

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA LUMINÁRIA DE ILUMINAÇÃO
PÚBLICA À BASE DE LEDs**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Tiago Maggi

Santa Maria, RS, Brasil

2013

PPGEE/UFSM. RS

MAGGI, Tiago

Mestre

2013

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA LUMINÁRIA DE ILUMINAÇÃO
PÚBLICA À BASE DE LEDs**

Tiago Maggi

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Eletrônica de Potência, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Elétrica**

Orientador: Prof. Dr. Marco Antônio Dalla Costa

Santa Maria, RS, Brasil
2013

Maggi, Tiago
ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA LUMINÁRIA DE ILUMINAÇÃO
PÚBLICA À BASE DE LEDs / Tiago Maggi.-2013.
234 p.; 30cm

Orientador: Marco Antônio Dalla Costa
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Elétrica, RS, 2013

1. Iluminação Pública 2. LEDs 3. Distribuição Luminosa
4. Luminárias I. Dalla Costa, Marco Antônio II. Título.

Ficha catalográfica elaborada através do programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

© 2013

Todos os direitos autorais reservados a Tiago Maggi. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita com autorização por escrito do autor.

Endereço: Rua Portácio Hoffmann, n.1891 ap.02, Bairro Esplanada, Caxias do Sul, RS, 95095-330. Fone: +55 54 8129 2300; Endereço Eletrônico: maggi.tiago@gmail.com

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA LUMINÁRIA DE ILUMINAÇÃO
PÚBLICA À BASE DE LEDs**

Elaborada por
Tiago Maggi

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Engenharia Elétrica

COMISSÃO EXAMINADORA:

Marco Antônio Dalla Costa, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Tiago Bandeira Marchesan, Dr. (UFSM)

Elvo Calixto Burini Junior, Dr. (USP)

Ricardo Nederson do Prado, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 18 de Fevereiro de 2013.

Ao meu pai Alfeu, pelo incentivo, apoio
e reconhecimento do esforço que sempre me
motivou a seguir em frente.

A minha mãe Ivete, pela compreensão
e amor imensurável que sempre
foi a base de tudo.

A minha noiva Michele, pela compreensão
amor e companheirismo
sempre demonstrados;

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida e por ter permitido nascer em uma família tão especial que sempre me motivou a evoluir, meus pais Alfeu e Ivete e irmã, Silviane que sempre me deram todo o suporte necessário, bem como bons exemplos, para seguir estudando.

Agradeço minha noiva Michele, pelo amor, carinho e compreensão sempre demonstrados durante esta caminhada.

Agradeço a empresa Intral que me auxiliou financeiramente e deu o suporte necessário para o desempenho das atividades, em especial aos Engenheiros Marcelo Toss e Anderson Soares dos Santos que sempre se mostraram prontos a ajudar.

Agradeço ao Prof. Marco Antônio Dalla Costa, pela oportunidade e pelo exemplo de dedicação e persistência, bem como pela orientação e troca de experiências.

Agradeço ao grupo GEDRE como um todo, pelo suporte e disponibilidade sempre apresentados, em especial aos colegas Diogo Vargas, César Augusto Furlanetto e André Kirsten pelo companheirismo e comprometimento.

“Seja a mudança que você quer ver no mundo.”

Dalai Lama

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Santa Maria

ESTUDO E IMPLEMENTAÇÃO DE UMA LUMINÁRIA DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA À BASE DE LEDs

AUTOR: TIAGO MAGGI

ORIENTADOR: MARCO ANTÔNIO DALLA COSTA

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 18 de Fevereiro, de 2013.

Este trabalho apresenta um estudo para o projeto e a implementação de uma luminária de Iluminação Pública a base de LEDs, onde são apresentadas as características necessárias para que a luminária de LED proposta possa substituir os modelos tradicionais com lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão (VSAP), que são usualmente utilizados no Brasil. Para tal, foi realizado um estudo detalhado e a implementação de um protótipo de uma luminária de LEDs que possa substituir as luminárias convencionais, mantendo as características fotométricas exigidas pelas normas vigentes no Brasil. Com isso, é possível uma redução significativa no consumo de energia elétrica, explorando as características dos LEDs como: alta eficiência energética, longa durabilidade, baixa depreciação luminosa e facilidade no direcionamento da luz.

É apresentada uma análise elétrica e fotométrica de alguns modelos tradicionais bem como do protótipo proposto para permitir a comparação de resultados.

No estudo é verificado que com a luminária de LED proposta pode-se atingir níveis de iluminação similares aos das luminárias com lâmpadas VSAP utilizando praticamente 50 % da potência elétrica.

Palavras Chave: LEDs, Luminárias, Iluminação Pública, Distribuição Luminosa.

ABSTRACT

Master Thesis
Post-Graduation Program in Electrical Engineering
Federal University of Santa Maria

STUDY AND IMPLEMENTATION OF A LED PUBLIC LIGHTING LUMINAIRE

AUTHOR: TIAGO MAGGI
ADVISOR: MARCO ANTÔNIO DALLA COSTA
Place as Date: Santa Maria - RS, 18th, February, 2013.

This work presents a study for the design and implementation of a LED Street light Luminaire. It shows the necessary characteristics for the proposed fixture replace the traditional models with High Pressure Sodium lamps (HPS), which are commonly used in Brazil. For this, it has been done a study and implementation of a LED fixture prototype that can replace a conventional fixture, keeping the photometric characteristics required by Brazilian standards. With this, is possible a significant reduction in the electrical power consumption by exploring the LED features such as high energy efficiency, long life, low luminous flux depreciation during the life and facility for light direction control.

Here is presented an analysis of some traditional HPS lamps models to allow comparison of results of the prototype proposed.

In this study is verified that the proposed LED fixture can reach similar levels of illuminance on the road that HPS modes, however using almost 50% of electric power.

Keywords: LEDs, Luminaries, Street light, light distribution

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Distribuição do consumo de energia em iluminação pública no Brasil (ELETROBRÁS,2008)	33
Figura 1.2 - Comparativo entre as principais fontes luminosas (OSRAM,2012b) (LUMILEDs,2011b)	35
Figura 1.3 - Evolução das fontes luminosas (SALES, 2011)	36
Figura 1.4 - Resultado do programa RELUZ (ELETROBRÁS, 2009).	39
Figura 2.1 - Ondas eletromagnéticas e distribuição do espectro da Luz	45
Figura 2.2 - Diagrama de Cromaticidade (SHUBERT, 2006).....	46
Figura 2.3 - Lei de Lambert.....	52
Figura 2.4 - Tipos de reflexão	54
Figura 2.5 - Lei da reflexão especular.....	54
Figura 2.6 - Transmitância em filtro para diferentes comprimentos de onda (RYER, 1998).	55
Figura 2.7 - Transmitância do vidro incolor (Adaptado de: GUARDIAN, 2011)	56
Figura 2.8 - Perdas da luz passando pelo vidro.....	57
Figura 2.9 - Refração da luz	58
Figura 2.10 - Ângulo crítico para a reflexão interna total	59
Figura 2.11 - Efeito da difração da luz	60
Figura 2.12 - Onda propagando-se no eixo z (PUC-RIO,2013)	61
Figura 2.13 - Identificação da intensidade luminosa a partir de um ponto (COSTA, 2004).	63
Figura 2.14 - Sistema de coordenadas C, γ (CIE, 2006)	64
Figura 2.15 - Representação da distribuição luminosa onilateral	65
Figura 2.16 - Distribuição Polar Onilateral	66
Figura 2.17 - Distribuição Cartesiana LED REBEL ES	66
Figura 2.18 - Diagrama de intensidade luminosas.....	67
Figura 2.19 – Luxímetros	69
Figura 2.20 - Luminancímetros	70

Figura 2.21 - Esfera integradora: a) - Estrutura b) - Esfera Real.....	71
Figura 2.22 - Goniofotômetro	73
Figura 2.23 - Linhas de intensidade para classificação de Luminárias ILP (ABNT, 2012).	78
Figura 2.24 - Tipos de distribuição de luminárias de Iluminação Pública (IESNA, 2000).	79
Figura 2.25 - relação entre LTV e LLV na classificação das luminárias, bem como a esfera imaginária ocupada pela luminária em seu centro (ABNT, 2012).	80
Figura 2.26 - Distribuição dos ângulos primários e secundários de acordo com a TM-15- 07 (IES, 2007)	82
Figura 2.27 - Curvas do fator de utilização sendo: a) em função da altura de montagem e b) em função do ângulo gama.....	86
Figura 2.28 - Ângulos referentes ao fator de utilização	86
Figura 2.29 - Perspectiva da distribuição luminosa de um cone contendo os valores máximos de intensidade.....	87
Figura 2.30 - comparação da vista do céu sobre Toronto – CA com a iluminação da cidade desligada (esquerda) e ligada (direita) (NELPAG, 2011).....	91
Figura 2.31 - Distribuição da Luz (SALES, 2011).....	91
Figura 3.1 - Curva espectral da Lâmpada VSAP SON 250W (PHILIPS, 2012)	94
Figura 3.2 - Variação das grandezas elétricas lâmpadas VSAP 100 W – 250 W (PHILIPS, 2012)	95
Figura 3.3 - Características elétricas em função do tempo	96
Figura 3.4 - Distribuição espectral da lâmpada Vapor Metálica	98
Figura 3.5 - Geração de fótons dos LEDs (BENDER, 2012).....	99
Figura 3.6 - Comprimento de onda das cores (CERVI, 2005)	101
Figura 3.7 - Modelos de LEDs.....	103
Figura 3.8 - Redução da resistência térmica dos encapsulamentos (VISERA ,2012) ..	104
Figura 3.9 - Distribuição espectral de um LED de Luz branca	105
Figura 4.1 - Luminária Aberta e fechada (COPEL, 2012).....	106
Figura 4.2 - Luminária Integrada	107
Figura 4.3 - Luminária de LED (SCHREDER, 2012)	108

Figura 4.4 - Emissão luminosa de uma luminária para lâmpadas HID.	113
Figura 4.5 - Distribuição de intensidade luminosa da luminária para lâmpada VSAP 150W	113
Figura 4.6 - Efeito da iluminância em uma via, classe V2, iluminada com luminárias para lâmpadas VSAP.....	114
Figura 4.7 - Fontes luminosas no ponto focal	115
Figura 4.8 - Lente secundária para LEDs	116
Figura 4.9 - Caminho térmico do LED.....	119
Figura 4.10 - Modelo de resistência térmica incluindo o dissipador.....	120
Figura 4.11 - Modelo térmico de vários LEDs no mesmo dissipador	122
Figura 5.1 - Manutenção luminosa de diferentes fontes de luz (adaptado de ASSIST, 2006)	124
Figura 5.2 - Fator de manutenção em ILP	125
Figura 5.3 - Índice de sobrevivência das lâmpadas VSAP SON 150 a 400W (PHILIPS, 2012)	127
Figura 5.4 - Depreciação do fluxo luminoso de uma luminária VSAP 100 a 400W (PHILIPS, 2012).....	128
Figura 5.5 - Redução efetiva do fluxo luminoso de um conjunto de lâmpadas (Philips, 2012)	129
Figura 5.6 - Depreciação Luminária IP2X (Adaptado de CIE, 2003)	134
Figura 5.7 - Depreciação Luminária IP5X (Adaptado de CIE, 2003)	134
Figura 5.8 - Depreciação Luminária IP6X (Adaptado de CIE, 2003)	134
Figura 5.9 - Fator de depreciação de luminárias VSAP com diferentes marcas de lâmpadas (OSRAM,2012) (PHILIPS,2012) (GE,2012b)	138
Figura 6.1 - Olho humano e suas partes (Adaptado: Schubert, 2006).....	141
Figura 6.2 - Faixas de atuação de cada tipo de visão (Adaptado: Schubert, 2006).....	142
Figura 6.3 - Curvas para visão fotópica, mesópica e escotópica (Adaptado: ASSIST, 2009)	143
Figura 6.4 - Distribuição luminosa típica de uma lâmpada incandescente (LEWIN, 1999)	145
Figura 6.5 - Visão em vias iluminadas (JOSEFOWICZ, 2008)	151

Figura 7.1 - Ângulos C e γ	156
Figura 7.2 - Dimensional da via e área de atuação da luminária (AAL)	157
Figura 7.3 - Triângulos para cálculo dos ângulos C	158
Figura 7.4 - Distância referentes ao poste de montagem.....	159
Figura 7.5 - Distribuição intensidades luminosas teórica por ângulos $I(C, \gamma)$ via Software MATHCAD.	162
Figura 7.6 - Ângulo sólido.....	163
Figura 7.7 - Seção transversal do ângulo sólido (COSTA, 2004).....	164
Figura 7.8 - Intensidade média para cada ângulo “ C ”	166
Figura 8.1 - Luminária ILP 2525 (ILUMATIC, 2012)	169
Figura 8.2 - Curva fotométrica da Luminária ILP-2525 da marca Ilumatic	169
Figura 8.3 - Fator de utilização da luminária ILP 2525	170
Figura 8.4 - Caso 1 - Lâmpada Philips 28000 lm	172
Figura 8.5 - Caso 2 - Lâmpada OSRAM 28000 lm.....	172
Figura 8.6 - Caso 3 - Lâmpada OSRAM 32200 lm.....	173
Figura 8.7 - Caso 4 - Lâmpada GE 26000 lm.....	173
Figura 8.8 - Fotometria ideal da luminária proposta	175
Figura 8.9 - Depreciação do fluxo luminoso dos LEDs baseado em I_f (mA) e T_{ps} ($^{\circ}C$)	177
Figura 8.10 - Fator de depreciação da luminária IP6X por sujeira – 4 anos (Adaptado de CIE, 2003)	179
Figura 8.11 - Gráfico do fator de manutenção da Luminária IP66 com LEDs $I_f = 700mA$ e $T_{ps} = 70^{\circ}C$	180
Figura 8.12 - Gráfico do fator de manutenção da Luminária IP66 com LEDs a 350mA	181
Figura 8.13 - Fluxo Luminoso x Corrente (Rebel ES) (Adaptado de: LUMILEDS, 2011b)	186
Figura 8.14 - Eficiência pela corrente direta (Adaptado de: LUMILEDS, 2011b)	187
Figura 8.15 - Eficácia x temperatura (Adaptado de: LUMILEDS, 2011b)	188
Figura 8.16 - Eficácia luminosa x temperatura de junção (Adaptado de: LUMILEDS, 2011b).....	188
Figura 8.17 - Corrente (I_f) x tensão (V_f) (Adaptado de: LUMILEDS,2011b)	190

Figura 8.18 - Valores relativos das partes da luminárias de LED (Adaptado de: DOE, 2012)	193
Figura 8.19 - Retorno do investimento x custo LED	195
Figura 8.20 - Distribuição da luminária sem o uso de lentes	197
Figura 8.21 - Luminária sem lentes	197
Figura 8.22 - Linhas de iso-iluminância Luminária sem lentes	198
Figura 8.23 - Lentes modelo a) - assimétrica e modelo b) - simétrica	199
Figura 8.24 - Distribuição dos modelos: a) assimétrica b) simétrica.....	199
Figura 8.25 - Distribuição arranjo lentes modelo A e B na proporção de 1:3.....	200
Figura 8.26 - Distribuição luminosa lentes A + B (proporção 1:3).....	201
Figura 8.27 - Linhas de iso-iluminância lentes A + B (proporção 1:3).....	201
Figura 8.28 - Lentes modelo C	202
Figura 8.29 - Distribuição da lente do modelo C.....	203
Figura 8.30 - Simulação distribuição Modelo C	203
Figura 8.31- Linhas de iso-iluminância lentes modelo C	204
Figura 8.32 - Lente modelo D	204
Figura 8.33 - Distribuição lente Modelo D.....	205
Figura 8.34 - Simulação distribuição Modelo D	205
Figura 8.35 - Curvas de iso-iluminância lentes modelo D.....	206
Figura 8.36 - Protótipo da luminária montada.....	209
Figura 8.37 - Distribuição luminosa do protótipo com lente do fabricante D	209
Figura 8.38 - Curva do fator de utilização do protótipo	210
Figura 8.39 - Simulação do protótipo na via	212
Figura 8.40 - Linhas de iso-iluminância protótipo	212
Figura 8.41 - Evolução do custos das luminárias de LED (Adaptado de DOE,2010) ..	215

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 - Relação dos tipos de Lâmpadas utilizados no Brasil	34
Tabela 1.2 - Sugestão do RELUZ para lâmpadas alternativas.....	38
Tabela 2.1 - Índices de ofuscamento desconfortável	50
Tabela 2.2 - Iluminâncias e uniformidades mínimas	84
Tabela 2.3 - Grade de referência de acordo com a classe da via	88
Tabela 3.1 - Dados de lâmpadas VSAP dos principais fabricantes.....	93
Tabela 4.1 - Elevação máxima de tensão no arco das lâmpadas VSAP.....	112
Tabela 6.1 - Taxa S/P relativa a temperaturas de cor correlata	147
Tabela 8.1 - Grade de referência via tipo V2.....	168
Tabela 8.2 - Fator de manutenção - 12 anos - IP6X	182
Tabela 8.3 - Valores simulados caso 1	198
Tabela 8.4 - Valores simulados caso 2	202
Tabela 8.5 - Valores simulados caso 3	204
Tabela 8.6 - Valores simulados no caso 4	206
Tabela 8.7 - Dados ensaio do protótipo	211

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1 - Especificações técnicas para luminárias ILP no Brasil	89
Quadro 4.1 - Classificação de proteção IP	110
Quadro 6.1 - Multiplicadores para luminância efetiva, Fotópica para Mesópica	149
Quadro 6.2 - Ganhos para visão mesópica em relação à fotópica para diferentes fontes luminosas	153
Quadro 8.1 - Valores da simulação das lâmpadas VSAP + Luminárias ILP2525.....	171
Quadro 8.2 - Fluxo Luminoso necessário – temperaturas	185
Quadro 8.3 - Fluxo luminoso necessário - If de 350 / 500 e 700 mA.....	189
Quadro 8.4 - Dados projetados da luminária	191
Quadro 8.5 - Relação da potência necessária para a luminária proposta	192
Quadro 8.6 - Ensaio simulado das lentes.....	207
Quadro 8.7 - Cálculo quantidade de LEDs para protótipo	208
Quadro 8.8 - Dados fotométricos finais da simulação do protótipo.....	213
Quadro 8.9 - Comparativo luminária VSAP x Protótipo da Luminária de LED.....	214

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABILUX – Associação Brasileira da Indústria de Iluminação
ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica
ANSI – *American National Standards Institute*
AlInGaP – Fosfeto de Alumínio Índio Gálio
BUG – Abreviatura de *Backlight*, *Uplight* e *Glare*, respectivamente
CIE – *Commission Internationale de l’Eclairage*
CRI – *Color rendering Index*
DOE – *U.S. Department of Energy*
FDL – Fator de depreciação da fonte Luminosa
FDS – Fator de Depreciação por sujeira
FM – Fator de Manutenção
FSL – Fator de Sobrevivência da Lâmpada
GaN – Nitreto de Gálio
GaP – Fosfeto de Gálio
HPS – *High Pressure Sodium*
HID – High Intensity Discharge
IES (IESNA) – *Illuminating Engineering Society of North America*
IDA – *International Dark-Sky Association*
ILP – Iluminação Pública
InGaN – Nitreto de Gálio Índio
IRC – Índice de Reprodução de cores
LCS – *Luminarie Classification System*
LED – *Light Emmiting Diode*
LLF – *Light Loss fator*
LLD – *Lamp Lúmen Depreciation*
LTV – Linhas Transversais da Via
LLV – Linhas Longitudinais da Via

MCPCB – Metal Core Printed Circuit Board

MF – Fator de Manutenção

MH – *Metal Halide*

MVM – Multi-Vapor Metálico

NELPAG - *New England Light Pollution Advisory Group*

NBR – Norma Brasileira

PNEf – Plano Nacional de Eficiência Energética

RELUZ – Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes

SPD – *Spectral Power Distribution*, em português, Distribuição Espectral da Potência;

SSL – *Solid State Lighting*, em português, Iluminação de estado sólido;

STV – *Small Target Visibility*

TCC – Temperatura de cor Correlata

TCU – Tribunal de Contas da União

VMAP – Vapor Mercúrio de Alta Pressão

VSAP – Vapor de Sódio de Alta Pressão

VSBP – Vapor de Sódio de Baixa Pressão

LISTA DE SÍMBOLOS

- AM – Altura de montagem da luminária
- AMI_C – Ângulo de máxima intensidade lado das casas
- AMI_V – Ângulo de máxima intensidade lado da Via
- B4a – Tipo de tarifação de energia elétrica
- B4b – Tipo de tarifação de energia elétrica
- C – Ângulo horizontal com origem no EOL, variando de 0° a 360°.
- Ce – Circunferência esférica
- d – Distância entre a fonte luminosa e o ponto sob análise
- D – Duração em horas do teste realizado, dividido por 1000
- D/AM – Relação da distância pela altura de montagem
- D_PIL_EOL – Distância entre PIL e EOL
- D_PIL_EOL(C) – Distância entre PIL e EOL em função do ângulo C.
- DAL – Distância de avanço da Luminária
- DEP – Distância entre postes
- Df – Diâmetro da fenda
- DLC_V – Distância da luminária até o cordão lado da via
- DLV – Distância de Largura da via
- DMEP – Distância média entre postes
- E* – Iluminância
- E_{méd}* – Iluminância média
- E_{min}* – Iluminância mínima
- E_{olho}* – Iluminância sobre o olho
- EOL – Eixo vertical de origem do centro óptico da luminária
- Fu – Fator de utilização
- i – Índice correspondente as fontes luminosas avaliadas
- I – Intensidade luminosa na direção do ponto
- If – Corrente direta do LED
- k – Fator correspondente a idade

L – Luminância

lm – Lúmen

lm/W – Lúmen por Watt

L_{med} – Luminância média

L_v – Luminância veladora

M/F – Fator da visão mesópica pela fotópica

M/P – Mesopic/Photopic (Mesópica/Fotópica)

n – Índice de refração

n_λ – Relação entre os índices de refração

P – Porcentagem mantida do fluxo luminoso inicial

P_d – Fator de reflexão do material

PIL – Ponto de incidência da luz na via

$P_{t_{led}}$ – Soma da potência de todos os LEDs

r_λ – Perdas por refletância

$R_{th_{j-a}}$ – Resistência térmica entre a junção e o ambiente

$R_{th_{j-sp}}$ – Resistência térmica entre a junção e o ponto de soldagem

$R_{th_{h-a}}$ – Resistência entre o dissipador e o ambiente

$R_{th_{sp-a}}$ – Resistência térmica entre o ponto de soldagem do Led e o ambiente

$R_{th_{sp-h}}$ – Resistência térmica entre o ponto de soldagem do Led e o Dissipador

S/P – Scotopic/Photopic (Escotópica/Fotópica)

Tc – Temperatura no corpo no ponto definido pelo fabricante

TI – *Threshold Increment*

Tj – Temperatura na junção do LED

Tsp – Temperatura no ponto de soldagem

Ta – Temperatura ambiente

Uo – Fator de uniformidade

Vf – Tensão direta do LED

Ze – zona esférica

γ – Ângulo vertical com origem no centro óptico da luminária variando de 0° a 180°.

λ – Comprimento de onda

$V(\lambda)$ – Curva sensibilidade espectral fotópica do observador padrão CIE

ρ – Valor da refletância em porcentagem

θ_i – Ângulo entre a direção de visão e a incidência de luz no olho

ϕ – Fluxo Luminoso

ϕ_r – Fluxo Real

ϕ_L – Fluxo luminoso da lâmpada

ϕ_t – Fluxo luminoso total

ϕ_{ti} – Fluxo luminoso total inicial

ϕ_{ti_led} – Fluxo luminoso total inicial nos LEDs

ϕ_u – Fluxo luminoso útil

τ_{ext} – Transmissão externa

τ_i – Transmitância interna do material

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A – PROPOSTA COMERCIAL LUMINÁRIA E LÂMPADA VSAP	233
ANEXO B – PROPOSTA COMERCIAL LUMINÁRIA DE LED	234

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	28
1 ILUMINAÇÃO PÚBLICA	30
1.1 A IMPORTÂNCIA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA	31
1.2 ILUMINAÇÃO PÚBLICA NO BRASIL	32
1.3 RELUZ.....	37
1.4 TARIFAÇÃO.....	39
1.5 NORMAS PERTINENTES	41
2 CONCEITOS DE ILUMINAÇÃO	44
2.1 LUZ.....	44
2.2 COLORIMETRIA	45
2.3 GRANDEZAS LUMINOTÉCNICAS	47
2.4 RELAÇÕES BÁSICAS EM LUMINOTÉCNICA	51
2.4.1 Lei do inverso dos quadrados	51
2.4.2 Aproximação para consideração de fonte puntiforme	51
2.4.3 Lei dos Cossenos ou lei de Lambert	52
2.5 COMPORTAMENTO DA LUZ	53
2.5.1 Reflexão	53
2.5.2 Transmissão.....	55
2.5.3 Refração.....	58
2.5.4 Difração	60
2.5.5 Interferência	61
2.5.6 Polarização.....	61
2.6 REPRESENTAÇÃO LUMINOSA DAS FONTES DE LUZ	62
2.6.1 Sistema C-Gama (C- γ).....	64
2.6.2 Representação simétrica polar onilateral	65
2.6.3 Representação cartesiana.....	66
2.6.4 Representação assimétrica por curva polar bilateral.....	67
2.7 MÉTODOS DE MEDIÇÃO DA LUZ.....	68

2.7.1	Luxímetro	68
2.7.2	Luminancímetro	70
2.7.3	Esfera Integradora	71
2.7.4	Goniofotômetro	72
2.7.5	Critérios de análise da Iluminação em Vias Públicas.....	74
2.7.6	Relação entre luminância e Iluminância;	75
2.8	CLASSIFICAÇÃO DAS LUMINÁRIAS.....	76
2.8.1	Classificação da Distribuição Luminosa das Luminárias	77
2.8.2	Classificação das vias.....	83
2.8.3	Conceitos em Iluminação Pública	84
2.8.4	Classificação da distribuição luminosa nas vias públicas conforme as concessionárias	88
2.8.5	Poluição Luminosa.....	90
3	FONTES LUMINOSAS.....	92
3.1	LÂMPADAS VAPOR DE SÓDIO DE ALTA PRESSÃO (VSAP)	92
3.1.1	Características elétricas.....	95
3.1.2	Metais pesados.....	97
3.2	LÂMPADA VAPOR METÁLICO (MVM)	98
3.3	LEDs	99
3.3.1	Tipos de LEDs	102
3.3.2	Características fotométricas LED.....	105
4	LUMINÁRIAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA	106
4.1	SEGURANÇA ELÉTRICA	108
4.2	ÍNDICE DE PROTEÇÃO IP E IK.....	109
4.3	REFLETORES.....	111
4.4	COLIMADORES.....	115
4.5	LUMINÁRIAS DE LED	116
4.5.1	Lentes de LED	116
4.6	GERENCIAMENTO TÉRMICO.....	117
4.6.1	Modelamento térmico	118

5	MANUTENÇÃO DO FLUXO LUMINOSO	123
5.1	FATOR DE MANUTENÇÃO DAS LUMINÁRIAS (MF)	125
5.1.1	Fator de Depreciação da Lâmpada ou fonte luminosa (FDL)	126
5.1.2	Fator de Depreciação por Sujeira (FDS)	132
5.1.3	Fator de Sobrevivência das Lâmpadas (FSL)	135
5.1.4	Fator do equipamento:	135
5.1.5	Temperatura ambiente	136
5.1.6	Tensão de alimentação	136
5.1.7	Fator da Lâmpada e Reator	136
5.2	CONSIDERAÇÃO DO FATOR DE MANUTENÇÃO (FM)	137
5.2.1	Dimerização	138
6	VISÃO	140
6.1	VISÃO FOTÓPICA, MESÓPICA E ESCOTÓPICA	140
6.2	COMO O FLUXO LUMINOSO É DETERMINADO	142
6.3	RELAÇÃO S/P	146
6.4	VISÃO EM VIAS PÚBLICAS	151
6.5	CONSIDERAÇÃO DA VISÃO MESÓPICA PARA OS DIFERENTES TIPOS DE LÂMPADAS	152
7	DEFINIÇÃO DO FLUXO LUMINOSO DA LUMINÁRIA DE LED	155
7.1	EQUACIONAMENTO INTENSIDADE LUMINOSA	155
7.2	REPRESENTAÇÃO GRÁFICA	161
7.3	EQUACIONAMENTO PARA CÁLCULO DO FLUXO LUMINOSO	162
8	DEFINIÇÃO DA LUMINÁRIA	167
8.1	CARACTERÍSTICAS ESCOLHIDAS:	167
8.2	CONDIÇÃO EXISTENTE	168
8.3	DEFINIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO LUMINOSA IDEAL	174
8.4	CÁLCULO DO FATOR DE MANUTENÇÃO	176
8.5	CÁLCULO DO FLUXO LUMINOSO	183
8.6	CÁLCULO DA QUANTIDADE DE LEDS	185
8.7	AVALIAÇÃO DA POTÊNCIA NECESSÁRIA	192

8.8 AVALIAÇÃO DAS LENTES.....	196
8.8.1 Simulações com diferentes Lentes	196
8.9 MONTAGEM DA LUMINÁRIA.....	207
8.10 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS.....	213
CONCLUSÃO.....	217
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	220
APÊNDICES.....	232
ANEXOS.....	233

INTRODUÇÃO

A iluminação de vias públicas passou por várias atualizações desde sua criação, partindo da luz gerada por fogo com a queima de combustíveis e posteriormente com o advento da eletricidade, com as lâmpadas elétricas, as quais estão em constante evolução em busca da melhora do aproveitamento da energia. As lâmpadas incandescentes foram as primeiras, seguidas pelas fluorescentes de baixa pressão e então pelas lâmpadas de descarga de alta pressão, também conhecidas pela sigla HID, do inglês: *High Intensity Discharge*. Atualmente as principais fontes de luz utilizadas em iluminação pública são: Lâmpadas de Vapor de Mercúrio (VMAP), Vapor de Sódio de Alta Pressão (VSAP), conhecidas por HPS (*High Pressure Sodium*) e lâmpadas de Multi-vapor Metálico (MVM) também conhecidas por MH (*Metal Halide*). Os modelos mais utilizados atualmente são os de VSAP, pois possuem alta durabilidade e elevada eficácia luminosa. Por outro lado, as lâmpadas VSAP possuem pontos negativos, como o alto tempo para re-ignição, baixo índice de reprodução de cores (CRI – *Color rendering Index*), a tonalidade de cor amarelada e a construção baseada em metais pesados que são maléficos à saúde e tornam seu descarte após o uso problemático.

Com a evolução da tecnologia surgiram os diodos emissores de luz (LED – *Light Emmiting Diode*) que tem se mostrado uma alternativa bastante interessante para este tipo de aplicação, pois agrega valores de alta eficácia luminosa, elevado índice CRI, possibilidade de alteração da coloração da luz (temperatura de cor), alta durabilidade e facilidade para direcionamento da luz através de lentes. Isso permite que sejam criados sistemas com esta tecnologia que garantam os níveis de luminosidade consumindo menos energia (DOE, 2008).

Além destas características está a questão ambiental, uma vez que grande parte da energia elétrica produzida no mundo é proveniente da queima de combustíveis fósseis como o carvão e o petróleo. Desta forma uma redução no consumo de energia elétrica pode estar diretamente ligada à redução da emissão de poluentes na atmosfera. Outro ponto importante a ser mencionado a favor da aplicação de luminárias de LED, é a ausência do emprego de elementos químicos pesados como o mercúrio,

que polui o ambiente e é muito usado na construção de lâmpadas de descarga convencionais (RODRIGUES, 2010).

O presente trabalho trata da avaliação e cálculo para quantificar o fluxo luminoso, bem como a quantidade de LEDs e as características das luminárias, a fim de justificar a utilização desta forma de iluminação em substituição às lâmpadas tradicionais. A proposta possibilita uma redução no consumo de energia elétrica e aumento da durabilidade, reduzindo os gastos com substituição e descarte das lâmpadas de alta pressão.

No capítulo 1 será apresentada uma introdução sobre o sistema de Iluminação Pública no Brasil e suas principais características.

No capítulo 2 será realizada uma revisão bibliográfica sobre os conceitos luminotécnicos, bem como dos conceitos empregados para a construção das luminárias.

No capítulo 3 são apresentadas as características das lâmpadas VSAP e dos LEDs, a fim que propiciar um conhecimento mais aprofundado nas características de cada um.

No capítulo 4 são apresentados os conceitos para a construção das luminárias de ILP.

Já o capítulo 5 traz uma abordagem sobre o comportamento da depreciação luminosa das luminárias e como este dado influencia no projeto e na quantidade de fluxo luminoso inicial da mesma.

No capítulo 6 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre os sistema de visão aplicados para iluminação pública e como as alterações na luminosidade do ambiente e na coloração da luz podem afetar o rendimento da visão.

A partir do capítulo 7 é apresentada a metodologia de cálculo para a luminária de LED proposta, sendo que no capítulo 8 são apresentados os dados obtidos e o projeto da luminária propriamente dito, bem como os resultados observados.

Por fim é apresentada a conclusão do trabalho, bem como a avaliação dos dados obtidos.

1 ILUMINAÇÃO PÚBLICA

A evolução humana está ligada à utilização da iluminação natural e artificial desde o período pré-histórico. Há indícios que povos primitivos já utilizavam a iluminação artificial por meio da queima de óleo. Utilizavam-se óleos naturais extraídos de plantas e sebo de animais (SALES, 2011).

A cidade de Córdoba na Espanha foi a primeira a receber a iluminação de rua no mundo, ainda no século IX, durante o Império Árabe. Por muito tempo a iluminação das ruas era imposta pelas autoridades como dever da população, sendo que obrigavam as famílias a acender tochas em frente suas casas. Só no Século XVIII a iluminação pública (ILP) começa a ser feita de forma planejada, sendo que as principais cidades da Europa foram as primeiras a receberem este benefício (SALES, 2011).

O surgimento da energia elétrica aconteceu por volta de 1672 com o alemão Otto Von Guericke utilizando um gerador eletrostático. Entretanto somente no ano de 1800 foi descoberto o gerador químico de eletricidade, a pilha de Alessandro Volta e logo em seguida, em 1831, os modelos eletromagnéticos em corrente contínua, por Michael Faraday e então os eletromagnéticos em corrente alternada, com Joseph Henry. Em 1869 surgiu, a máquina de Gramme desenvolvida por Zênobe Gramme, um gerador com capacidade de geração de energia elétrica de corrente contínua com potência adequada para a utilização de lâmpadas elétricas na ILP. Com isso iniciou-se também o desenvolvimento das lâmpadas elétricas (SALES, 2011).

No Brasil as lâmpadas incandescentes deram espaço às de VMAP, que por sua vez começaram a ser substituídas pelas lâmpadas de VSAP, isso se deu de forma mais intensa a partir do início dos anos 90 (BURINI JUNIOR, 2011).

O desenvolvimento cerebral está diretamente relacionado com as funções da visão, assim a luz tem papel fundamental para tal. As necessidades humanas elevam-se de maneira exponencial exigindo cada vez mais recursos. Os sistemas de transporte, de comunicações, de captação de resíduos, de abastecimento de água e energia, dentre outros, precisam uns dos outros para sua continuidade. Os habitantes das cidades tornaram-se dependentes destes serviços, que no princípio surgiram como

comodidades e rapidamente foram incorporados na vida dos cidadãos, ficando estes completamente dependentes dos mesmos. Quando qualquer um destes sistemas falha, a situação torna-se caótica, sendo percebida mais drasticamente nas grandes metrópoles. Dentre estes serviços está o de iluminação pública que tem como objetivo estender o dia dos cidadãos. O reconhecimento de locais, pessoas, plantas, animais, obstáculos, objetos, dentre outros, é possível por intermédio do sentido da visão sendo que este depende da luz. A ausência dela nos priva deste sentido, e conseqüentemente de grande parte de nossas capacidades.

Com o incremento do trabalho, lazer e comércio à noite e com a mobilidade cada vez maior da população, o contingente de pessoas que utiliza este período para realização de atividades cresce a cada dia. A possibilidade de ocupação deste período para a realização de atividades tornou-se um fator de cidadania e assim a iluminação pública tornou-se uma exigência, a ser proporcionado pelo poder público.

Dentre as razões que levam as autoridades a instalar luminárias em ambientes públicos, para iluminação noturna estão os fatos de aumentar a sensação de segurança dos transeuntes, reduzir acidentes automobilísticos, possibilitar a visibilidade noturna dos pedestres e promover o comércio (IES, 2000).

No caso da segurança, um ambiente mais iluminado à noite melhora a visibilidade e isso coíbe a ação de criminosos, pois aumenta o risco de serem reconhecidos ou interceptados durante uma possível investida contra a lei. Além disso, com uma via melhor iluminada ocorre um aumento do fluxo de pessoas que acabam por coibir a ação de criminosos (FARRINGTON, 2002).

1.1 A importância da Iluminação Pública

A escuridão aumenta os perigos dos usuários das vias, pois reduz a distância que podem enxergar os obstáculos. Geralmente os acidentes noturnos são mais

frequentes e mais sérios, segundo a IES¹, a taxa de acidentes fatais à noite em vias não iluminadas é aproximadamente três vezes maior do que a taxa de acidentes no período diurno, relativamente às distâncias percorridas em cada período. Esta relação aproximada também foi encontrada em estudos realizados pela CIE² (IESNA,2000), (LICHT, 2011).

Esta taxa pode ser reduzida quando uma iluminação adequada é instalada, pois permite a visão além da faixa iluminada pelos faróis dos veículos e reduz o ofuscamento vindo deles em sentido contrário, por aumentar o nível de adaptação do olho (IESNA, 2000).

Além da segurança no trânsito, uma iluminação adequada reduz a taxa de criminalidade. Experiências mostraram que atos de violência e crimes contra propriedades são na maior parte dos casos cometidos em áreas escuras, pois quem os comete está menos inibido nestes lugares devido a um menor risco de ser identificado e por as vítimas estarem mais inseguras e vulneráveis (LICHT, 2011).

1.2 Iluminação Pública no Brasil

A iluminação pública no país corresponde a aproximadamente 4,5 % da demanda nacional e a cerca de 3,0 % do consumo total de energia elétrica do país. Estes valores equivalem a uma demanda de 2,2 GW e a um consumo de 9,7 bilhões de kWh/ano. Segundo o levantamento cadastral realizado pela ELETROBRAS, feito em 2008 junto às distribuidoras de energia elétrica, há 15 milhões de pontos de iluminação pública instalados no país, aproximadamente, distribuídos conforme o gráfico apresentado na Figura 1.1 (ELETROBRÁS, 2011).

¹ IES (IESNA)– *Illuminating Engineering Society of North America*

² CIE - *Commission Internationale de l'Eclairage* ou em português *comissão internacional de iluminação*



Figura 1.1 - Distribuição do consumo de energia em iluminação pública no Brasil (ELETROBRÁS,2008)

Como a iluminação pública é considerada como um serviço público de interesse local, e conforme definido pela Constituição Federal, fica a cargo dos municípios a responsabilidade pela prestação deste serviço. Até o ano de 1996, antes das privatizações, grande parte dos sistemas era mantida pelas concessionárias de distribuição. Após a privatização, muitas não tiveram interesse em continuar a administração dos sistemas de ILP e transferiram a responsabilidade de manutenção para os municípios.

Embora atualmente ainda existam instalações onde as concessionárias são as responsáveis, uma recente resolução da ANEEL, a 414/10, diz que a partir de setembro de 2012, todas as prefeituras serão responsáveis pela manutenção da infraestrutura de iluminação pública, como postes, reatores e lâmpadas. Esta decisão tem causado polêmica, pois segundo reportagem na página da câmara dos deputados, a representante da frente nacional dos prefeitos, Dárcy da Silva Vera, apresentou um cálculo onde a despesa para as prefeituras aumentaria em 28 % com esta decisão. Elas discordam e prometem recorrer da decisão da ANEEL (AGÊNCIA CAMARA DE NOTÍCIAS, 2012).

No caso da responsabilidade do município, todas as despesas relativas à prestação do serviço, caracterizadas pela instalação, manutenção e consumo de energia elétrica, deverão ser arcadas pelos mesmos, sendo que muitas vezes os municípios terceirizam este serviço, podendo ser para a própria concessionária.

Quando a instalação é de responsabilidade da concessionária de energia elétrica que obteve concessão, são definidas em cada contrato as condições para exploração dos serviços (FROÉS DA SILVA, 2006).

Em qualquer forma, todos os gastos com este serviço são pagos pelos contribuintes. Medidas para redução nos gastos, principalmente de manutenção e consumo de energia, e melhora na eficácia do sistema devem ser constantemente avaliadas para evitar desperdícios de recursos por parte da prefeitura e melhorar o serviço para a população. Estes gastos estão diretamente relacionados com o tipo de luminárias e lâmpadas utilizadas. A distribuição referente aos tipos de lâmpadas para ILP utilizadas no Brasil é dado pela ELETROBRÁS e é apresentada na Tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Relação dos tipos de Lâmpadas utilizados no Brasil

Tipo de Lâmpada	Quantidade (un)	Porcentagem
Vapor de sódio (VSAP)	9.294.611	62,93 %
Vapor Mercúrio (VMAP)	4.703.012	31,84 %
Mista	328.427	2,22 %
Incandescente	210.417	1,42 %
Multi-Vapor Metálico (MVM)	108.173	0,73 %
Outras	5.134	0,03 %
Total	14.769.309	100 %

Fonte: (ELETROBRAS, 2011)

De acordo com a tabela, a maior parte da iluminação de espaços públicos, atualmente é realizada com o emprego de lâmpadas VSAP, seguido pelas lâmpadas menos eficientes de vapor de mercúrio. Cada tipo de lâmpada possui características

elétricas e luminosas próprias e estas devem ser analisadas para o correto projeto de uma instalação.

Os sistemas de iluminação pública devem ser caracterizados não somente pela potência das lâmpadas, mas sim por todo o conjunto de iluminação que compõe a fonte luminosa. As luminárias utilizadas para este fim devem estar de acordo com os requisitos ambientais, energéticos e luminosos.

Cada tipo de fonte luminosa tem capacidade de emitir um determinado fluxo luminoso, expresso em lumens (lm). Sendo a unidade de energia elétrica consumida o Watt, é possível definir a eficácia do sistema como lumens por Watt (lm/W). Em geral, a luz produzida pelas fontes não é direcional, mas sim espalhada em seu entorno. Neste caso torna-se necessário o uso de refletores ou lentes, responsável por direcionar a luz para o plano de trabalho. A Figura 1.2 relaciona as características dos principais tipos de lâmpadas.

