta seção, as principais normas que regulamentam o sistema de Iluminação Pública são apresentadas.

Estabelecer critérios, regras e diretrizes visando com que “o produto, projeto, processo, sistema, pessoa, bem ou serviço atendam às finalidades a que se destinam, sem se esquecer dos aspectos de segurança” são as principais funções de uma norma. [106]

No Brasil, a entidade privada e sem fins lucrativos ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) se encarrega de elaborar normas, certificar produtos, sistemas e rotulagem ambiental. Fundada em 1940, a ABNT atua através de comitês e comissões técnicas (Comitês Brasileiros, Organismos de Normalização Setorial e Comissões de Estudos Especiais) compostos de membros da sociedade civil, indústria, comércio, centros de pesquisa, governo, entre outros interessados, acumulando a experiência de profissionais e entidades e agregando visões de diversos setores para a produção de normas. [106]

As normas brasileiras que regulamentam o sistema de Iluminação Pública são as normas ABNT NBR 5101 Iluminação Pública – Procedimento e ABNT NBR 5181 – Iluminação de Túneis.

Algumas das normas internacionais para o sistema de Iluminação são: CIE 115:2010 *Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic*, AADL J 2022-2 – ALUMBRADO PÚBLICO – VIAS DE TRÁNSITO – CLASSIFICACIÓN Y NIVELES DE

ILUMINACIÓN do IRAM (Instituto Argentino de Normalização e Certificação) e ANSI IESNA RP-8 -14 *Road Lighting*.

## **B.1 Normas Brasileiras**

### **B.1.1 ABNT NBR 5101 Iluminação Pública – Procedimento**

A Norma ABNT NBR 5101 determina requisitos e critérios a serem atendidos para iluminação de vias, visando garantir segurança ao tráfego de veículos e pedestres. Publicada no dia 4 de abril de 2012, esta versão, elaborada pela Comissão de Estudo para Iluminação Pública (CE-03:034.01) do Comitê Brasileiro de Eletricidade (ABNT/CB-03), substituiu a anterior de 1992 inserindo atualizações e modificações, baseando-se principalmente em normas da IESNA e do CIE. [107]

Utilizando a classificação de vias do Código de Trânsito Brasileiro, a norma estabelece níveis mínimos de iluminância, luminância e uniformidade de acordo com cada tipo de via e seu volume de tráfego noturno de veículos e pedestres. São definidas as chamadas malhas de verificação para medições ou cálculo de iluminância destinadas para avaliação da luminosidade na via. [107]

A norma contém ainda recomendações para condições particulares das vias, tais como curvas e elevações, cruzamentos em nível, cruzamentos em dois níveis, entre outros, bem como situações de poluição luminosa, compatibilidade com arborização, etc. [107]

### **B.1.2 ABNT NBR 5181 – Sistema de Iluminação de Túneis**

De acordo com a ABNT, a norma ABNT NBR 5181 – Sistema de Iluminação de Túneis estabelece requisitos para iluminação em “túneis urbanos, rodoviários, subaquáticos, ferroviários com usuários, cargas transportadas e patrimônio público ou privado”, determinando critérios mínimos de visibilidade e distribuição luminosa em seu interior. [106, 108]

As normas em que se baseiam a ABNT NBR 5181 são em sua grande maioria, normas internacionais, como a CIE número 61, *Tunnel Entrance Lighting: A Survey of Fundamentals for Determining the Luminance in the Threshold Zone*; CIE número 88, *Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses*; CIE número 189, *Calculation of Tunnel Lighting Quality Criteria*, entre outras. [108]

Alguns dos assuntos que esta norma trata dizem respeito à determinação de como deve ser a iluminação para túneis curtos e longos nos períodos diurnos e noturnos, classificação de passagens de níveis e túneis, determinação dos níveis de luminância e iluminância nas diversas zonas de um túnel e condições para iluminação de emergência para rotas de fuga e saídas de emergência. [108]

## **B.2 Normas Internacionais**

### **B.2.1 CIE 115:2010 Lighting of Roads for Motor and Pedestrian Traffic**

Elaborada pela *International Commission on Illumination (Commission Internationale de l'Eclairage – CIE)*, a norma CIE 115:2010 é uma atualização de sua versão anterior, publicada em 1995 (CIE 115:1995). Esta norma trata de recomendações para iluminação de vias e áreas de pedestres, em termos de luminância e iluminância.

A versão mais recente passou a considerar tópicos que ganharam relevância no atual contexto de Iluminação Pública, como aspectos ambientais e consumo de energia. Informações e recomendações de requisitos mínimos para o uso de sistemas de IP com controle adaptativo e uma nova classificação de vias também foram incorporados ao novo texto.