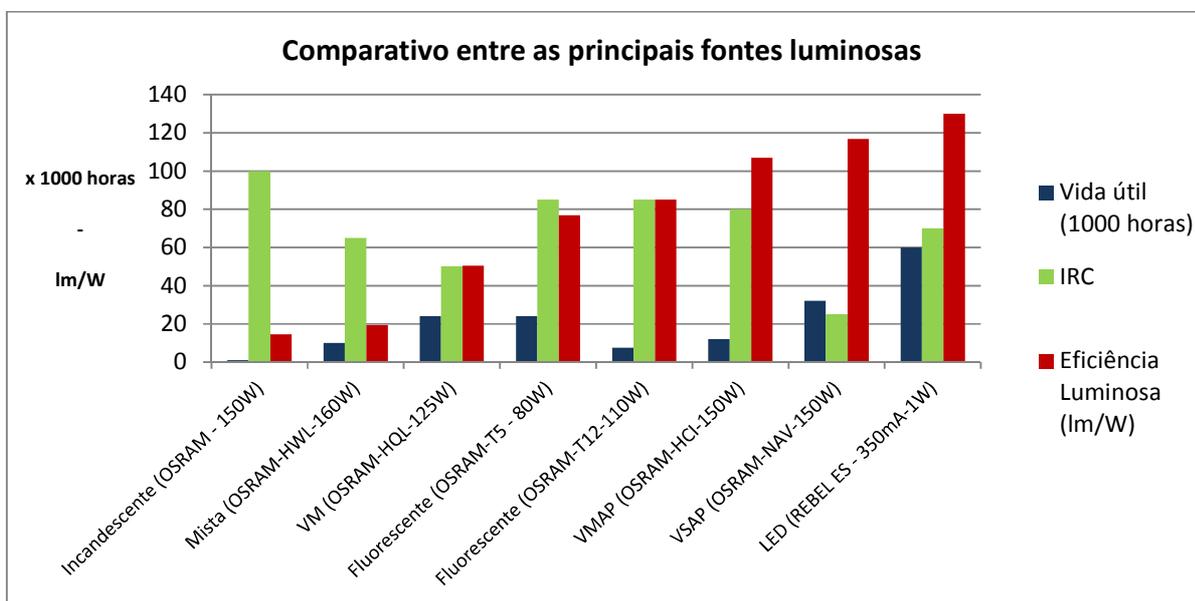


Figura 1.2 - Comparativo entre as principais fontes luminosas (OSRAM,2012b) (LUMILEDs,2011b)

Pode-se notar que as lâmpadas VSAP apresentam uma eficiência luminosa próxima a 120 lm/W e uma expectativa de vida na faixa de 30.000 horas. Estas

características fizeram com que este tipo de lâmpada fosse o mais comum empregado em iluminação pública, pois dentre as tecnologias tradicionais é a que melhor se adapta para este fim. Embora possua um baixo IRC, próximo a 30, isso não é um impeditivo para uso em vias públicas, pois o interesse é iluminar, sendo que a qualidade da luz por muitas vezes não é considerada. Será visto neste trabalho, que, com o advento da tecnologia de LED, são alcançadas eficiências luminosas de ordem superior às destas lâmpadas, com a vantagem de possuir uma luz com melhores características luminosas. Com os LEDs podem-se obter índices de reprodução de cores acima de 70, o que permite uma melhor reprodução das cores e assim uma melhor iluminação das vias. A evolução do rendimento dos LEDs vem crescendo de forma mais acelerada que as outras fontes de luz já consolidadas. A Figura 1.3 apresenta como está ocorrendo esta evolução.

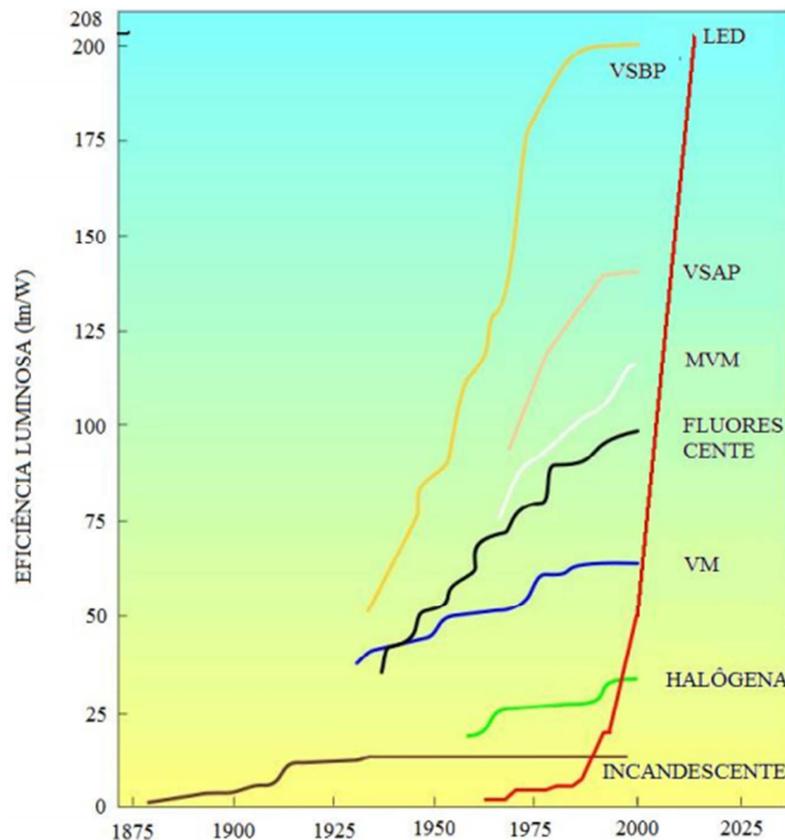


Figura 1.3 - Evolução das fontes luminosas (SALES, 2011)

Além disso, as lâmpadas vapor de sódio apresentam um tom de luz amarelado, que é menos eficiente que o tom de luz azulado possível com os LEDs, para a visão noturna, assim para uma mesma sensação luminosa dos usuários, torna-se possível a utilização de menos potência elétrica quando os LEDs são utilizados. Esta característica será tratada de forma mais aprofundada no capítulo 6.

Segundo Costa e Diniz, em artigo publicado pela revista *Lumière*, o Brasil continua atrasado em relação a outros países em relação à implementação de políticas públicas na área de conservação e eficiência energética. São encontradas perdas significativas na transmissão elétrica, que foram relatadas por comissão especial do Tribunal de Contas da União (TCU), da ordem de 17 %. Em países como Europa e EUA este número é na ordem de 5 %. Assim existe um grande potencial de economia de energia que se poderia alcançar com soluções já existentes (LUMIÈRE, 2012).

O PNEf (Plano Nacional de Eficiência Energética) estima uma possível redução na ordem de 9 % da demanda e na economia de energia, em se tratando de ILP, isso considerando a substituição das lâmpadas menos eficientes por lâmpadas de vapor de sódio (LUMIÈRE, 2012).

Assim a substituição por luminárias de LEDs pode gerar uma redução muito mais significativa, como poderá ser vista nos próximos capítulos. Estes ganhos já estão gerando um acréscimo na demanda de produtos de LED, segundo publicação da ABILUX (Associação Brasileira da Indústria de Iluminação) entre janeiro e maio do ano de 2011, a Philips *lighting* obteve um crescimento de 300 % nas vendas de Lâmpadas de LED no mercado brasileiro (ABILUX, 2011).

1.3 Reluz

A ELETROBRÁS tem incentivado a apresentação de projetos, com o objetivo de melhorar a eficiência dos serviços públicos relacionados com o uso da energia elétrica. No ponto de vista da Iluminação pública, foi criado o Programa Nacional de Iluminação Pública Eficiente - RELUZ, com o intuito de melhorar a qualidade de vida da população, a segurança pública e o turismo, valorizar os espaços públicos urbanos bem como

promover a educação ambiental, gerar empregos e promover a gestão mais eficaz dos recursos públicos em função do uso racional e eficiente da energia elétrica (ELETROBRAS, 2011).

Além da ILP o programa também envolve projetos de efficientização da sinalização de semáforos. O programa foi instituído no ano de 2000, e implementado pelas concessionárias de energia com a participação das prefeituras, e seu prazo final foi o ano de 2010. O Reluz propunha algumas alternativas para a substituição das lâmpadas já instaladas por modelos que apresentassem melhor eficiência, essa relação é apresentada na Tabela 1.2 (RELUZ, 2004).

Tabela 1.2 - Sugestão do RELUZ para lâmpadas alternativas

Lâmpada Existente	Alternativa de Lâmpada Eficiente
2 x Fluorescente 40W	
Incandescente 100 a 300W	VSAP 70W
Mista 160W	
Mercúrio 80W	
Halógena 400W	
Halógena 500W	
Incandescente 1000W	VSAP 150W
Mista de 500W	
Mercúrio 250W	
Halógena 1000W	VSAP 250W
Mercúrio 400W	
Halógena 1500W	VSAP 400W
Mercúrio 700W	

Fonte: RELUZ, 2004

Nota-se que a sugestão tratava sempre da alteração dos modelos existentes por modelos do tipo VSAP, que além de mais eficientes apresentam uma vida útil bem mais elevada, conforme visto na Figura 1.2.

Segundo dados da ELETROBRÁS, as melhorias foram feitas em todas as regiões do país, sendo que a economia total atingida foi de cerca de 626.892 MWh/ano em todo o Brasil distribuída conforme o gráfico da Figura 1.4 (ELETROBRÁS, 2009).

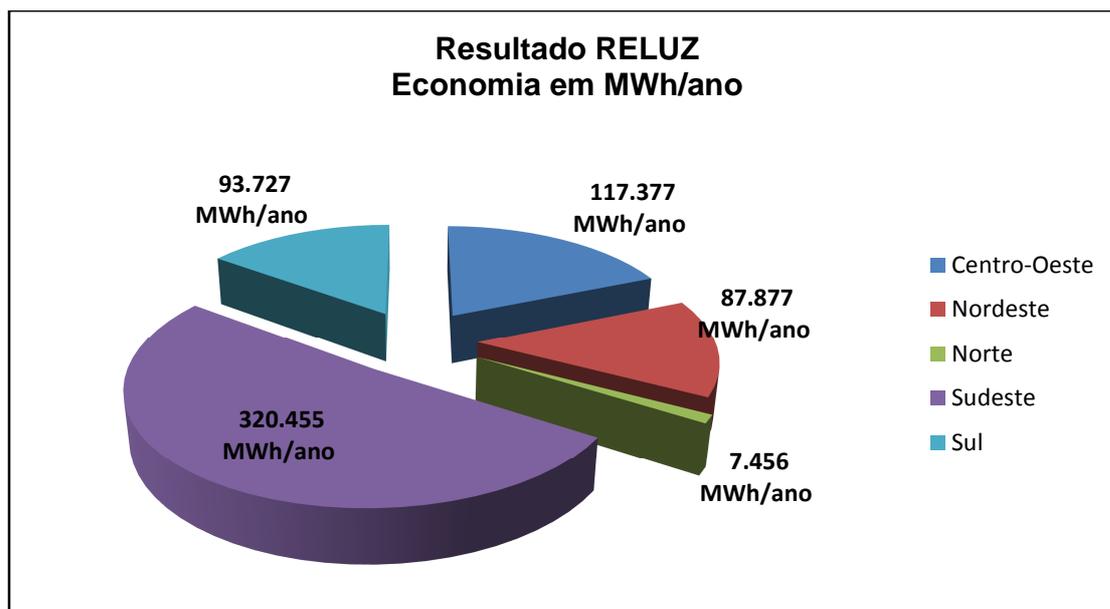


Figura 1.4 - Resultado do programa RELUZ (ELETROBRÁS, 2009).

Como referência, a produção da usina de Itaipu no ano de 2010, gerada por suas 20 turbinas foi de 85.970 GWh, assim a economia gerada pelo programa RELUZ representa 15 % da energia gerada por uma turbina durante o ano (ITAIPU, 2011).

1.4 Tarifação

Os sistemas de iluminação pública são ativados basicamente à noite, pois são raros os dias cuja claridade é baixa o suficiente para ativá-los. O horário de funcionamento muda de região para região, pois depende da sua posição no globo

terrestre. Embora possível, ainda é inviável o uso de medidores de potência para cada luminária, assim a forma encontrada para a estimativa do consumo de energia do sistema de ILP é feito por meio de um cálculo que leva em conta a potência do conjunto reator mais lâmpada e o período médio que permanece ligado. Como o controle é realizado por intermédio de relés sensíveis à luz do dia, foram realizados estudos do tempo médio de escuridão no Brasil e a partir daí foi convencionado que o período médio de operação diária dos sistemas de ILP considerado é de 12 horas. Dessa forma para critérios de cobrança do consumo de energia elétrica pela companhia distribuidora, a resolução nº 456 da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) estabelece um valor base de 360 horas de operação mensal (ANEEL, 2000).

O faturamento das contas de consumo de energia elétrica associadas à iluminação pública no Brasil é realizado pelas concessionárias de distribuição de energia elétrica, geralmente através do cadastro dos pontos de iluminação pública dos municípios. O cadastro relaciona a quantidade de pontos de iluminação divididos por tipo de lâmpada utilizada e potência (FROÉS DA SILVA, 2006).

Entretanto a resolução nº 456/2000 da ANEEL, menciona no artigo 32 que, “no caso de fornecimento destinado para iluminação pública, efetuado a partir de circuito exclusivo, a concessionária deverá instalar os respectivos equipamentos de medição quando solicitados pelo consumidor” (ANEEL, 2000).

Basicamente, as concessionárias de energia possuem duas tarifas para iluminação pública, definidas pelo artigo 116 da resolução 456 da ANEEL, a tarifa B4a, quando o poder público for o proprietário do sistema de iluminação e a tarifa B4b quando a propriedade for da concessionária (ANEEL, 2000).

O custo da energia tarifada para concessionária RGE (Rio Grande Energia), atuante na região norte e nordeste do estado do Rio Grande do Sul, para o ano corrente é de R\$ 0,217 / kWh para a tarifa B4a e de R\$ 0,239 / kWh para a tarifa B4b. Para referência o custo do kWh para o uso residencial típico é de R\$ 0,423 / kWh (RGE, 2012). Assim, a concessionária de energia, recebe cerca de 45% a menos pela venda de energia para a ILP do que pela venda para o setor residencial.

Do ponto de vista das concessionárias, os programas de eficiência em ILP podem gerar benefícios indiretos pois economizam energia no segmento onde a tarifa é menos atrativa, e ainda sem diferenciação horária. Em outras palavras, a economia de potência em ILP, poderia ser encarada como a possibilidade de fornecimento a outro segmento de tarifação maior (FROÉS DA SILVA, 2006).

1.5 Normas Pertinentes

Qualquer projeto de iluminação, seja ele de interiores, espaços públicos, túneis ou vias, deve seguir determinadas recomendações regidas por normas. No caso da Iluminação pública, alvo deste trabalho, a metodologia de medição e dados referenciais são definidos pela norma ABNT NBR 5101 (ABNT, 2012). Esta norma foi revisada recentemente sendo que sua última revisão foi publicada em fevereiro de 2012. As principais mudanças se deram na forma de classificação das vias, que estão de acordo com o código de trânsito brasileiro e foram acrescidas as considerações sobre luminância, como já ocorre em outros países Europeus bem como Estados Unidos (IES, 2000).

Além da norma para vias públicas outra norma brasileira rege a iluminação em túneis, a ABNT NBR 5181 – Iluminação de Túneis. Estas normas estipulam os valores mínimos para cada situação (RODRIGUES, 2012).

As luminárias também deverão atender os requisitos gerais definidos pela norma brasileira a ABNT NBR IEC 60598-1 – Luminárias: Requisitos Gerais e Ensaio, que especifica requisitos para luminárias incorporando fontes elétricas de luz com tensões de alimentação não superiores a 1000 V. Esta norma especifica as condições da construção mecânica, elétrica, de classificação e marcação, juntamente com os ensaios correspondentes (ABNT, 2010).

Ainda em se tratando de luminárias, a norma NBR 15129 – Luminárias para iluminação pública - requisitos particulares, estipula os requisitos para luminárias de Iluminação pública e outros tipos de aplicações externas com equipamentos auxiliares

integrados ou não, e com altura mínima em relação ao solo de 2,5 metros. Assim esta norma pode ser aplicada para luminárias ILP de LEDs (ABNT, 2004).

Para a iluminação de LEDs algumas normas de âmbito internacional são utilizadas. A LM 79 – *Electrical and Photometric Measurements of Solid-State Lighting Products*, publicada pela IES, e que trata das recomendações para ensaios e medição de produtos SSL (*Solid State Lighting*) ou iluminação de estado sólido, termo utilizado para se referir a produtos que utilizam LEDs como fontes de Luz (IES, 2008a).

Outra norma relevante é a LM 80 – *Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources*, que trata das condições para ensaio dos LEDs propriamente ditos, a qual define a metodologia para medição da variação das características fotométricas em função do tempo, como a variação do fluxo luminoso e coordenadas cromáticas (IES, 2008b).

Complementar à LM 80, foi publicada a TM 21 também pela IES, esta norma intitulada de *Projecting Long Lumen Maintenance of LED Light Sources*, utiliza os dados coletados através da LM80, para extrapolar o tempo de duração dos LEDs. Visto que estes dispositivos possuem uma expectativa de vida bastante elevada e seria impraticável ensaiá-la em tempo real (IES, 2011).

Muito já foi estudado no passado a respeito da variação da eficiência da visão humana de acordo com a luminosidade do ambiente em que se encontra e a coloração da luz emitida pelas fontes luminosas, entretanto agora com a disseminação dos LEDs, que podem emitir luz com diferentes tonalidades de cor facilmente, este assunto voltou a ser pesquisado. Com isso, foi publicado pelo CIE, em 2010, um reporte técnico identificado como CIE 191, que traz a relação de eficiências da visão humana quando em ambientes com diferentes níveis de iluminação e para diferentes temperaturas de cor da fonte luminosa (CIE, 2010).

Em se tratando da qualidade da energia, pode-se citar que a norma IEC 61000-3-2, que é uma referência mundial para limites de harmônicos de equipamentos elétricos, especifica as amplitudes relativas máximas dos componentes harmônicos na corrente de entrada dos equipamentos, sendo que a classe C desta norma trata dos requisitos para sistemas de iluminação (RODRIGUES, 2012).

Recentemente foram publicadas as primeiras normas referentes à drivers de LED no Brasil, a ABNT NBR 16026 de 2012, que trata das dos requisitos de desempenho para dispositivos de controle eletrônico alimentados em corrente contínua ou alternada para módulos de LED. Além desta, a ABNT NBR IEC 61347-2-13 se refere aos requisitos particulares de segurança para os dispositivos de controle eletrônicos para módulos de LED (ABNT, 2012).

Normas brasileiras específicas para a iluminação com LEDs estão sendo discutidas, entretanto até o momento foram liberadas para consulta pública mas ainda não foram publicadas oficialmente. Dentre estas pode-se citar: NBR IEC 62663-1 e NBR IEC 62663-2 referente a lâmpadas LED sem dispositivo de controle incorporado de base única – requisitos de segurança e de desempenho respectivamente a cada norma; NBR IEC 62560 e NBR IEC PAS 62612 referente à lâmpadas LED com dispositivo de controle incorporado para serviços de iluminação geral para tensão >50V – especificações de segurança e de desempenho, respectivos a cada uma das normas; NBR IEC62031 e NBR_IEC_62717 referente à módulos de LED para iluminação em geral – especificações de segurança e de desempenho respectivamente (ABNT,2012).

Para Iluminação Pública, foi criado um RAC (Requisitos de Avaliação da Conformidade), para criação de uma portaria junto ao INMETRO para estipular características mínimas para a fabricação e comercialização deste tipo de luminária no Brasil, entretanto este RAC ainda não está oficializado mas circula entre os fabricantes de luminárias deste tipo para adequações.

2 CONCEITOS DE ILUMINAÇÃO

Neste capítulo serão tratados os conceitos básicos de iluminação, revisando as características da luz e seu comportamento. Também serão abordadas as formas de medição e representação das características fotométricas das fontes da luz, que são de extrema importância para a correta avaliação do projetista no momento da criação de um projeto.

2.1 Luz

A luz, dita visível, pode ser traduzida como uma radiação eletromagnética que tem a propriedade de ser percebida pelo olho humano. Assim como a luz visível, existem outros tipos de radiação eletromagnética como, por exemplo, podem-se citar os raios X, raios gama, radiação infravermelha, radiação ultravioleta, ondas de rádio, dentre outros. As características e efeitos destas radiações são determinados pela sua frequência e, conseqüentemente, pelo seu comprimento de onda, observado devido a sua natureza ondulatória.

Os comprimentos de onda que podem produzir uma sensação visual estão compreendidos na faixa de 380 à 780nm. Comprimentos de onda não compreendidos nessa faixa possuem outras funções e não proporcionam sensação visual nos seres humanos. A Figura 2.1 apresenta uma relação das ondas eletromagnéticas mais comuns.

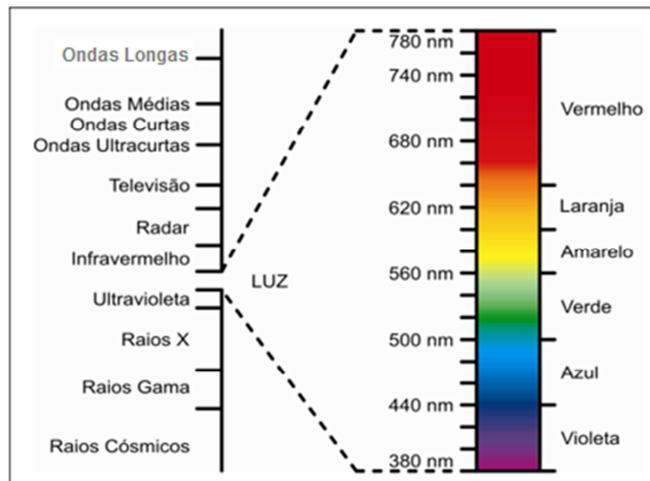


Figura 2.1 - Ondas eletromagnéticas e distribuição do espectro da Luz

A luz, quando refletida ou refratada, sofre desvio e em seguida continua um trajeto retilíneo. Sua velocidade aproximada em linha reta no vácuo é de 3×10^8 m/s.

Basicamente a radiometria trata do estudo da radiação eletromagnética, que é a radiação que pode ser medida pela utilização de certas técnicas e equipamentos (espelhos, lentes, prismas, filtros, etc.). Já a fotometria é um ramo da radiometria que estuda somente a radiação que pode ser percebida pelo olho humano (IES, 2000).

2.2 Colorimetria

A colorimetria é a ciência que estuda os fenômenos relacionados com a cor. A cor é a componente da sensação visual que depende fundamentalmente da distribuição espectral da luz. Uma cor específica somente consegue ser distinguida de outra, quando o seu estímulo é processado pelo sistema nervoso do olho e interpretado pelo cérebro. A colorimetria na prática utiliza métodos comparativos “*color matching*” associados com medições de fenômenos físicos correlatos com a percepção da cor.

Dentro da faixa de comprimentos de onda da luz, cada cor está associada a um comprimento específico, como pode ser visto na Figura 2.1. que apresenta o espectro

de luz visível ao ser humano e as cores com seus respectivos comprimentos de onda.

Em 1913 foi criada a CIE, como fórum para troca de informações e padronização de grandezas relacionadas à iluminação. No mesmo ano, a CIE elaborou o primeiro modelo para a cor, baseado na percepção de cor totalmente independente de qualquer dispositivo bem como das características da fonte e da emissão. A premissa do modelo foi a padronização dos iluminantes (fontes de luz) e das características do observador.

Foi então elaborado um diagrama de cromaticidade utilizando os valores das grandezas matemáticas dos valores dos tristímulos³. A quantidade de componentes RGB necessária para gerar uma cor em particular é chamada de valores tristímulos, e são denotadas por X, Y, Z (GAMBA, 2008).

Por meio de uma transformação matemática, os 3 valores X, Y e Z são relacionados com duas variáveis x e y, sendo que dessa forma é possível expressar o diagrama de cromaticidade em uma representação de duas dimensões, conforme apresentada na Figura 2.2.

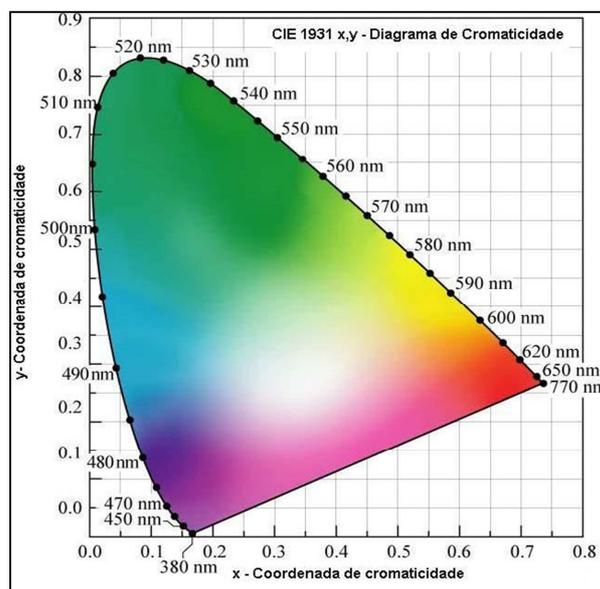


Figura 2.2 - Diagrama de Cromaticidade (SHUBERT, 2006)

³ Valores Tristímulos – De estímulo de cor, são as quantidades dos três estímulos de referência necessários para igualar o estímulo de cor considerado, num sistema tricromático dado (ABNT, 1991).

A curva em forma de ferradura apresenta o lugar geométrico das coordenadas de cromaticidade, sendo que o espaço limitado em seu interior representa toda a gama de cores possíveis. As cores situadas na borda do diagrama são as cores monocromáticas (SCHUBERT, 2006).

A cor branca pura é gerada quando todos os comprimentos de onda visíveis são gerados ao mesmo tempo (OSRAM, 2008).

2.3 Grandezas Luminotécnicas

Os conceitos apresentados nesta seção darão auxílio para o entendimento dos elementos da luminotécnica que são de grande relevância para a interpretação dos parâmetros ópticos das fontes luminosas.

Fluxo Luminoso (ϕ) – É a radiação total da fonte luminosa, percebida pelo olho humano, entre os limites de comprimento de onda de 380 nm a 780 nm. Sua unidade é o lúmen (lm). Uma luz monocromática emitindo uma potência óptica de 1/683 W com comprimento de onda de 555nm tem fluxo luminoso de 1 lm. Comparando com candelas pode-se dizer que 1 cd é igual a 1 lm por esterradiano (SCHUBERT, 2006).

Intensidade Luminosa (I) – É o fluxo luminoso irradiado em uma determinada direção. É expressa em candela (cd). A definição para a leitura de uma intensidade luminosa de 1 cd pode ser entendida como a potência óptica emitida por uma luz monocromática de 1/683 W com um comprimento de onda de 555 nm, dentro de um ângulo sólido de 1 esterradiano. Toda a intensidade de luz medida pode ser traçada em candelas (SCHUBERT, 2006).

Iluminância ou Iluminamento (E) – Em um ponto de uma superfície, é a razão do fluxo luminoso incidente num elemento de superfície que contém o ponto dado, para a área deste elemento (ABNT,1991).

Na prática, é a quantidade de luz dentro de um ambiente e pode ser medida com o auxílio de um luxímetro. Como o fluxo luminoso não é distribuído uniformemente, a iluminância pode não ser a mesma em todos os pontos da área em questão. Considera-

se por isso a iluminância média (E_m). Existem normas especificando o valor mínimo, para ambientes diferenciados pela atividade exercida e relacionados ao conforto visual. Sua unidade de medida é o Lux (COSTA, 2004).

Luminância (L) – Das grandezas mencionadas, nenhuma é visível, isto é, os raios de luz não são vistos, a menos que sejam refletidos em uma superfície e aí transmitam a sensação de claridade aos olhos. Essa sensação de claridade é chamada de Luminância. Em outras palavras, é a Intensidade Luminosa que emana de uma superfície, pela sua superfície aparente. Sua unidade é a candela por metro ao quadrado (cd/m^2) (COSTA, 2004).

Temperatura de Cor Correlata (TCC) – É a temperatura de um corpo negro cuja cor percebida se assemelha o mais próximo possível, nas condições de visão especificadas, àquela do estímulo dado de mesma luminosidade, e sua unidade é o Kelvin (K) (ABNT,1991).

É a grandeza que expressa a aparência de cor da luz. Quanto mais alta a temperatura de cor, mais branca é a cor da luz. A “luz quente” é a que tem aparência amarelada e temperatura de cor baixa: 3000 K ou menos. A “luz fria”, ao contrário, tem aparência azul-violeta, com temperatura de cor elevada: 6000 K ou mais. A “luz branca natural” é aquela emitida pelo sol em céu aberto ao meio-dia, cuja temperatura de cor é de 5800K.

Índice de Reprodução de Cores (IRC ou R) – É a avaliação quantitativa do grau de aproximação entre a cor psicofísica de um objeto iluminado pelo iluminante sob ensaio, e a do mesmo objeto iluminado pelo iluminante de referência, sendo o estado de adaptação cromática considerado de maneira correta (ABNT,1991).

Em outras palavras é a medida de correspondência entre a cor real de um objeto ou superfície e sua aparência diante de uma fonte de luz. A luz artificial, como regra, deve permitir ao olho humano perceber as cores corretamente, ou o mais próximo possível da luz natural. Lâmpadas com IRC de 100 % apresentam as cores com total fidelidade e precisão. Quanto mais baixo o índice, mais deficiente é a reprodução de cores. Os índices variam conforme a natureza da luz e são indicados de acordo com o uso de cada ambiente (COSTA, 2004).

Ofuscamento – O ofuscamento é sentido quando lâmpadas, luminárias, janelas ou outras áreas são “claras” demais comparadas com a luminosidade geral do local. O ofuscamento pode ser direto ou refletido. O primeiro é causado por uma fonte luminosa de grande porte no campo de visão do observador, enquanto o segundo ocorre quando o observador percebe a reflexão desta fonte em uma superfície especular.

O ofuscamento também pode estar presente de duas maneiras, sendo que podem ocorrer separadamente ou juntas. O ofuscamento inabilitador ou fisiológico, que dificulta a visão de objetos e o ofuscamento conhecido como desconfortável ou psicológico que é experimentado como um senso de desconforto que aumenta com o tempo (PHILIPS, 1986).

O ofuscamento inabilitador, é caracterizado pelo incremento linear ou *Threshold increment* (TI), que é expresso em porcentagem e depende a luminância veladora equivalente e da luminância média da via. A equação (2.1) faz a relação para cálculo deste valor (HARGROVES, 1983).

$$TI = 65 \frac{L_v}{L_{med}^{0,8}} \quad (2.1)$$

A perda do desempenho visual devido ao ofuscamento pode ser compreendida considerando o efeito dentro do olho sob a luz. A luz é refratada na direção da retina e causa um véu claro, superposto sobre a imagem nítida da cena de frente ao observador. A iluminância deste véu é a chamada luminância veladora (L_v) e é calculada por meio de uma fórmula empírica, conforme equação (2.2) (PHILIPS, 1986).

A luminância de véu equivalente é a soma das iluminâncias de véu relativas a cada uma das fontes luminosas contribuintes (IES, 2000).

$$L_v = k \sum_{i=1}^n \frac{E_{olho\ i}}{\theta_i^2} \quad (2.2)$$

Onde:

E_{olho} - iluminância sobre o olho

θ - ângulo entre a direção de visão e a incidência de luz no olho

k - fator correspondente à idade. O fator 10, correspondente ao olho de um indivíduo de 25 anos de idade é utilizado para fins de cálculos.

Índice i - Corresponde às fontes luminosas avaliadas.

Já o ofuscamento desconfortável é dado pelo índice G, e foi definido de forma experimental com um grande número de observadores. A Tabela 2.1 relaciona valores de 1 a 9 para quantificar o nível de ofuscamento desconfortável.

Tabela 2.1 - Índices de ofuscamento desconfortável

Índice (G)	Ofuscamento	Avaliação
1	Intolerável	Ruim
2	-	-
3	Perturbador	Inadequada
4	-	-
5	Admissível	Razoável
6	-	-
7	Satisfatório	Boa
8	-	-
9	Imperceptível	Excelente

Dentre os fatores que mais influenciam o ofuscamento desconfortável estão a intensidade luminosa emitida pela fonte nos ângulos de 80° e 88°, a luminância média da superfície da via, a altura entre o nível do olho do observador e a luminária, o número de luminárias por quilômetro, a área luminosa das luminárias projetada sob o ângulo de 76° e a coloração da luz (PHILIPS, 1986).

2.4 Relações básicas em luminotécnica

Nesta seção serão apresentadas algumas informações relativas ao comportamento da Luz, as quais são importantes para o entendimento e projeto de um sistema de ILP.

2.4.1 Lei do inverso dos quadrados

A lei do inverso dos quadrados relaciona o valor de iluminância com a distância entre a fonte e o plano iluminado. Define-se que o fluxo luminoso por unidade de área varia de forma inversamente proporcional ao quadrado da distância. E é dada pela relação da equação (2.3) (RYER, 1998).

$$E = \frac{I}{d^2} \quad (2.3)$$

Onde:

E – Iluminância no ponto

I – Intensidade Luminosa na direção do ponto

d – Distância entre a fonte luminosa e o ponto

2.4.2 Aproximação para consideração de fonte puntiforme

A lei dos inversos dos quadrados somente pode ser utilizada em casos onde as fontes luminosas se aproximam de uma fonte pontual. Uma regra geral para considerar uma fonte como sendo puntiforme, é que esteja a uma distância de aproximadamente 5

vezes seu tamanho, a partir do observador. Conforme Ryer, utilizando a lei em questão, quando o observador estiver a esta distância, o erro entre o valor real e o cálculo é menor que 1 % (RYER, 1998).

2.4.3 Lei dos Cossenos ou lei de Lambert

A iluminância que atinge qualquer superfície varia com o cosseno no ângulo de incidência da luz “ θ ”. O ângulo de incidência é o ângulo entre o eixo normal, a superfície e a direção da luz incidente. A Figura 2.3 ilustra a iluminância resultante no plano horizontal, quando atingida por raios luminosos inclinados (IES, 2000).

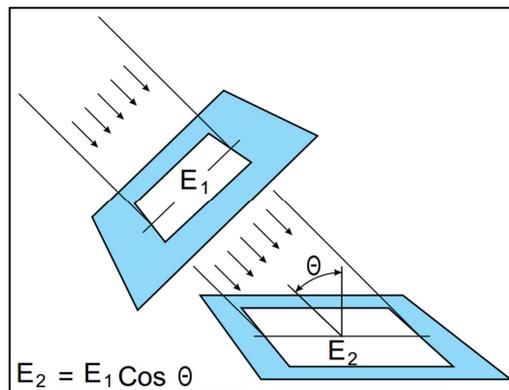


Figura 2.3 - Lei de Lambert

Nota-se pela Figura 2.3 que quando a luz atinge o plano com um determinado ângulo a área onde a luz incide é maior, entretanto sua intensidade diminui. Esta relação é dada pela equação (2.4).

$$E_2 = E_1 * \cos\theta \quad (2.4)$$

Desta forma, a equação para cálculo do iluminamento incidente em um ponto pode ser definido pela equação (2.5).

$$E_2 = \frac{I}{d^2} * \cos\theta \quad (2.5)$$

Nesta equação é relacionada a intensidade luminosa incidente (I) , o ângulo (θ) que relaciona a inclinação de incidência dos raios luminosos e a distância (d) entre a fonte e o ponto (IES, 2000).

2.5 Comportamento da Luz

A luz é uma onda eletromagnética que se desloca pelos meios, podendo ter um comportamento próprio para cada tipo de superfície que atingir. Os comportamentos possíveis para a luz podem ser: Reflexão, Transmissão, Refração, Difração, Interferência e Polarização. Estes comportamentos são apresentados a seguir.

2.5.1 Reflexão

Dependendo do tipo da superfície, basicamente três tipos de reflexão poderão ser formados, a especular, a difusa e a espalhada.

A maioria das superfícies sólidas polidas (brilhantes) são especulares em sua natureza, sendo que até mesmo o vidro transparente reflete uma parcela da luz incidente de forma especular e ocorre quando os raios de luz seguem a lei da reflexão. A reflexão difusa é típica de substâncias formada por pequenas partículas, como superfícies cobertas por pó. Por exemplo, se a farinha for iluminada por uma fonte de luz, não será visto nenhuma componente de brilho em determinada direção. O pó gerará um brilho uniforme independente da direção em que for observado.

Muitas reflexões são combinações de componentes difusos e especulares. Uma manifestação disso é a reflexão espalhada, que tem uma componente direcional dominante e que é parcialmente difundida pelas irregularidades da superfície. A Figura 2.4 apresenta os três tipos de reflexão (RYER, 1998).

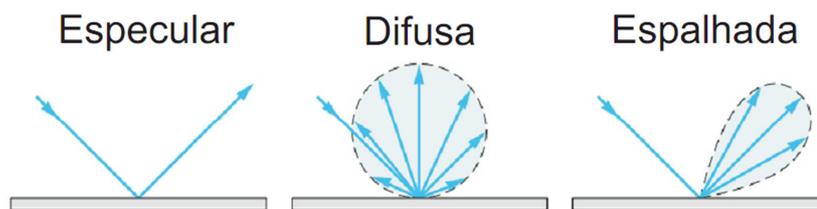


Figura 2.4 - Tipos de reflexão

O conceito de reflexão é indispensável em projetos de luminárias visto que o bom rendimento delas está diretamente relacionado com as características de reflexão dos materiais onde a luz irá incidir. As luminárias convencionais de ILP tem seu corpo basicamente transformado em um refletor.

Na reflexão especular, por exemplo, a luz reflete a partir de uma superfície polida ou espelho seguindo a lei da reflexão, onde o ângulo entre o raio de luz incidente e a normal da superfície é igual ao ângulo entre o raio refletido e a normal. A Figura 2.5 representa esta característica.

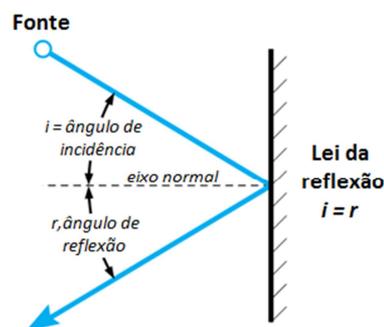


Figura 2.5 - Lei da reflexão especular

2.5.2 Transmissão

Trata-se da capacidade da luz em atravessar determinados materiais, que podem ser classificados como filtros. A absorção da luz por um filtro varia de acordo com o comprimento de onda e a espessura do filtro. Um exemplo do efeito da transmissão da luz em função do comprimento de onda pode ser visto na Figura 2.6.

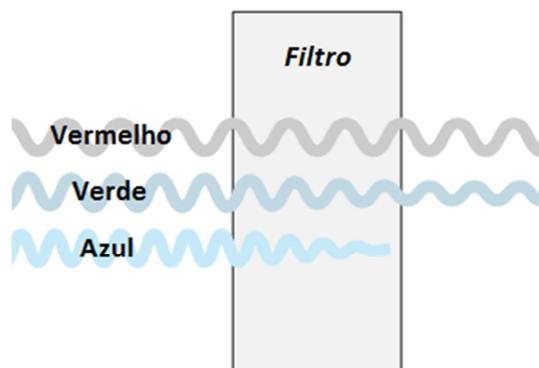


Figura 2.6 - Transmitância em filtro para diferentes comprimentos de onda (RYER, 1998).

A transmitância interna de um material, representada por " τ_i " é a transmissão através de um filtro depois de contabilizadas as perdas de reflexão inicial. É dada pela divisão da transmissão externa, " τ_{ext} ", pelo fator de reflexão do material " P_d " conforme equação (2.6) (RYER, 1998).

$$\tau_i = \frac{\tau_{ext}}{P_d} \quad (2.6)$$

O fator de reflexão do material geralmente é dado pelo fabricante, mas pode ser calculado pela equação (2.7). A variável r_λ representa as perdas por refletância, dada pela equação (2.9), a qual será abordada posteriormente.

$$P_d = 1 - (2 * r_\lambda) \quad (2.7)$$

A lei de Bouger faz uma relação logarítmica entre a transmissão interna dos materiais para um determinado comprimento de onda e sua espessura, esta relação é dada pela equação (2.8).

$$\frac{\log_{10}(\tau_1)}{d_1} = \frac{\log_{10}(\tau_2)}{d_2} \quad (2.8)$$

Sendo:

τ_1 - transmitância interna do filtro 1

τ_2 - transmitância interna do filtro 2

d_1 - espessura do filtro 1

d_2 - espessura do filtro 2

Sendo assim é possível avaliar os valores de transmitância, para diferentes espessuras, lembrando que quanto maior a espessura, menor será o índice de transmitância. Materiais como o vidro apresentam um valor de transmitância específico para cada comprimento de onda e são considerados filtros de radiação ultravioleta, por possuírem um baixo valor de transmitância para ondas curtas. A Figura 2.7 apresenta os valores de transmitância para um vidro liso com espessura de 4 mm (GUARDIAN, 2011).

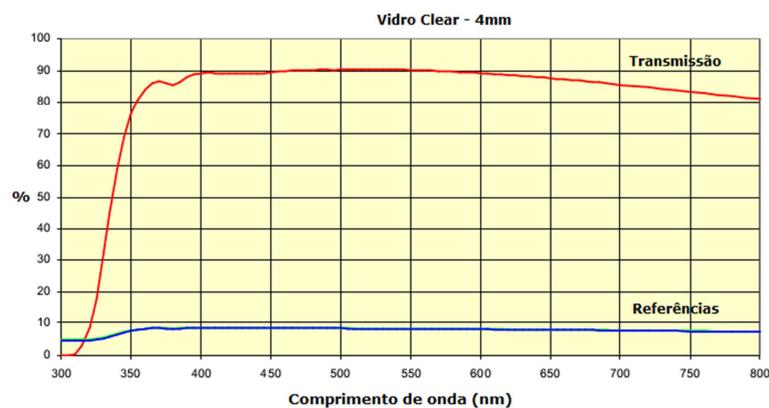


Figura 2.7 - Transmitância do vidro incolor (Adaptado de: GUARDIAN, 2011)

Como as luminárias deverão ser resistentes a impactos, deverá ser avaliado um vidro tal que apresente uma boa relação entre sua resistência mecânica e seu valor de transmitância. Tendo visto que as luminárias em geral deverão estar enquadradas no grau de proteção IK08, seu vidro também deverá suportar um impacto de 5 J.

A perda de transmitância também ocorre quando a luz passa entre dois materiais com índices de refração diferentes, uma quantidade previsível de perdas por reflexão pode ser esperada. Uma forma de calcular esta perda é dada pela lei de Fresnel. As perdas por refletância, em uma incidência normal entre dois materiais com índices de refração diferentes podem ser definidas pela equação (2.9) (RYER, 1998).

$$r_{\lambda} = \frac{(n_{\lambda} - 1)^2}{(n_{\lambda} + 1)^2} \quad (2.9)$$

Onde n_{λ} é a relação entre os índices de refração, e é dado pela equação:

$$n_{\lambda} = \frac{n'}{n} \quad (2.10)$$

Sendo “n” e “n’” os índices de refração do primeiro e do segundo material por onde a luz está incidindo. A Figura 2.8 exemplifica a sequência de perdas de um raio luminoso atravessando um vidro.

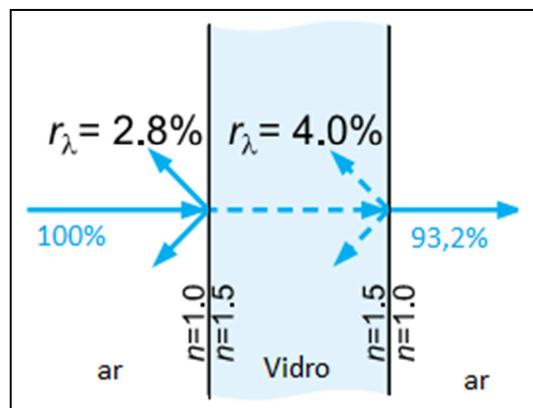


Figura 2.8 - Perdas da luz passando pelo vidro

No exemplo proposto a perda por reflexão na primeira transição entre o ar e o vidro foi de 2,8 %, na segunda transição do vidro para o ar a perda é de cerca de 4 %, assim a transmitância do vidro em questão é de 93,2 %.

2.5.3 Refração

Quando a luz passa por materiais diferentes, os raios desviam e mudam sua velocidade de forma singela, causando um efeito chamado de refração. A refração depende do ângulo de incidência da luz e o índice de refração do material, “n”, como é dado pela lei de Snell mostrada na equação (2.11).

$$n \sin(\theta) = n' \sin(\theta') \quad (2.11)$$

No caso de uma transição entre ar e vidro, por exemplo, o ar possui índice de refração $n=1$ e o vidro possui $n'=1,5$. Se um raio de luz entrar no vidro com um ângulo de θ a partir do eixo normal, sofrerá um desvio e mudará seu ângulo de trajeto para θ' . No momento que trocar novamente de meio passa pelo vidro com um ângulo de θ' e retorna ao ângulo de θ assim que deixa a outra face paralela do vidro.

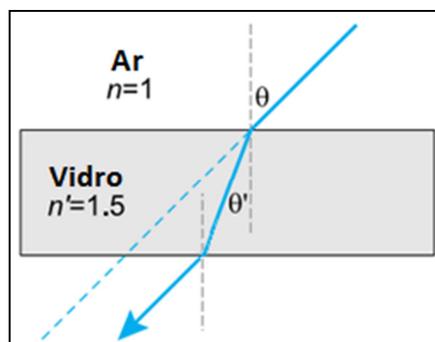


Figura 2.9 - Refração da luz

Quando o raio de luz penetra no material a um ângulo de 0° , como $\sin(0^\circ) = 0$, sua direção não é alterada. Entretanto, a partir de um determinado ângulo de incidência da luz na fronteira entre os dois materiais, ocorre a reflexão interna total. Esse fenômeno ocorre a partir dos ângulos onde o valor de uma das parcelas da equação (2.11) é igual a 1. No caso da situação proposta anteriormente quando a luz passa do vidro para o ar, o ângulo crítico é de $41,8^\circ$, considerando o índice de refração do vidro $n=1,5$. A Figura 2.10 representa graficamente este efeito.

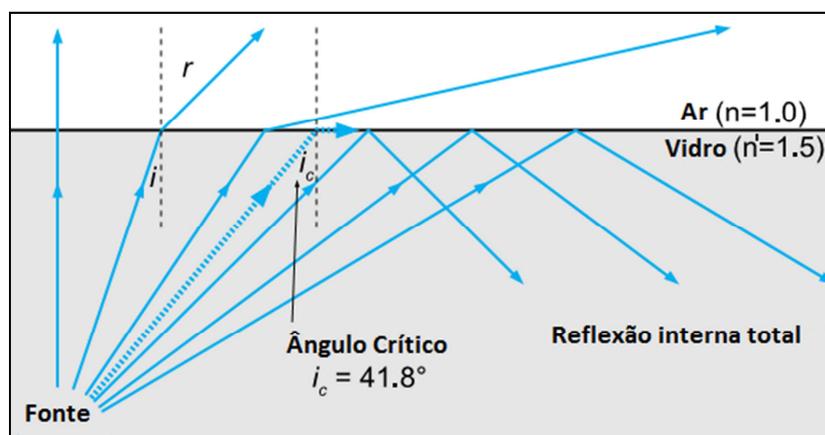


Figura 2.10 - Ângulo crítico para a reflexão interna total

O índice de refração também depende do comprimento de onda. Desta forma, a luz azul, que possui comprimento de onda mais curto, refrata mais do que a luz vermelha, que possui maior comprimento de onda. Este fenômeno é o responsável pela criação dos arco-íris e pela possibilidade de separação do espectro da luz a partir de um prisma (RYER,1998).

A partir deste fenômeno também é possível alterar a direção dos raios luminosos provenientes dos LEDs, através do uso de lentes secundárias com formas livres para controle do direcionamento da luz destes dispositivos.

A influência da transmissão pelo ângulo também pode acarretar em perdas de rendimento luminoso. Assim, além da transmitância do vidro, a angulação em que luz

incide sobre a superfície, também reduz a transmissão da luz e, conseqüentemente, o rendimento da luminária (RORIZ, 2007).

2.5.4 Difração

As ondas de radiação luminosa também podem mudar de direção, quando passam pelas bordas de uma abertura estreita ou por uma fenda. Este fenômeno, conhecido como difração também é dependente do comprimento de onda da radiação visível. A equação (2.12) aproxima o ângulo de difração (θ) de um raio luminoso de acordo com o diâmetro da fenda (D_f) e seu comprimento de onda (λ).

$$\theta = \frac{\lambda}{D_f} \quad (2.12)$$

O efeito da difração é apresentado na Figura 2.11.

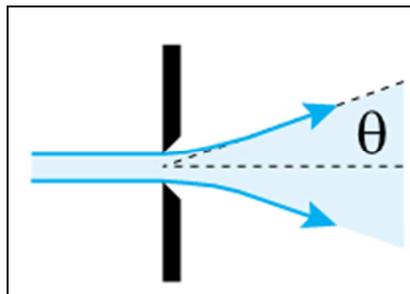


Figura 2.11 - Efeito da difração da luz

Este efeito é negligenciado na grande maioria dos sistemas ópticos, entretanto é explorado em dispositivos do tipo monocromadores, que são capazes de separar a radiação em determinados comprimentos de interesse (RYER, 1998).

2.5.5 Interferência

Quando as ondas eletromagnéticas estão em fase e se sobrepõem, a magnitude da onda aumenta. Em contrapartida, a partir do momento que as ondas que se sobrepõem não estiverem em fase, acabam por se subtraírem. Os filtros de interferência utilizam este efeito para filtrar de forma seletiva a luz por comprimentos de onda (RYER,1998).

2.5.6 Polarização

Sabe-se que a luz que se propaga no espaço livre é uma onda transversal eletromagnética, que consiste em uma oscilação de um campo elétrico (E) e magnético (H) perpendiculares à direção de propagação da onda (k) em todos os instantes de tempo. Se for considerada uma onda sendo propagada na direção positiva do eixo z, os campos E e H terão componentes apenas no plano perpendicular ao eixo z, ou seja, no plano xy, como é o caso da onda apresentada na Figura 2.12 (PUC-Rio,2013).

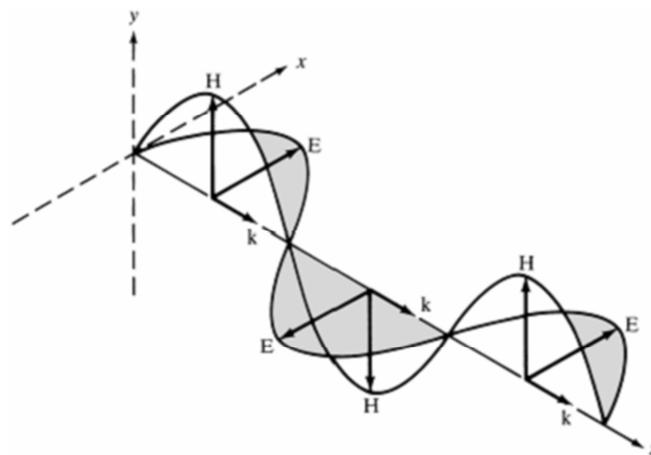


Figura 2.12 - Onda propagando-se no eixo z (PUC-RIO,2013)

A direção da polarização da onda é sempre aquela que corresponde ao campo elétrico, de forma que no caso da Figura 2.12, a onda está polarizada na direção do eixo x. A polarização das ondas eletromagnéticas pode ser classificada em três categorias: linear, circular e elíptica, sendo que estes se referem à figura desenhada no plano perpendicular à direção de propagação da onda (PUC-RIO, 2013).

Assim sendo a polarização é a propriedade de orientação de uma onda eletromagnética, sendo que para tal são utilizados filtros específicos. Um exemplo disto são os óculos de sol, que polarizam a luz em um sentido, impedindo que uma grande quantidade de luz chegue ao olho.

2.6 Representação luminosa das fontes de luz

Para que um profissional possa definir, por exemplo, o tipo e posição de luminárias para determinado projeto, é necessário que o fabricante da luminária forneça características referentes à distribuição luminosa do produto. As informações imprescindíveis para tal são as referentes à intensidade luminosa em cada direção, dadas em candelas e ângulos de abertura. Quando dispostas em forma gráfica, as informações podem ser rapidamente traduzidas no comportamento da luminária.

Atualmente, existem no mercado vários programas de computador aplicados à iluminação, vários deles gratuitos como o Dialux, Relux ou Calculux, que otimizam o tempo do profissional no projeto luminotécnico. Entretanto, para que um aplicativo seja bem empregado é necessário que o projetista saiba exatamente os fatores que afetam o resultado desejado, assim poderá otimizar seu uso.

Na representação gráfica da distribuição da luz de uma luminária, esta é entendida como uma fonte luminosa composta basicamente pelo elemento emissor de luz e seu sistema ótico, onde a ideia básica é a apresentação das medições das intensidades luminosas, emitidas por esta fonte. De acordo com o princípio do comportamento da intensidade luminosa no espaço, a forma mais comum de realizar tal medição, é centrando a fonte luminosa no interior de uma esfera, e realizando as

medições na casca desta esfera. Cada intensidade luminosa pode ser representada por um vetor no qual seu módulo é proporcional ao valor medido, seu sentido é traçado a partir do centro da esfera e sua direção é definida por duas coordenadas angulares, relativas a planos verticais com origem no centro da esfera e ao plano horizontal equatorial que também passa pelo centro e é perpendicular ao eixo vertical.

Os ângulos relativos aos planos verticais são chamados de colatitudes ou alturas (α) e os que estão sobre o plano horizontal são denominados azimutes ou longitudes (C). Denomina-se também que o ângulo de altura de 0° é o nadir, e que o de altura sobre o ângulo de 180° é o zênite. A representação gráfica é apresentada na Figura 2.13 (COSTA, 2004).

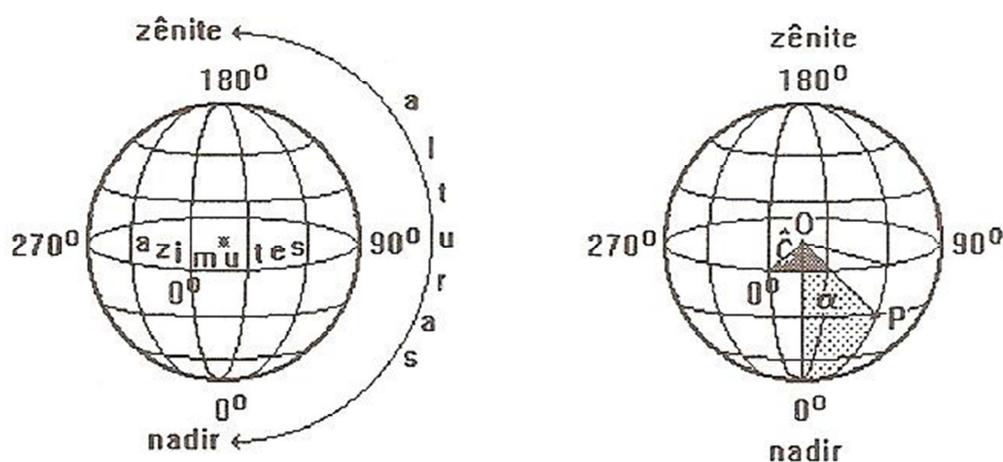


Figura 2.13 - Identificação da intensidade luminosa a partir de um ponto (COSTA, 2004).

Torna-se então necessário transcrever os dados em um plano. De acordo com o tipo de fonte luminosa utilizada, que pode ser simétrica ou não, podem ser utilizados métodos distintos de representação que podem ser mais ou menos representativos dependendo do caso. A seguir serão vistas as principais formas de representação.

2.6.1 Sistema C-Gama (C- γ)

Para a representação da distribuição luminosa de luminárias de iluminação pública, o sistema de coordenadas geralmente utilizado é o “C- γ ”, que conforme a norma CIE 140 especifica que a variável “C” representa os ângulos sobre o plano horizontal e a variável “ γ ” os ângulos do plano vertical em relação ao eixo fotométrico da luminária. Para melhor entendimento este sistema é apresentado na Figura 2.14 (CIE, 2006).

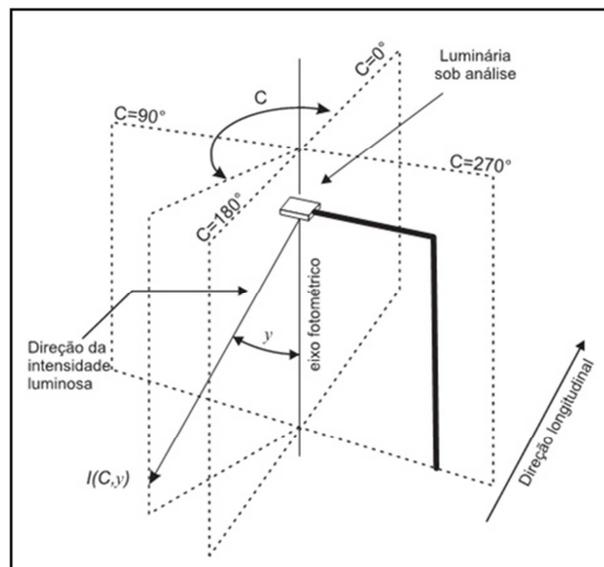


Figura 2.14 - Sistema de coordenadas C, γ (CIE, 2006)

Neste sistema a intensidade luminosa é normalizada e expressa em candelas por kilolúmen (cd/klm). Os valores são obtidos dentro de um intervalo angular de interesse, tanto no sentido de C quanto no de γ (CIE, 2006).

2.6.2 Representação simétrica polar onilateral

Uma das formas mais comuns para representar a resposta angular da luz gerada por uma fonte luminosa é o sistema de coordenadas polares. Este método é largamente utilizado devido ao seu fácil entendimento por meio visual. A Figura 2.15 mostra a intensidade luminosa emitida por uma fonte ao seu redor.

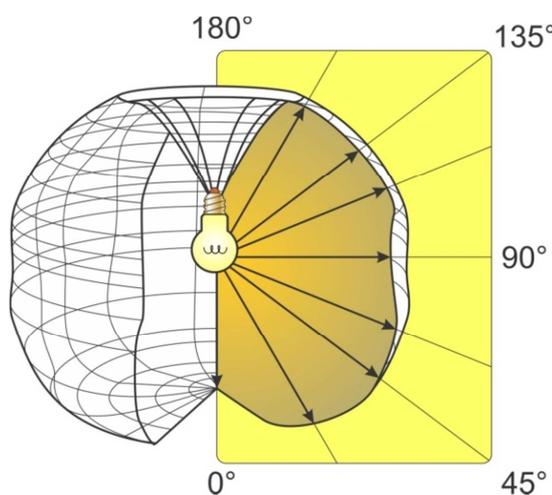


Figura 2.15 - Representação da distribuição luminosa onilateral

A representação polar é definida pelas intensidades luminosas geradas em cada direção, sendo que a direção é definida pelos ângulos a partir do nadir. O gráfico geralmente apresenta linhas radiais, distribuídas de forma linear, para quantificar os valores de intensidade. O termo onilateral foi denominado por tratar-se de uma distribuição igual ao longo das latitudes (COSTA, 2004). A Figura 2.16 apresenta este tipo de representação.

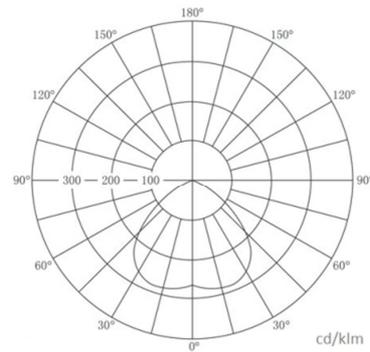


Figura 2.16 - Distribuição Polar Onilateral

Sendo que os segmentos de reta que se dirigem do centro do diagrama para as extremidades da curva da distribuição luminosa correspondem ao vetores luminosos, expressos em candelas para 1000 lumens (COSTA, 2004).

2.6.3 Representação cartesiana

Outra forma de representação de uma distribuição simétrica, é através do gráfico cartesiano no qual as abscissas representam os ângulos de abertura e as ordenadas os valores de intensidades luminosas. A Figura 2.17 representa a distribuição de luminosa de um LED típico.

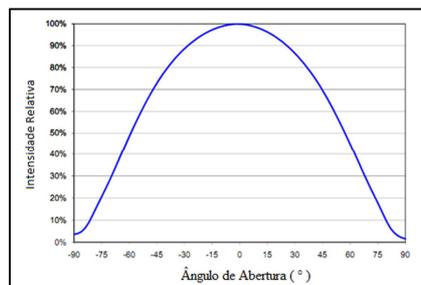


Figura 2.17 - Distribuição Cartesiana LED REBEL ES (Adaptado: LUMILEDS, 2011)

2.6.4 Representação assimétrica por curva polar bilateral

Este tipo de distribuição é empregado quando existem pelo menos dois planos que caracterizam de forma satisfatória o diagrama de distribuição luminosa de uma determinada luminária. Geralmente é empregado em luminárias que utilizam lâmpadas fluorescentes, onde na maioria das vezes a dimensão no sentido do plano longitudinal é diferente do sentido transversal, sendo que a curva de distribuição também é distinta nos dois planos. Sendo assim são representadas as curvas para o plano transversal identificado por C0° e C180° e para o plano longitudinal identificado por C90° e C270°. Por vezes, torna-se necessária a representação de uma terceira curva intermediária, nestes casos pode-se apresentar também a curva para C45° (COSTA, 2004).

A Figura 2.18 apresenta a representação assimétrica bilateral de uma luminária para lâmpadas fluorescentes típicas.

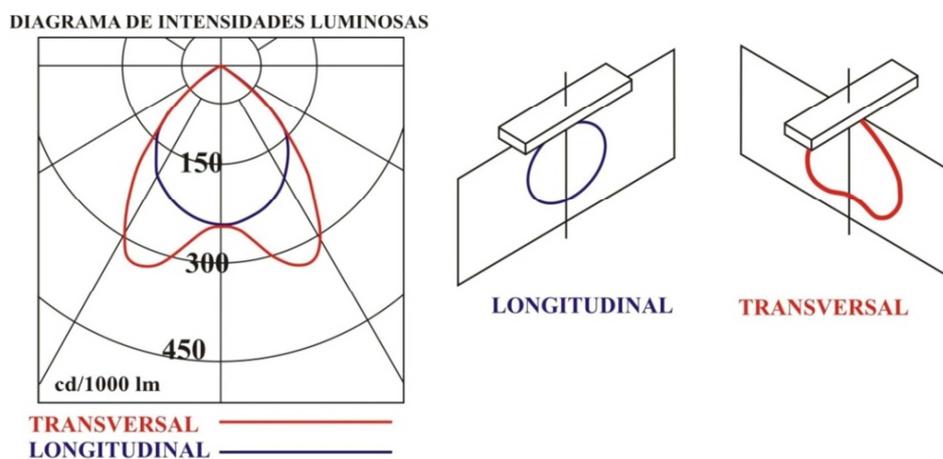


Figura 2.18 - Diagrama de intensidade luminosas

Da mesma forma que nos outros casos, o gráfico traz os valores de intensidade luminosa em cada direção, dados para uma fonte de 1000 lumens.

2.7 Métodos de medição da Luz

Em geral toda energia luminosa emitida por uma fonte, ou incidente em alguma superfície pode ser medida. Esta energia pode estar espalhada em diversos comprimentos de onda, lembrando que o espectro da luz visível pelo olho humano fica entre 380nm e 780nm. Os equipamentos utilizados para as medições espectrométricas, que medem o espectro da luz, em comprimentos de onda específicos ou fotométricas que medem os comprimentos da luz visível, são caracterizados por suas funções principais, sendo que os mais comuns são: a esfera integradora, o goniofotômetro, o luxímetro e o luminâncímetro, cujas características são citadas a seguir.

2.7.1 Luxímetro

O Luxímetro, ou medidor de iluminância, é o aparelho mais utilizado para a medição de grandezas fotométricas devido a sua simplicidade e baixo custo. Mede a grandeza de iluminância que é dada em lux, e se refere à quantidade de energia dentro do espectro visível que incide sobre uma determinada superfície. São largamente utilizados na indústria, bem como em aplicações onde se torna necessária a verificação dos níveis de iluminância, para adequação do conforto do usuário de acordo com o tipo de atividade exercida. Em geral existem normas brasileiras que definem estes níveis para cada tipo de tarefa ou aplicação.

Os luxímetros apresentam um sensor que possui sensibilidade espectral próxima à sensibilidade do olho humano, na condição fotópica, ou seja, quando o pico de sensibilidade do olho está próximo ao comprimento de onda de 550nm, e de acordo com a curva padrão do olho humano ($V(\lambda)$) definida pela CIE (CHROMPACK, 2012) (KONICA MINOLTA, 2012).

Por definição, a luz incidente em um plano de medição deve ser proporcional ao cosseno do seu ângulo de incidência. Para tanto, a correção da leitura do medidor para

a lei dos cossenos pode ser amenizada com difusores com formas específicas e filtros colocados sobre o sensor do medidor (KONICA MINOLTA, 2012). A Figura 2.19 apresenta alguns exemplos de luxímetros.



Figura 2.19 – Luxímetros

Embora os equipamentos apresentem um sistema de correção da medição entre sensor e filtro do aparelho e a curva padrão do olho, este é geralmente ruim para os limites da faixa do espectro visível, por isso a temperatura de cor da lâmpada utilizada para a calibração dos equipamentos é crítica. Como a maioria destes equipamentos é calibrada com lâmpadas de filamento de tungstênio, as medidas realizadas para lâmpadas incandescentes e halógenas, são bastante precisas, entretanto estes medidores não são ideais para medições luz monocromática, ou que apresentam emissão em uma faixa estreita do espectro, como os LEDs de luz branca ou azul. Erros de medição também são significativos na medição da luz de lâmpadas de descarga que apresentam picos separados de energia dentro do espectro visível (KONICA MINOLTA, 2012).

2.7.2 Luminômetro

A energia visível proveniente diretamente de uma fonte luminosa, ou refletida por alguma superfície, pode ser determinada por um equipamento chamado de luminômetro, ou medidor de luminância. A luminância é uma grandeza direcional, assim o instrumento utilizado deve ter grande sensibilidade uma vez que a luminância deve ser medida em uma área pequena, e então o equipamento deve captar somente a área que está sendo medida. Por exemplo, no caso da medição de vias a uma distância de 90 m e com altura do equipamento de 1,5 metros, deverá captar uma área de cerca de 3 metros. Isto significa que o ângulo de visão do equipamento será da ordem de 2 minutos de arco e como o fluxo medido será muito baixo, o detector do equipamento deve ser muito sensível e com capacidade de foto multiplicação (COSTA, 2004). Segue na Figura 2.20 alguns exemplos de luminômetros.



Figura 2.20 - Luminômetros

Como são muito sensíveis é necessário que suas lentes estejam perfeitamente limpas, sendo que qualquer presença de pó ou de sujeira interferirá na leitura. Estes equipamentos geralmente são utilizados como forma de medição da iluminação pública e na identificação das classes de revestimento do piso das rodovias (COSTA, 2004).

2.7.3 Esfera Integradora

Para medição do fluxo luminoso é geralmente utilizada uma esfera integradora, ou esfera de Ulbricht, juntamente com um espectrômetro ou fotômetro. A esfera integradora, como o próprio nome sugere, refere-se a uma esfera revestida por uma tinta branca de alta refletância, onde em seu interior é colocada a fonte luminosa a ser ensaiada. Seu formato faz com que toda a luz emitida pela fonte, independentemente da direção, seja concentrada em um sensor colocado em seu interior, que capta a radiação e envia para o fotômetro ou espectrômetro que converte para as grandezas a serem analisadas. No interior da esfera é adicionado um anteparo chamado de rebatedor que impede que a luz proveniente da fonte incida diretamente no sensor.

Quando um espectrômetro é adicionado, outras grandezas como IRC, TCC, espectro da emissão e curva de cromaticidade podem ser medidas. A medida do fluxo luminoso da fonte luminosa sob ensaio é sempre comparada com a medida de uma lâmpada padrão, que serve de calibração para a esfera. Na Figura 2.21a é apresentada uma imagem da estrutura de uma esfera e na Figura 2.21b a imagem de uma esfera real.

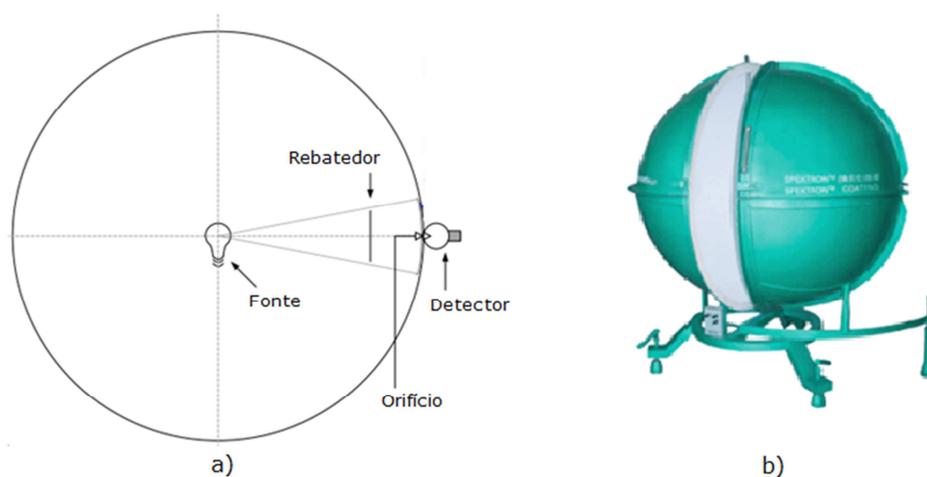


Figura 2.21 - Esfera integradora: a) - Estrutura b) - Esfera Real

O tamanho da esfera deve ser grande o suficiente para manter as incertezas de medição reduzidas e independentes da direção de emissão da luz, bem como, para o corpo da própria fonte sob teste não influenciar na medição. Por outro lado o tamanho da esfera está diretamente relacionado com os níveis de atenuação da luz, assim esferas com dimensões pequenas são mais indicadas quando a fonte luminosa gera baixos valores de fluxo luminoso como, por exemplo, um único LED operando em baixas correntes. Nestes casos, segundo Dahn (2012) é recomendado o uso de uma esfera com diâmetro mínimo de 200 mm (DAHAN, 2012).

2.7.4 Goniofotômetro

Quando é necessário o conhecimento da intensidade luminosa da fonte nas direções nas quais a luz está sendo dirigida torna-se necessária a utilização de um equipamento chamado de goniofotômetro. Este aparelho mede os dados luminosos da fonte de luz em uma série de coordenadas esféricas, de forma a construir uma teia de dados tridimensional ao redor da lâmpada ou luminária sendo ensaiada. Este equipamento possui uma parte móvel e uma parte fixa, sendo que em uma é fixada a luminária a ser ensaiada e na outra o sensor (RODRIGUES, et al., 2012).

Os modelos mais comuns de goniofotômetros mantêm o sensor fixo e fazem o movimento com a luminária, já modelos mais sofisticados possuem um sistema de espelhos que realiza a movimentação e permite que a luminária fique imóvel. Este tipo é indicado para modelos de luminárias e lâmpadas que possuam posição definida de funcionamento.

Os goniofotômetros são normalmente divididos em três tipos denominados tipo A – geralmente utilizado para medições de faróis de automóveis, tipo B – tipicamente utilizado para holofotes e projetores e o tipo C – usado para luminárias de iluminação pública. Originalmente cada aparelho era designado para a medição de um tipo de coordenada, entretanto os equipamentos são capazes de realizar qualquer uma das formas de coordenadas, com diferentes graus de dificuldade (IES, 2001). Nota-se pela

Figura 2.22 que representa um goniofotômetro, que existe uma sala de controle, localizada na extremidade esquerda, e em seguida fica o goniofotômetro propriamente dito onde é instalada a luminária sob ensaio. O sensor fica na outra extremidade da sala, sendo separado da luminária sob ensaio por vários batentes que restringem a passagem da luz, fazendo com que chegue ao sensor somente um raio de luz muito estreito. Como a luminária é rotacionada em todos os sentidos, todos os raios são coletados e assim é possível traçar o diagrama de distribuição de intensidade luminosa da luminária sob análise.

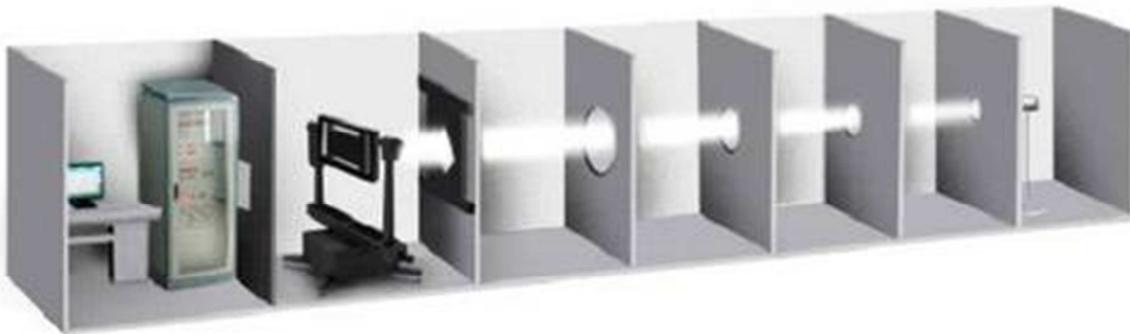


Figura 2.22 - Goniofotômetro

A medição pode ser realizada por dois métodos, o de fotometria relativa ou absoluta. Na relativa, é medido o fluxo luminoso da lâmpada sob ensaio, e após é realizada a medição do fluxo luminoso emitido pela mesma lâmpada, porém no interior da luminária em questão. Assim é possível calcular o rendimento da luminária, o arquivo fotométrico gerado pelo equipamento conhecido como arquivo IES, trará esta informação. Já no método de medição de fotometria absoluta, a saída luminosa total da luminária já com a lâmpada instalada é considerada. Assim, o fluxo luminoso da lâmpada ou fonte luminosa, bem como o rendimento isolado da luminária não são identificados.

Para luminárias de LED, o método absoluto tem sido utilizado visto que o desempenho dos LEDs é dependente de sua temperatura de operação. Se os LEDs

forem testados sem a luminária, que serve na maioria das vezes como dissipador, eles irão sobreaquecer e apresentar rendimentos irreais (PHILIPS, HADCO, 2011).

Este método está de acordo com a norma da IES, a LM 79, que prescreve a metodologia para os ensaios fotométricos com produtos de LED, onde também são definidas as condições de teste como temperatura ambiente, características da tensão de alimentação, sazonalidade e estabilização, orientação, bem como os equipamentos necessários. Assim, um produto ensaiado de acordo com esta norma deverá contemplar as seguintes informações: Fluxo luminoso total, distribuição da intensidade luminosa, potência elétrica, eficácia luminosa, características da cor como cromaticidade, temperatura de cor correlata e o índice de reprodução de cores (IES, 2008a).

2.7.5 Critérios de análise da Iluminação em Vias Públicas

Basicamente, existem três formas mais utilizadas para análise dos níveis de iluminação em vias públicas. O critério por medição da iluminância, medição de luminância e o critério STV – *Small Target Visibility*, conforme abaixo:

Critério da Iluminância (lux)

A avaliação da iluminação por este critério leva em conta a quantidade de lux gerada pelas luminárias e dirigida diretamente para a pista. Como a quantidade de luz vista pelo motorista é a parcela da luz refletida pela pista, e como diferentes tipos de pistas apresentam níveis de reflexão diferentes, torna-se necessário a definição de diferentes níveis de iluminância para cada tipo de via.

Algumas normas internacionais utilizam este critério e assim recomendam níveis médios de iluminância específicos, dados em lux, para diferentes áreas de classificação e tipo de pavimentação utilizada (IES, 2000).

Critério da luminância (cd/m²)

O critério pelo método da luminância determina quão brilhante a pista será para o motorista. Este método determina qual é a quantidade de luz que é de fato refletida a partir da pista em direção ao motorista. O critério é definido em termos de luminância da pista, uniformidade de luminância e ofuscamento inabilitador produzido pelo sistema de iluminação (IES, 2000).

Critério STV

Este critério conhecido pela sigla STV referente ao termo em inglês *Small target visibility*, determina o nível de visibilidade de uma série de alvos na pista considerando os fatores: Níveis de luminância, luminância no plano de fundo, os níveis de adaptação dos arredores e o ofuscamento inabilitador.

A média ponderada dos níveis de visibilidade destes fatores define o STV. A luminância veladora é incluída na metodologia para cálculo do STV (IES, 2000).

Por se tratar de um cálculo complexo e pouco usado não será abordado de forma detalhada.

2.7.6 Relação entre luminância e Iluminância;

Como visto, a luminância é a luz refletida que de fato chega aos olhos do observador, e depende das condições de reflexão da superfície onde a luz está incidindo. Já no caso da Iluminância, esta só depende das características da fonte luminosa.

Para a análise das condições de iluminação, é muito comum o uso da medição de Iluminância, visto que o aparelho a ser utilizado para esta grandeza é mais comum (luxímetro). Entretanto algumas das normas de ILP, já especificam também valores de luminância, visto que estes são dependentes também do tipo de pavimento da via.

Seja considerada a seguinte situação: uma parte de uma estrada seca e iluminada de forma adequada. Se houver chuva a instalação não será afetada e os níveis de intensidade luminosa gerados pelas luminárias se manterão iguais, entretanto o condutor notará de forma imediata que o aspecto da estrada se modificou radicalmente. Isto se dá pela alteração nos níveis de reflexão da via por causa da água em sua superfície. Em uma análise de iluminância, medida em lux, não seria notada nenhuma diferença, entretanto quando é avaliada a luminância, medida em cd/m^2 , nota-se uma variação.

É possível relacionar valores de iluminância com valores de luminância, quando são conhecidos os valores de refletância das superfícies. A equação (2.13) apresenta esta relação (COSTA, 2004).

$$L = \frac{\rho \cdot E}{\pi} \quad (2.13)$$

Onde:

L – Valor de luminância em cd/m^2

E – Valor de iluminância em lux

ρ – Valor de refletância em porcentagem

Esta equação é restrita pois considera um valor de luminância médio e a via como difusor perfeito (superfície lambertiana), assim esta equação tem efeito prático limitado.

2.8 Classificação das Luminárias

No Brasil a iluminação pública é regida pela norma ABNT NBR 5101 que dita as características básicas das luminárias, bem como os mínimos níveis de iluminação que devem ser atingidos em cada tipo de situação em vias públicas, para colaborar com a segurança para o tráfego de pedestres e veículos. Dentre as especificações para

luminárias de iluminação pública algumas características são evidenciadas conforme explicadas a seguir.

2.8.1 Classificação da Distribuição Luminosa das Luminárias

A classificação da luminária em relação à distribuição luminosa é um fator de extrema importância em um projeto de iluminação, pois define como a luz será direcionada na via. Esta distribuição deve ser baseada em uma faixa de condições características da aplicação, como a altura das luminárias, posição transversal (avanço sobre a rua), espaçamento, largura das vias e quantidade percentual do fluxo luminoso a ser aplicado na via e nas áreas adjacentes, como as calçadas por exemplo.

Toda a luminária deve ser classificada de acordo com três critérios: Distribuição lateral, Distribuição vertical e tipo de controle da distribuição luminosa no espaço acima dos cones de 80° e 90° com vértice no centro ótico da luminária.

A classificação transversal e longitudinal está baseada nas linhas de iso-intensidades ou iso-candelas que devem ser relacionadas com a distância entre a linha de referência e os pontos em que incidirão na via, sempre relacionados com a altura de montagem da luminária. Para isso devem ser conhecidas as linhas ou pontos de máxima intensidade e de meia máxima intensidade luminosa. Traça-se também uma série de linhas no sentido longitudinal da via (LLV) e de linhas no sentido transversal da via (LTV), sempre espaçadas de múltiplos da altura de montagem (AM).

A linha de máxima intensidade é a responsável pela classificação no sentido longitudinal, sendo que quando são instaladas luminárias com espaçamentos mais longos, são necessárias linhas de intensidade máximas com ângulos verticais mais altos, para permitir um melhor espalhamento da luz e assim obter a uniformidade luminosa desejada. Ângulos de distribuição vertical maiores direcionam a luz para distâncias mais longas na direção da via, entretanto aumentam o ofuscamento para os motoristas, por isso existem as limitações para emissão luminosa em ângulos elevados

e deve ser criada uma relação entre a distância máxima entre a luminária, a altura de montagem e o ofuscamento. A Figura 2.23 representa as linhas mencionadas.

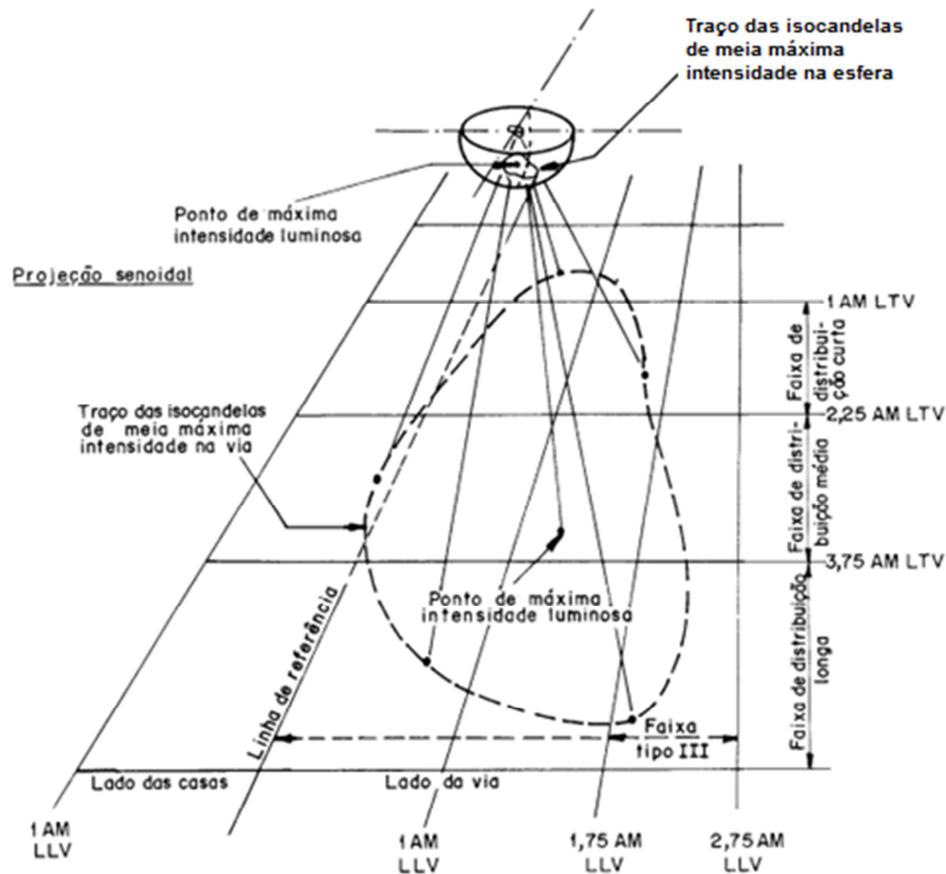


Figura 2.23 - Linhas de intensidade para classificação de Luminárias ILP (ABNT, 2012).

A classificação das luminárias quanto à distribuição transversal são dadas por tipos, do I ao IV, e são definidas pela máxima distância entre a linha de referência e o ponto onde passa a linha de meia máxima intensidade.

Os tipos de distribuição I e V são utilizados quando as luminárias são localizadas no centro ou próximo ao centro da área a ser iluminada, enquanto os tipos II, III e IV são usados quando as luminárias estão localizadas nos pontos adjacentes a área a ser

iluminada (ASSIST, 2010). Os tipos são explanados a seguir e exemplificados pela Figura 2.24.

Tipo I – Quando a linha de meia intensidade máxima não atinge as linhas LLV 1 AM, tanto para o lado da via quanto para o lado das casas. Podendo no sentido vertical estar em qualquer uma das classificações curta, média ou longa.

Tipo II – Quando a linha de meia intensidade máxima fica situada entre LLV 1,75AM e a linha de referência na área dos três tipos de distribuição (curta, média e longa). Sendo que a linha de referência não é o limite fixo e pode ser ultrapassada, porém quanto mais próximo desta linha é melhor.

Tipo III – Quando a linha de meia intensidade máxima ultrapassa parcialmente ou totalmente a LLV 1,75 AM, porém não ultrapassa a LLV 2,75 AM na área dos três tipos de distribuição (curta, média e longa). Para o lado das casas a linha de referência é um limite fixo.

Tipo IV – quando parte da linha de meia intensidade máxima ultrapassa parcialmente ou totalmente a LLV 2,75 AM (ABNT, 2012).

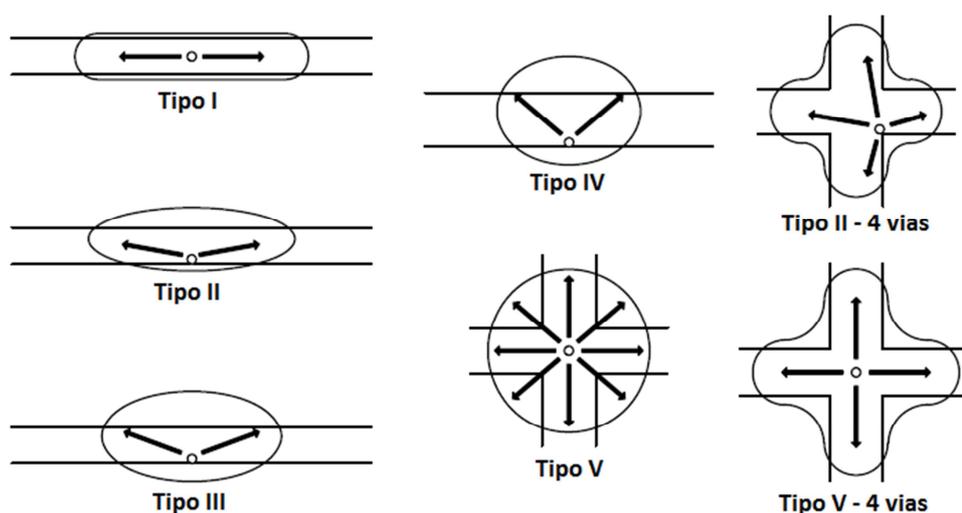


Figura 2.24 - Tipos de distribuição de luminárias de Iluminação Pública (IESNA, 2000).

A classificação quanto à distribuição longitudinal, é definida pela linha ou ponto referente à máxima intensidade, e é separada em três tipos:

- **distribuição Curta (C):** Quanto o ponto de máxima intensidade luminosa encontra-se na região “Curta” do sistema, ou seja, quando está localizado entre as linhas LTV 1 AM e 2,25 AM.

- **distribuição Média (M):** Quanto o ponto de máxima intensidade luminosa encontra-se na região “Média” do sistema, ou seja, quando está localizado entre as linhas LTV 2,25 AM e 3,75 AM.

- **distribuição Longa (L):** Quanto o ponto de máxima intensidade luminosa encontra-se na região “Longa” do sistema, ou seja, quando está localizado entre as linhas LTV 3,75 AM e 6,0 AM (ABNT, 2012).

A Figura 2.25 ilustra as faixas limites de cada classificação sobre a pista.