### **B.2.2 IESNA RP-08-14 – Road Lighting**

A IESNA RP-08-14, elaborada pela Sociedade Norte Americana de Engenharia (*Illuminating Engineering Society of North America – IESNA*), é uma versão atualizada da norma IESNA RP-08-00. Esta norma é considerada um referencial na área de Iluminação Pública e estabelece práticas recomendadas no design de Iluminação Pública para vias, ciclovias e áreas de pedestres. [109]

## **B.3 Resolução 414/2010**

A Resolução Normativa 414/2010 – Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica da ANEEL enquadra o sistema de IP como pertencente ao grupo B, ou seja, como unidade consumidora com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV, e ao subgrupo B4. Esta resolução estabelece ainda o processo de medição, tarifação e faturamento de cada grupo de unidades consumidoras.

Desde o início de 2015, compete aos municípios à reponsabilidade dos ativos de Iluminação Pública. Visando atender a Constituição Federal de 1988, onde está disposto que os municípios se encarregam de prestar serviços de interesse local, a Resolução nº 414/2010 estabeleceu a transferência de ativos de IP (luminárias, lâmpadas, relés e reatores). [110]

# **APÊNDICE C:**

## **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E ILUMINAÇÃO**

### **PÚBLICA NO BRASIL**

Nas últimas décadas, aquecimento global e questões relacionadas ao meio-ambiente pressionam agendas de diversos países, organizações e empresas a adotar iniciativas que promovam desenvolvimento sustentável, incentivando programas de eficiência energética, sustentabilidade, entre outros. No Brasil, alguns esforços nesse sentido foram realizados para promover iniciativas na área de eficiência energética em vários setores da sociedade.

Em 2001, a Lei nº 10295 foi promulgada com o objetivo de fortalecer a conservação de energia, desenvolvimento tecnológico e sustentabilidade. Denominada “Lei de Eficiência Energética”, a lei estabelece limites máximos e mínimos de consumo e eficiência energética, respectivamente, para equipamentos comercializados no Brasil. Pode-se citar a criação do “Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética” (CGIEE) como um dos principais desdobramentos dessa lei. [111]

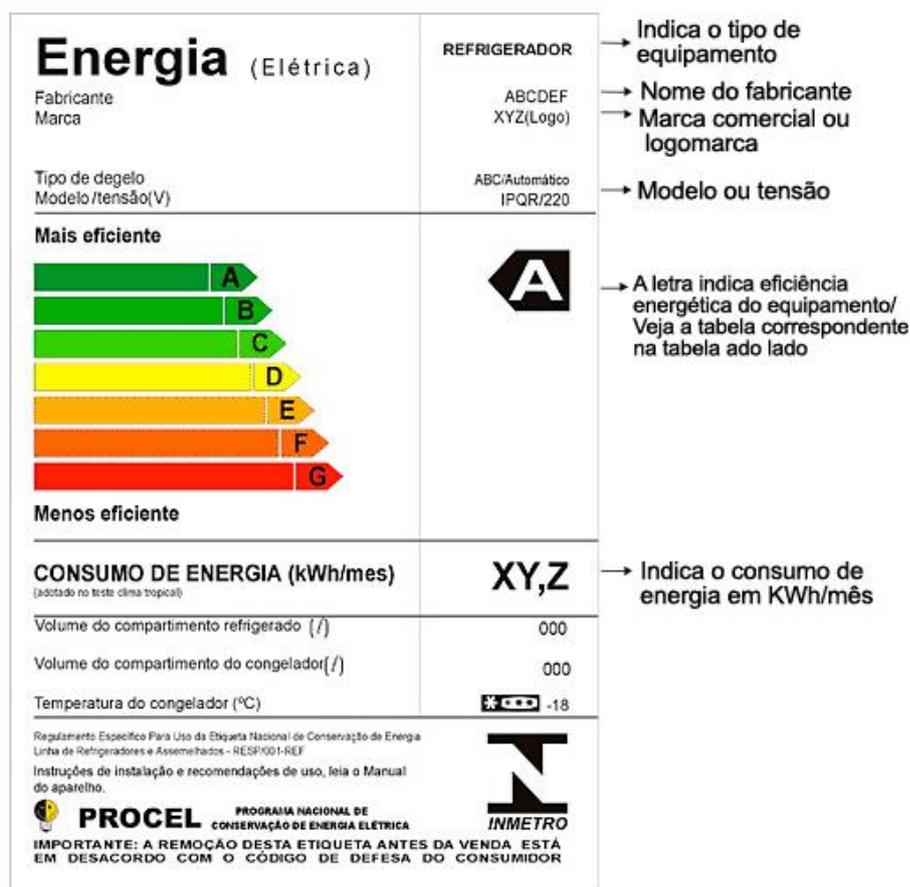


Figura C.1 – Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) [112]

Outra iniciativa importante é o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE) que disponibiliza dados e informações acerca da performance de produtos em relação a sua eficiência energética, ruído, entre outros, aos consumidores. Em laboratórios acreditados pelo Inmetro, os equipamentos são ensaiados e classificados de acordo com seu desempenho através da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE). Esta etiqueta pode apenas apresentar os níveis de eficiência (que variam de A a E), conforme mostrado a Figura C.1.

Visando tornar o mercado mais competitivo e com produtos mais eficientes, incentivar escolhas mais conscientes dos consumidores, o PBE auxilia e contribui para implementar o disposto na Lei de Eficiência Energética.

O Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (*Procel*), programa criado pelo governo em 1985, também atua através de diversas frentes promovendo o uso eficiente de energia. De acordo com a Eletrobrás, o país obteve economia de 11,7 bilhões de

quilowatts-hora em 2015, o que abasteceria aproximadamente seis milhões de residências brasileiras por um ano, por meio de ações do Procel. [113]

A Lei nº 13.280, promulgada em 3 de maio de 2016, passou a garantir recursos para o Procel. No ano de 2017, 107 milhões de reais foram direcionados para a gestão de energia e saneamento ambiental nas áreas de educação, indústria, edificações e iluminação pública. Ainda de acordo com o Procel, em 2016, 15,15 bilhões de kWh foram economizados, evitando a emissão de 1,238 milhões de toneladas de gás carbônico [8]. A Tabela C.1 apresenta os resultados do Procel para o ano de 2016.

**Tabela C.1 – Resultados do Procel para o ano de 2016 (adaptado de [8])**

Resultado	Total
Energia economizada (bilhões de kWh)	15,15
Usina equivalente (MW)	3634
Emissão de CO <sub>2</sub> equivalente evitada (milhão tCO <sub>2</sub> e)	1,238

Instituído pelo Procel em 1993, o Selo Procel de Economia de Energia assinala os equipamentos e eletrodomésticos mais eficientes, indicando de maneira acessível e clara os melhores produtos em termos de eficiência aos consumidores. Os componentes de Iluminação Pública que são certificados com o Selo Procel, mostrado na Figura C.2, são as lâmpadas a vapor de sódio e seus reatores eletromagnéticos. [40]



Figura C.2 – Selo Procel [113]

O Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica eficientes (Procel Reluz) é outra iniciativa implementada pela Eletrobrás, com apoio do Ministério de Minas e Energia, para promover eficiência energética nos sistemas de IP. Municípios, Governos Estaduais e Distritos podem participar do programa por meio das concessionárias de energia elétrica. [113]

De acordo com informações fornecidas no site da Eletrobrás, os objetivos do Procel Reluz são a realização dos seguintes projetos:

- *“Melhoria dos Sistemas de Iluminação Pública Existentes;*
- *Expansão dos Sistemas de Iluminação Pública;*
- *Remodelagem dos Sistemas de Iluminação Pública;*
- *Melhoria dos Sistemas de Sinalização Semafórica;*
- *Iluminação Especial (Destaque de praças, monumentos, fachadas, etc.);*
- *Iluminação de Espaços Públicos Esportivos;*
- *Inovação Tecnológica na Iluminação Pública.”* [113]

Através da substituição de lâmpadas incandescentes, mistas e de vapor de mercúrio por tecnologias mais eficientes, respeitando os níveis de iluminância de cada via, de acordo com o estabelecido pelas normas, o Procel Reluz modernizou sistemas de iluminação

pública economizando 62,64 milhões de kWh. A demanda no horário de ponta também foi reduzida em 14,3 mil kW. [8]

Os resultados obtidos pelo Procel Reluz do ano de 1994 a 2016 podem ser conferidos na Tabela C.2.

**Tabela C.2 – Resultados do Procel Reluz de 1994 a 2016 [8]**

Anos	1994-2011	2012	2013	2014	2015	2016
Número de Pontos de IP Substituídos Acumulado	3.281.788	3.404.396	3.454.300	3.487.348	3.487.348	3.487.348
Economia de Energia no Período (milhões de kWh)	-	154,38	157,98	150,56	120,67	62,64
Economia de Energia Acumulada (milhões de kWh)	1.154,09	1.183,63	1.207,28	1.216,73	1.216,73	1.216,73
Demanda retirada da Ponta no Período (mil kW)	-	35,18	36,01	34,34	27,51	14,30
Demanda retirada da Ponta Acumulada (mil kW)	265,95	272,69	278,09	280,25	280,25	280,25