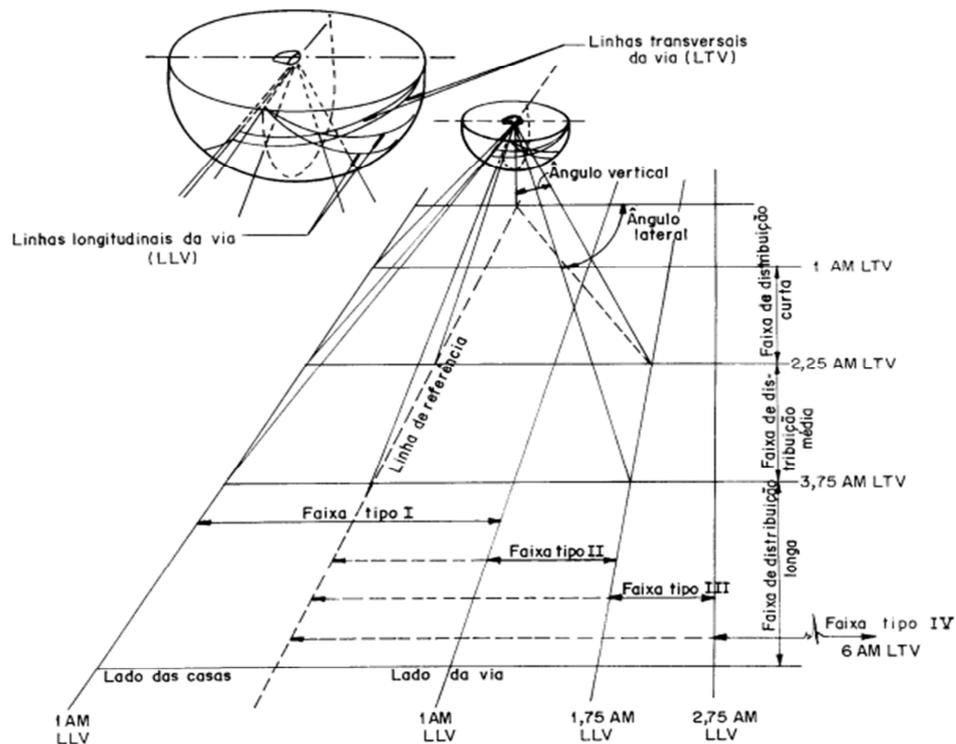


Figura 2.25 - relação entre LTV e LLV na classificação das luminárias, bem como a esfera imaginária ocupada pela luminária em seu centro (ABNT, 2012).

O outro tipo de classificação das luminárias trata da emissão luminosa em ângulos mais elevados, acima dos cones de 80° e 90° que irá definir os níveis de ofuscamento da luminária. A norma brasileira NBR 5101, bem como a Americana IES RP-08, definem o grau de ofuscamento das luminárias baseado na parcela de luz emitida em ângulos mais elevados que é direcionada para os olhos dos motoristas, causando o ofuscamento. Estas normas definem o grau de ofuscamento como: totalmente limitado, limitado, semi-limitado e não limitado, ou respectivamente em inglês, *full-cutoff*, *cutoff*, *semi-cutoff* ou *non-cutoff*, conforme apresentado a seguir.

Distribuição totalmente limitada (*full-cutoff*): Quando a intensidade luminosa acima de 90° é nula e a intensidade acima de 80°, não excede 10 % dos lúmens nominais da fonte luminosa empregada, sendo que isso se aplica a todos os ângulos verticais em torno da luminária.

Distribuição Limitada (*cutoff*): Quando a intensidade luminosa acima de 90° não é maior que 2,5 % e a intensidade acima de 80°, não excede 10 % dos lúmens nominais da fonte.

Distribuição Semi-Limitada (*Semi-cutoff*): Quando a intensidade luminosa acima de 90° não é maior que 5 % e a intensidade acima de 80°, não excede 20 % dos lúmens nominais da fonte.

Distribuição não-Limitada (*non-cutoff*): Quando não existe uma limitação de intensidade luminosa acima da zona de máxima intensidade luminosa (ABNT, 2012).

2.8.1.1 Índice BUG

Para este parâmetro, embora não compreendido pela norma brasileira, foi desenvolvido um novo método para a classificação publicado pela norma IESNA TM 15-07 – *Luminarie Classification System Outdoor Luminaries*.

O chamado LCS, sigla de *Luminarie Classification System*, ou em português, Sistema de Classificação de Luminárias, define a distribuição da luz de uma luminária

dentre três ângulos sólidos primários, sendo que estes são subdivididos totalizando dez secundários. O sistema classifica a luminária de acordo com a quantidade relativa de lumens que é gerada em cada um dos ângulos primários e secundários (IES, 2007).

Os três ângulos primários são divididos nas direções: para trás, (*Backlight*), para cima (*Uplight*) e o índice de ofuscamento (*Glare*), as iniciais das palavras em inglês formam a sigla BUG, que é utilizada para definição destes parâmetros. A classificação BUG, é dada com base no cálculo dos lumens zonais, dentro de determinados intervalos angulares secundários conforme apresentados na Figura 2.26.

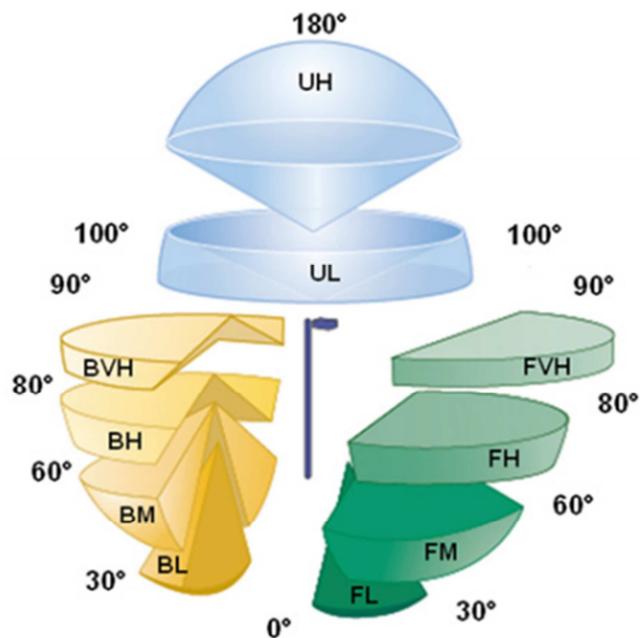


Figura 2.26 - Distribuição dos ângulos primários e secundários de acordo com a TM-15-07 (IES, 2007)

As parcelas da luz dirigida para trás, B – *Backlight*, divide-se em quatro zonas, VH – *Very high* (muito alto) , H – *High* (alto) , M – *Mid* (médio) e L - *Low* (baixo). Formando as zonas identificadas como BVH, BH, BM, BL. De forma análoga, para a luz dirigida para a parte frontal da luminária, ou seja, o lado da via, F – *Foward*, são formadas as zonas FVH, FH, FM e FL. Ainda na parte superior as siglas UL definem a

parcela da luz direcionada para cima em ângulo mais baixo e a sigla UH em ângulo mais alto. Sendo que cada zona é compreendida dentro do intervalo angular apresentado na figura.

A norma TM-15, traz valores máximos que cada uma das zonas poderá ter, para diferentes índices de classificação. Para formar os índices de B,U e G todos em uma escala de 0 a 5 proporcional à quantidade de lúmens em cada faixa, são avaliadas as seguintes zonas:

B – Zonas BH, BM e BL, o indicador varia de B0 até B5

U – Zonas UH, UL, FVH e BVH, o indicador varia de U0 até U5

G – Zonas FVH, BVH, FH e BH, o indicador varia de G0 até G5

Os limites para cada item não serão apresentados por não ser o foco do trabalho, mas cabe lembrar que esta classificação já está sendo bastante difundida pelos fabricantes de luminárias. E ajuda o projetista a identificar para onde a luz está sendo direcionada (IES, 2007).

2.8.2 Classificação das vias

Em se tratando de níveis de luminosidade no ambiente, a norma NBR5101 de 2012 especifica valores mínimos de iluminância e de fator de uniformidade de acordo com cada tipo de via e com o tipo de tráfego. A classificação se dá conforme a seguir:

Classe V1 – Caracteriza vias de trânsito rápido em geral como autoestradas, ou vias arteriais, bem como vias de alta velocidade com separação de pistas. Classe indicada para volume de tráfego intenso.

Classe V2 – Basicamente a mesma classificação V1, porém para um volume de tráfego médio, acrescido das vias coletoras e urbanas de tráfego importante, como as de interligação entre bairros com tráfego intenso.

Classe V3 – Vias coletoras e urbanas de tráfego importante com volume de circulação médio.

Classe V4 – Similar à Classe V3, porém para tráfego leve, acrescido das vias locais de conexão menos importante de tráfego médio.

Classe V5 – As vias locais de menor tráfego, como as de acesso residencial.

Com as definições de tipos de vias é então possível definir os níveis de iluminância e uniformidade necessários, para cada caso. A Tabela 2.2 apresenta estes valores de acordo com a norma brasileira.

Tabela 2.2 - Iluminâncias e uniformidades mínimas

Classe de iluminação	Iluminância média mínima ($E_{med,min}$) - (lux)	Fator de uniformidade mínimo ($U=E_{min}/E_{med}$)
V1	30	0,4
V2	20	0,3
V3	15	0,2
V4	10	0,2
V5	5	0,2

Fonte: ABNT, 2012

2.8.3 Conceitos em Iluminação Pública

Altura de Montagem (AM) - É a distância vertical entre a rodovia e o centro aparente da luminária ou fonte de luz.

Avanço - Distância transversal entre o meio-fio ou acostamento da rodovia e a projeção de luz aparente da luminária.

Iluminância média horizontal - É a iluminância em serviço da área delimitada pela malha utilizada, ao nível da via, para a verificação da iluminância. O tipo de malha utilizada depende do tipo de medição que pode ser detalhada ou periódica.

Fator de Uniformidade - O fator de uniformidade (U) é uma característica de extrema importância para iluminação pública, pois define a maior relação possível de iluminância

entre os pontos iluminados pela luminária. Assim como o próprio nome sugere, garante uma uniformidade na iluminação da via, evitando que alguns pontos fiquem muito claros e outros muito escuros, a fim de garantir maior segurança e evitar o desconforto aos usuários. Este fator faz relação entre o valor mínimo (E_{\min}) e o valor médio ($E_{\text{méd}}$) de iluminância encontrado na área de cobertura da luminária, dados em lux. A relação acordada neste trabalho é dada pela equação (2.14) (ABNT, 2012).

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\text{méd}}} \quad (2.14)$$

Fator de utilização – Em iluminação pública, o fator de utilização é definido como a fração do fluxo luminoso, partindo de uma luminária e que realmente atinge a pista. Esta relação é dada pela equação (2.15).

$$Fu = \frac{\phi_u}{\phi_L} \quad (2.15)$$

Onde:

ϕ_u - Fluxo luminoso utilizado

ϕ_L – Fluxo luminoso da luminária

Basicamente, as curvas referentes aos fatores de utilização para uma luminária são dadas de duas formas. A primeira relaciona as distâncias transversais da via em função da altura de montagem da luminária (AM) sobre a superfície. As cotas (linhas tracejadas) do gráfico apresentado na Figura 2.27a representam os fatores de utilização desde a linha longitudinal da luminária até os dois meios-fios. A segunda forma de visualização mostrada na Figura 2.27b apresenta o fator de utilização da mesma luminária em função dos ângulos entre a luminária e os meios-fios.

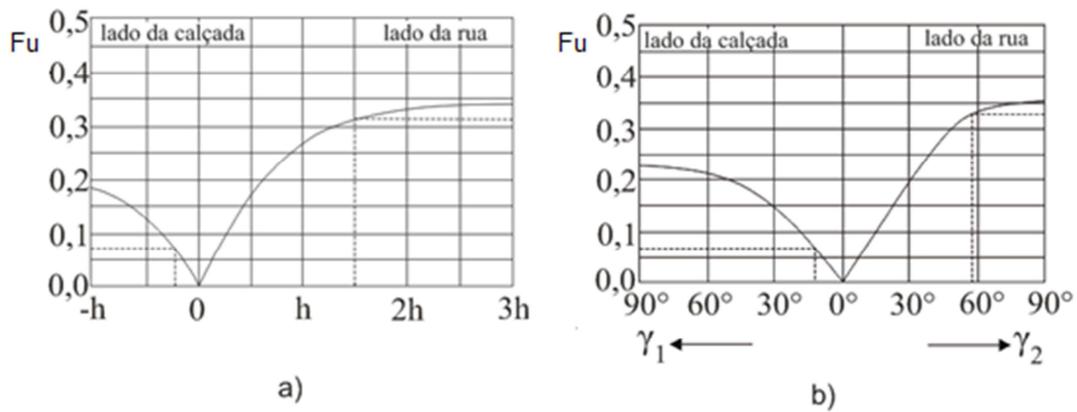


Figura 2.27 - Curvas do fator de utilização sendo: a) em função da altura de montagem e b) em função do ângulo gama.

A posição dos ângulos apresentados na segunda forma de visualização é apresentada na Figura 2.28.

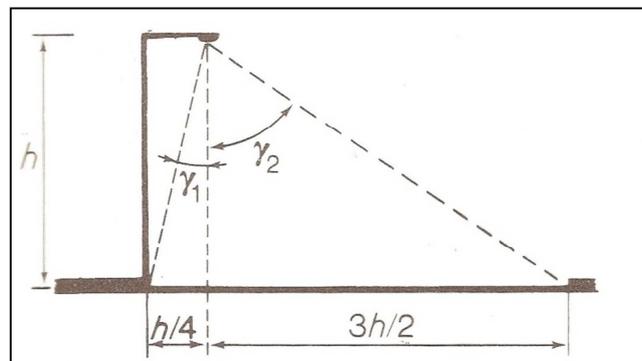


Figura 2.28 - Ângulos referentes ao fator de utilização

Em ambos os casos os fatores de utilização η do lado as casas e do lado da via devem ser somados para definir o fator de utilização real para a largura total da via (PHILIPS, 1986).

Linha Iso-intensidade (Iso-candela) - É uma linha traçada em uma esfera imaginária, sendo que a fonte está localizada em seu centro, e a linha conecta todos os pontos a partir da fonte onde as intensidades luminosas são iguais.

Linha Iso-iluminância (Iso-lux) - É o lugar geométrico onde os valores de iluminância sobre uma superfície, dados em Lux, possuem o mesmo valor.

Linha de Largura - É uma linha radial que passa pelo ponto de meia intensidade máxima na linha de distribuição lateral de intensidade. É traçada na superfície do cone de máxima intensidade.

Linha longitudinal da via (LLV) - Trata-se de qualquer linha paralela ao eixo da pista, ao logo da via.

Linha Tranversal da via (LTV) - Trata-se de qualquer linha transversal da via, que é perpendicular ao eixo da pista

Linha de referência - trata-se de qualquer uma das linhas radiais onde a superfície do cone de máxima intensidade é cortado por um plano vertical paralelo a linha do eixo da pista ou à linha do acostamento e contendo o centro de luz da luminária, como pode ser visto na Figura 2.29.

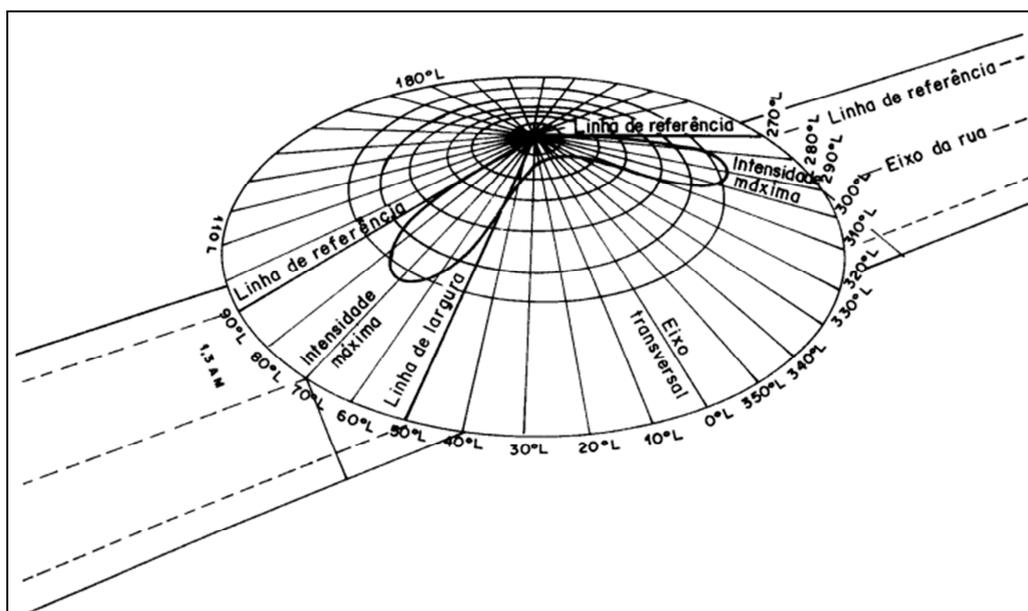


Figura 2.29 - Perspectiva da distribuição luminosa de um cone contendo os valores máximos de intensidade

Malha para inspeção – São padrões utilizados para a verificação dos dados luminosos da via, para tal a norma estabelece dois tipos de malhas a serem utilizadas. A detalhada, para procedimentos que exijam detalhamento na medição ou cálculo de iluminância, espaçamentos entre os pontos de medição são menores, e a geral, onde os espaçamentos entre os pontos de medição são maiores. A quantidade de pontos a serem medidos é calculada de acordo com o espaçamento entre poste e de acordo com as larguras das faixas de rolamento.

Cada concessionária e/ou prefeitura no Brasil possui padrões próprios para iluminação pública. Para criar uma metodologia de avaliação, a norma brasileira estipula valores de referência para montagem de luminárias nos diferentes tipos de vias, conforme pode ser visto na Tabela 2.3 (ABNT, 2012).

Tabela 2.3 - Grade de referência de acordo com a classe da via

Classe de Iluminação da Via	Vão Médio (m)	Altura de Montagem (m)	Número de faixas de trânsito da Via	Largura por faixa da Via (m)	Largura total da via/calha (m)	Avanço (m)	Número de pontos de medição
V5	35	7	3	2,7	8,1	1,5	24
V4	35	8	3	3,0	9,0	1,5	24
V3	35	8	3	3,0	9,0	1,5	24
V2	35	9	4	2,7	10,8	2,5	32
V1	40	12	4	3,0	12,0	3,0	32

Fonte: ABNT, 2012

2.8.4 Classificação da distribuição luminosa nas vias públicas conforme as concessionárias

Embora exista uma norma Brasileira para iluminação Pública (NBR 5101), as companhias responsáveis pela iluminação no Brasil possuem geralmente algumas

especificações próprias que se adequam às características das vias e das regiões onde atuam. É possível verificar no Quadro 2.1 as características exigidas para luminárias de vapor de sódio de 250 W, por algumas das principais companhias no Brasil.

Companhias / Prefeituras		CEIP / PMPA			CEMIG		CPFL / ELEKTRO	CEB	
Elétrica	Potência de Lâmpada (W)	250			250		250	250	
Classificação Fotométrica	Longitudinal	Curta ou Média			Média		<i>Média</i>	<i>Média</i>	
	Transversal	II e III			Tipo II		III	I	
	Controle de Ofuscamento	Limitado			Limitada		Limitado / Semi-limitado	Semi-Limitado	
	Rendimento	79 %			75 %		75 %	80 %	
Simulação de Campo	Trecho Típico	Altura de Montagem (m)	8	8	12	8,5	12,0	9	8,00
		Distância entre Postes (m)	35,0	35,0	35,0	35	42	35	39,00
		Largura da Via (m)	12,0	12,0	12,0	10	10	9	12,00
		Recuo (m)	0,3	0,3	0,3	*	*	0	*
		Projeção do Braço (m)	2,3	3,0	0,35	2,52	0,3	1	2,68
		Inclinação	0°			10°	10°	0°	15°
	Iluminância e Uniformidade	Emed (lux)	25	25	25	0,001 x fluxo da lâmpada	0,0007 x fluxo da lâmpada	20	35
U _o	0,20	0,20	0,40	0,20	0,40	0,30	0,25		

Quadro 2.1 - Especificações técnicas para luminárias ILP no Brasil
Fonte: (CPFL, 2008) (CEIP, 2007) (CEMIG, 2008) (CEB, 2007)

Nota-se que para esta potência de lâmpadas a classificação fotométrica transversal é do tipo I, II ou Tipo III e a longitudinal do tipo curta ou média. O controle de ofuscamento também é especificado como semi-limitado ou limitado, o que implica em baixos índices de ofuscamento para os motoristas.

2.8.5 Poluição Luminosa

As luminárias de ILP, como as demais luminárias em geral, servem para direcionar a luz emitida pelas lâmpadas para o plano de trabalho, sendo que este, no caso específico de ILP, trata-se da superfície das vias públicas.

As luminárias mais eficientes direcionam a maior parte da luz para o plano de trabalho, reduzindo os espalhamentos, pois isso representa em perda de trabalho útil das lâmpadas. Entretanto, geralmente parte da luz gerada é espalhada para a região superior à luminária e parte para as laterais. A chamada luz intrusa é a luz dispersa para as laterais e que invade locais externos ao plano de trabalho. Essa luz pode causar desconforto em moradias, que deixam de estar na escuridão absoluta. Isto é, a luz intrusa invade as aberturas das construções, como janelas e portas, clareando seu interior. Já a luz dispersa para a parte superior da luminária é espalhada para o céu, causando uma falsa impressão de claridade natural para os ecossistemas e impedindo a observação de astros durante a noite.

Organizações internacionais atuam nas temáticas da poluição lumínica, conservação e desperdício de energia, como a *International Dark-Sky Association* (IDA), prezando pela preservação da escuridão do céu e a iluminação noturna eficiente e de qualidade, e a *New England Light Pollution Advisory Group* (NELPAG), com propostas relacionadas às iluminações públicas, particulares e propagandas luminosas.

Além da poluição visual o acréscimo desordenado da iluminação pública sem controle acaba por alterar o ecossistema. A luz noturna artificial espalhada no ambiente afeta a migração, acasalamento, descanso e busca por comida de várias espécies desde selvagens até peixes. Também é um efeito da iluminação mal projetada o ofuscamento da visão dos astros no céu, como mostra de forma drástica a Figura 2.30. A foto da esquerda, registrando o céu, foi tirada em um dia onde um apagão generalizado ocorreu ao leste da América do Norte no ano de 2003. A foto ao lado mostra a mesma cena um dia depois quando a energia havia sido restabelecida. (NELPAG, 2011)



Figura 2.30 - comparação da vista do céu sobre Toronto – CA com a iluminação da cidade desligada (esquerda) e ligada (direita) (NELPAG, 2011).

Na Figura 2.31 é apresentado o fenômeno da luz intrusa e da poluição luminosa que são referentes à luz emitida para cima de forma direta ou indireta.



Figura 2.31 - Distribuição da Luz (SALES, 2011)

Baseado nestes fatos é importante que os projetos luminotécnicos sejam realizados de forma a direcionar a luz somente para a área de interesse. Assim, além de não desperdiçar energia, melhora-se a qualidade de vida da população e preserva-se a natureza. O projeto de iluminação deverá levar em consideração a forma de distribuição luminosa da luminária a ser utilizada, com o objetivo de obter o melhor resultado, como será visto neste trabalho.

3 FONTES LUMINOSAS

Existem inúmeros tipos de fontes luminosas, entretanto como o foco deste trabalho é ILP, será focado a seguir, nos dois tipos de fonte de luz sob análise, as lâmpadas VSAP e os LEDS.

3.1 Lâmpadas Vapor de Sódio de Alta Pressão (VSAP)

As lâmpadas de descarga são caracterizadas pela geração de luz através da descarga elétrica em uma mistura de gases. As lâmpadas de VSAP são encontradas no mercado em uma ampla faixa de potência, variando entre 35 e 1000 W.

Pelo fato de não possuir filamentos para a condução da corrente elétrica, a lâmpada de descarga é inicialmente caracterizada por um circuito aberto, onde para que a mesma passe ao estado de condução é necessário estabelecer um campo elétrico muito intenso para ionizar o gás e assim iniciar a operação da lâmpada. Em seguida, tem-se início a condução intensa de corrente elétrica pelo interior do tubo, tornando-se necessário o uso de um reator para seu controle (DALLA COSTA, 2008).

A característica da luz emitida por estas lâmpadas está relacionada com os metais que são adicionados ao gás inerte no interior do tubo das lâmpadas, e que são utilizados na descarga para a formação do plasma. A fim de se obter altas densidades de corrente no interior dos tubos de descarga, o gás é confinado a alta pressão, o que também faz que o tubo opere em altas temperaturas e dessa forma é necessário o uso de um segundo bulbo de vidro que auxilia a manter estas temperaturas além de proteger contra possíveis explosões acidentais (DALLA COSTA, 2008).

A Tabela 3.1 apresenta as características de algumas lâmpadas de Vapor de Sódio dos principais fabricantes mundiais.

Tabela 3.1 - Dados de lâmpadas VSAP dos principais fabricantes

Fabricante	Imagem	Modelo	Potência	Fluxo Luminoso @25C	TCC	IRC	Vida Mediana	Mercúrio (Hg)
Philips		MASTER SON-T PIA Plus	250W	33300 lm	2000K	< 25	36000h	15mg
Philips		SON 250W E E40 CO 1SL	250W	28000 lm	2000K	< 25	28000h	20,4mg
Osram		NAV-T 250 4Y	250W	28000lm	2000K	< 25	32000h	-
Osram		NAV-T 250 SUPER 4Y	250W	33200lm	2000K	< 25	32000h	-
Osram		VIALOX NAV-E 250 4Y	250W	27000lm	2000K	< 25	32000h	-
GE		LU250/D/H/ECO	250W	26000lm	2000K	22	28500h	16,4mg
GE		LU 250T/40	250W	28500lm	2000K	25	28500h	20mg
GE		LU250/XO/T	250W	33210lm	2100K	25	32000h	23,2mg

Em geral as lâmpadas com tubos transparentes tubulares apresentam níveis de fluxo luminoso superior aos modelos elípticos com bulbo leitoso. Nota-se, através dos dados dos fabricantes que o fluxo luminoso das lâmpadas de 250 W varia entre 26000 lm e 33300 lm e a vida mediana entre 28000 h e 36000 horas. Estas lâmpadas possuem eficácia luminosa elevada, alcançando 133 lm/W, considerando a curva de visão fotópica, em contra partida apresentam um baixo IRC, na faixa de 20 a 25, bem como temperatura de cor correlata relativamente baixa, na faixa de 2.000 K (GE, 2012a) (PHILIPS, 2012a) (OSRAM, 2012).

Devido a estas características, são mais utilizadas na iluminação de ambientes externos, ruas, avenidas, pátios de empresas, dentre outros, onde não se faz necessário um maior cuidado com a reprodução de cores.

A variação de rede permitida de forma constante é de +/- 3 %, variações maiores geram redução de seu desempenho sendo que quedas de tensão de rede, maiores que 10 %, mesmo que por um curto tempo, poderão causar o apagamento das lâmpadas (OSRAM, 2012).

Estas lâmpadas necessitam de equipamentos auxiliares para controlar a corrente que flui pelo seu interior, denominados reatores. Basicamente, são utilizados modelos eletromagnéticos por ser uma tecnologia consolidada. Estudos apontam soluções para o desenvolvimento de soluções eletrônicas de reatores para estas lâmpadas, como desenvolvido por (MARCHESAN, 2007), (DUMS, 2005), (DALLA COSTA, 2008), entretanto o fenômeno de ressonância acústica típico destas, torna esta solução complexa e por isso muito pouco utilizada.

As características da luz emitida pelas lâmpadas VSAP fazem delas uma das mais eficientes entre as lâmpadas de descarga. Isto é explicado pela emissão de comprimentos de onda emitidos pela lâmpada, na faixa espectral que coincidem com os valores próximos a região de pico da curva de sensibilidade do olho humano $V(\lambda)$. A Figura 3.1 mostra o espectro irradiado pela lâmpada de vapor de sódio marca Philips, modelo SON de 250 W, onde é possível verificar que a radiação emitida por ela está concentrada nos comprimentos de onda entre 540 e 680 nm.

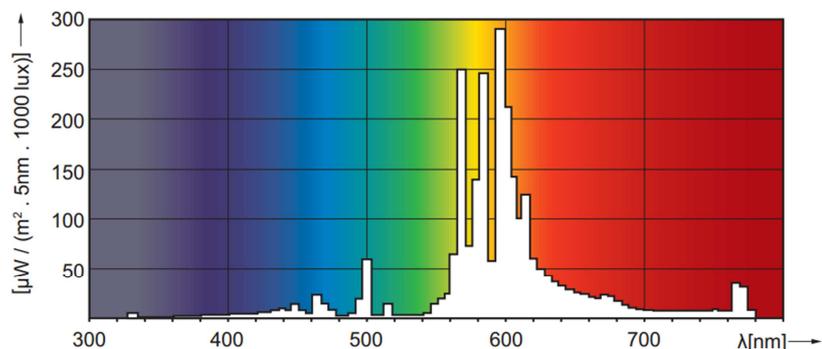


Figura 3.1 - Curva espectral da Lâmpada VSAP SON 250W (PHILIPS, 2012)

Se for calculada a quantidade de lumens efetivos considerando a visão escotópica, onde o pico de sensibilidade do olho humano se dá em 508 nm, esta lâmpada terá uma eficácia reduzida, em torno de 1,5 vezes menor do que na visão fotópica (FRAYTAG, 2010).

3.1.1 Características elétricas

Embora já existam reatores eletrônicos comerciais desenvolvidos para lâmpadas de alta pressão (HEP, 2012), a grande maioria das instalações nacionais são realizadas com os tradicionais reatores eletromagnéticos, dispositivos simples e robustos. Estes dispositivos são basicamente limitadores de corrente para a lâmpada e não possuem qualquer sistema eletrônico de compensação de potência em relação à variação de tensão da rede. Isto significa que quando houver variação na rede de alimentação também ocorrerá uma variação na corrente, tensão e, conseqüentemente, na potência sobre a lâmpada. A Figura 3.2 apresenta como as grandezas elétricas da lâmpada se comportam em relação à variação da tensão de alimentação.

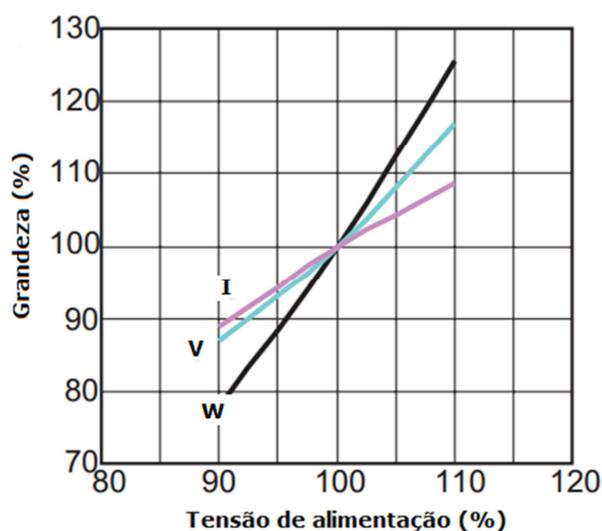


Figura 3.2 - Variação das grandezas elétricas lâmpadas VSAP 100 W – 250 W (PHILIPS, 2012)

Onde:

I - Corrente na lâmpada

V - Tensão na lâmpada

W - Potência na lâmpada

Conforme visto na Figura 3.2 a variação da potência é a mais crítica, sendo que com uma variação na tensão de alimentação de cerca de 10 %, acarreta em uma variação de potência maior que 20 %. Esta diferença também é refletida nos gastos com energia elétrica, pois linhas com tensão de alimentação acima da nominal, também geram um maior consumo de energia.

Este tipo de lâmpada também apresenta um comportamento não linear, das grandezas de corrente, tensão e potência logo após a sua partida, estabilizando após um determinado período de tempo, que em geral gira em torno de 10 minutos (PHILIPS, 2012).

A Figura 3.3 apresenta a variação destas grandezas em função do tempo, utilizando as mesmas grandezas mencionadas anteriormente.

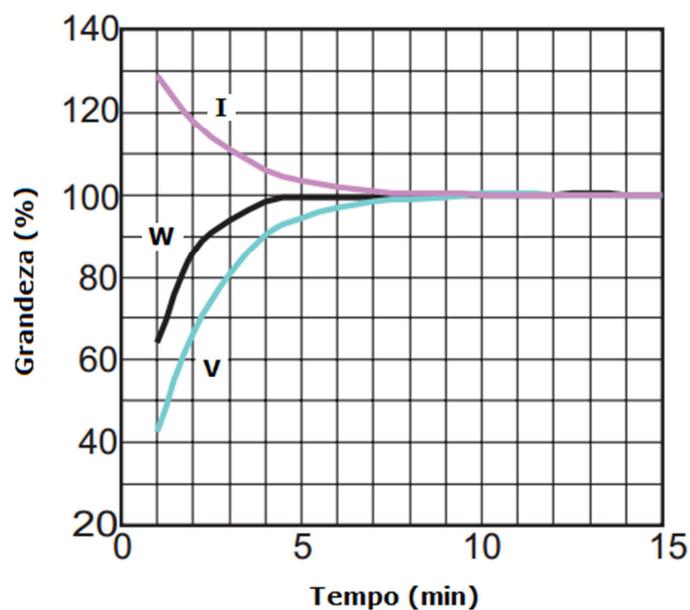


Figura 3.3 - Características elétricas em função do tempo MASTER SON-T PIA Plus 100 W – 250 W (PHILIPS, 2012)

Uma vez que as lâmpadas apresentem esta característica de alta corrente na partida, os circuitos de potência deverão ser dimensionados para tais níveis de corrente, o que onera a instalação.

3.1.2 Metais pesados

A tecnologia mais aplicada às lâmpadas de descarga usualmente utilizadas para ILP consiste na utilização de mercúrio (Hg) em sua construção. Este metal está presente nas lâmpadas de vapor de mercúrio, vapor de sódio, multi-vapor metálico e na fluorescente. Na Tabela 3.1 são apresentados os valores de mercúrio presentes nas lâmpadas VSAP de 250 W dos principais fabricantes.

Além do mercúrio utilizado na construção das lâmpadas, que pode ser liberado para o ambiente caso o bulbo destas lâmpadas se rompa a liberação de mercúrio também pode ser dada por outros meios como na queima de materiais fósseis. Assim, em países com geração de energia elétrica com base fóssil, a emissão de mercúrio para a atmosfera pode ser significativa. O carvão mineral, de forma particular, apesar de conter pequenas percentagens de mercúrio, quando utilizado como matéria prima para a geração de energia elétrica é queimado em quantidades muito grandes, o que gera uma emissão considerável de mercúrio para a atmosfera. Segundo SKAVRONECK (1998), são emitidos cerca de $1,67 \times 10^{-5}$ g de mercúrio para a atmosfera para cada kWh de energia elétrica consumida em uso final.

Para se ter uma ideia, uma luminária que reduz em 100 W o consumo de energia durante uma vida útil de 50.000 horas, representa cerca de 83,5 mg a menos de mercúrio espalhados pelo meio ambiente. Se for considerado que uma lâmpada de vapor de sódio de 250 W possui em seu interior cerca de 20 mg de mercúrio, pode-se afirmar que a quantidade de mercúrio espalhada no ambiente por causa da economia de energia é mais de 4 vezes maior do que a quantidade contida na própria lâmpada (ABILUX, 2001) (PHILIPS, 2012).

3.2 Lâmpada Vapor Metálico (MVM)

De forma similar à VSAP, o funcionamento das lâmpadas MVM também está baseado na descarga elétrica no interior de um tubo onde existe um determinado gás. Estas lâmpadas apresentam eficácia luminosa entre 75 e 125 lm/W e sua vida útil varia entre 5000 e 22000 horas (IESNA, 2000).

Normalmente, este tipo de lâmpada é encontrado em potências entre 20 e 2000 W. Uma grande diferença para as lâmpadas vapor de sódio, mencionadas previamente, está no índice de reprodução de cores, que neste modelo gira em torno de 90 (FRAYTAG, 2010).

Nota-se na distribuição espectral deste tipo de lâmpada, conforme apresentado na Figura 3.4, que existe energia em praticamente todos os comprimentos de onda dentro do espectro visível, o que justifica o seu alto índice de reprodução de cores.

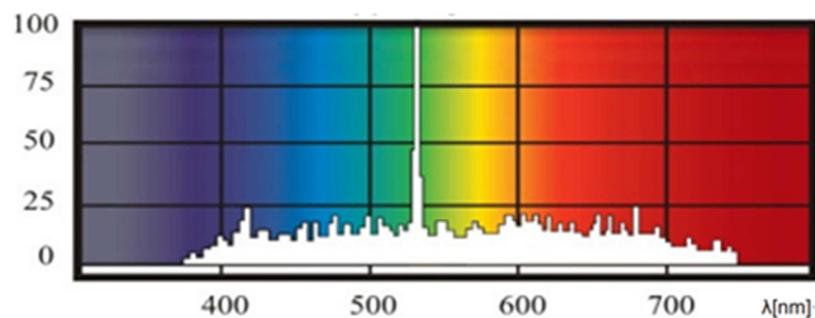


Figura 3.4 - Distribuição espectral da lâmpada Vapor Metálica

Quando a energia desta lâmpada é comparada com as curvas de sensibilidade do olho humano, tem-se que a eficácia na condição escotópica é aproximadamente 1,7 vezes a eficiência na condição fotópica. Conclui-se então que, em baixos níveis de luminosidade ambiente, a eficiência luminosa para lâmpadas vapor metálico aumenta, ao contrário das lâmpadas VSAP.

3.3 LEDs

A sigla em Inglês LED significa *Light Emitting Diode*, ou em português Diodo Emissor de Luz. Um diodo nada mais é, do que um dispositivo semiconductor, com uma junção tipo P-N, amplamente utilizada na eletrônica. Com algumas variações em sua construção, ele passa a emitir luz quando uma corrente elétrica circula pelo mesmo, criando assim uma fonte luminosa.

É formado pela junção de dois pequenos cristais de silício aplicados com outros materiais formando uma junção P-N. Os cristais chamados de “P” possuem carga positiva, ou seja, falta de elétrons, e com tendência a receber elétrons, enquanto que os cristais conhecidos como “N” possuem carga negativa, excesso de elétrons, e assim doadores de elétrons. A Figura 3.5 ilustra esta operação.

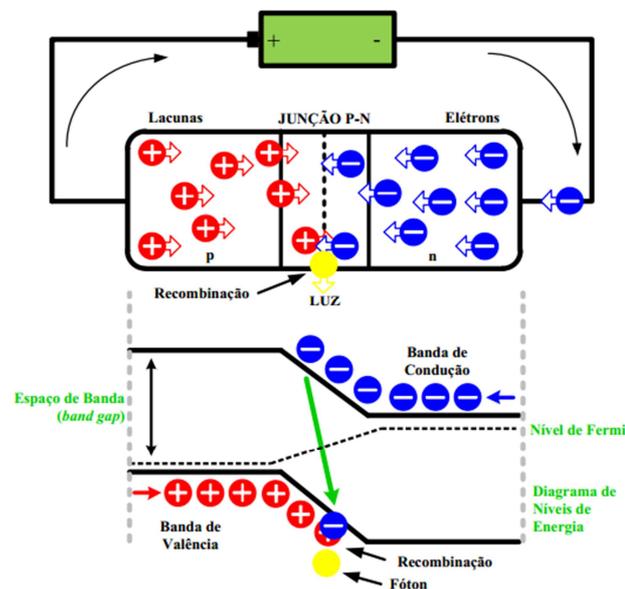


Figura 3.5 - Geração de fótons dos LEDs (BENDER, 2012).

Quando uma diferença de potencial é aplicada no sentido direto da junção “PN”, os elétrons e as lacunas (espaços determinados pela falta de elétrons) se direcionam

para o mesmo ponto. Nesta etapa ocorrem encontros dos elétrons com as lacunas nas proximidades da junção, na região chamada de zona de depleção. Quando o elétron adquire energia suficiente ele passa pela zona de depleção e se recombina com as lacunas.

Nesta recombinação o elétron passa da camada de condução (nível de energia superior) para a camada de valência (nível de energia inferior) sendo que a energia possuída pelo elétron é liberada. Esta recombinação pode ocorrer de duas maneiras, radiativa e não radiativa. No caso da radiativa a energia perdida pelo elétron é convertida em fótons, ou em luz propriamente dita. Quando ocorre a recombinação não radiativa a energia perdida é convertida em fônons, ou calor. Fônons são as vibrações mecânicas que são propagadas pelo material (BENDER, 2012).

A relação entre a recombinação radiativa e não radiativa é que irá determinar a eficiência interna de um LED (ZUKAUSKAS, 2002).

A luz gerada na pastilha é essencialmente monocromática sendo que este processo de emissão de luz é chamado de eletroluminescência. Como a luz gerada é praticamente monocromática, a radiação emitida se concentra em uma faixa de comprimento de onda muito estreito, a cor emitida é, portanto, dependente do cristal e da impureza de dopagem com que o componente é fabricado. Assim, podem-se variar os comprimentos de onda emitidos, de forma a se obter várias cores no espectro.

O comprimento de onda resultante da excitação do cristal de um LED é determinado pelos elementos químicos utilizados na construção do cristal semicondutor. Dentre esses elementos estão o gálio (Ga), alumínio (Al), arsênio (As), fósforo (P), índio (In) e nitrogênio (N), e a alteração da mistura desses elementos, ou da relação dessa mistura, altera o comprimento de onda da luz emitida (OLIVEIRA, 2007).

Os compostos mais usados são: InGaN, utilizada em LEDs emissores de luz azul, verde e branca, sendo que a cor branca é originada geralmente pelo acréscimo de fósforo sobre emissores azuis; e AlInGaP, utilizada em LEDs emissores de luz vermelha, laranja e amarela, a variação das cores depende da relação utilizada na mistura destes componentes. Como visto anteriormente, cada comprimento de onda emitido na faixa visível corresponde a uma cor específica. Na Figura 3.6 é possível observar as cores geradas para cada comprimento de onda (CERVI, 2005).

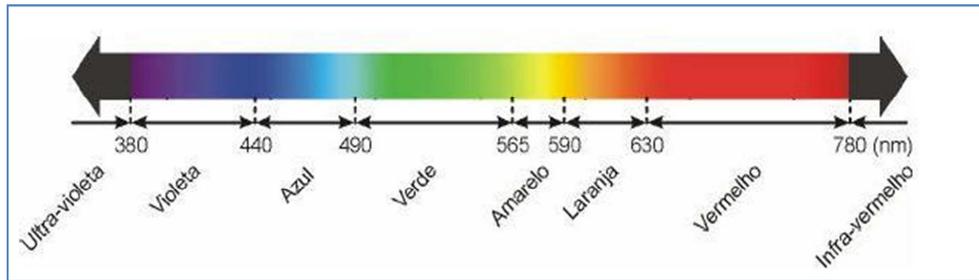


Figura 3.6 - Comprimento de onda das cores (CERVI, 2005)

Um detalhe importante a ser analisado é que o fluxo luminoso característico de uma lâmpada convencional é irradiado em todas as direções e, assim, grande parte deste fluxo é irradiado em direções onde não há interesse e acaba sendo absorvido pelas superfícies sem contribuir de forma plena para a iluminação do ambiente, mesmo com o uso de luminárias para o direcionamento da luz. Nos LEDs é possível utilizar-se lentes refletoras diretamente sobre a pastilha emissora de luz, o que direciona a luz e pode representar um aproveitamento de praticamente 100 % da energia luminosa produzida dependendo da aplicação (OLIVEIRA, 2007).

Os LEDs apresentam outros benefícios, dos quais é possível citar sua confiabilidade, resistência a grandes variações de temperatura (de -20 °C a 120 °C) e a vibrações, garantindo assim a continuidade de operação independentemente das condições do local de uso. Apresentam também um baixo custo de manutenção, pois como podem atingir uma vida útil elevada, podendo ultrapassar facilmente as 100.000 horas, dependendo das condições de operação (LUMILEDS, 2012).

Além disso, não apresentam gás ou filamento para geração de luz, o que resulta em uma baixa irradiação de calor. Como é possível delimitar os comprimentos de onda a serem emitidos, no processo de fabricação, evita-se a geração de radiação infravermelha responsável pelo aquecimento do ambiente, radiação esta que é intrínseca nas lâmpadas de filamento.

Devido às baixas tensões a que os LEDs operam, pode ser proporcionada uma maior segurança ao usuário e como não necessitam de ignitores, como as lâmpadas

fluorescentes e lâmpadas de alta pressão, para gerar um pulso de alta tensão para sua ignição, os dispositivos de acionamento também se apresentam mais seguros.

Com essa nova tecnologia o sistema de dimerização também se torna mais simples, caso que, nas fontes luminosas convencionais de alta eficiência, como lâmpadas fluorescentes e HID, este processo é bastante complicado e por isso pouco comum na maioria das aplicações.

Entretanto, todas estas vantagens, bem como a eficiência e a coloração dos LEDs, é diretamente dependente da temperatura da junção semicondutora e da forma como a energia é fornecida a eles. Um dispositivo eletrônico de alta confiabilidade e um bom sistema de estabilização térmica deve ser utilizado para prover o correto desempenho de uma luminária de LEDs (PERIN, 2007).

3.3.1 Tipos de LEDs

Em meados dos anos 70, dez anos após a descoberta dos vermelhos, os LEDs verdes foram produzidos usando Gallium Phosphide (GaP). Os primeiros azuis surgiram nos anos 90, usando Gallium Nitride (GaN). Após a descoberta da luz azul, foi possível gerar luz branca (LUMIERE, 2009).

Para a geração de LEDs de luz branca, existem basicamente duas maneiras, uma é a utilização de um arranjo com vários LEDs emitindo diferentes cores (RGB) e a outra é a utilização de LEDs que emitem radiação em comprimentos de onda mais curtos como a radiação ultra-violeta ou a luz azul e com a utilização de fósforo, convertê-la em radiação com comprimentos de onda mais longos, completando o espectro da luz branca. No caso do uso de LEDs azuis uma parte da energia emitida é utilizada diretamente para a complementação da parcela azul da luz branca (ZUKAUSKAS, 2002).

Atualmente os LEDs podem ser divididos em quatro grupos: baixa potência, média potência, potência e de alta potência. Os LEDs de baixa potência são utilizados para indicação e sinalização encontrados em painéis e equipamentos eletrônicos que

também pode ser de alto brilho com invólucro transparente, sendo utilizados em luminárias internas e equipamentos de iluminação portáteis. Operam em correntes de até 20mA. Os LEDs conhecidos como de média potência, tem-se destacado ultimamente em aplicações como as lâmpadas de “*retrofit*” substitutas das incandescentes e das fluorescentes, onde há necessidade de alta potência por ponto de luz, porém com luz difusa e não direcional. A luz deve ser distribuída sendo que altas concentrações de luz em uma única direção devem ser evitadas, para reduzir o ofuscamento e uma aparência de luz não homogênea. Operam com correntes de até 150 mA e fornecem uma potência na faixa dos 500 mW.

O LED de potência apresenta potências em torno de 1 W ou 3 W e geralmente operam em níveis de corrente entre 350 e 1000 mA, entretanto alguns modelos já podem suportar 3000 mA, como é o caso do modelo XM-L da CREE (CREE, 2012b). São utilizados nas mais diversas aplicações devido a seu tamanho reduzido e alto fluxo luminoso sendo que permite facilmente que lentes colimadoras sejam utilizadas, podendo direcionar a luz nas mais diversas formas, dependendo da construção da lente utilizada.

O outro grupo são os LEDs de alta potência que são construídos em arranjos de vários LEDs individuais, conectados se forma série ou paralela dentro do mesmo encapsulamento. Geralmente utilizados em aplicações onde é necessário um alto fluxo luminoso em um espaço pequeno e quando não há a necessidade do uso de lentes colimadoras. Com este modelo geralmente é utilizado o sistema de refletores. A Figura 3.7 apresenta os diferentes tipos de LED.

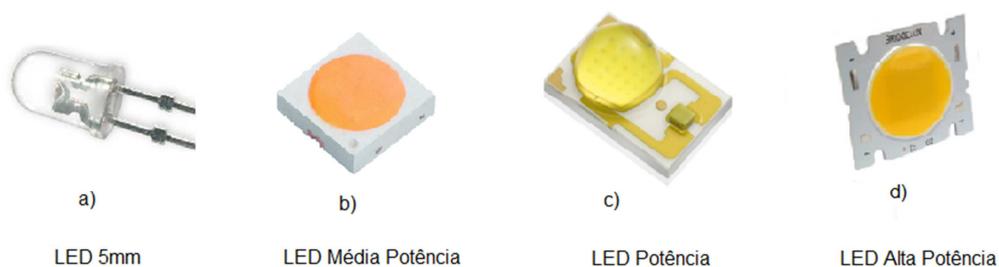


Figura 3.7 - Modelos de LEDs

Os LEDs de baixa potência foram os primeiros a serem desenvolvidos, e um dos fatores que possibilitou o aumento de potência em um mesmo encapsulamento, foi a redução da resistência térmica dada em $^{\circ}\text{C}/\text{W}$, entre a junção do LED que é a geradora de calor, e a sua parte externa responsável com a conexão com os dissipadores externos. Assim tornou-se possível retirar o calor da junção P-N de forma mais eficaz, permitindo LEDs de maiores potências. A Figura 3.8 apresenta a evolução deste parâmetro.

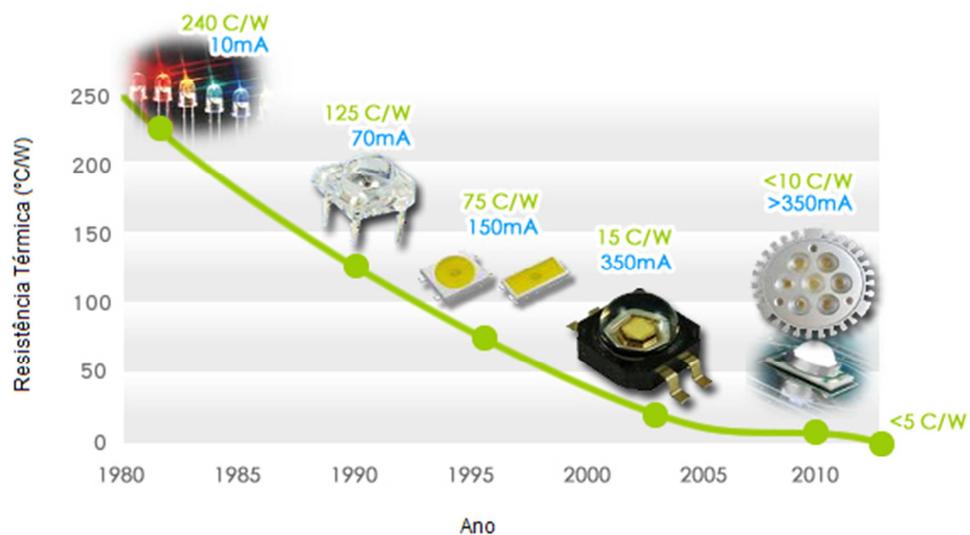


Figura 3.8 - Redução da resistência térmica dos encapsulamentos (VISERA ,2012)

A resistência térmica dos LEDs depende da forma como ele é construído e dos tipos de materiais utilizados. Assim, dois LEDs da mesma família, mas fabricados com diferentes materiais podem apresentar resistências térmicas diferentes (BENDER, 2012).

Atualmente, os LEDs de potência apresentam resistência térmica na faixa de 4 $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ como é o caso do modelo XP-G da empresa CREE (CREE, 2012b).

3.3.2 Características fotométricas LED

A luz é percebida pelo olho humano com sendo branca, se os três tipos de cones localizados na retina do olho humano são excitados em uma determina razão (SCHUBERT, 2006).

A temperatura de cor da luz emitida por eles varia geralmente entre 2700 a 6000K, dependendo da construção do LED (CREE, 2012b), (LUMILEDS, 2012).

Na Figura 3.9 é apresentada a distribuição espectral de um LED de Luz branca. Nota-se que de forma similar ao espectro da lâmpada vapor metálico, existe emissão em toda a faixa do espectro visível ao olho humano.

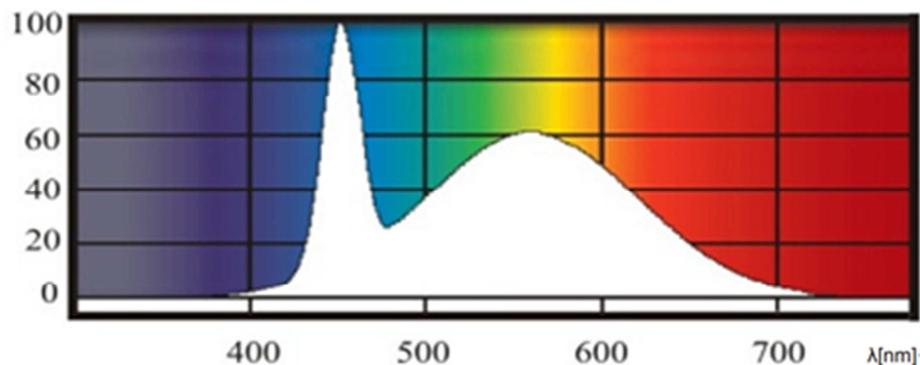


Figura 3.9 - Distribuição espectral de um LED de Luz branca

Pode ser observado também que existe uma grande concentração de potência na faixa do azul, em torno dos 450 nm e na faixa do verde amarelado, em torno de 550 nm. A eficácia deste LED na condição escotópica pode atingir mais que o dobro da eficácia medida na condição fotópica, devido a sua distribuição espectral (FRAYTAG, 2010).

4 LUMINÁRIAS DE ILUMINAÇÃO PÚBLICA

Inicialmente, a função das luminárias para uso em ILP era de apenas servir de sustentação e interface de conexão entre as lâmpadas, reatores e a rede elétrica. As luminárias antigas não apresentavam nenhuma proteção para as lâmpadas, o que as deixavam expostas às intempéries e outros agentes como vandalismo e insetos, além de não prover o correto direcionamento do fluxo luminoso. Evoluindo o conceito de luminárias foram criados modelos fechados utilizando materiais poliméricos, ou vidro, que melhoram a qualidade do sistema. Na Figura 4.1 são apresentados modelos de luminárias abertas e fechadas, respectivamente (COPEL, 2012).

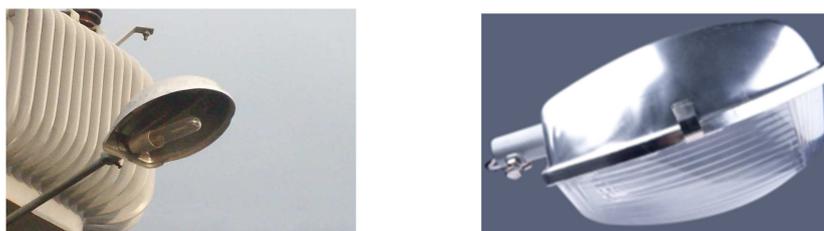


Figura 4.1 - Luminária Aberta e fechada (COPEL, 2012)

Em ambas as luminárias, os equipamentos necessários para seu funcionamento, reatores e relés fotoelétricos, precisam ser instalados nos postes. Além da poluição visual causada pela fiação e pelos próprios equipamentos, a distância física entre estes equipamentos e a luminária dificulta a manutenção, visto que em caso de falhas, todos os componentes devem ser verificados. Frente a isto a solução encontrada foi que elas fossem projetadas para contemplar em seu interior os reatores e na parte superior uma tomada para os relés fotoelétricos. Na Figura 4.2 é apresentada uma luminária deste tipo (COPEL, 2012).



Figura 4.2 - Luminária Integrada

Para definir limites e condições de referência para estas luminárias foram criadas normas específicas dentre as quais se destacam a NBR 15129: Luminárias para iluminação pública - Requisitos particulares e a NBR IEC 60598-1: Luminárias – Requisitos gerais e Ensaios. A seguir serão vistos alguns pontos de importantes sobre as luminárias de ILP.

Como já comentado, o propósito da iluminação das vias é aumentar a segurança e melhorar o conforto para os motoristas que dirigem à noite. As lâmpadas VSAP são largamente utilizadas neste tipo de aplicação devido a sua alta eficácia. Estas lâmpadas são utilizadas em conjunto com luminárias que servem para direcionar a luz gerada, para a pista de acordo com o tipo de distribuição desejada. Entretanto, é muito difícil controlar todos os raios de luz emitidos por uma lâmpada VSAP, dentro de uma região precisa, resultando em poluição luminosa e desperdício de energia. Além disso, o baixo índice de reprodução de cores destas lâmpadas tem uma influência negativa para a habilidade dos motoristas de diferenciar objetos nas vias (FENG, 2010).

Comparados com as fontes de luz tradicionais, os LEDs são diferenciados principalmente pela alta eficiência, tamanho reduzido, alto índice de reprodução de cores, longa vida útil e são ecologicamente corretos, pois não possuem metais pesados em sua construção. Entretanto, devido à geralmente apresentarem uma distribuição luminosa simétrica, os LEDs usualmente não são utilizados na iluminação de vias diretamente, pois uma pobre distribuição luminosa seria atingida. Para tornar possível uma distribuição luminosa adequada, torna-se necessário o uso de luminárias e

refletores que podem então ser projetados para atingir os níveis desejados de luminosidade por toda a via. Esta solução, embora possível, resulta em estruturas complexas, além de dificultar a montagem dos LEDs. Para resolver tal problema, lentes secundárias podem ser colocadas sobre os emissores de luz, onde por refração são capazes de direcionar praticamente todos os raios luminosos emitidos pela fonte luminosa. Além disso, com o uso de lentes os LEDs podem ser montados em placas planas, sem a necessidade de posicionamento especial na luminária, facilitando o processo de montagem (FENG, 2010). Um exemplo deste tipo de luminária é apresentado na Figura 4.3.



Figura 4.3 - Luminária de LED (SCHREDER, 2012)

Com o uso de vários pontos luminosos se torna possível controlar o direcionamento luminoso de cada um dos pontos. Os LEDs permitem que a potência seja dividida em vários pequenos pontos que, quando vistos a uma distância acima de 5 vezes o tamanho da luminária, podem ser também admitidos como sendo uma única fonte de luz (COSTA, 2004).

4.1 Segurança Elétrica

No que se refere à segurança elétrica as luminárias de um modo geral são classificadas em quatro classes. Esta classificação se aplica a todas as luminárias, incluindo as de uso residencial e comercial. As classes são listadas a seguir:

Classe 0 – Esta classe representa uma luminária com isolamento básica, sem previsão de aterramento.

Classe I – Luminária em que além da isolamento básica, apresenta uma medida adicional de segurança. Deve possuir um sistema de aterramento que em caso de falha da isolamento básica, nenhuma parte condutora possa se tornar parte viva⁴.

Classe II – Neste tipo a isolamento contra choque elétrico deve ser dupla ou reforçada, não necessitando ser aterrada;

Classe III – Luminária cuja proteção contra choque elétrico é prevista para funcionar em extra baixa tensão de segurança (EBTS) também conhecida pela sigla (SELV), em inglês, *Safety Extra Low Voltage*. Nesta luminária não são geradas tensões fora desta classificação (ABNT, 2010).

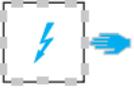
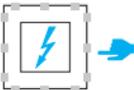
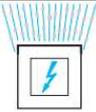
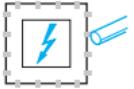
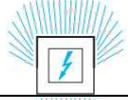
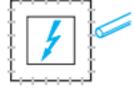
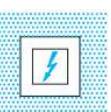
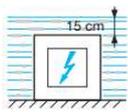
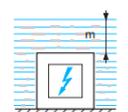
O valor da extra baixa tensão (ELV) é de 50Vca eficaz ou 120Vcc livre de *ripple*, entre os condutores ou entre qualquer condutor e a terra. Para o caso da EBTS os valores são os mesmos, entretanto, deve possuir um transformador de isolamento que esteja em conformidade com a norma específica, IEC61558-2-6 ou equivalente (ABNT, 2010).

4.2 Índice de proteção IP e IK

As luminárias devem ser construídas de forma a se manterem operantes mesmo quando expostas a condições adversas. Assim, devem apresentar uma proteção contra penetração de substâncias líquidas e sólidas em seu interior bem como uma resistência mecânica que garanta sua correta operação. Além de proteger os elementos internos, uma estrutura com um elevado fator de proteção contra penetração de substâncias, reduzirá as perdas de luminosidade devido ao acúmulo de sujeira em seus elementos ópticos.

⁴ Parte viva – Entende-se por parte viva qualquer parte condutora que possa causar choque elétrico em utilização normal. O condutor neutro, entretanto, também é considerado como parte viva.

Para tanto existe a norma IEC 60529, a qual define índices de proteção contra entrada de sólidos e líquidos no interior de equipamentos. Os níveis são definidos através de código que combina dois algarismos precedidos das letras IP, que faz menção é *Ingress Protection code*, ou código de proteção de ingresso, para dispositivos e equipamentos. O primeiro dígito refere-se à resistência contra penetração de corpos sólidos e o segundo dígito refere-se à corpos líquidos. De acordo com a norma IEC 60529 cada dígito é caracterizado conforme o Quadro 4.1.

Primeiro dígito			Segundo dígito		
0	-	Sem proteção	0	-	Sem proteção
1		Protegido contra objetos sólidos maiores que 50 mm.	1		Protegido contra gotas de águas incidindo verticalmente.
2		Proteção contra objetos sólidos maiores que 12,5 mm	2		Protegido contra gotas de águas incidindo com ângulos de 15°.
3		Protegido contra objetos sólidos maiores que 2,5 mm	3		Protegido contra spray de água incidindo com ângulos de até 60°.
4		Protegido contra objetos sólidos maiores que 1 mm	4		Protegido contra spray de água incidindo em todas as direções.
5		Protegido contra poeira, que poderia danificar o equipamento	5		Protegido contra jato de água em todas as direções. (12,5l/min)
6		Totalmente vedado contra poeira	6		Protegidos contra potentes jatos de água. (100 l/m)
			7		Protegido para imersão em água por um determinado período.
			8		Protegido contra submersão total por períodos indeterminados.

Quadro 4.1 - Classificação de proteção IP

Cada local de aplicação, devido as suas condições climáticas e características específicas, exigem graus de proteção diferentes.

As luminárias de iluminação pública devem atender no mínimo o índice de proteção IP33 para o compartimento onde está o reator e IP 55 para o compartimento da lâmpada (ABNT, 2004).

Outra norma internacional, a IEC 62262, visa preencher a lacuna referente à resistência mecânica contra choques externos, a qual não é coberta pelos códigos IP. Esta norma codifica a robustez da luminária pelas letras IK, seguidas de números que podem variar de 00 a 10 de acordo com cada nível. A norma se refere à energia de impacto que o corpo sob ensaio deverá resistir em uma condição específica. Quanto maior o índice, maior é a energia que o corpo deverá suportar. Por exemplo, um corpo classificado como IK02 deverá suportar um choque mecânico de 0,2 J, enquanto um corpo classificado como IK08, deverá suportar um impacto de 5 J.

É importante lembrar que as luminárias são instaladas em lugares desprotegidos e assim estão sujeitas a inúmeros fenômenos da natureza bem como de vândalos. Desta forma, o projeto das luminárias também deverá fornecer uma resistência mecânica satisfatória. Embora não haja esta solicitação na norma brasileira, grandes fabricantes como Philips, Scheréder e GE têm especificado índice de proteção mecânica IK08 para seus itens de LEDs (PHILIPS, 2012), (SCHRÉDER, 2012), (GE, 2012).

O índice de proteção influencia de forma significativa no fator de perda de luminosidade da luminária ou fator de manutenção (FM), que é influenciado pelo fator de depreciação da luminária por sujeira, que será tratado no item 5.1.2. Este fator está relacionado diretamente com a limpeza da luminária, e uma vez que a luminária possua um sistema de vedação eficiente estará menos sujeita à penetração de sujeira.

4.3 Refletores

As luminárias para lâmpadas de alta pressão, por possuírem tamanhos consideráveis e atingir elevadas temperaturas, não se adaptam com uso de lentes

colimadoras. A solução utilizada para direcionar a luz deste tipo de lâmpada é o uso de refletores acoplados à luminária. Estes refletores permitem que a luz gerada pelas lâmpadas seja espalhada pela via de forma a permitir uma luminosidade mais uniforme. Entretanto, como uma lâmpada deste tipo gera luz em todas as direções, mesmo com o uso de refletores é possível modificar a direção somente da parcela da luz que incide sobre o refletor. Toda a luz emitida pela parte inferior da luminária é direcionada diretamente para a pista.

Diversos materiais como vidro espelhado, plástico espelhado podem ser utilizados para sua confecção, sendo a chapa de alumínio anodizado a mais utilizada por ser leve, ter alta refletância, boa resistência mecânica e baixo custo. Para a máxima eficiência, os refletores são projetados de acordo com a forma geométrica da lâmpada a ser utilizada.

A forma do refletor deve evitar que os raios de luz reflitam para a fonte de luz, pois quando isto ocorre, além de uma redução no rendimento, pode causar a elevação da temperatura e com isso o aumento da tensão de arco na lâmpada. De acordo com a empresa General Eletric (GE, 2002) as lâmpadas vapor de sódio, para terem operação satisfatória, sem comprometer a vida útil da lâmpada, devem operar em luminárias que provoquem uma elevação na tensão de arco máxima de acordo com a Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Elevação máxima de tensão no arco das lâmpadas VSAP

Potência	Tensão nominal (V)	Elevação máxima no arco (V)
35W/50W/70W	52	4
100W/150W	55	4
50W/70W/ 100W	90	5
100W	100	5
150W/250W	100	7
400W/1000W	100	10
1000W	250	25

Fonte: (GE, 2002)

A Figura 4.4 apresenta como os raios luminosos se comportam em luminárias para lâmpadas VSAP. Nota-se que há uma parcela da luz que incide no refletor e é direcionada para fora da luminária, outra parcela incide no refletor e retorna para a lâmpada, e uma grande parcela sai diretamente da lâmpada sem incidir no refletor, esta parcela é a energia luminosa que não tem sua direção controlada.

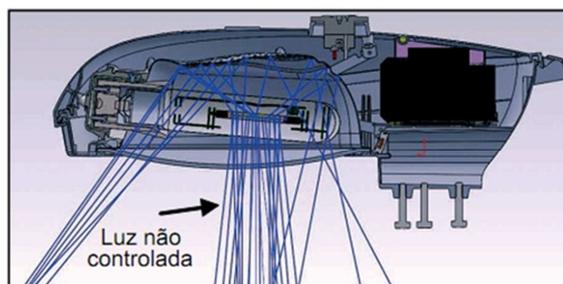


Figura 4.4 - Emissão luminosa de uma luminária para lâmpadas HID.

A curva de distribuição de intensidade luminosa da luminária é apresentada na Figura 4.5.

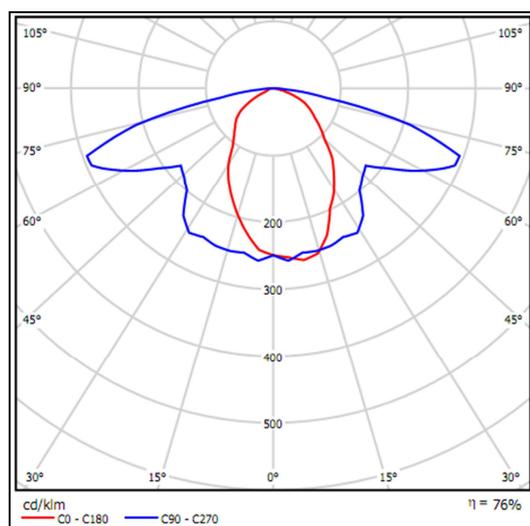


Figura 4.5 - Distribuição de intensidade luminosa da luminária para lâmpada VSAP 150W modelo ILP300 do fabricante Ilumatic

A linha central (ângulos C0 a C180) representa a distribuição luminosa no sentido transversal da via, ou seja, é esta distribuição que definirá se a luminária será tipo I, II, III, IV ou V. Já a linha na região mais externa (ângulos C90 a C270) representa a distribuição da luminária no sentido longitudinal da via. E será esta distribuição que definirá a classificação da luminária como curta, média ou longa. Esta linha também definirá de se distribuição será limitada, semi-limitada ou não limitada, que é a responsável pelo ofuscamento causado aos motoristas.

Este tipo de distribuição acarreta que a parte da pista diretamente abaixo da luminária recebe uma parcela maior de luminosidade, enquanto na periferia do alvo de distribuição da luminária a luminosidade é reduzida. O efeito desta distribuição pode ser observado na Figura 4.6.

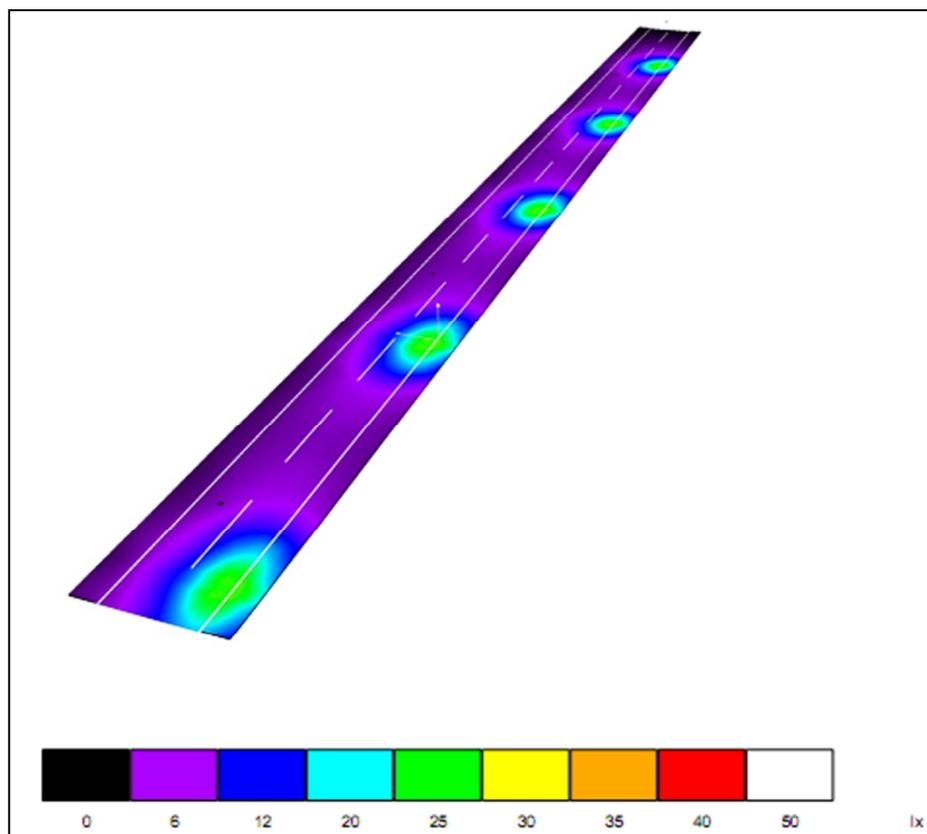


Figura 4.6 - Efeito da iluminância em uma via, classe V2, iluminada com luminárias para lâmpadas VSAP

Nota-se que na simulação é possível observar o baixo índice de uniformidade na iluminação. Na região diretamente abaixo da luminária o valor da iluminância fica próximo a 25 lux enquanto na zona de intersecção com a luminária subsequente o valor de iluminância atinge valores próximos a 6 lux.

4.4 Colimadores

Os colimadores são dispositivos instalados juntamente com lâmpadas ou fontes luminosas, com a função de redirecionar a luz para uma distribuição em raios paralelos. Se a fonte luminosa é colocada no ponto focal da lente, todos os raios que entram na lente se tornarão paralelos. De forma similar, se a fonte luminosa for colocada no ponto focal de um espelho esférico ou parabólico, os raios refletidos serão todos paralelos.

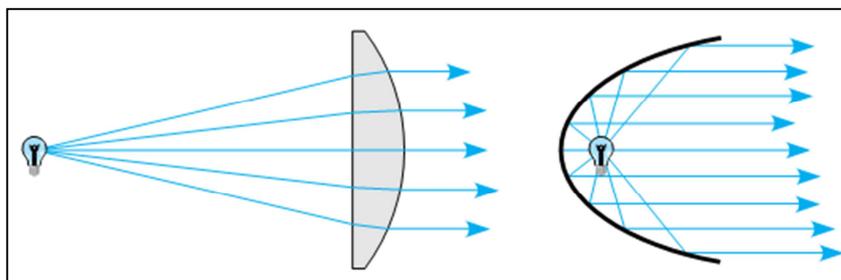


Figura 4.7 - Fontes luminosas no ponto focal

Este princípio é o comumente utilizado em luminárias de ILP com lâmpadas convencionais. Já existem alguns fabricantes de luminárias que estão utilizando esta solução também com LEDs.

4.5 Luminárias de LED

Por possuírem tamanho reduzido e relativa baixa emissão luminosa, se comparados com lâmpadas VSAP convencionais, para atingir uma equivalência fotométrica, é necessário o uso de vários LEDs em uma mesma luminária. Os LEDs emitem luz de forma direcional, ou seja, emitem luz dirigida, o que simplifica a operação de direcionamento da luz para a pista. Por estas características em geral para luminárias deste tipo são utilizadas lentes ao invés de refletores. Com isso, conseguem-se melhores resultados na distribuição da luz.

4.5.1 Lentes de LED

A aplicação de LEDs em sistemas de iluminação tem se tornado mais e mais importante com o contínuo aumento do fluxo luminoso destes dispositivos. Para modificar a distribuição luminosa destes, a melhor técnica considerada é o uso de lentes *freeform*, ou lentes de forma livre, dispostas diretamente sobre cada LED (Yi, et al, 2008).

A Figura 4.8 apresenta uma lente secundária utilizada com LEDs, bem como a projeção em que os raios luminosos se direcionam.

O diagrama ilustra a configuração de uma lente secundária para LEDs. Na base, há uma 'Junção' de LEDs, com o 'MMID' (Módulo de Montagem Integrada) indicado. Uma 'Lente Esférica' é montada sobre a junção. Acima dela, há 'Lentes de forma livre' (freeform) que direcionam os raios luminosos para um 'Plano alvo' (plano de destino) representado por uma linha azul horizontal no topo. As setas indicam a trajetória da luz desde a junção, através das lentes, até o plano alvo.

Figura 4.8 - Lente secundária para LEDs

Com o uso dos LEDs, é possível que toda a luz emitida por eles seja direcionada de forma simples. Pela natureza de sua construção os LEDs já emitem luz somente para sua parte frontal, ou seja, ângulos entre 0° e 180° . O modelo REBEL ES da Philips Lumileds indica que 90 % de todo o fluxo emitido é concentrado em uma abertura com ângulo de 160° (LUMILEDS, 2011b).

Desta forma ao invés de uso de refletores, podem ser utilizadas lentes individuais para cada LED. Podem-se utilizar lentes especialmente desenvolvidas para os diferentes tipos de aplicação ou pode-se realizar o arranjo de lentes com distribuições luminosas diferentes que quando colocadas próximas, geram uma curva de distribuição luminosa única.

4.6 Gerenciamento térmico

O gerenciamento térmico de uma aplicação com LEDs é muito importante para garantir a expectativa de vida indicada e melhorar seu desempenho. A máxima temperatura de junção da pastilha interna ao encapsulamento é baseada no máximo estresse térmico do material, que não pode ser excedido, para evitar a falha ou deterioração precoce do semicondutor.

O aumento da temperatura na junção P-N do LED está inversamente relacionado com a intensidade de saída luminosa do dispositivo. A temperatura da junção é basicamente afetada pelos três parâmetros citados abaixo:

- Temperatura ambiente nas imediações do LED;
- Caminho térmico entre a Junção do LED e as condições do ambiente;
- Potência dissipada pelo LED.

Nas aplicações utilizando LED de potência, algumas recomendações podem ser seguidas para melhorar a eficiência do sistema. No desenvolvimento do projeto é importante minimizar a quantidade de energia térmica que precisa ser removida. Então é importante separar o sistema eletrônico de controle de corrente da pastilha do LED.

Desta forma, o calor gerado pelo driver não contribuirá para o aquecimento da junção do LED, e o calor gerado pelo LED também não afetará a vida útil do driver.

Outra estratégia é minimizar a temperatura ambiente dentro da luminária onde os LEDs estão instalados. Para isto devem ser analisadas as características da luminária, projetando-a com materiais que possuam características de condutibilidade térmica adequadas. O *design* da luminária de iluminação pública também deve ser confeccionado de forma que propicie uma grande área de troca térmica com o ar, de preferência propiciando um caminho desobstruído para o fluxo de ar, de modo que a convecção natural de resfriamento possa ser aprimorada. A limpeza da luminária também influencia na troca térmica com o ar. Assim é interessante que em seu projeto seja analisado métodos de auto limpeza, como evitar áreas planas no lado superior, a fim de reduzir a possibilidade de retenção de resíduos.

A melhora da condutividade térmica entre o dissipador e o LED é muito útil para um bom gerenciamento térmico, pois embora a energia térmica seja removida do dissipador por convecção, o caminho térmico a partir do LED, fonte de calor, até o dissipador, é por meio de condução.

Por fim, a orientação das placas de LEDs e/ou dissipador deve ser considerada cuidadosamente, para que fiquem no plano vertical. Se estiverem no plano horizontal, este bloqueará a formação de correntes de ar de convecção e reduzirá substancialmente a capacidade de resfriamento do sistema (CREE, 2010).

4.6.1 Modelamento térmico

A resistência térmica do encapsulamento do LED é basicamente definida pela diferença da temperatura entre a junção do LED e a atmosfera ambiente sob uma determinada condição de dissipação de potência. A unidade utilizada para este valor geralmente é °C/W ou K/W. No caso dos LEDs de potência, a temperatura de junção é afetada por, basicamente, dois importantes caminhos térmicos:

- 1- A partir da junção do LED até o contato térmico na sua parte inferior. Esta resistência térmica é definida pelo *design* do encapsulamento e é referida como sendo a resistência térmica entre a junção e o ponto de soldagem ou *solder point* ($R_{th\ j-sp}$).
- 2- A partir do ponto de soldagem, que é o contato térmico do encapsulamento, até o ambiente. Esta resistência térmica é definida como sendo ($R_{th\ sp-a}$). De um modo geral a resistência térmica entre a junção do LED e o ambiente ($R_{th\ j-a}$) pode ser modelada como a soma das resistências térmicas em série desde a junção até o ambiente como é mostrado na Figura 4.9 (CREE, 2010).

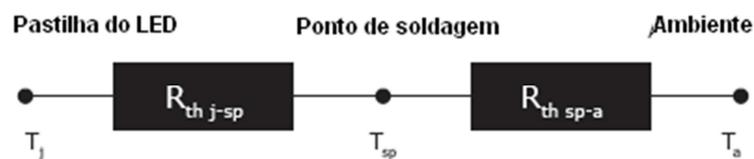


Figura 4.9 - Caminho térmico do LED

Na grande parte das aplicações com LEDs de potência, estes são montados em circuitos impressos com núcleo de metal, conhecidos como *MCPCB* (*metal-core printed circuit boards*), que são então agrupados a dissipadores térmicos com maior capacidade de troca térmica com o ar por convecção. O calor flui a partir da junção do LED, atravessa o MCPCB e passa pelo dissipador, por condução térmica que é mais eficiente que o modo de convecção. O dissipador por sua vez, distribui o calor para o ambiente através do processo de convecção. Assim, é acrescido ao caminho térmico um terceiro componente que auxiliará na diminuição da resistência térmica entre a junção e o ambiente.

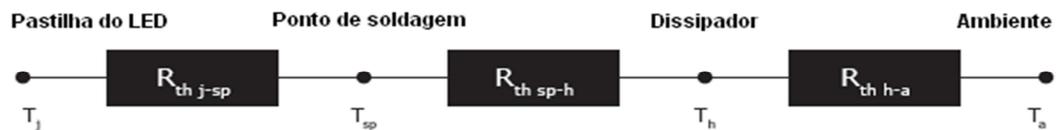


Figura 4.10 - Modelo de resistência térmica incluindo o dissipador

A resistência entre o ponto de soldagem do LED e o dissipador, $R_{th\ sp-h}$, depende do acabamento da superfície, imperfeições na área de contato, pressão aplicada na montagem, tamanho da área de contato e o tipo de material utilizado no acoplamento bem como sua espessura. Em um bom projeto, esta resistência pode ser minimizada para menos que $1\ ^\circ\text{C}/\text{W}$.

Geralmente, neste tipo de aplicação é utilizada uma camada de pasta térmica ou uma fita térmica para melhorar o acoplamento térmico entre a MCPB e o dissipador. Sendo assim, pode-se calcular o valor da resistência térmica utilizando os dados característicos dos materiais dados pelo fabricante. A equação (4.1), apresenta a equação para o calcula da resistência térmica entre o LED e o dissipador.

$$R_{th\ sp-h} = \frac{\text{Espessura } (\mu\text{m})}{\text{Condutividade térmica } \left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right) * \text{Área } (\text{mm}^2)} \quad (4.1)$$

Quando o dissipador é utilizado, a resistência térmica total é a soma das resistências em série desde a junção do LED até o ambiente, sendo que a resistência térmica é inversamente proporcional à área de contato do dissipador. A equação (4.2) representa esta relação.

$$R_{th\ j-a} = R_{th\ j-sp} + R_{th\ sp-h} + R_{th\ h-a} \quad (4.2)$$

Onde:

$R_{th\ j-sp}$ - Resistência térmica entre a junção do LED e o ponto de soldagem

$R_{th\ sp-h}$ - Resistência térmica entre o ponto de soldagem e o dissipador

$R_{th\ h-a}$ - Resistência entre o dissipador e o ambiente

Existe também uma parcela de calor que flui diretamente do encapsulamento do LED para o ambiente, porém como é relativamente pequena pode ser negligenciada nos cálculos.

A potência total dissipada pelo LED (P_d), e é o produto da queda de tensão direta (V_f) sobre o dispositivo e a corrente direta (I_f) que flui por seu interior, conforme equação (4.3).

$$P_d = V_f * I_f \quad (4.3)$$

A temperatura na junção do LED (T_j), e é a soma da temperatura ambiente (T_a) com o produto da resistência térmica a partir da junção até o ambiente, com a potência dissipada conforme visto na equação (4.4).

$$T_j = T_a + (R_{th_{j-a}} * P_d) \quad (4.4)$$

Quando vários LEDs são colocados em um mesmo dissipador, então a temperatura de junção pode ser calculada pela equação (4.5).

$$T_j = T_a + P_{t_{led}} \left(\frac{R_{th_{j-sp}}}{n} + R_{th_{sp-h}} + R_{th_{h-a}} \right) \quad (4.5)$$

Onde:

n - Número de LEDs instalados no mesmo dissipador

$P_{t_{led}}$ - é a soma da potência de todos os LEDs

A Figura 4.11 a seguir ilustra esta situação.

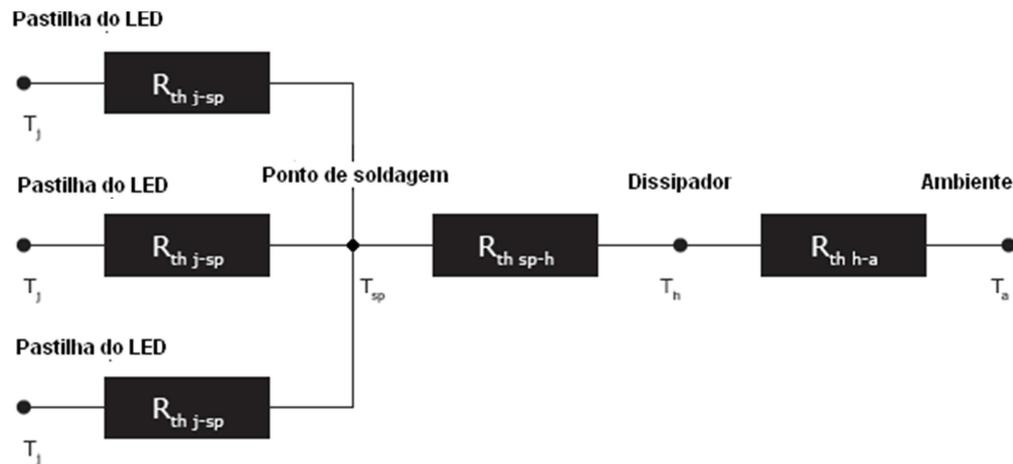


Figura 4.11 - Modelo térmico de vários LEDs no mesmo dissipador

A parcela de potência elétrica consumida pelos LEDs que é transformada em calor, é inversamente proporcional à eficiência dos LEDs. Ou seja, quanto menores as perdas internas, maior será a parcela de energia transformada em luz. Como referência pode-se citar que o LED modelo REBEL ES da Lumileds, com TCC de 5650K, apresenta 79 % da energia elétrica consumida transformada em calor e apenas 21 % transformada em Luz, conforme informações coletadas com o apoio técnico da empresa LUMILEDs. Sendo assim, mesmo possuindo eficiências elevadas, a parcela de potência a ser dissipada é considerável. Assim, projetos de dissipadores térmicos eficientes devem ser implementados, como é tratado no trabalho de BENDER, 2012.

Como existem várias variáveis de contorno um cálculo manual seria bastante complexo. Para isso existem vários softwares sofisticados que podem auxiliar no projeto dos dissipadores para LEDs, dentre eles pode-se citar o software FloTherm da empresa Mentor ou Flow Simulation, da empresa Solid Works que podem calcular com precisão a temperatura nos LEDs a partir de um desenho mecânico do dissipador e das características térmicas dos materiais utilizados (MENTOR, 2012), (SOLIDWORKS, 2012).

5 MANUTENÇÃO DO FLUXO LUMINOSO

Geralmente, as fontes de luz artificial tradicionais como as lâmpadas incandescentes, fluorescentes e as lâmpadas de alta pressão mantêm a emissão de luz com depreciação reduzida ao longo de sua vida útil, até falhar e cessar a emissão de luz totalmente. Essa característica não é observada nos LEDs de potência, sendo que sua intensidade luminosa diminui progressivamente, mas dificilmente se extinguirá.

Na grande parte das instalações, existe um valor mínimo de luz admissível pelos padrões impostos pelos clientes ou pelas normas vigentes. Quando houver diminuição da intensidade luminosa do ambiente pela falha das lâmpadas ou pela redução da intensidade luminosa, a substituição do sistema deve ser efetuada. Este trabalho de substituição tem um custo elevado, principalmente quando o acesso aos pontos é crítico, como no caso das luminárias de iluminação pública, que são instaladas em alturas elevadas e afastadas dos postes. Assim, o acesso precisa ser realizado por elevadores especiais, e no caso de vias uma equipe precisa ser mobilizada para cuidados com o trânsito.

A indústria de iluminação estipula valores de durabilidade das fontes de luz, para permitir que os projetistas possam estimar os intervalos de troca de lâmpadas, garantir os níveis de iluminação mínima e comprovar os gastos do investimento inicial.

Por exemplo, para lâmpadas de descarga convencionais, um valor enquadrado na classificação B10 representa a quantidade de horas estimadas para que 10 % da população de lâmpadas falhem totalmente. Outra classificação comumente utilizada é o B50, conhecido também como vida mediana das lâmpadas.

A vida útil das fontes de luz tradicionais é indicada através de procedimentos de testes já consagrados e normalizados. Por exemplo, a expectativa de vida de uma lâmpada fluorescente compacta é encontrada de acordo com os testes da norma LM-65 publicada pela IESNA⁵. Uma amostra estatística de lâmpadas é testada a uma temperatura ambiente de 25°C usando um ciclo de operação de 3 horas ligadas e 20 minutos desligadas. O tempo em que metade das lâmpadas falharem é indicado então

⁵ IESNA - *Illuminating Engineering Society of North America*.

como a vida mediana daquelas lâmpadas. Para uma lâmpada com vida útil de 10.000 horas este processo leva em torno de 15 meses.

Diferente das lâmpadas tradicionais, a aplicação de ciclos de liga e desliga não é um fator determinante da vida dos LEDs, porém mesmo testando-os em regime permanente 24 horas por dia e 7 dias por semana, para um LED com expectativa de 50.000 horas o teste levaria cerca de 5,7 anos. Como há um rápido desenvolvimento desta tecnologia, ao término deste tempo, provavelmente os itens testados já estariam obsoletos. Na Figura 5.1 é possível visualizar a depreciação do fluxo de diferentes fontes de luz.

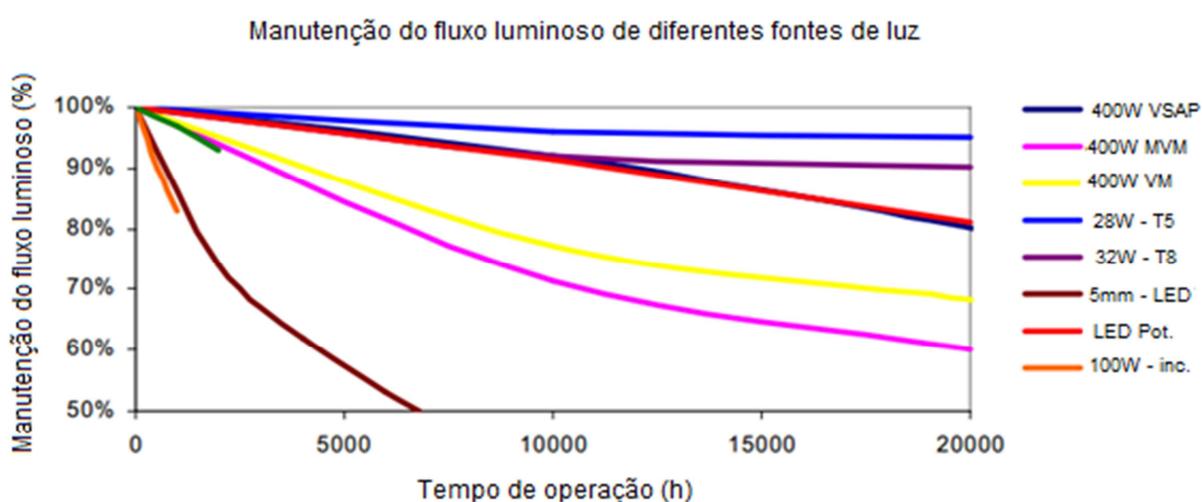


Figura 5.1 - Manutenção luminosa de diferentes fontes de luz (adaptado de ASSIST, 2006)

Quanto maior for a vida útil da luminária, menor serão os gastos com manutenção, lembrando que além da lâmpada e do sistema, os gastos se estendem para os equipamentos necessários para a troca, recursos humanos, sinalização e/ou desvio do trânsito, dependendo da via onde estão instaladas.

5.1 Fator de manutenção das luminárias (MF)

As luminárias de todo o tipo estão sujeitas à ação do tempo que faz com que o fluxo luminoso inicialmente alcançado venha a diminuir. Assim, esta degradação deve ser também levada em conta no projeto inicial. A sigla MF, cujo significado é *maintenance factor* ou em português FM referente a fator de manutenção, que será usada no decorrer do trabalho, é um valor utilizado para quantificar esta depreciação. Este fator relaciona o valor da iluminância inicial gerada por uma luminária em uma determinada área pelo valor da iluminância após um determinado período (IES, 2000).

O termo fator de manutenção pode também ser apresentado pela sigla LLF - *Light Loss factor*, ou em português, Fator de Perda de Luz, que é o produto proveniente de todos os fatores que contribuem para a depreciação do fluxo luminoso da luminária. A Figura 5.2 apresenta esta relação, onde $E(t)$ representa a função da iluminância em função do tempo de operação.

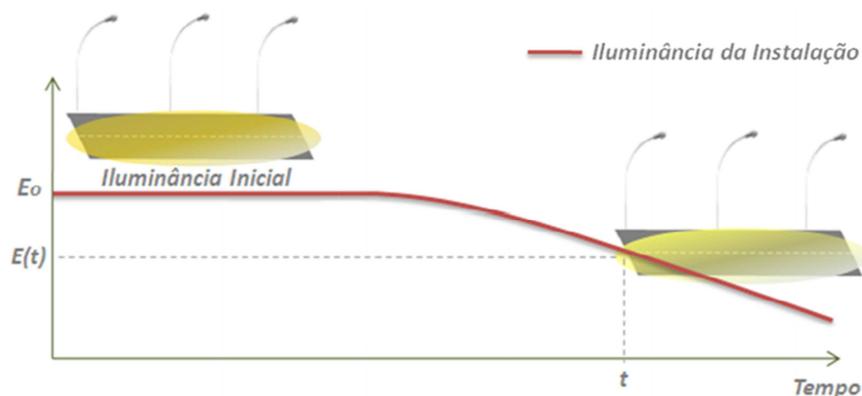


Figura 5.2 - Fator de manutenção em ILP

As normas específicas para iluminação pública, em geral, trazem valores de referência para luminância ou iluminância, sendo que estes valores são os menores valores admissíveis para cada tipo de via. Por este motivo é imprescindível conhecer

quais são as perdas de luminosidade de um sistema dentre o período de manutenção (limpeza) ou *relamping* (IES, 2000).

Vários fatores influenciam para a redução no fluxo luminoso das luminárias, sendo que a magnitude varia com o tipo da lâmpada, luminária, geometria e ambiente. Por exemplo, as áreas variam de acordo com o tipo e a quantidade de sujeira no ar. A quantidade de sujeira no ar no centro de uma cidade industrial é maior que a encontrada em ambientes rurais. Dentre os fatores que influenciam na redução do rendimento luminoso, podem-se destacar os citados a seguir.

5.1.1 Fator de Depreciação da Lâmpada ou fonte luminosa (FDL)

É também conhecido pela sigla em inglês LLD, que significa *Lamp lúmen depreciation*. Com o decorrer do tempo as fontes luminosas reduzem a capacidade de geração de Luz, sejam elas lâmpadas fluorescentes, de descarga de alta pressão ou os próprios LEDs, embora em intensidades diferentes. Os fabricantes devem indicar qual a vida média das fontes luminosas para que programas de manutenção possam ser efetuados. Segundo a IESNA, um sistema de iluminação viário típico opera entre 4000 e 4300 horas por ano, então, dependendo da vida média de cada tipo de fonte, estes programas podem ser planejados (IES, 2000).

5.1.1.1 Manutenção do Fluxo Luminoso das Lâmpadas VSAP

No caso das lâmpadas convencionais de vapor de sódio, a expectativa de vida fornecida pelos fabricantes é determinada quando metade de uma determinada amostra deixa de operar, ou seja, uma lâmpada cuja expectativa de vida seja de 30.000 horas, significa que este é o tempo em que 50 % de uma determinada amostra falha totalmente (OSRAM, 2012).

Este dado é conhecido como vida mediana da lâmpada. Segundo a GE estes valores são publicados em catálogo baseados em testes de laboratório com um número representativo de lâmpadas sob condições controladas, incluindo ciclo de operação de 10 horas por partida em reatores com características elétricas especificadas. Quanto menor for o período do ciclo de operação, menor será a durabilidade da lâmpada, para ciclos de 5 horas, por exemplo, reduz-se a vida mediana em 25 %, e para ciclos de 2,5 horas este valor chega a 50 %. Por isso algumas lâmpadas possuem vida mediana especificada para ciclos de operação diferentes de 10 horas por partida. As condições de operação da lâmpada também podem afetar sua vida (GE, 2002).

A Figura 5.3 apresenta a relação da taxa de falha das lâmpadas de acordo com o tempo de operação, no caso da lâmpada em questão, a expectativa de vida dada no seu catálogo seria de 30.000 horas, embora com 20.000 horas de operação, aproximadamente 15 % de uma determinada população já tenha falhado.

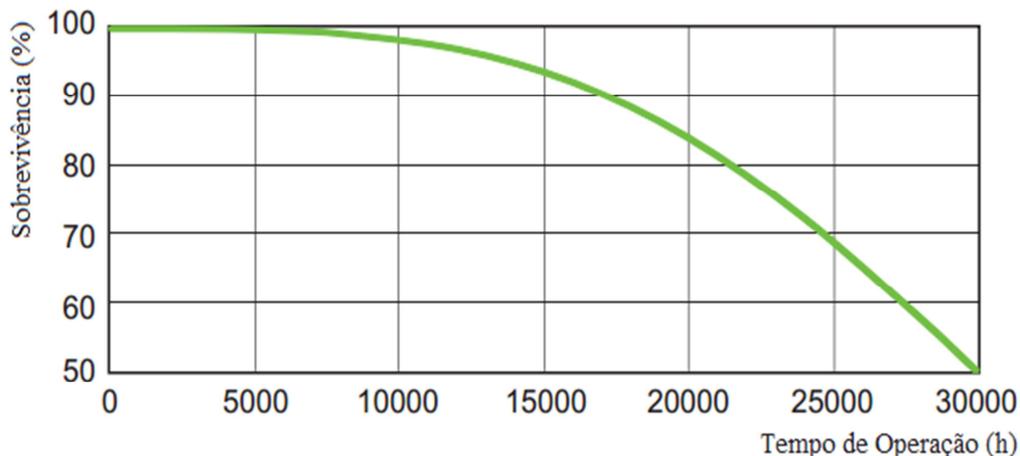


Figura 5.3 - Índice de sobrevivência das lâmpadas VSAP SON 150 a 400W (PHILIPS, 2012)

O fluxo luminoso nominal é obtido sob condições controladas de laboratório em uma determinada posição de operação. Nos catálogos são publicados valores nominais de fluxo após 100 horas de operação. As lâmpadas de Descarga de Alta Intensidade (HID) estão sujeitas a diversos fatores os quais podem afetar os níveis finais da

iluminação. Como resultado, o desempenho da lâmpada pode variar devido a suas posições de funcionamento, temperatura ambiente, variações no reator ou na tensão de rede, etc. Assim, na escolha do sistema é necessário observar como estas variações podem afetar os níveis de iluminação (GE, 2002).

O fluxo luminoso também varia com o passar do tempo, entretanto em geral esta redução não é muito acentuada sendo que geralmente até o término da vida útil da lâmpada esta redução não ultrapassa 20 % (PHILIPS, 2012).

A Figura 5.4 apresenta a depreciação luminosa das lâmpadas vapor de sódio modelo SON entre 150 e 400 W da marca Philips.

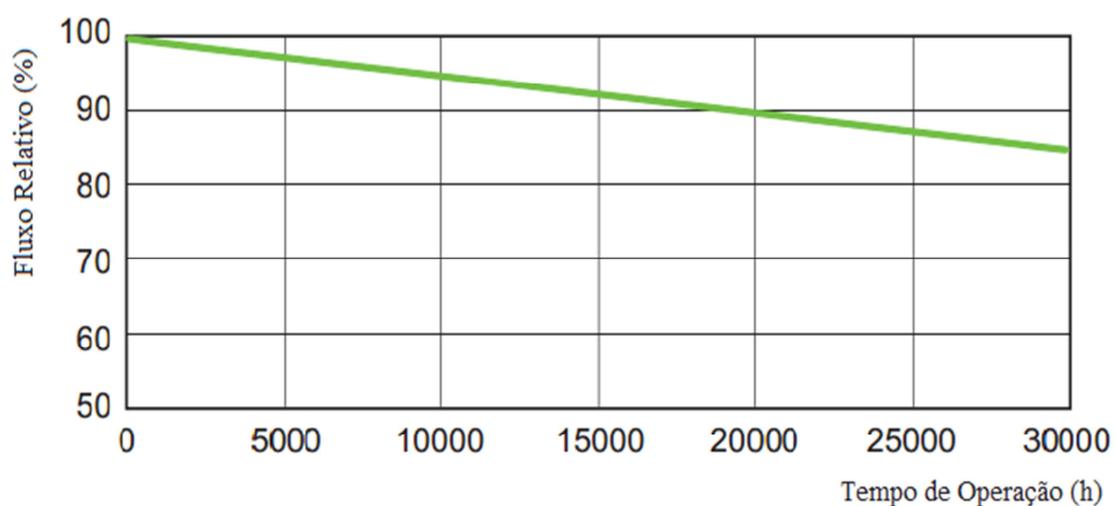


Figura 5.4 - Depreciação do fluxo luminoso de uma luminária VSAP 100 a 400W (PHILIPS, 2012)

Juntando-se estes dois parâmetros, o tempo de sobrevivência e a depreciação do fluxo, pode-se ter uma ideia mais real de como serão o comportamento do fluxo luminoso de uma instalação com o passar do tempo. A Figura 5.5 apresenta este comportamento.

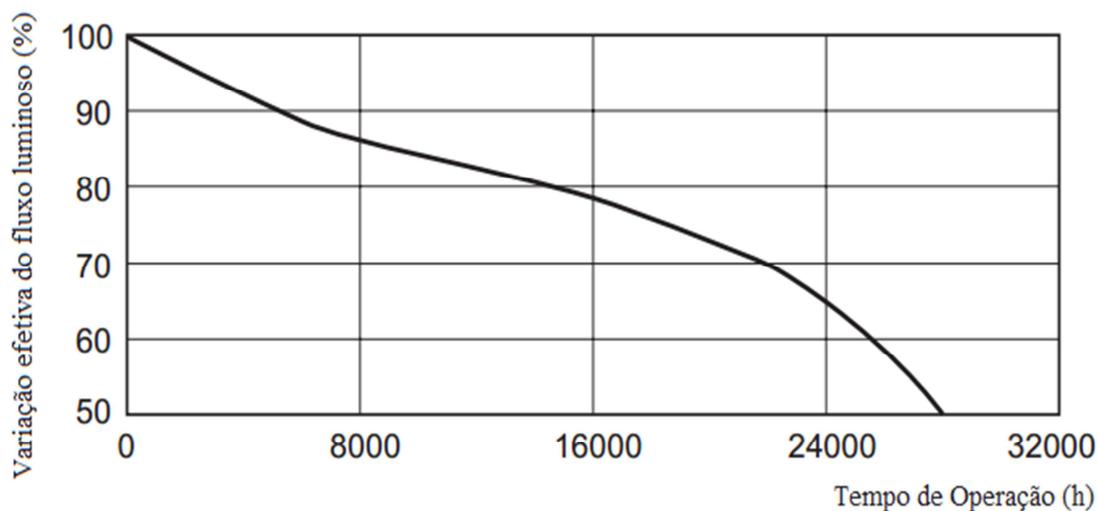


Figura 5.5 - Redução efetiva do fluxo luminoso de um conjunto de lâmpadas (Philips, 2012)

5.1.1.2 Manutenção do fluxo luminoso dos LEDS

Diferente das tradicionais lâmpadas HID, onde o final de sua vida útil é definido como o tempo de operação onde 50 % de uma determinada amostra deixasse de operar, estes componentes dificilmente deixam de emitir luz repentinamente, mas sofrem uma redução gradual do fluxo luminoso emitido. Assim, uma nova forma para estimar a durabilidade destes componentes precisou ser criada.

A ASSIST⁶ definiu que uma manutenção de fluxo luminoso de 70 % entra no limite a que o olho humano consegue distinguir, quando a redução é gradual. Pesquisas da ASSIST mostram que 30 % de redução na intensidade luminosa também é aceitável para a maioria das aplicações de iluminação em geral. Em grande parte das aplicações decorativas o valor de 50 % de redução pode ser considerado. Entretanto em aplicações mais específicas recomenda-se que este valor seja melhor analisado.

⁶ ASSIST - Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies.- é um comitê independente cujos participantes incluem a Boeing, GELcore, autoridades de pesquisa e desenvolvimento de energia de New York, Nichia, America Corporation, Osram Sylvania/Osram Opto Semiconductors, Philips Lighting e a Agencia de proteção ambiental dos Estados Unidos.

A IES⁷ desenvolveu um procedimento de teste para LEDs baseado em recomendações da ASS/ST, que é publicado pela norma IES LM 80. Esta norma especifica critérios para o ensaio de depreciação luminosa e de variação da cromaticidade dos LEDs, bem como o tamanho de amostragem, temperaturas de ensaio, umidade, variação de corrente admissível, dentre outros (IES, 2008).

Cabe lembrar que a LM 80 não traz a informação de quantas horas o componente irá operar até apresentar a redução de fluxo esperada, ela simplesmente estipula a metodologia de ensaio.

A extrapolação para determinar o período em que ocorrerá a redução do fluxo, até as taxas estabelecidas, é realizada com base em uma norma também desenvolvida pela IES, a TM-21, que toma como base os valores coletados nos ensaios dos LEDs realizados de acordo com norma LM80.

O ensaio segundo a LM80, deve ser realizado com uma determinada quantidade de amostras sendo que os dados fotométricos destas devem ser coletados no mínimo em três temperaturas de corpo (T_c) diferentes, com o local de medição desta temperatura identificado pelo fabricante. O ensaio deve ser realizado com as temperaturas $T_c = 55\text{ °C}$, $T_c = 85\text{ °C}$ e uma terceira a ser determinada pelo próprio fabricante. As amostras também deverão ser ensaiadas em níveis de corrente que representam a aplicação real, em geral o teste é realizado com vários níveis de corrente diferentes, com o objetivo de fornecer os dados de depreciação para diferentes níveis de exigência do componente (IES, 2008b).

A intensidade luminosa dos LEDs normalmente varia mais rapidamente durante as primeiras 1000 horas de operação, podendo sofrer até mesmo um acréscimo. Então, para uma estimativa mais correta, é feita a normalização do valor medido após este primeiro período de sazonalidade. A coleta de dados deve ser realizada no mínimo por 6000h, com intervalo de medição de no mínimo a cada 1000h. As medidas entre as 1000 e 6000 horas são comparadas com o nível de intensidade inicial considerado

⁷ IES - *Illuminating Engineering Society of North America*. É uma comunidade dedicada a estudos sobre iluminação. É composta por diversos membros dentre os quais 25 % são fabricantes, 25 % são Lighting Designers e Arquitetos e os 50 % restantes são consultores, representantes do governo de instituições de educação dentre outros. Este comitê desenvolve normas guias de projetos, guias de teste e medições, materiais de gerenciamento de energia em iluminação, etc (IES, 2012).

(nível ao término das primeiras 1000 horas). O tempo em que os dispositivos deverão operar até atingir os níveis de depreciação considerados é indicado pela representação L_p , onde “p” representa o nível de depreciação em porcentagem. Caso as amostras não atinjam os níveis L70 e L50 durante as 6000 horas iniciais, os dados coletados podem ser extrapolados para estimar a sua expectativa real de vida (ASSIST, 2006).

Para esta extrapolação, é utilizada a norma IES TM 21, a qual define a equação (5.1) (IES, 2011).

$$L_p = \frac{\ln\left(100 * \frac{B}{p}\right)}{\alpha} \quad (5.1)$$

Onde:

L_p , - tempo de manutenção luminosa expressa em horas, onde p representa o percentual do fluxo luminoso inicial mantido.

B - Constante inicial da curva de depreciação do fluxo

α - Taxa da constante de decaimento da curva de depreciação de fluxo

Os detalhes deste cálculo não serão explorados, visto que são padronizados pela norma em questão. Para o cálculo está disponível no site da Energy Star⁸ uma planilha padrão com as equações pertinentes de acordo com a IES TM 21 que permite determinar a expectativa de vida dos LEDs com base nos dados coletados no ensaio anterior definido pela norma LM80 (ENERGYSTAR, 2011).

A manutenção luminosa projetada pode ser de até seis vezes o período ensaiado. Por exemplo, se um determinado LED foi ensaiado por 6000h, poderá ter seu fluxo luminoso estimado para um período máximo de 36000h. Para estimar corretamente a depreciação em períodos maiores, os LEDs deverão também ser ensaiados por mais tempo.

⁸ Energy Star – Programa da Agencia de proteção ambiental (EPA) e do departamento de energia Americano (DOE) que cria recomendações para o uso mais eficiente da energia, a fim de proteger o meio ambiente. Endereço da internet para a planilha de cálculo vide a norma TM21: www.energystar.gov/TM21-calculator.xls

Para uma melhor precisão nos resultados, é aconselhado um período de teste de 10000 horas (RICHMAN, 2009).

A nomenclatura que define a manutenção de fluxo luminoso dos LEDs é dada por:

$$L_p(Dk) \quad (5.2)$$

Onde “p” se refere à porcentagem mantida do fluxo luminoso inicial e “D” é a duração em horas do teste realizado, dividido por 1000. Se o valor calculado for maior que 6 vezes o tempo de ensaio, é utilizado o símbolo “>” para informar que a vida do LED será maior que o indicado. Assim por exemplo:

- $L_{70}(6k) > 36000 \text{ horas}$ Neste caso, quer dizer que o LED foi submetido a um teste de 6000 horas, e pela extrapolação manterá um fluxo luminoso maior que 70 % após 36000 horas.
- $L_{70}(4k) = 4400 \text{ horas}$ Neste caso o LED atingiu 70 % do fluxo inicial após 4400 horas de operação. O valor “D”, neste caso é arredondado para o múltiplo mais abaixo (IES, 2008).

Em uma luminária, além da depreciação do fluxo luminoso dos LEDs, outros fatores contribuem para a redução da luminosidade emitida por ela, como a depreciação por sujeira como será visto a seguir. Dependendo de sua tecnologia e dos materiais utilizados em sua construção, modelos ou marcas diferentes podem sofrer uma redução mais ou menos intensa.

5.1.2 Fator de Depreciação por Sujeira (FDS)

É conhecido também pela sigla LDD, em inglês *Luminarie Dirt Depreciation* que relaciona o acúmulo de resíduos sobre a luminária que faz com que o seu rendimento diminua, devido à diminuição da transmitância luminosa das partes transmissivas, ou

pela diminuição do poder de dissipação térmica da luminária, ocasionando uma menor iluminação na via. O fator de depreciação por sujeira é influenciado pela categoria do local em que a instalação é realizada, sendo que é determinado pela comparação do fluxo luminoso relativo de uma luminária instalada em regime normal e o fluxo após um determinado intervalo de tempo, em cada tipo de ambientes (KAUFFMAN, 2011).

A depreciação da luminária também depende do seu tipo e sua classe de proteção, baseada nos índices IP, vistos anteriormente. Quanto mais protegida for a luminária, menor será a penetração de sujeira e assim menor será também seu índice de depreciação.

Levando em consideração estas características, a norma CIE 154, estipula valores distintos para os índices de depreciação, dependendo do tipo da luminária. Esta norma divide as condições de sujeira do ambiente em 3 categorias de poluição do ambiente:

Baixa - Ambientes com baixo nível de contaminação, longe de fumaças ou atividades geradoras de poeira, vias de tráfego leve. Geralmente áreas rurais ou residenciais. Nível de partículas no ambiente menor que 150 microgramas por metro cúbico.

Média - Ambientes com fumaça ou atividades geradoras de poeira moderada nas proximidades. Nível de partículas no ambiente menor que 600 microgramas por metro cúbico.

Alta - Fumaça ou nuvens de poeira geradas por atividades nas proximidades normalmente envolvem as luminárias (CIE, 2003).

A sujeira sobre as lâmpadas ou luminárias causará a maior parte da redução de luz da luminária. A acumulação de sujeira nas superfícies refletoras pode ser minimizada realizando a vedação no compartimento ótico da luminária. Benefícios significativos podem ser obtidos em luminárias onde o índice de proteção é maior que IP5X (CIE, 2003) (SANDERS,2008).

Os gráficos apresentados nas Figura 5.6, Figura 5.7 e Figura 5.8 apresentam estes valores.

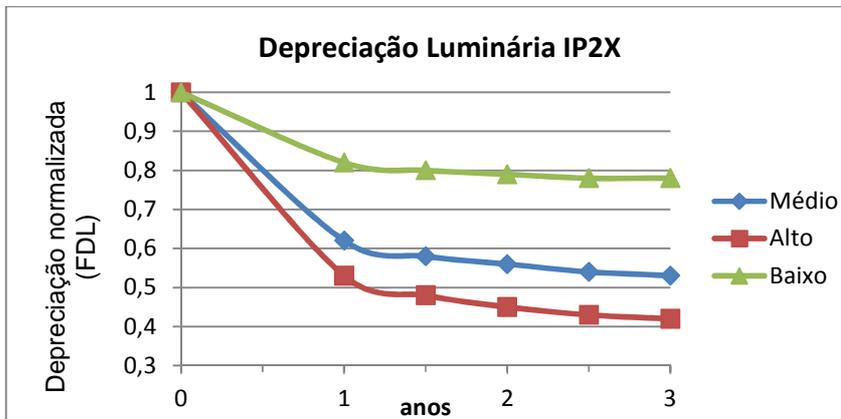


Figura 5.6 - Depreciação Luminária IP2X (Adaptado de CIE, 2003)

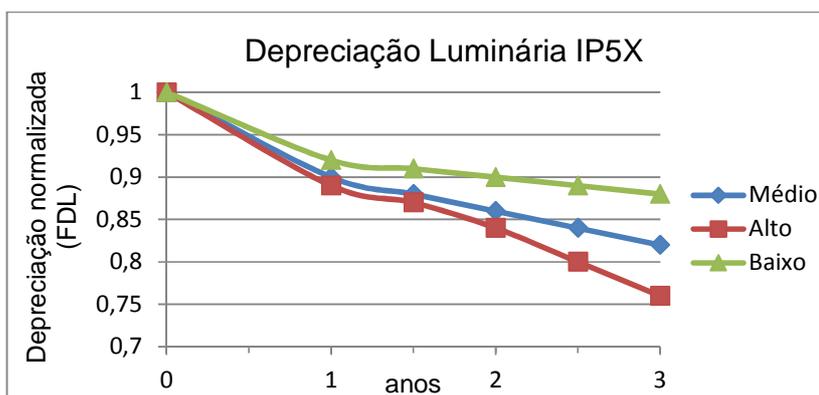


Figura 5.7 - Depreciação Luminária IP5X (Adaptado de CIE, 2003)

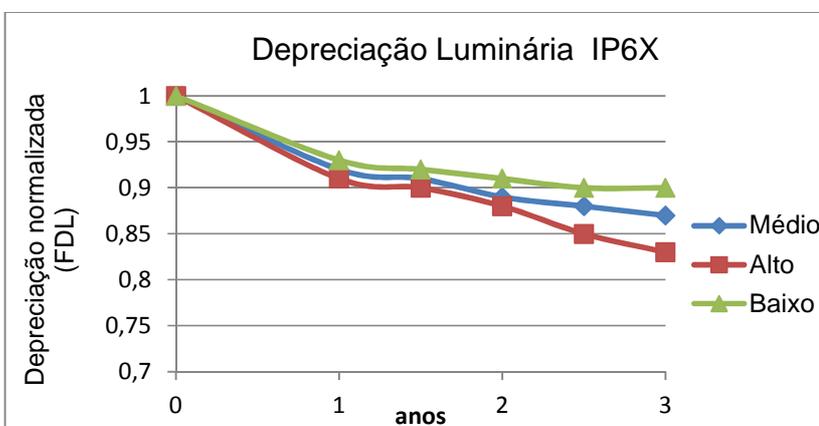


Figura 5.8 - Depreciação Luminária IP6X (Adaptado de CIE, 2003)

Um dos fatores que influenciam na sujeira da luminária é a atração de insetos por intermédio da luz emitida pelas lâmpadas convencionais. Os insetos de vida noturna são atraídos principalmente pela radiação ultra violeta e pela radiação visível na faixa da cor verde, que ocorre de forma significativa nas lâmpadas VSAP. Os LEDs de cor branca emitem um pico de maior intensidade de radiação na região da cor azul e intensidade reduzida na região da cor verde, sendo que não emitem radiação ultra-violeta o que faz com que os insetos sejam menos atraídos por este tipo de luz. Isso faz com que os fatores de depreciação da luminária por sujeira possam ser melhorados (MASAKI, 2009).

5.1.3 Fator de Sobrevivência das Lâmpadas (FSL)

Dependendo do tipo de lâmpada utilizada, o tempo de mortalidade irá variar. Assim, o programa de manutenção deverá levar em conta as estatísticas de falha dadas pelo fabricante. Em vias onde a iluminação é crítica, uma checagem periódica é necessária.

5.1.4 Fator do equipamento:

Os fatores de perda luminosa que não são dependentes do tempo referem-se essencialmente às características específicas dos equipamentos utilizados. Assim, um cuidado especial deve ser tomado na escolha de equipamentos adequados para cada situação.

5.1.5 Temperatura ambiente

O efeito da temperatura ambiente na proximidade das lâmpadas pode ser considerável. Cada combinação particular entre lâmpada e luminária tem sua própria característica relacionada com a luz gerada pela temperatura ambiente. Para aplicar um fator de perda de luz devido à temperatura ambiente, o projetista deve conhecer as temperaturas máximas e mínimas esperadas e ter os dados de variação da intensidade luminosa com as mudanças na temperatura ambiente para a fonte luminosa específica na luminária a ser utilizada.

5.1.6 Tensão de alimentação

Sabe-se que as redes de distribuição de energia apresentam variações na tensão de alimentação, estas variações também devem ser consideradas nos projetos de iluminação, visto que dependendo do caso podem ser utilizados reatores que compensem estas variações. A bitola dos condutores utilizados em uma rede de alimentação para ILP também afeta diretamente a queda de tensão no circuito então deve ser realizado também uma avaliação de custo/benefício entre a bitola dos condutores e a possível utilização de reatores com compensadores para variação de tensão (IES, 2000).

5.1.7 Fator da Lâmpada e Reator

Esta informação trata da variação quanto ao tipo de reator e lâmpada utilizados e seu comportamento. Alguns reatores podem compensar as variações de tensão, outros podem minimizar as variações das lâmpadas, enquanto outros ainda podem

compensar a degradação da lâmpada pelo seu envelhecimento. Os ensaios fotométricos do fluxo luminoso são baseados em condições de laboratório, sendo que em condições de campo os valores de fluxo luminoso podem sofrer alterações (IES, 2000).

5.2 Consideração do Fator de Manutenção (FM)

Para uma correta estimativa das perdas luminosas, ao menos dois índices devem ser considerados: a depreciação da fonte luminosa propriamente dita (FDL) e a depreciação por sujeira (FDS) (KAUFFMAN, 2011) (TEEM, 2012).

Para possibilitar uma maior precisão, o fator de sobrevivência da lâmpada ou fonte luminosa (FSL) também pode ser inserido no cálculo, assim o fator é dado pela equação (5.3) (TICHELEN, 2007). Estes conceitos já foram avaliados no item 5.1.1.

$$FM = FDL * FDS * FSL \quad (5.3)$$

Assim para garantir os níveis mínimos de iluminação projetados durante o período indicado, estas características devem ser avaliadas. O fator de manutenção sempre está atrelado a um determinado período. No caso das Luminárias com lâmpadas VSAP este período gira na faixa de 3 a 4 anos, sendo que neste período já é possível perceber uma redução expressiva no fator de manutenção. Se for escolhido um período de manutenção maior, torna-se necessário um sobre dimensionamento do projeto.

A Figura 5.9 apresenta a curva de depreciação das luminárias convencionais com índice de proteção IP66 e com diferentes marcas de lâmpadas, para um ambiente classificado como nível de poluição média.

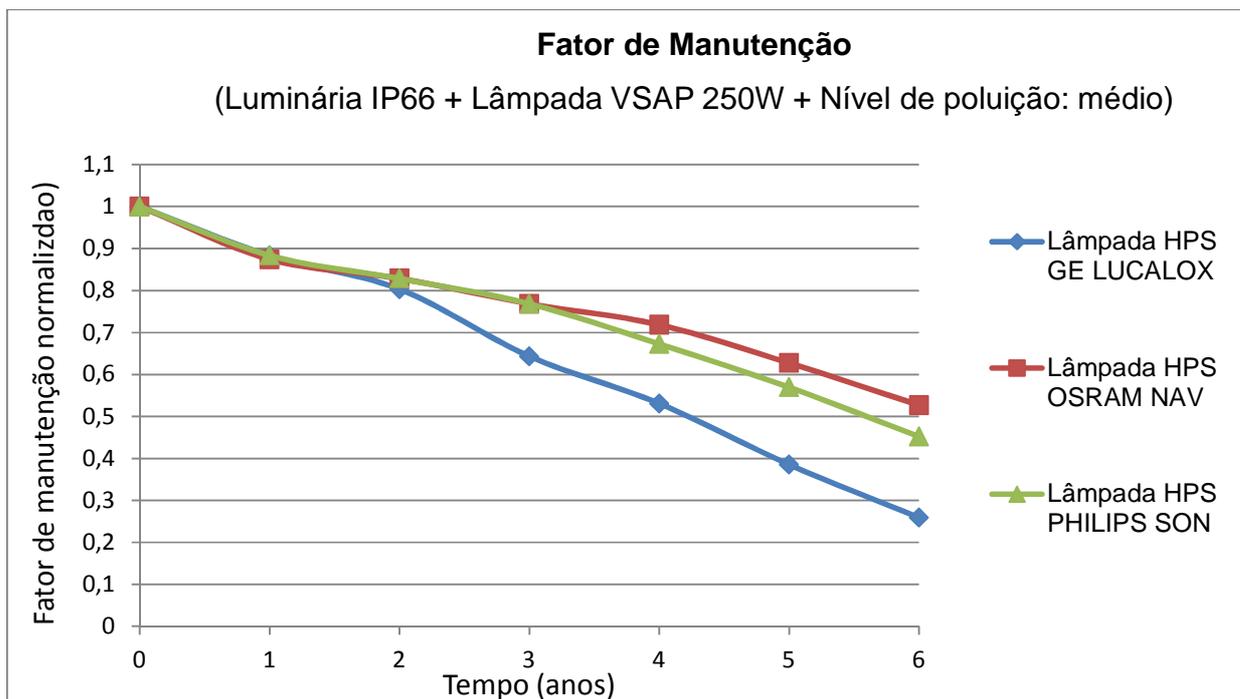


Figura 5.9 - Fator de depreciação de luminárias VSAP com diferentes marcas de lâmpadas (OSRAM,2012) (PHILIPS,2012) (GE,2012b)

Nota-se que no período de seis anos, os valores de fator de manutenção considerando uma luminária IP66, variam entre 0,26 e 0,53 dependendo do tipo de lâmpada o que tornaria o projeto inviável. Assim, geralmente é utilizado um período de manutenção entre 3 e 4 anos, sendo que para 4 anos o fator de manutenção varia entre 0,53 e 0,71.

5.2.1 Dimerização

Muitas das aplicações de iluminação podem ser aprimoradas com a técnica de dimerização. Esta técnica não só possibilita a criação de uma iluminação mais agradável em ambientes como, por exemplo, em restaurantes e salas de estar, mas pode também ser utilizada para economizar energia. Isso é possível realizando a

alteração do fluxo luminoso, ajustando-o para os níveis mínimos necessários de acordo com a aplicação e os horários.

Por exemplo, a iluminação de estacionamentos ou de vias públicas, pode ter a intensidade luminosa reduzida durante a madrugada, quando não há circulação de pessoas e automóveis. Utilizando um sensor de movimento, o fluxo normal pode ser facilmente restituído quando ocorrer movimento novamente. Com um sistema de controle aprimorado e um método de comunicação entre os pontos é possível controlar a iluminação de grandes áreas, tornando a economia de energia mais significativa.

O fato dos LEDs responderem de forma praticamente instantânea às variações de alimentação aplicadas a eles, os tornam vantajosos frente às tecnologias de iluminação atuais, como lâmpadas vapor de sódio ou multi-vapor metálico, que demoram a estabilizar e reacender no caso de um desligamento.

Embora o LED aceite variação instantânea e responda de mesma forma, para o uso de um sistema de dimerização em iluminação devem ser observados alguns limites para a frequência de oscilação, para evitar o surgimento do efeito *flicker*. Segundo estudo da ASSIST o efeito flicker ou de cintilação, pode ser percebido diretamente, para frequências abaixo de 100 Hz. Entretanto, mesmo em frequências onde não é percebido diretamente, pode ser percebido de forma indireta através do efeito estroboscópico. Além da frequência de oscilação, a razão cíclica também influencia neste efeito, entretanto o efeito passa a ser praticamente imperceptível para frequências de oscilação acima de 1000 Hz (ASSIST, 2012).

A possibilidade de dimerização pode ser considerada um dos pontos chave para a aceitação geral da tecnologia de LED em aplicações de grande porte.

No caso de luminárias de LED é possível também a utilização de um sistema de realimentação que poderá compensar as perdas luminosas causadas pela depreciação luminosa da luminária, podendo aumentar a potência nos LEDs gradativamente para manter o fluxo luminoso constante.

6 VISÃO

Neste capítulo será apresentada uma revisão bibliográfica sobre o comportamento do olho humano em diferentes situações de luminosidade e com diferentes tipos de fontes de luminosas. Será visto, então, como a visão humana responde para diferentes tipos de excitações luminosas.

6.1 Visão fotópica, mesópica e escotópica

Todos os sistemas de iluminação são projetados para atender as necessidades dos usuários, sendo que geralmente são balizados por normas que visam a adequação da iluminação artificial à tarefa a ser desempenhada e ao ambiente. Desta forma, é ponto fundamental conhecer a percepção do indivíduo sobre o ambiente para o correto dimensionamento em um projeto de iluminação.

Para o cérebro identificar uma imagem, esta deve ser captada pelo olho e focada em sua retina. Existem basicamente três partes no interior do olho que estão envolvidos para permitir focar uma imagem na retina. O primeiro é uma fina camada de lágrimas que fica sobre a córnea. Esta camada limpa a superfície do olho e inicia o processo de refração, necessário para foco da imagem. O segundo componente é a própria córnea, que é a parte transparente que cobre cerca de um quinto do globo ocular, sendo que junto com a camada de lágrima representa 70 % da capacidade de refração do olho. O terceiro componente é a lente cristalina, que propicia basicamente os outros 30 % da refração interna do olho (IESNA, 2000). Na Figura 6.1 pode ser visto o olho humano com suas principais partes.

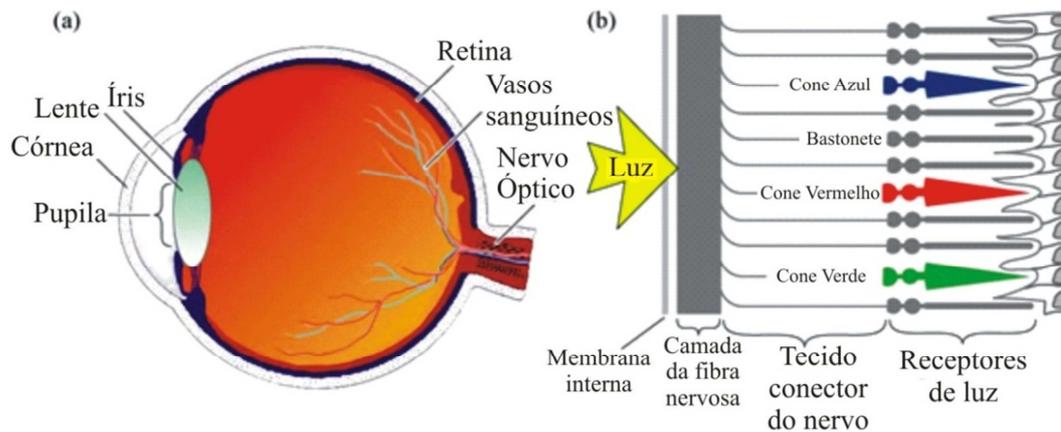


Figura 6.1 - Olho humano e suas partes (Adaptado: Schubert, 2006)

O olho humano tem dois tipos diferentes de células sensíveis à luz, os cones e os bastonetes. Os cones são menos sensíveis à luz e estão localizados em maior densidade na região central da retina (fóvea) e são subdivididos em três tipos, os cones sensíveis à faixa espectral verde, à azul e à vermelha, e são identificados pela cor em que atuam. Em ambientes onde existem altos níveis de luminosidade, luminância maior que 3 cd/m^2 , os cones são predominantes e permitem que as cores sejam diferenciadas com maior clareza. Neste caso, tem-se a visão chamada de fotópica. Os bastonetes possuem uma sensibilidade muito maior que os cones, entretanto não possibilitam a identificação de cores. Apresentam-se em maior concentração na região periférica da retina e são adaptados para situações onde os níveis de luminosidade são mais reduzidos, valores de luminância menores que $0,003 \text{ cd/m}^2$. Estas células são responsáveis basicamente pela percepção de claro e escuro, sendo que neste caso está caracterizada a visão escotópica.

Existe ainda outro tipo de visão denominada de mesópica, que atua em níveis de luminosidade intermediários, entre $0,003 \text{ cd/m}^2$ e 3 cd/m^2 , sendo que é situada na faixa mediada tanto pelos cones quanto pelos bastonetes (SCHUBERT,2006) (IESNA,2000) (MORANTE,2008).

Esta adaptação do olho dependendo dos níveis de luminosidade no ambiente é conhecida como "*Purkinje Effect*" (LEWIN, 1999).

A Figura 6.2 apresenta as faixas de luminância onde cada uma das visões está atuando.

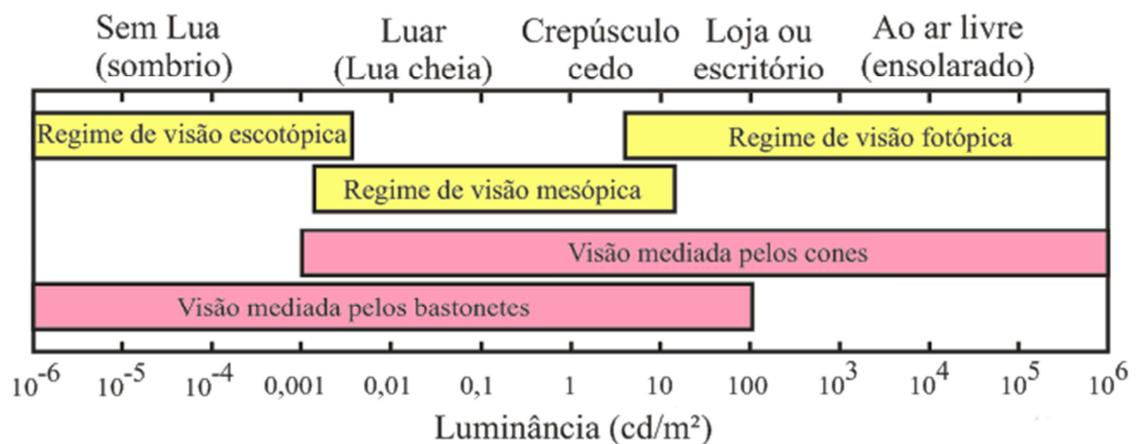


Figura 6.2 - Faixas de atuação de cada tipo de visão (Adaptado: Schubert, 2006)

Para percepção da imagem esta deverá ser formada sobre a retina, sendo que para que isso ocorra, a luz deve ser transmitida através do olho sem absorção e espalhamento excessivo. A transmitância dentro do olho varia com o comprimento de onda da luz estimulante e com a idade da pessoa. Isto ocorre porque a lente cristalina desenvolve gradualmente uma pigmentação amarelada com o envelhecimento que atenua a transmissão da energia luminosa para a retina, por isso que pessoas com mais idade possuem maior dificuldade em enxergar.

6.2 Como o fluxo Luminoso é determinado

Como já visto anteriormente, o fluxo luminoso é a quantidade total de luz que é originada por uma fonte, e sua unidade é dada em lumens. A determinação da quantidade de lumens de uma fonte luminosa envolve o conhecimento da sua

distribuição espectral da potência - SPD⁹ e a resposta visual do olho humano. A luz é definida como a energia avaliada pelo olho, assim não é simplesmente definida como as outras formas de radiação. Para simplificar o entendimento, a comissão internacional de iluminação - CIE adotou uma curva de resposta padrão para o olho, representada por $V(\lambda)$, que define a resposta espectral de uma pessoa típica sobre as condições fotópica (LEWIN, 1999).

A Figura 6.3 apresenta a curva para a visão fotópica e escotópica, bem como uma possível curva de sensibilidade para a visão mesópica.

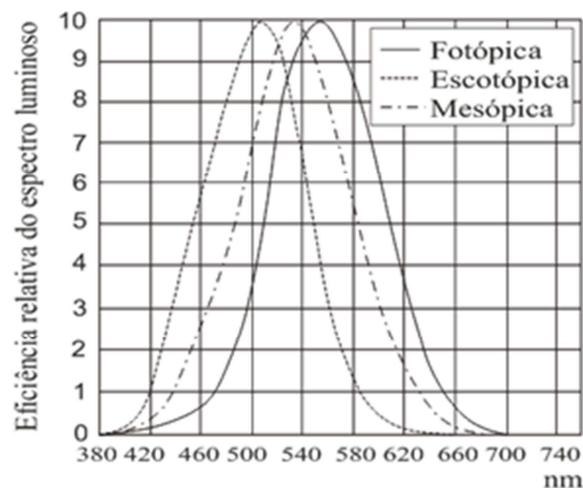


Figura 6.3 - Curvas para visão fotópica, mesópica e escotópica (Adaptado: ASSIST, 2009)

Para determinar a quantidade de lumens, a potência da luz em cada comprimento de onda, $P(\lambda)$, no espectro visível é multiplicada pelo valor $V(\lambda)$, referente à sensibilidade do olho no comprimento de onda equivalente. Assim, é realizado o somatório de todas as multiplicações para encontrar o fluxo luminoso total (COSTA, 2004) (SCHUBERT, 2006).

A equação (6.1) representa esta função para a visão fotópica.

⁹ SPD – Sigla referente a *Spectral Power Distribution*, ou em português, Distribuição Espectral da Potência.

$$\Phi_{lum} = 683 \int_{380}^{780} V(\lambda) * P(\lambda) d\lambda \quad (6.1)$$

Onde:

683 = constante de máxima luminosidade no comprimento de onda de 555 nm;

$P(\lambda)$ = Potência total emitida pela fonte em um determinado comprimento de onda;

$V(\lambda)$ = Curva de sensibilidade fotópica;

A equação (6.1) é válida somente para cálculo de lumens da fonte luminosa dentro da faixa fotópica. Quando a condição de luminosidade para o observador é alterada, o termo lumens efetivos pode ser utilizado para definir a quantidade de lumens de uma determinada fonte de luz, e assim ser considerada a variação na sensibilidade do olho para as diferentes situações (LEWIN, 1999).

Desta forma, quando a condição visual é alterada, a curva padrão para visão escotópica é aplicada para determinar a quantidade de lumens efetivos (FRAYTAG, 2010).

A equação (6.2) representa a forma de cálculo do fluxo luminoso efetivo para a visão escotópica.

$$\Phi_{ef} = 1700 \int_{380}^{780} V'(\lambda) * P(\lambda) d\lambda \quad (6.2)$$

Onde:

Φ_{ef} = Fluxo luminoso efetivo para a sensibilidade escotópica;

1700 = constante de máxima luminosidade no comprimento de onda de 508 nm;

$P(\lambda)$ = Potência em um determinado comprimento de onda;

$V'(\lambda)$ = Curva de sensibilidade escotópica;

Para ilustrar o efeito da resposta do olho em relação à luz, pode ser utilizada a Figura 6.4, onde é apresentado o gráfico com a distribuição espectral de uma lâmpada incandescente na mesma escala de comprimentos de onda da sensibilidade do olho

humano. Nota-se que a lâmpada gera uma pequena potência em comprimentos de ondas menores, na região da cor azul e a resposta do olho para a visão fotópica também é reduzida nesta faixa, assim a quantidade de lumens produzidos por esta faixa espectral é baixa.

Quando a emissão é dada em comprimentos de onda maiores, na faixa da cor vermelha, a intensidade de energia gerada pela lâmpada é extremamente alta, entretanto, a resposta do olho nesta faixa também é reduzida, assim a quantidade de lumens gerados nesta faixa possui um valor moderado. Já na região intermediária, situada nas cores verde e amarelo, a energia gerada pela lâmpada é intermediária, não obstante, a sensibilidade do olho é máxima, desta forma é nessa faixa a maior geração de lumens das lâmpadas incandescentes. Isto explica porque a luz gerada por este tipo de lâmpada tem tonalidade amarelada, embora a maior parte da energia gerada por ela, no espectro visível, seja na faixa da cor vermelha (LEWIN, 1999).

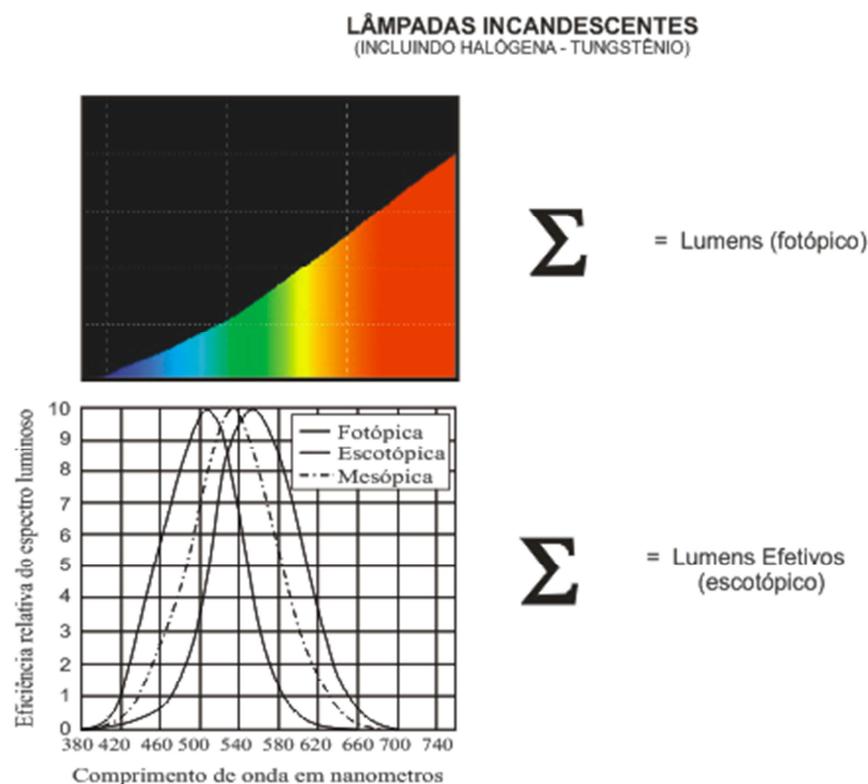


Figura 6.4 - Distribuição luminosa típica de uma lâmpada incandescente (LEWIN, 1999)

Sendo assim, fica claro que a quantidade de lumens efetivos está relacionada com a curva de sensibilidade do olho humano, que varia na medida em que a luz no ambiente se altera. Esta variação é caracterizada pelos tipos de visão fotópica, mesópica e escotópica. Na prática, a visão fotópica é utilizada durante o dia ou em ambientes internos iluminados, a visão mesópica é tipicamente utilizada à noite quando em vias públicas iluminadas, e a visão escotópica sob a luz das estrelas.

Como mostra a Figura 6.3, na visão escotópica a sensibilidade do olho para a luz na faixa amarela e vermelha reduz drasticamente, enquanto a sensibilidade para a cor azul aumenta de forma significativa (LEWIN, 1999).

O fluxo luminoso das lâmpadas incandescentes poderia ser calculado para a visão escotópica, bastando para isto integrar a multiplicação das potências geradas em cada comprimento de onda, pelo valor da sensibilidade para visão escotópica correspondente (LEWIN, 1999).

6.3 Relação S/P

A representação S/P^{10} trata da relação calculada tomando por base a distribuição de potência total espectral radiante da fonte de luz, em unidades radiométricas, entre iluminação escotópica e fotópica. O valor dessa taxa é expresso pela efetividade relativa de diferentes fontes de luz em estimular os cones e bastonetes no sistema visual humano. Fontes luminosas com taxa S/P alta vão estimular mais os bastonetes do que as fontes com baixa taxa S/P quando as duas produzirem o mesmo fluxo luminoso fotópico (fluxo luminoso mostrado em luxímetros comuns) (BERMAN, 1995).

Para saber o valor das iluminâncias fotópica e escotópica seria necessário ter medidores com duas calibrações distintas, uma para cada resposta do olho humano. Contudo, a maioria das aplicações pode ser gerenciada apenas usando o luxímetro convencional (com calibração para iluminação fotópica) juntamente com o conhecimento da taxa S/P (BERMAN, 1995).

¹⁰ S/P - Sigla de Scotopic/Photopic, quociente entre o valor escotópico e fotópico.

Convenientemente, a maioria das fontes de luz utilizadas tem a taxa S/P com um valor fixo, tornando-se uma propriedade, assim como a temperatura de cor ou o índice de reprodução de cor. Os valores típicos da taxa S/P para as fontes de luz tradicionais variam de 1 a 2,5 a exceção é feita para as lâmpadas VSAP que possuem taxa S/P com valores abaixo de 1 (BERMAN, 1995).

Embora a taxa S/P seja calculada pela potência respectiva à distribuição espectral das fontes luminosas, ela é correspondente à temperatura de cor correlata da fonte em questão. Assim para a determinação desta taxa, pode ser utilizada a equação (6.3) (CITY OF SAN JOSE, 2011).

$$S/P = -7 * 10^{-8} * (TCC)^2 + 0,001 * (TCC) - 1,3152 \quad (6.3)$$

Onde TCC significa a temperatura de cor correlata, dada em Kelvin. A Tabela 6.1 lista os valores de S/P calculados para várias temperaturas de cor utilizando a equação apresentada acima.

Tabela 6.1 - Taxa S/P relativa a temperaturas de cor correlata

Temperatura de Cor - TCC (K)	Taxa S/P
1500	0,03
2000	0,40
2500	0,75
3000	1,05
3500	1,33
4000	1,56
4500	1,77
4700	1,84
5000	1,93
5500	2,07
6000	2,16
6500	2,23
7000	2,25

Em um estudo realizado pela cidade de San Jose nos Estados Unidos, foi constatado que embora os LEDs com temperatura de cor mais elevadas sejam mais eficientes, os participantes da pesquisa, de forma subjetiva, preferiram as temperaturas de cor mais baixas. Segundo o guia de projeto para iluminação pública da cidade, a faixa de temperatura de cor mais recomendada para este tipo de aplicação é entre 3500K e 4300K (CITY OF SAN JOSE, 2010).

A grande maioria dos LEDs de potência tem sua construção baseada na tecnologia InGaN, a qual origina a cor azul que posteriormente é convertida em luz branca por uma camada de fósforo. Desta forma, como é possível observar nas especificações dos fabricantes de LEDs, produtos com cores brancas mais próximas do azul, apresentam um rendimento luminoso maior que cores brancas com temperaturas de cor mais baixas. Por exemplo, o LED modelo XT-E da empresa CREE, pode fornecer 130 lm/W com TCC de 6000 K, porém apenas 114 lm/W quando a TCC é reduzida para 3000 K, nas mesmas condições de corrente e temperatura (CREE, 2012a).

De forma similar a empresa LUMILEDS indica que seu produto denominado como Luxeon R, atinge 128 lm/W com TCC de 5700 K, e 105 lm/W quando o TCC é de 3000K (LUMILEDS, 2012).

Outra característica é que para a visão escotópica, quanto maior for a taxa S/P, o que significa uma maior temperatura de cor, maior será o rendimento da visão humana em ambientes com baixa luminosidade. Poderiam ser utilizadas então TCCs na faixa de 8000 K, entretanto existem algumas preocupações, quanto ao uso de TCC muito elevadas, devido à presença dos comprimentos de onda na faixa da cor azul que são dispersos e com isso maior é o impacto aos sistemas biológicos (LUGINBUHL, 2009). Então, baseado na indicação de fabricantes de LEDs, serão considerados LEDs com temperatura de cor na faixa de 5700K.

O a norma CIE 191 apresenta uma relação entre os valores de luminância calculados pelo sistema mesópico e os valores calculados com tradicional sistema fotópico. O Quadro 6.1 apresenta estas relações em porcentagem, onde as células escuras mostram onde há variação maior que 5 % para facilitar a visualização. As fontes luminosas com elevada energia em comprimentos de ondas mais curtos, ou seja,

maiores temperaturas de cor, apresentam também maiores índices S/P. Nota-se pela tabela em questão, que de fato, as fontes com taxa S/P maior que 1, apresentam um acréscimo nos valores de luminância, enquanto as fontes com taxas S/P menores que 1, apresentam comportamento contrário. Para definição de valores intermediários, tanto da taxa S/P quanto da luminância, pode ser realizada interpolação linear dos pontos (CIE, 2010).

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

Quadro 6.1 - Multiplicadores para luminância efetiva, Fotópica para Mesópica
Fonte: (CIE, 2010)

Em geral a luminância recomendada para vias públicas varia entre 0,3 cd/m² a 2 cd/m² (IES, 2000), (CIE, 2010).

Se as lâmpadas tradicionais utilizadas para iluminação destas vias apresentam taxa S/P entre 0,65 (VSAP) e 2,45 (alguns tipos de MVM), quando for utilizada a relação do Quadro 6.1, pode-se ter variações entre -8 % e +28 % da luminância medida tradicionalmente, considerando uma via iluminada a 0,3 cd/m². Isso apenas trocando o tipo de fonte luminosa, e mantendo-se a quantidade de lumens.

Os medidores de luz convencionais são baseados na curva de sensibilidade fotópica. Assim, criou-se uma relação chamada taxa S/P para relacionar os dois tipos de visão. A representação S/P ¹¹ trata da relação calculada tomando por base a distribuição de potência espectral relativa da fonte de luz, em unidades radiométricas, entre iluminação escotópica e fotópica.

Fontes luminosas com alta taxa S/P vão estimular os bastonetes de forma mais intensa do que as fontes com baixa taxa S/P, quando as duas produzirem o mesmo fluxo luminoso fotópico (fluxo luminoso mostrado em luxímetros) (BERMAN, 1995).

Embora a taxa S/P seja calculada pela potência respectiva a distribuição espectral das fontes luminosas, ela também é correspondente à sua TCC. Assim, para a determinação desta taxa, pode ser utilizada a equação (6.4) (CITY OF SAN JOSE, 2011).

$$S/p = -7 * 10^{-8} * (TCC)^2 + 0,001 * (TCC) - 1,315 \quad (6.4)$$

As fontes luminosas com elevada energia em comprimentos de ondas mais curtos (maiores TCCs) apresentam maiores índices S/P.

Com a taxa S/P definida é possível determinar um multiplicador para estimar, para cada temperatura de cor, o fluxo luminoso efetivo em diferentes condições de luminosidade ambiente, que irão determinar o tipo da visão que estará atuando: fotópica, mesópica ou escotópica. Cabe lembrar que o fluxo luminoso efetivo leva em conta a sensibilidade do olho para diferentes níveis de luminosidade.

No caso de iluminação pública de vias os valores de luminância típicos ficam dentro da faixa entre 0,3 cd/m² e 2 cd/m².

¹¹ S/P - Sigla para Scotopic/Photopic, que significa Escotópica/Fotópica em português, respectivamente.

6.4 Visão em vias públicas

Durante várias décadas a comunidade internacional que estuda iluminação vem discutindo a necessidade de revisar as práticas de fotometria para reconhecer que a cor da luz tem um efeito significativo na visão humana, particularmente na visão periférica, quando em ambientes de baixa luminosidade. Esta condição específica é a conhecida visão mesópica.

A Figura 6.5 exemplifica como se dá a visão do motorista quando trafegando em vias iluminadas.

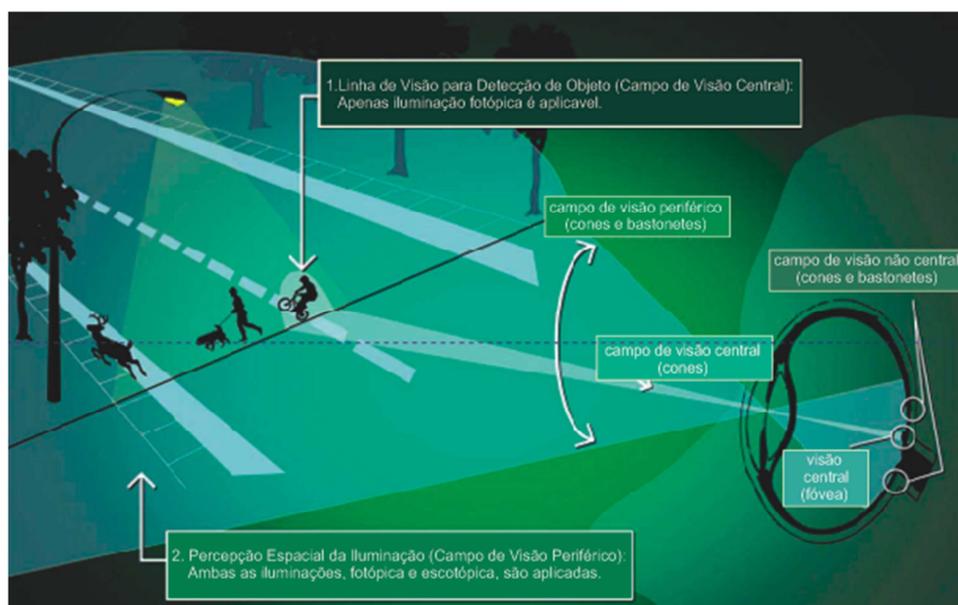


Figura 6.5 - Visão em vias iluminadas (JOSEFOWICZ, 2008)

A recomendação CIE 191 que foi adotada internacionalmente, sumariza o estudo científico, concluindo que uma iluminação à base de lâmpadas de Sódio (luz amarelada) pode ser substituída por uma fonte que emita luz branca com menos intensidade luminosa, garantindo igual ou melhor visibilidade. A CIE quantifica a

melhora no rendimento da luz branca através do uso de multiplicadores que transformam lumens reais em lumens efetivos (CIE, 2010).

Os objetos são vistos mais facilmente com a visão central, ou seja, quando estão diretamente à nossa frente. No período noturno, isso se torna muito mais fácil com a presença de um sistema de iluminação externo. Quando é avistado algo de frente, a luz proveniente do objeto atinge o centro da nossa retina, conhecida como a fóvea que é composta exclusivamente pelos foto-receptores cones. Em consequência desta anatomia, a sensibilidade espectral na visão direta é a fotópica.

Em complemento à visão central, a percepção da luminosidade espacial envolve a luz que estimula toda a retina, ativando os cones e também os bastonetes. Como resultado, tanto a sensibilidade fotópica quanto a escotópica precisam ser consideradas para descrever como a luz afeta a percepção espacial de luminosidade (JOSEFOWICZ, 2008).

6.5 Consideração da Visão Mesópica para os diferentes tipos de lâmpadas

A norma RP-08-00 define os valores de luminância para vias urbanas entre 0,3 e 1,2 cd/m². Sendo que para vias principais o valor médio é de 0,9 cd/m² (IES, 2000).

A tabela disposta na CIE 191, não apresenta os valores de ganho para o valor de luminância de 0,9 cd/ m². Assim, conforme determinação da mesma norma, estes podem ser extrapolados com base nos valores mais próximos definidos (CIE, 2010).

Com isso foi criada o Quadro 6.2 com os valores de ganho em visão mesópica para as principais lâmpadas utilizadas em iluminação pública com suas temperaturas de cor específicas e, conseqüentemente, com as específicas taxas S/P.

Como o fator M/P varia de acordo com o nível de luminância, este deve ser indicado junto com o valor M/P. Para a consideração do fator M/P neste trabalho, este será normalizado em 1 para o ganho de 0%, para uma luminância de 0,9 cd/m².

Tipo	Potência	Modelo	Fluxo luminoso típico	TCC	Taxa S/P	Ganhos					
						Luminância Fotópica (cd/m ²)					
						0,3	0,5	0,9	1	1,5	2
VSAP	250W	OSRAM NAV-T	28000lm	2000K	0,40	-14%	-11%	-8%	-7%	-5%	-4%
Luz mista	250W	Osram HWL	5600lm	3800K	1,47	9%	7%	6%	5%	3%	3%
Fluorescente	32W	OSRAM Standard	2700lm	4000K	1,56	11%	9%	7%	6%	4%	4%
Vapor Mercúrio	250W	OSRAM HQL	13000lm	4000K	1,56	11%	9%	7%	6%	4%	4%
LED	700 mA (2,1W)	LUMILEDS REBEL ES	235lm	4100K	1,61	13%	10%	8%	7%	5%	4%
Multi-Vapor Metálico	250W	OSRAM HQI-TS	22000lm	4200K	1,65	13%	10%	8%	7%	5%	4%
LED	700 mA (2,1W)	LUMILEDS REBEL ES	235lm	5650K	2,10	22%	17%	12%	11%	8%	6%

Quadro 6.2 - Ganhos para visão mesópica em relação à fotópica para diferentes fontes luminosas
 Fonte: Adaptado de CIE, 2010

Com base nestes dados, conclui-se que para uma mesma aplicação de vias, quando utilizadas lâmpadas com baixas temperaturas de cor, o rendimento do fluxo luminoso gerado pela lâmpada que é de fato aproveitado pelo olho humano é menor que quando se utiliza fontes com TCC mais elevados. Como o fluxo luminoso possui uma relação direta com os valores de luminância e de iluminância, pode-se dizer que este fator pode ser aplicado para as três grandezas. Este fator será considerado neste trabalho como fator M/P, ou fator *mesopic/photopic*, fazendo uma analogia ao fator já consolidado na literatura como S/P (*Scotopic/Photopic*).

Este sistema recomendado pela CIE 191 foi desenvolvido envolvendo a visão periférica, onde os tanto os bastonetes quanto os cones são estimulados. A visão escotópica é geralmente considerada em valores de luminância partindo de níveis extremamente baixos, que geram o mínimo de estímulos visuais até o valor de aproximadamente 0,003 cd/m², que pode ser considerado o limite mínimo da visão

mesópica. O limite superior não pode ser definido com precisão, uma vez que depende de vários fatores incluindo o tamanho e a posição do objeto sob análise no campo de visão, entretanto segundo o relatório técnico CIE 191, pode-se considerar que há atuação da visão mesópica quando os níveis de luminância estiverem acima do limite da visão escotópica e abaixo de aproximadamente 10 cd/m^2 (CIE , 2010).

7 DEFINIÇÃO DO FLUXO LUMINOSO DA LUMINÁRIA DE LED

Os LEDs, em sua maioria, apresentam uma distribuição luminosa simétrica direcionada para o sentido frontal, geralmente com ângulo de abertura de 120°. Da mesma forma que nas lâmpadas VSAP, é necessário o direcionamento da luz para se adequar aos requisitos das normas para ILP. Como estes componentes são de tamanho reduzido, permitem que lentes secundárias sejam colocadas sobre eles, onde, por efeito de refração, são capazes de direcionar todos os raios luminosos emitidos para a direção necessária. Os LEDs podem ser montados em placas planas, sem a necessidade de posicionamento especial, facilitando assim a construção da luminária. (FENG, 2010).

Para garantir os limites mínimos de iluminância na via, poderá ser calculado qual deverá ser o fluxo luminoso necessário, para isso serão utilizados os conceitos de fotometria vistos anteriormente.

7.1 Equacionamento intensidade luminosa

Sabe-se que a iluminância está relacionada com a intensidade luminosa que incide em uma determinada área e está relacionada com o ângulo de incidência sobre esta área e a distância percorrida conforme a lei de Lambert, como apresentada anteriormente pela equação (2.5). A distância entre a fonte luminosa e o ponto de incidência da luz está relacionada com os ângulos C e γ como mostra a Figura 7.1.

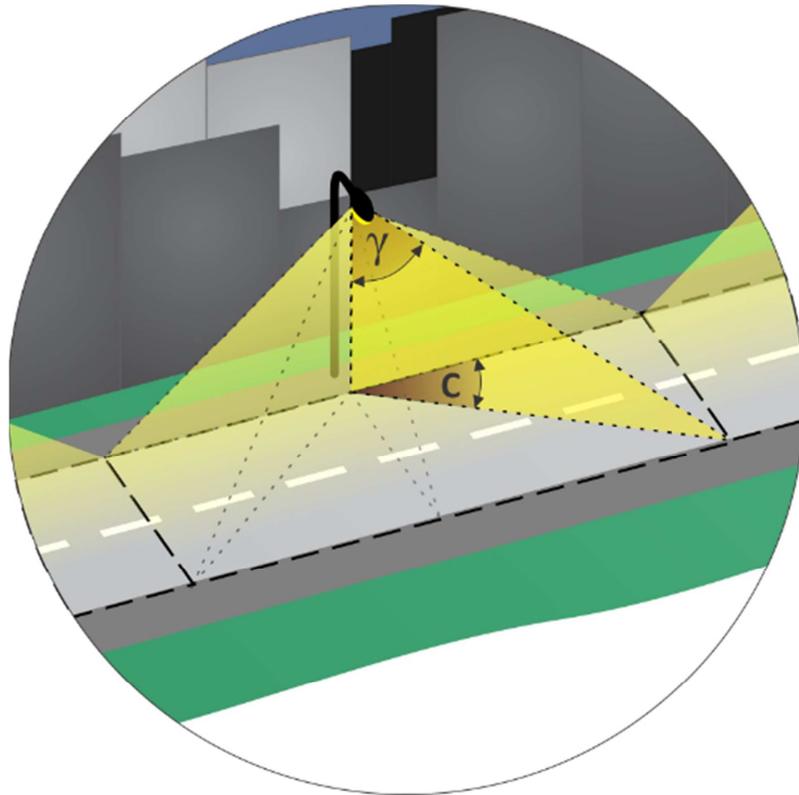


Figura 7.1 - Ângulos C e γ

Os ângulos C são calculados baseados na largura da via (DLV) e distância entre postes (DEP), estes valores são apresentados na Figura 7.2, onde se pode notar que a área de atuação de cada luminária (AAL), delimitada pela região com hachura, é simétrica para os dois lados, sendo que para cada lado possui uma distância igual à metade da distância entre as luminárias, definida na figura como a distância até o ponto médio entre as luminárias (DMEP). A sigla DLV representa a distância da largura da via, DAL representa a distância do avanço da luminária a ser considerado a partir do meio fio da via. Já a sigla DLC_V, representa a distância entre a luminária e o meio fio ou cordão do lado da via oposto ao da luminária e, por sua vez, a sigla EOL representa o eixo vertical que passa pelo centro ótico da luminária. A Figura 7.2 mostra a vista superior da via.

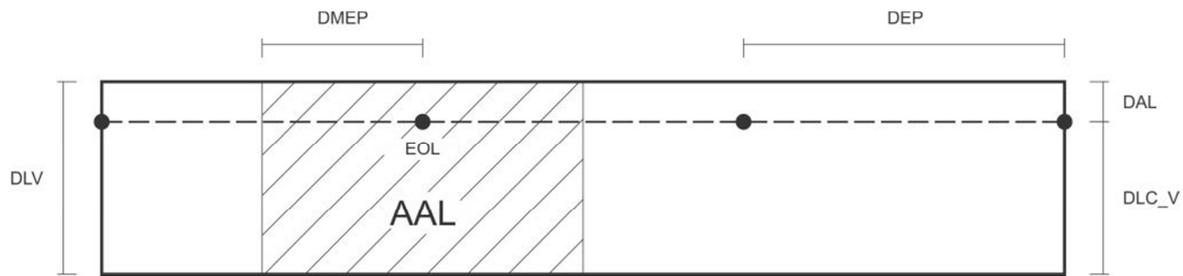


Figura 7.2 - Dimensional da via e área de atuação da luminária (AAL)

Agora por trigonometria, calcula-se a distância entre cada ponto de incidência da luz na via (PIL) e o eixo (EOL), este eixo é perpendicular ao centro ótico da luminária (COL) que pode ser visualizado de melhor forma na Figura 7.4, esta distância é definida como (D_{PIL_EOL}) e deve ser calculada para todos os pontos possíveis dentro da área balizada pela área de atuação da luminária na via que conforme visto na Figura 7.2 que está relacionada com (DLV), (DAL) e a distância entre postes (DEP).

Como a área de atuação da luminária (AAL) é um retângulo, a avaliação das distâncias deverá ser calculada em partes, ou seja, dividindo-se o retângulo em triângulos retângulos, para relacioná-las com as distâncias conhecidas que são: o avanço da luminária (DAL), que representa a distância entre o “meio fio” da rua do lado das casas e o EOL, a distância média entre os postes ($DMEP$) e a distância entre o EOL e o “meio fio” oposto, também identificado como “cordão”, para o lado da via (DLC_V). Dentro deste retângulo (AAL), são identificados então oito ângulos de C . Quatro deles são: o ângulo de origem, seu perpendicular e seus opostos, representados respectivamente por 0° , 90° , 180° , 270° que dividem os quatro quadrantes. Os outros quatro ângulos necessários são encontrados com base na maior distância possível entre o EOL e o PIL, para cada um dos quadrantes. Os ângulos C respectivos a estas distâncias são denominados como ângulo de máxima intensidade do lado da via (AMI_V), sendo que são simétricos para ambos os lados de atuação da luminária, e o ângulo de máxima intensidade do lado das casas (AMI_C) que também são simétricos para os dois lados. Estes podem ser determinados com base nas distâncias $DMEP$, na DLC_V e na DAL . A Figura 7.3 apresenta as variáveis mencionadas acima.

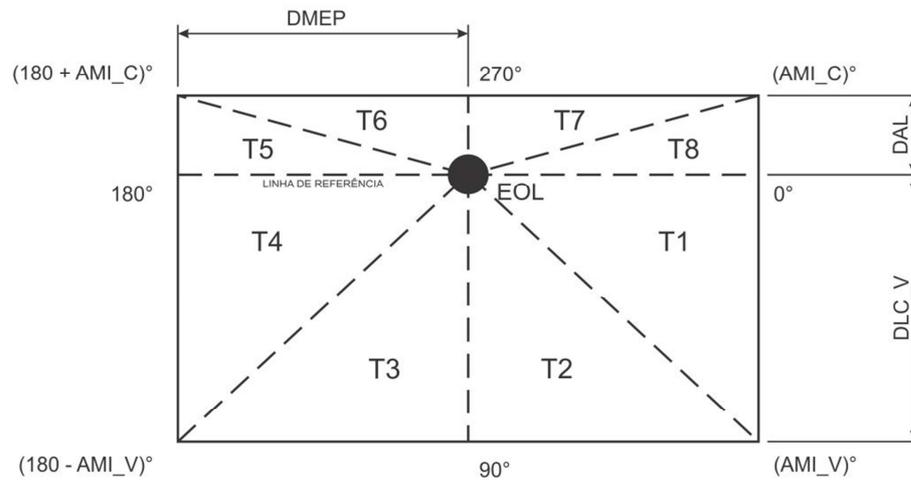


Figura 7.3 - Triângulos para cálculo dos ângulos C

Uma vez que estes dados estão definidos, é possível determinar as distâncias D_{PIL_EOL} máximas, dentro da AAL, em função do ângulo C, para cada intervalo angular que delimita os triângulos retângulos, sendo que os ângulos limite são os ângulos: 0° , AMI_V° , 90° , $(180^\circ - AMI_V^\circ)$, 180° , $(180^\circ + AMI_C^\circ)$, 270° , $(360^\circ - AMI_C^\circ)$. Estas distâncias relativas são definidas pela representação $D_{PIL_EOL}(C)$ e então pelas equações (7.1), (7.2) e (7.3).

$$D_{PIL_EOL}(C) = \frac{DMEP}{\cos(C)} \text{ para } AMI_C < C < AMI_V \text{ e } (180 - AMI_C) < C < (180 + AMI_C) \quad (7.1)$$

$$D_{PIL_EOL}(C) = \frac{DLC_V}{\cos(C)} \text{ para } AMI_V < C < (180 - AMI_V) \quad (7.2)$$

$$D_{PIL_EOL}(C) = \frac{DAL}{\cos(C)} \text{ para } (180 + AMI_C) < C < (AMI_C) \quad (7.3)$$

Para o cálculo dos ângulos AMI_V e AMI_C são utilizadas as equações (7.4) e (7.5) respectivamente.

$$AMI_V = \tan^{-1} \left(\frac{DLC_V}{DMEP} \right) \quad (7.4)$$

$$AMI_C = \tan^{-1} \left(\frac{DAL}{DMEP} \right) \quad (7.5)$$

Uma vez definidas estas distâncias horizontais, torna-se necessária a definição dos ângulos verticais γ (gama) que estão relacionados com a altura de montagem da luminária (AM) e a distância D_PIL_EOL, que varia para cada ângulo C. A Figura 7.4 apresenta as informações sobre os dados referentes aos postes a serem utilizados em uma vista lateral onde a sigla COL, representa o centro ótico da luminária.

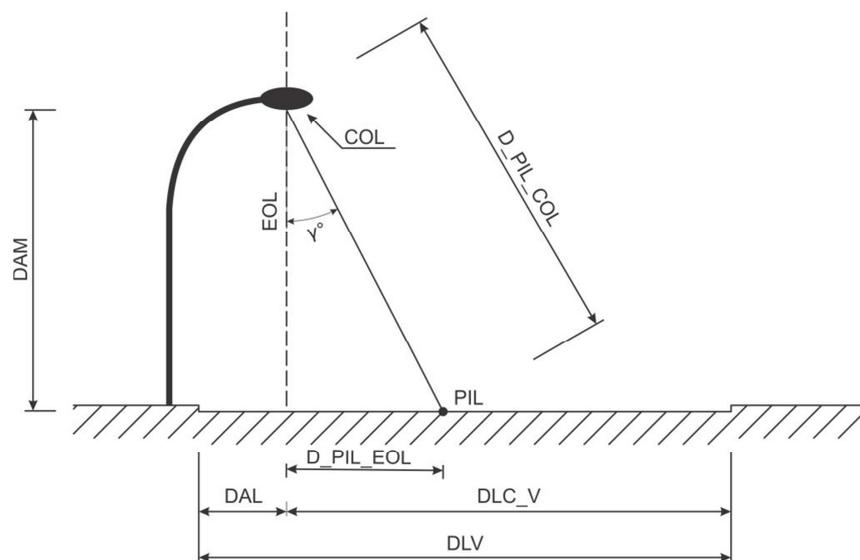


Figura 7.4 - Distância referentes ao poste de montagem

Com isso, para cada ângulo C, pode-se calcular o respectivo ângulo γ pela equação (7.6).

$$\gamma(C) = \cos^{-1} \left(\frac{DAM}{\sqrt{DAM^2 + (D_PIL_EOL(C))^2}} \right) \quad (7.6)$$

Uma vez definidos também os ângulos γ pode-se calcular a distância D_PIL_COL pela equação (7.7).

$$D_PIL_COL(C, \gamma) = \sqrt{AM^2 + D_PIL_EOL(C)^2} \quad (7.7)$$

A partir da equação (7.4) e da (7.6) é possível encontrar qual será o ângulo de abertura γ que deverá apresentar a máxima intensidade luminosa, ou seja, a maior distância entre o COL e o PIL. Isto ocorre no ângulo AMI_V e pode ser calculado pela equação (7.8).

$$\gamma(AMI_V) = \cos^{-1} \left(\frac{DAM}{\sqrt{DAM^2 + \left(\frac{DMEP}{\cos(AMI_V)} \right)^2}} \right) \quad (7.8)$$

Para definir esta intensidade, dada em candelas, é necessário conhecer qual deverá ser a iluminância mínima (E_{min}) a ser atingida na via. Como o cálculo visa a distribuição da luz perfeita na via, ou seja, com fator de uniformidade (U_0) unitário, a E_{min} será igual a iluminância média (E_{med}) de acordo com a equação (2.14). Assim, baseado na equação (2.5) e (7.8) tem-se a equação (7.9).

$$I_{max} = \frac{AM^2 * E_{min}}{\cos^3(\gamma(AMI_V))} \quad (7.9)$$

Cabe agora definir a equação para o cálculo de todos os valores de intensidades luminosas dos raios que irão atingir a via dentro da área de atuação da luminária (AAL). Para tal é necessária uma equação que relacione os ângulos C e γ .

$$I(C, \gamma) = \frac{DAM^2 * E_{min}}{\cos^3(\gamma)} \text{ para } 0 \leq \gamma \leq \gamma(C) \quad (7.10)$$

A equação (7.10) permite calcular qualquer intensidade luminosa para todo ângulo C, visto que este varia entre 0° e 360°, em conjunto com o valor de γ equivalente.

7.2 Representação gráfica

Uma vez definida a equação para definição das intensidades luminosas em cada direção, é possível a criação de um gráfico de coordenadas (C, γ) que pode representar como deverá ser a distribuição luminosa ideal.

Para tal foi utilizado o software MATHCAD, o qual possui uma interface de fácil entendimento. Assim, foi criada uma rotina que utiliza os valores da definição física da via e posição da luminária, pelas variáveis DEP, DAV, DLV, DAM e luminosas E_{min} . Com estes dados e as equações definidas anteriormente é possível traçar a curva ideal da luminária, com os valores de intensidade luminosa necessários para cada ângulo. Para tanto foi criada uma rotina que aplica as equações desenvolvidas acima.

Como exemplo, foi realizada a simulação da distribuição luminosa utilizando-se os seguintes parâmetros: DEP=35m, DLV=10m, DAV=2,5m, Emin=20lux. Baseado nestes dados, foi traçada a curva cujo resultado é apresentado na Figura 7.5.

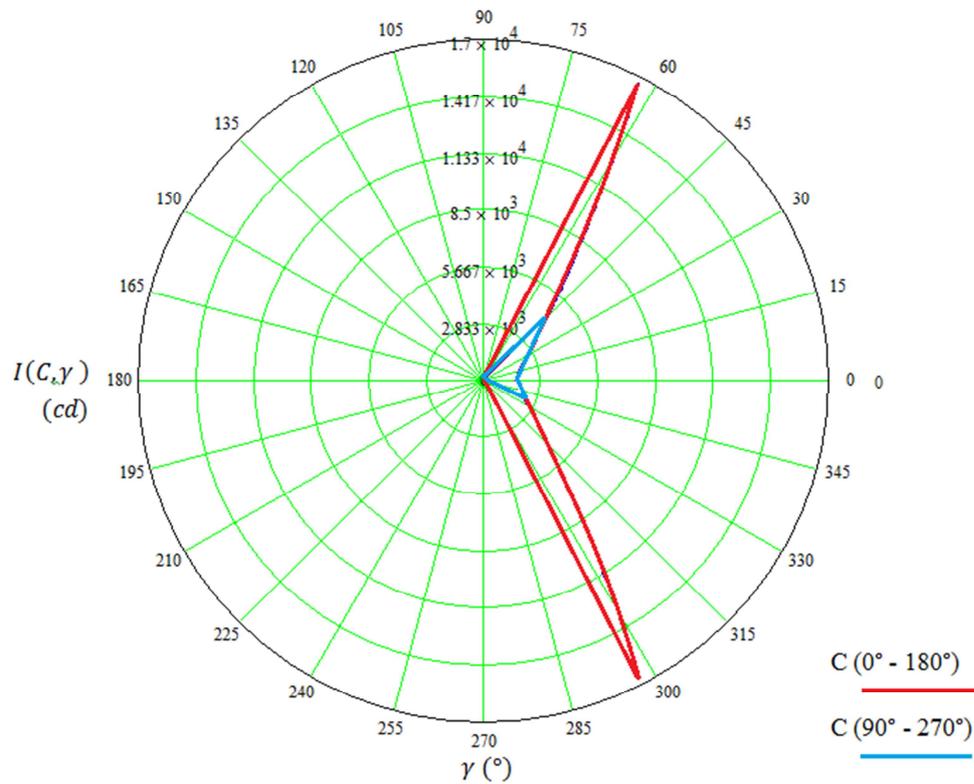


Figura 7.5 - Distribuição intensidades luminosas teórica por ângulos $I(C, \gamma)$ via Software MATHCAD.

Na figura foram representados somente os ângulos principais, relacionando as direções 0° - 180° e 90° - 270° que representam respectivamente a distribuição longitudinal e a vertical na via. Pela distribuição é possível perceber que no sentido longitudinal a distribuição é simétrica, ou seja, mesmas intensidades para os dois lados da luminária, já no sentido transversal, a distribuição é assimétrica, visto que a distância entre o EOL e o DLC_V, é maior do que a distância até o limite DAL.

7.3 Equacionamento para cálculo do fluxo luminoso

O fluxo luminoso representa a potência luminosa emitida ou observada por segundo, em todas as direções, sob a forma de luz. Como já visto anteriormente, a

unidade de medida é o lúmen (lm). O fluxo luminoso pode ser entendido como a soma de toda a energia luminosa proveniente de uma determinada fonte. Sendo que uma forma de cálculo para o fluxo luminoso é definida pela equação

$$\Phi = \int I * d\omega \quad (7.11)$$

Onde $d\omega$ representa a variação do ângulo sólido (ω), que tem sua unidade o esterradiano (sr) e é definido como o ângulo de um cone. A Figura 7.6 apresenta este ângulo sólido, sendo que também pode ser compreendido em uma faixa dentre dois paralelos de uma esfera.

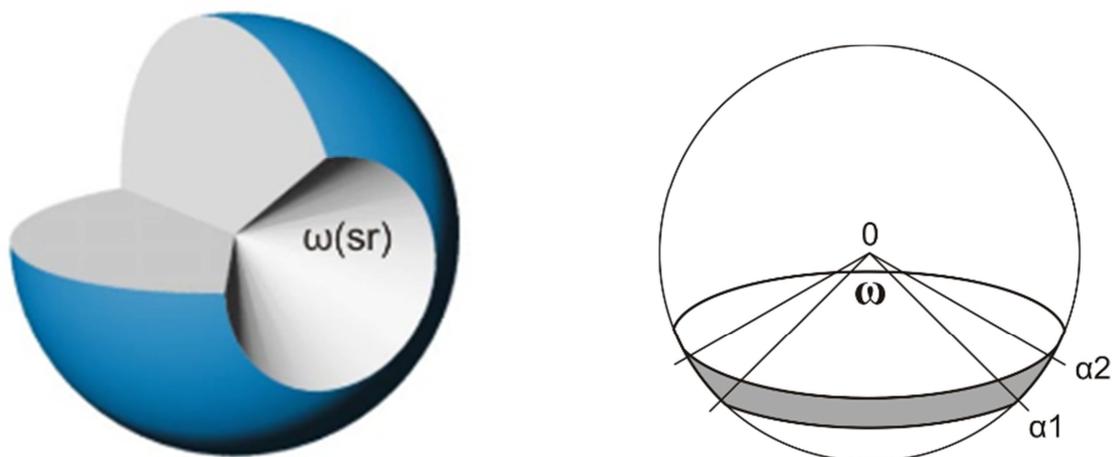


Figura 7.6 - Ângulo sólido

Para facilitar a dedução da equação, para o ângulo entre dois paralelos é possível representar em uma secção transversal como apresentado na Figura 7.7.

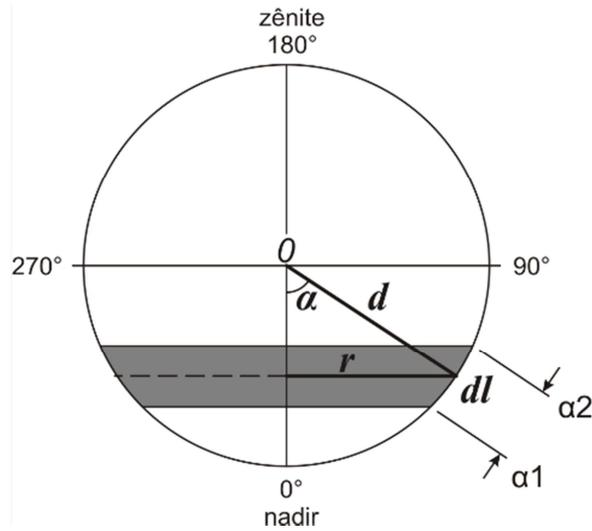


Figura 7.7 - Seção transversal do ângulo sólido (COSTA, 2004)

Conforme Costa, o ponto localizado no nadir, ou seja, o ponto perpendicular mais baixo é de 0° e o ponto localizado no zênite, que é oposto ao nadir, é o ponto perpendicular mais elevado medindo 180° . A circunferência da zona esférica é igual a “ $Cem = 2 * \pi * r$ ” e área da zona esférica é igual a “ $Ze = 2 * \pi * r * dl$ ”, e pela Figura 7.7 tem-se que “ $dl = d * d\alpha$ ” e “ $r = d * \sin(\alpha)$ ”. A definição de ângulo sólido é apresentada em (7.12) (COSTA, 2004).

$$d\omega = \frac{dA}{d^2} = \frac{2 * \pi * d^2 * \sin(\alpha) * d\alpha}{d^2} \quad (7.12)$$

A partir desta definição tem-se a equação (7.13) que define o ângulo sólido entre dois paralelos α_1 e α_2 . Este valor é conhecido também como fator zonal.

$$\omega_{1,2} = 2 * \pi * (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) \quad (7.13)$$

O comportamento da intensidade luminosa de uma fonte real, dificilmente apresenta uma função definida que possa ser utilizada na equação (7.11). Assim os laboratórios de fotometria utilizam valores coletados das fontes de luz de forma discreta.

Os valores discretos, são coletados em todas as direções ao redor da fonte de luz e permitem que a integral seja transformada em um somatório. Aplicando-se este somatório à definição do fator zonal, tem-se a equação do fluxo zonal (7.14) (COSTA, 2004).

$$\phi = 2 * \pi * \sum_{\alpha_i}^n I_{med} * (\cos \alpha_i - \cos \alpha_{i+l}) \quad (7.14)$$

Onde:

α_i - ângulo respectivo do primeiro paralelo;

α_{i+l} - ângulo relativo ao segundo paralelo;

n - é o maior ângulo do intervalo a ser analisado;

l - é o passo estipulado, geralmente de 5° ;

I_{med} - Intensidade luminosa média entre os dois ângulos;

ϕ - Fluxo luminoso total

Adaptando-se esta equação para a análise baseada nas intensidades luminosas calculadas pela equação (7.10) no sistema de coordenadas (C, γ) , pode-se definir a equação (7.14), alterando os ângulos “ α ” pelos ângulos “ γ ” e considerando l como 5°. Este passo depende da precisão necessária, sendo que quanto menor mais preciso, geralmente é utilizado como 10°, 5° ou 1°. Em geral, nos goniofotômetros, o valor utilizado é de 5°, onde já é possível uma aproximação satisfatória, assim este será o valor utilizado.

$$\phi = 2 * \pi * \sum_{\gamma}^n I_{med} * (\cos(\gamma) - \cos(\gamma + 5)) \text{ para } 0 < \gamma < 175 \quad (7.15)$$

Tendo a equação para o fluxo luminoso definida, é necessário o cálculo da intensidade média (I_{med}) em cada intervalo entre “ γ ” e “ $\gamma + 5$ ”. A intensidade média para cada ângulo “C” é definida como a média aritmética das intensidades em “ γ ” e “ $\gamma + 5$ ” conforme ilustrado pela Figura 7.8.

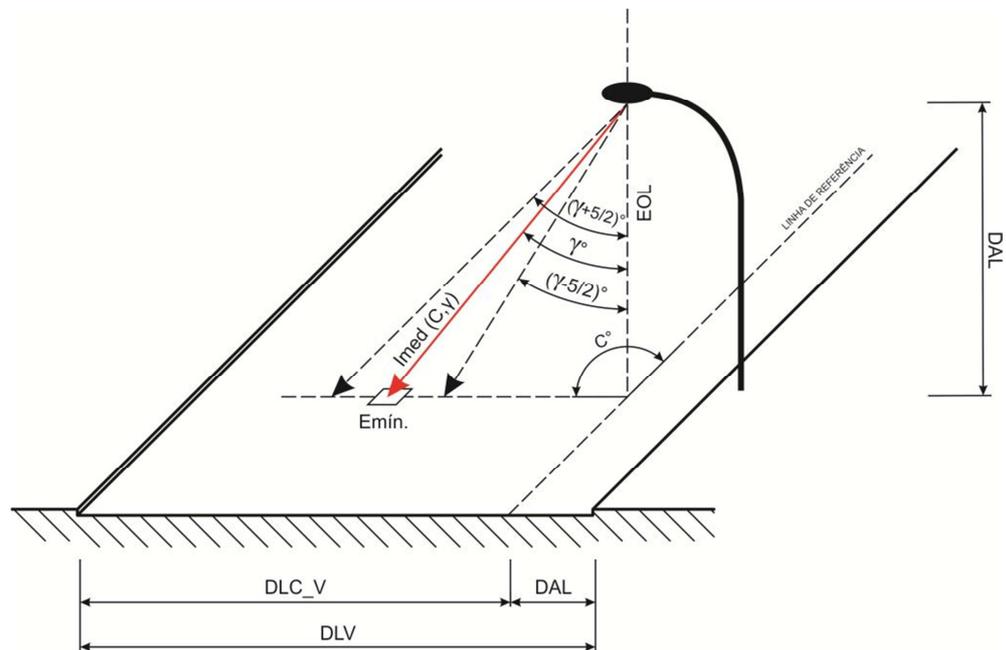


Figura 7.8 - Intensidade média para cada ângulo “C”

Como se trata de uma distribuição não simétrica, ou seja, os valores das intensidades luminosas $I(C, \gamma)$ para um determinado “ γ ” serão diferentes para cada valor de “C”, este variando entre 0° e 360° . Desta forma, deverá ser realizada uma média considerando todas as intensidades luminosas para cada “ γ ”. Para os valores de “C” também será considerado o passo de 5° . Assim a quantidade de pontos avaliados entre 0° e 360° é de 72 pontos. A equação que define o valor médio da intensidade luminosa é então dado pela equação (7.16).

$$I_{md}(\gamma) = \frac{\sum_{C=0...5}^{355} (I(C, \gamma) + I(C, \gamma + 5))}{72} \text{ para } 0 < \gamma < 175 \quad (7.16)$$

Com isso, pela equação (7.15) define-se a metodologia para cálculo do fluxo luminoso necessário para a via definida.

8 DEFINIÇÃO DA LUMINÁRIA

Conforme as informações estudadas, tem-se a base para identificar e calcular quais serão as características necessárias para a luminária de LED a ser criada. Dentre estas, as mais importantes são a quantidade e potência de LEDs necessária. Será visto a seguir a avaliação de cada etapa.

O primeiro passo para a definição do projeto para a luminária ILP é a escolha de qual será sua aplicação. No Brasil, existem várias companhias que gerenciam a ILP, sendo que cada qual atua em uma região. Cada uma possui uma especificação própria tanto para as características da luminária quando da instalação. As especificações comuns são para luminárias equipadas com lâmpadas de alta pressão, e são ainda raras especificações para luminárias à base de LEDs.

Como o objetivo é substituir a iluminação das vias públicas existente atualmente, serão consideradas as mesmas características fotométricas destas luminárias VSAP, para que o efeito na via seja igual ou melhor que o atual, com um menor consumo de energia.

8.1 Características escolhidas:

O ponto inicial a ser definido é a aplicação em que a luminária será utilizada. Foi escolhida a potência de 250 W por se tratar de uma potência largamente utilizada para aplicação em vias de tráfego intenso. Nota-se, conforme o Quadro 2.1, que em geral a altura de montagem das luminárias varia entre 8 e 12 metros sendo que a distância entre os postes varia entre 35 e 42 metros, quando utiliza-se lâmpadas VSAP de 250W.

Cabe lembrar que para espaçamentos maiores entre os postes, é necessário aumentar a altura de montagem garantir a uniformidade na via e evitar o ofuscamento para os motoristas. Como base foi escolhida a especificação para via do tipo V2

conforme a Tabela 2.3, onde tipicamente são indicadas luminárias com lâmpadas Vapor de sódio de 250 W, alvo desta análise. São apresentadas na Tabela 8.1 as características a serem usadas.

Tabela 8.1 - Grade de referência via tipo V2

Classe de Iluminação da Via	DEP (m)	DAM (m)	DLV (m)	DAL (m)	Emin (lux)	Uo (mínimo)
V2	35	9	10,8	2,5	20	0,3

Através destes dados será realizada a análise do fluxo luminoso necessário para a luminária bem como da distribuição que este fluxo deverá ter ao longo da via.

8.2 Condição Existente

Conforme visto anteriormente, a aplicação atual é constituída de lâmpadas de VSAP aplicadas em luminárias específicas para este fim. Como referência foi utilizada a luminária modelo ILP-2525 da empresa Ilumatic, que apresenta grau de proteção IP66, refletor de alumínio anodizado de alta refletância e refrator de vidro temperado (ILUMATIC, 2012). O modelo da luminária é apresentado na Figura 8.1 e sua curva fotométrica na Figura 8.2.



Figura 8.1 - Luminária ILP 2525 (ILUMATIC, 2012)

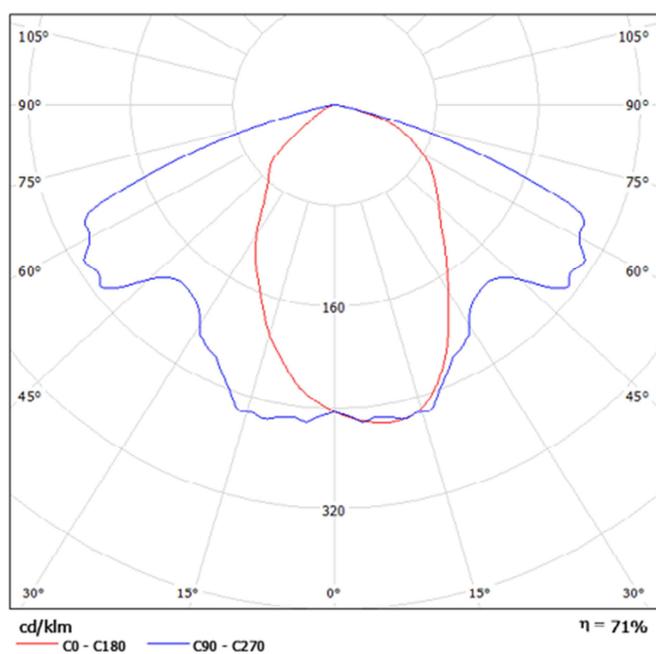


Figura 8.2 - Curva fotométrica da Luminária ILP-2525 da marca Ilumatic

Para a via sendo avaliada, classificação “V2”, esta luminária apresenta um fator de utilização na faixa de 52 %, ou seja, esta é a porcentagem da luz emitida pela lâmpada que de fato irá incidir sobre a zona de interesse da via. A Figura 8.3 apresenta

as curvas características de acordo com o ângulo de inclinação da luminária. No caso em questão é considerado ângulo de 0°.

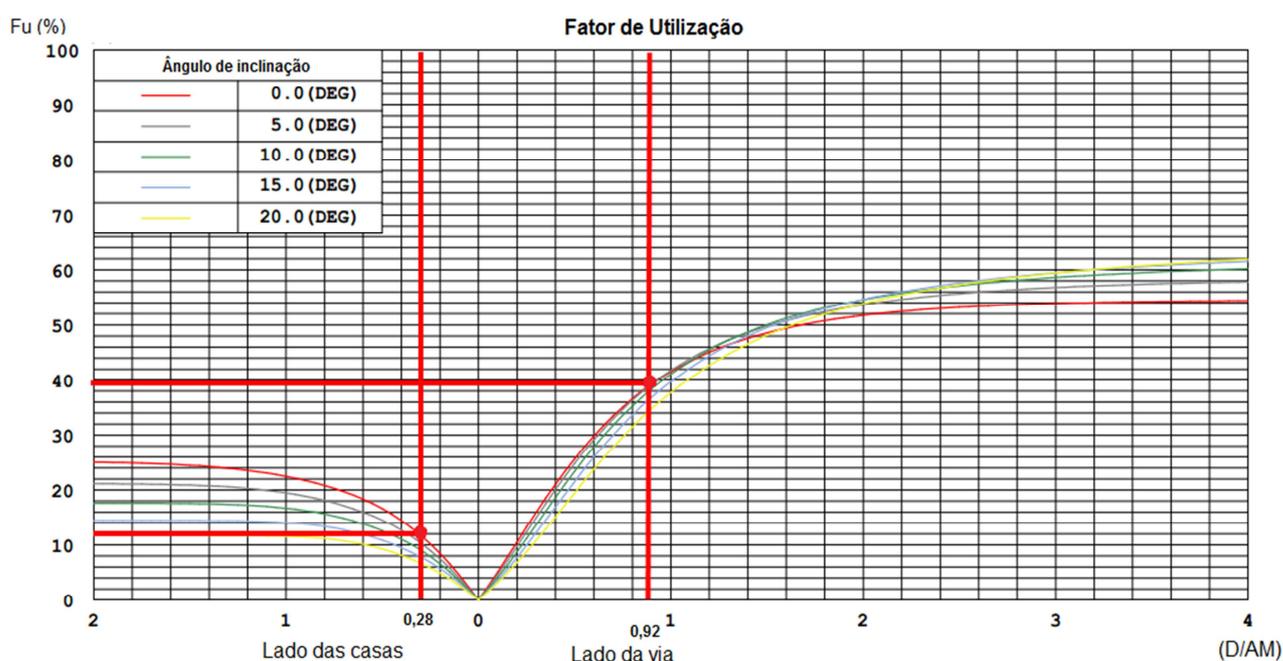


Figura 8.3 - Fator de utilização da luminária ILP 2525

As lâmpadas típicas para este tipo de aplicação apresentam valores de fluxo luminoso entre 26000 lm e 33300 lm conforme apresentado na Tabela 3.1, e a vida mediana varia entre 28500 h e 32000 h. Para representar a condição atual foram realizadas simulações com 4 tipos de lâmpadas distintas.

Os fatores de manutenção para estas lâmpadas em conjunto com a luminária proposta a qual possui índice de proteção IP66, foram determinados conforme o gráfico apresentado na Figura 5.9.

Como a temperatura de cor destas lâmpadas é de 2000 K, ainda deve ser considerado o fator de redução do fluxo efetivo pela atuação da visão mesópica (M/P), que conforme visto no Quadro 6.2 para esta temperatura de cor é de - 8 %.

Assim, baseando-se nos fluxos iniciais das lâmpadas e aplicando-se os multiplicadores de ajuste, pode-se definir qual é a quantidade de fluxo luminoso que de fato será considerada para garantir a iluminação na via pelo período definido.

O Quadro 8.1 apresenta os valores utilizados para a simulação, bem como os valores de iluminância obtidos com em cada um dos casos.

Simulações das Diferentes opções de Lâmpadas VSAP				
Caso	1	2	3	4
Lâmpada	Philips	Osram	Osram	GE
Modelo	SON 250W E E40 CO 1SL	NAV-T 250 4Y	NAV-T 250 SUPER 4Y	LU250/D/H/ECO
Fluxo luminoso (lm)	28000	28000	33200	26000
Vida Mediana (h)	28000	32000	32000	28500
Fator de manutenção (4 anos)	0,67	0,72	0,72	0,53
Luminária	Ilumatic modelos ILP 2525			
Rendimento da luminária	0,71			
Fluxo luminoso efetivo (lm)	13319,6	14313,6	16971,84	9783,8
Simulações (M/F=1)				
Emed (lux)	20,0	22,0	26,0	15,0
Emáx (lux)	57,0	61,0	72,0	42,0
Emin(lux)	6,5	6,9	8,2	4,7
Uo	0,32	0,32	0,32	0,32
Simulações (M/F=0,92)				
Emed (lux)	18,4	20,2	23,9	13,8
Emáx (lux)	52,4	56,1	66,2	38,6
Emin(lux)	5,9	6,3	7,5	4,4
Uo	0,32	0,32	0,32	0,32

Quadro 8.1 - Valores da simulação das lâmpadas VSAP + Luminárias ILP2525

As imagens referentes a cada simulação são apresentadas a seguir:

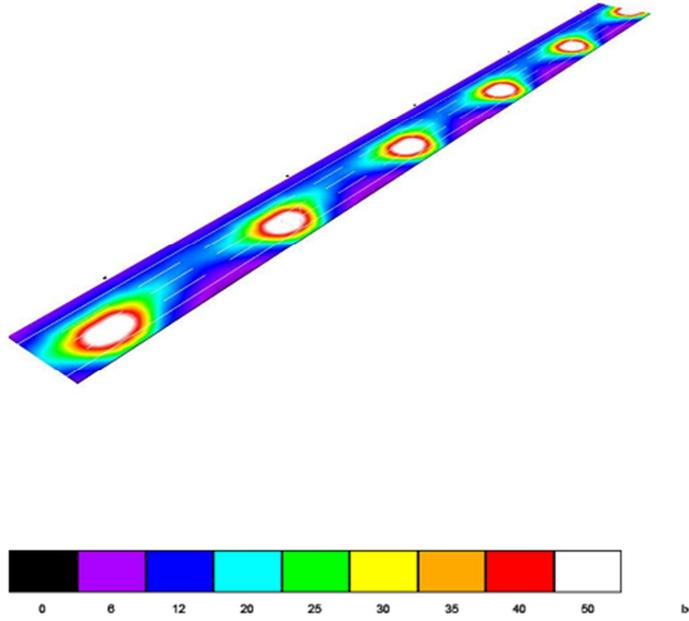


Figura 8.4 - Caso 1 - Lâmpada Philips 28000 lm

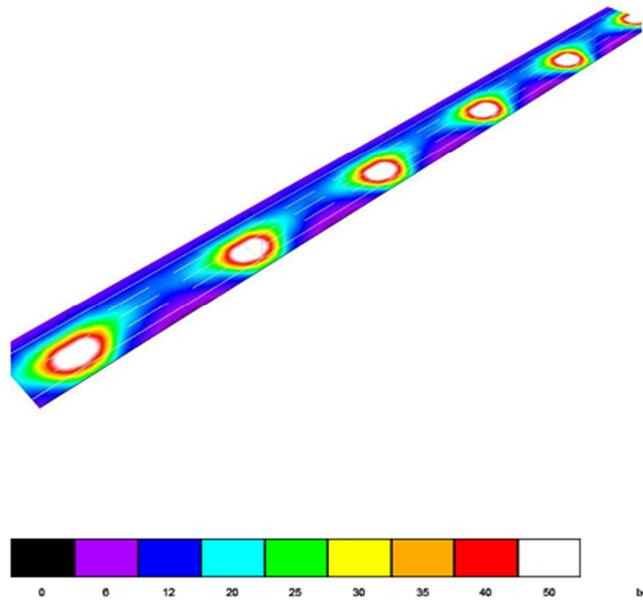


Figura 8.5 - Caso 2 - Lâmpada OSRAM 28000 lm

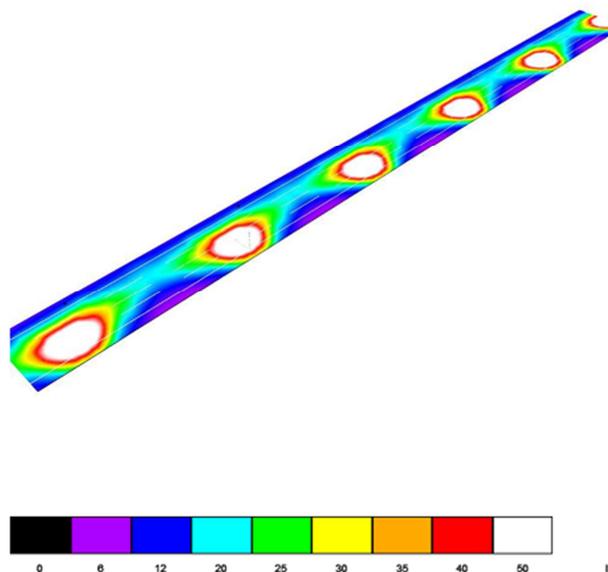


Figura 8.6 - Caso 3 - Lâmpada OSRAM 32200 lm

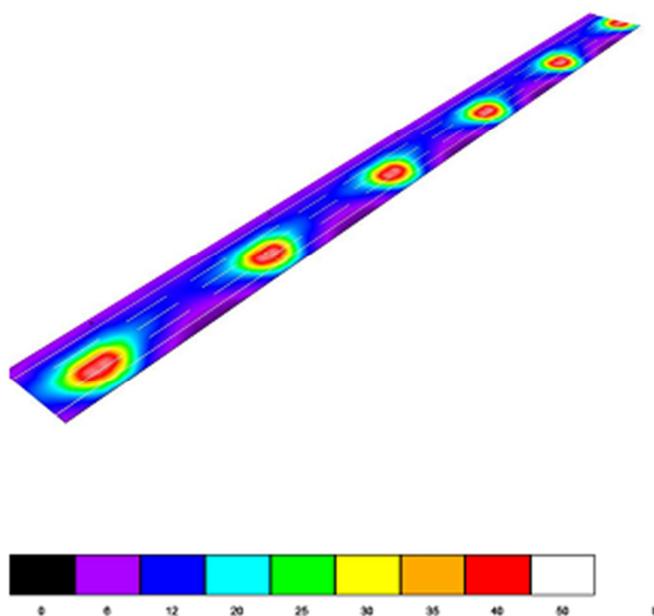


Figura 8.7 - Caso 4 - Lâmpada GE 26000 lm

Nota-se, conforme os dados analisados que em todos os casos o valor de iluminância mínima na via foi atingido, quando não considerado o Fator (M/P) com

exceção do caso 4, onde o nível de iluminância ficou abaixo do necessário. Quando é considerado o fator referente à atuação da visão mesópica, o caso 1 também apresenta valores abaixo do recomendado.

Cabe lembrar que os níveis de iluminância são os mínimos garantidos, e representam os níveis ao final do período de manutenção considerado. Com isso pode-se dizer que os valores iniciais de iluminância são maiores que os apresentados no Quadro 8.1.

Como estas lâmpadas necessitam de reatores para seu funcionamento, a potência total do circuito será a potência da lâmpada somada com as perdas do reator. Para o caso em questão foi considerado o reator da marca Intral modelo RVSI 250 W, o qual apresenta uma perda de 28 W (INTRAL, 2012a).

Com isso a potência total da solução da luminária para ILP equipada com lâmpada VSAP e seu respectivo reator é de 278 W.

8.3 Definição da distribuição luminosa ideal

Para o dimensionamento da luminária de LED, o primeiro passo é descobrir qual deverá ser a distribuição luminosa da luminária sobre a via. Como já visto, isto é possível com base nas características físicas da via e dos postes a serem utilizados, bem como a distância entre eles. Neste caso também será considerada a via do tipo V2 para comparação. Com a definição anterior e pelo equacionamento deduzido no capítulo 7, calculam-se os valores de intensidade luminosa em cada direção, de modo que o fluxo gerado pela luminária atinja a área de interesse da via de forma eficiente.

Para facilitar a análise da distribuição luminosa, as equações foram aplicadas ao Software matemático "MATHCAD". Tendo os limites da via definidos, foi criada uma rotina que calcula as intensidades que devem sair da luminária em todas as direções (C, γ) que possuem como alvo a superfície da via. Basicamente, os valores de intensidade dependem da distância percorrida pela Luz, do ângulo de incidência na via e do valor de iluminância estipulado para a via conforme já definido na equação (7.10).

Realizando a varredura dos ângulos em questão, traça-se o diagrama polar conforme apresentado na Figura 8.8.

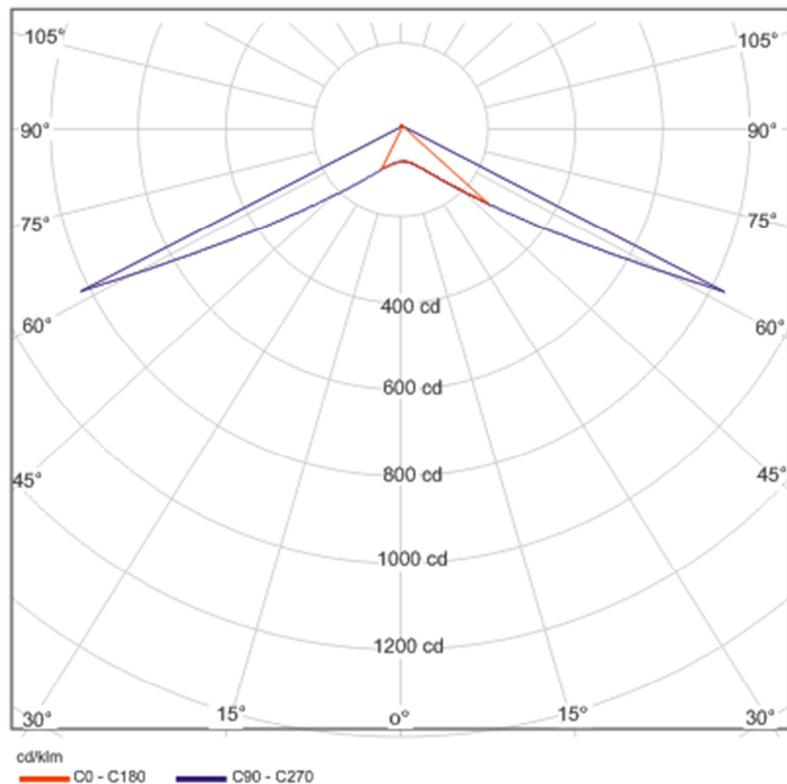


Figura 8.8 - Fotometria ideal da luminária proposta (adaptado do Software Mathcad)

A curva polar apresentada na Figura 8.8 mostra qual deveria ser a distribuição ideal da luminária que atingiria os níveis mínimos de iluminância na via na área de atuação da luminária (AAL), com o mínimo de consumo de energia. Sendo assim, é necessário que a luz emitida seja direcionada desta forma. Tendo a definição da distribuição, pode-se então calcular o fluxo luminoso necessário, dado em lumens, para atingir os níveis de intensidade luminosa nas direções necessárias. Este cálculo é verificado a seguir.

8.4 Cálculo do Fator de Manutenção

Conforme o estudo anterior, o fator de manutenção é decisivo no cálculo do fluxo luminoso. Dentre os pontos a serem considerados estão o fator de manutenção da luminária (FML), o fator de depreciação da lâmpada (FDL) e o fator de sobrevivência da lâmpada (FSL).

Para o projeto proposto será considerada uma expectativa de vida da luminária mínima de 12 anos sendo que, conforme citado pela NBR 5101, para a ILP, a média diária de funcionamento no Brasil é de 12 horas. Assim o período total que a luminária permanecerá em funcionamento durante sua vida será de no mínimo 52.560 horas.

Para luminárias com lâmpadas VSAP, em geral, estima-se como um período padrão de manutenção cerca de 3 anos a 4 anos dependendo da lâmpada a ser utilizada. Os valores de mortalidade deste tipo de lâmpada aumentam de forma substancial em períodos maiores que estes, que representam cerca de 13140 a 17520 horas de operação e é visto na seção 5.1.1.1.

Fator de Depreciação dos LEDs (FDL) – Como visto anteriormente, baseado no relatório LM80 do fabricante e com a metodologia definida pela norma IES TM-21, é possível determinar o índice de depreciação do fluxo luminoso dos LEDs pelo tempo relacionado com as características elétricas e térmicas. O gráfico da Figura 8.9 apresenta a depreciação do modelo REBEL ES, para diferentes níveis de corrente direta (I_f) e de temperatura no ponto de soldagem do LED (T_{ps}), sendo que o período em anos é dado considerando um uso diário de 12 horas.

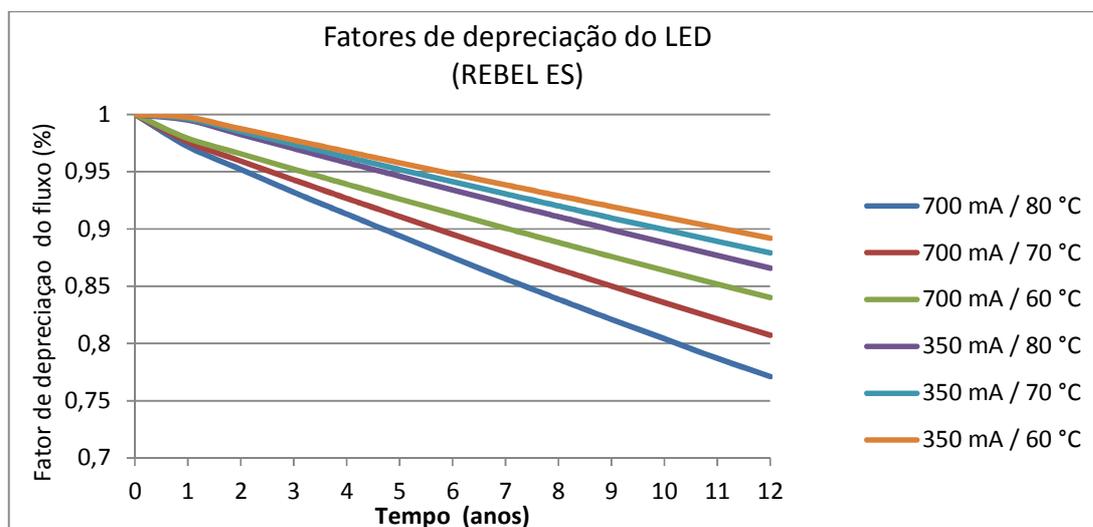


Figura 8.9 - Depreciação do fluxo luminoso dos LEDs baseado em I_f (mA) e T_p (°C)

Nota-se que a depreciação luminosa é mais intensa com o acréscimo da corrente e da temperatura de operação. Ao término dos 12 anos, cerca de 52650 horas de operação previstos como duração da luminária, a manutenção do fluxo luminoso dos LEDs chega a 77 % quando operando a 700 mA e com temperatura no ponto de soldagem de 80 °C, se a temperatura for reduzida para 60 °C, o valor mantido neste mesmo período aumenta para 84 %. Se for optado por operar em uma corrente mais baixa, como 350 mA, os valores aumentam para 86,5 % a 80 °C e 89,2 % para 60 °C (IES, 2011), (LUMILEDS,2012).

Cabe lembrar que quanto menor forem os valores de corrente dos LEDs, maior será também seu rendimento luminoso, pois menores serão as perdas internas. Em contrapartida, utilizando níveis de corrente menores, o fluxo luminoso individual também será reduzido e assim uma quantidade maior de LEDs deverá ser utilizada. Como estes dispositivos ainda apresentam valores de custo relativamente elevados, e sendo que também são necessárias lentes individuais que também elevam os custos, deve-se aproveitá-los ao máximo. No item 8.7 é realizada uma análise para definição da corrente a ser utilizada.

Fator de Manutenção da Luminária (FML) - Este índice está baseado na redução do rendimento da luminária pelo acúmulo de sujeira em sua superfície e é influenciado pela natureza do local onde a luminária é instalada. Embora existam gráficos que apresentam valores para depreciação luminosa dependendo do ambiente em que está instalada a luminária, este valor também é dependente da forma de construção das luminárias. A proposta da luminária de LED é que, além da redução de consumo de energia, a necessidade de substituição seja reduzida, visto que os LEDs possuem uma expectativa de vida elevada.

As lâmpadas VSAP apresentam expectativa de vida dada pelo fabricante quando 50 % de uma determinada população deixa de operar. Neste caso deve ser realizada a substituição das lâmpadas e a limpeza da luminária para possibilitar um melhor aproveitamento da mesma, em geral exigem que seja realizada uma manutenção a cada 3 ou 4 anos pois neste período já são percebidos níveis de fator de manutenção reduzidos.

No caso na luminária de LEDs, embora os dispositivos mantenham seu fluxo luminoso por um período longo, o acúmulo de sujeira na luminária acaba por fazer o fluxo efetivo do sistema reduzir precocemente. Assim, um projeto de manutenção preventiva deve ser implementado. A luminária de LED não necessitará de troca, mas apenas de limpeza, a fim de evitar perdas muito significativas no fluxo luminoso.

De modo a contemplar a maior parte das instalações, para a estimativa da depreciação por sujeira, será considerada uma instalação em ambiente com classificação quanto à sujeira do tipo moderado, conforme (IES, 2000), o qual identifica ambientes onde há fumaça ou atividades geradoras de poeira moderada nas proximidades e nível de partículas no ambiente menor que 600 microgramas por metro cúbico.

A curva de depreciação luminosa pelo tempo, para a luminária escolhida classificada como IP 66, segundo a Norma CIE 154, é apresentada pela Figura 5.8 já vista anteriormente. Com o objetivo de possibilitar uma análise em períodos maiores a curva foi extrapolada para o período de 4 anos, conforme é apresentado na Figura 8.10.

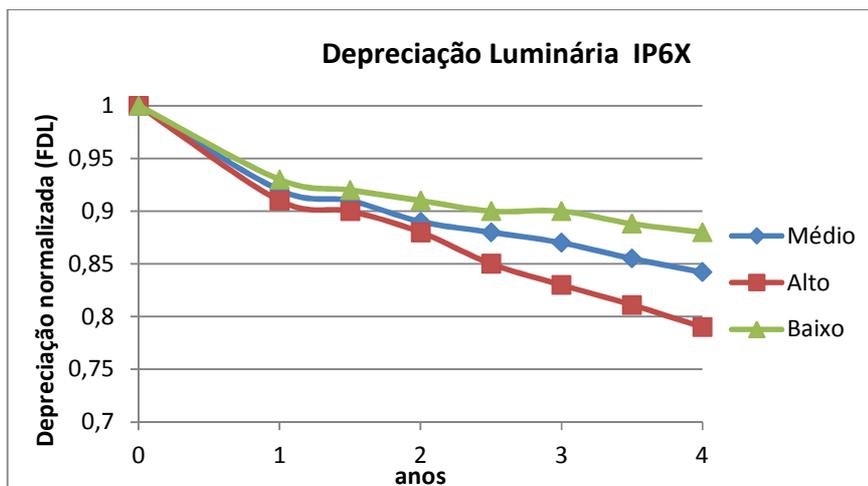


Figura 8.10 - Fator de depreciação da luminária IP6X por sujeira – 4 anos (Adaptado de CIE, 2003)

Fator de Sobrevivência dos LEDs (FSL) – Por serem dispositivos semicondutores de estado sólido e muito confiáveis, os LEDs dificilmente falham de forma catastrófica, ou seja, deixam de emitir luz totalmente, como ocorre com as lâmpadas de filamento ou de eletrodos. Por isso, geralmente são considerados como falhos quando seu fluxo luminoso decresce abaixo dos índices considerados no projeto.

Mesmo se falharem, os LEDs de potência atuais como, por exemplo, o modelo REBEL ES considerado neste trabalho, não apresentam fios de conexão em seu interior, assim se falharem entrarão em curto circuito. Como são dispositivos que devem ser controlados por corrente e geralmente aplicados em conjunto com outros, e em conexão série, uma falha desta natureza ainda manteria o restante do circuito em funcionamento (LUMILEDS, 2004).

Mesmo assim podem ocorrer falhas que deixem o circuito em aberto que podem estar relacionadas com o processo de montagem e solda dos componentes. Neste caso, um sistema auxiliar pode ser adaptado em paralelo com os LEDs, de forma que se um deles apresentar falha de circuito aberto, o sistema auxiliar entra em operação mantendo um caminho alternativo para a passagem de corrente e, com isso, mantendo o restante do sistema em operação. Um exemplo deste dispositivo é o circuito integrado “PLED5” da empresa LITTELFUSE, que entra em condução quando a tensão sobre ele

ultrapassa um limite pré-determinado, sintoma típico do rompimento do circuito do LED (LITTELFUSE, 2012).

Como as chances destas falhas afetarem o desempenho do sistema são muito reduzidas, será considerado um fator de sobrevivência unitário.

$$FML = 1,0$$

Finalmente o índice do fator de manutenção para a luminária proposta, pode ser definido pela equação (8.1).

$$MF = FDL * FML * FSL \quad (8.1)$$

Com isso é possível traçar o gráfico do fator de manutenção da luminária em função do tempo de operação. Para uma avaliação mais específica foram realizados cálculos para os fatores de manutenção utilizando diferentes intervalos de manutenção.

No gráfico da Figura 8.11, é apresentado o fator de manutenção para um período final de 12 anos, aproximadamente 52000 h, com diferentes intervalos de limpeza.

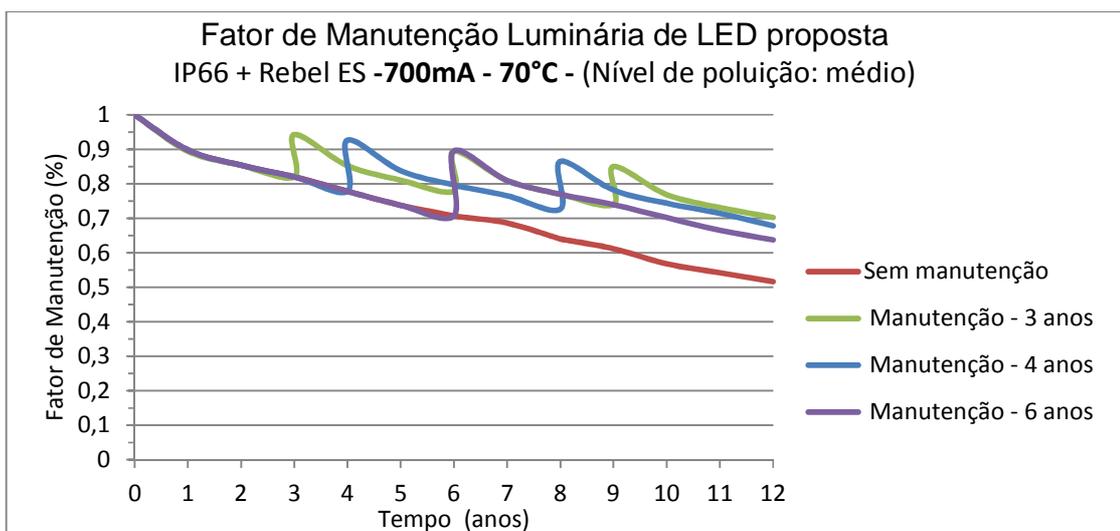


Figura 8.11 - Gráfico do fator de manutenção da Luminária IP66 com LEDs $I_f = 700\text{mA}$ e $T_{ps} = 70\text{ }^\circ\text{C}$

Nota-se que, se não for realizado nenhum trabalho de limpeza, o fator de manutenção a ser considerado será de 0,52. Quando se faz uma limpeza no sexto ano, ou seja, na meia vida da luminária, aumenta-se o fator de manutenção para 0,64. Já se forem realizadas limpezas a cada 4 anos ou 3 anos, este fator é aumentado para 0,68 e 0,70, respectivamente.

Como comentado anteriormente, a redução na corrente utilizada nos LEDs melhora sua eficiência e reduz sua depreciação luminosa. Assim foi realizado o mesmo estudo, porém utilizando os LEDs com corrente de 350 mA e os mesmos intervalos de limpeza. A Figura 8.12 apresenta o comportamento da depreciação do fluxo luminoso pelo tempo para esta situação.

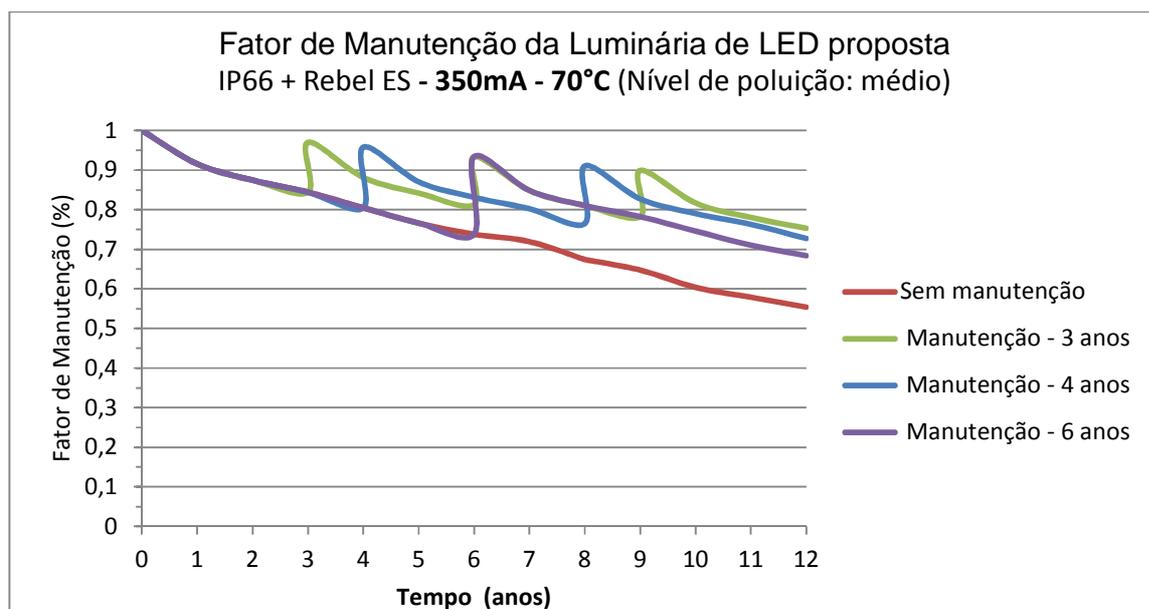


Figura 8.12 - Gráfico do fator de manutenção da Luminária IP66 com LEDs a 350mA

Neste caso, com os LEDs operando à 350 mA, o fator de depreciação apresenta uma pequena melhora, sendo que no período de 12 anos sem manutenção aumenta de 0,52 para 0,56. A melhora é mais perceptível quando serviços de limpeza são realizados nas luminárias, visto que o maior responsável pela redução do FM é

justamente a depreciação por sujeira. Neste caso, para uma limpeza no sexto ano o FM passa para de 0,64 para 0,7. Já com os intervalos de limpeza a cada 4 anos, o valor passa de 0,68 para 0,74 e de 0,70 para 0,76, com um intervalo de limpeza de 3 em 3 anos.

Arelada à vantagem da melhora do fator de depreciação dos LEDs, a operação em corrente mais baixa faz com que os LEDs apresentem menores perdas térmicas e assim a temperatura no corpo da luminária também é reduzida, quando considerado o mesmo corpo. Para demonstrar a variação no fator de manutenção quando operando em temperaturas menores ou maiores, foram calculados os fatores de manutenção para temperatura nos LEDs de 60 °C, 70 °C e 80 °C. A Tabela 8.2 apresenta os valores em questão.

Tabela 8.2 - Fator de manutenção - 12 anos - IP6X

Fator de Manutenção - 12 anos - IP6X				
Ciclos de limpeza	Sem limpeza	6 anos	4 anos	3 anos
350mA @ 60°C	0,57	0,70	0,75	0,78
350mA @ 70°C	0,56	0,69	0,74	0,76
350mA @ 80°C	0,55	0,68	0,73	0,75
700mA @ 60°C	0,54	0,66	0,71	0,73
700mA @ 70°C	0,52	0,64	0,68	0,70
700mA @ 80°C	0,49	0,61	0,65	0,67

Conforme a tabela nota-se que se for realizada uma limpeza a cada 4 anos, o fator de manutenção aumenta em torno de 30 % em relação a uma aplicação sem manutenção. Este aumento implica diretamente na quantidade de lumens iniciais necessários, e com isso, também na quantidade de LEDs e na potência da mesma.

8.5 Cálculo do Fluxo Luminoso

Baseado na definição da distribuição ideal da luz na via, dada na Figura 8.8, é possível aplicar a equação que integra todos os raios de luz, fazendo o somatório desta energia para determinar qual deverá ser o fluxo mínimo para que quando aplicado com esta distribuição, permita alcançar a iluminância mínima projetada para a via.

A equação (8.2), resume a definição para o cálculo do fluxo luminoso, baseado no equacionamento definido anteriormente.

$$\phi_u = 2 * \pi * \sum_{\gamma=0}^{175} Imd \left(\gamma + \frac{5}{2} \right) * [\cos(\gamma) - \cos(\gamma + 5)] \quad (8.2)$$

Sendo assim, o valor de fluxo luminoso calculado útil (ϕ_u) encontrado, foi de:

$$\phi_u = 7726 \text{ lumens}$$

Este é o valor de fluxo luminoso teórico que a luminária deverá emitir para garantir os níveis de iluminância mínimos estipulados para a via, desconsiderando as perdas. Cabe ressaltar que este valor é para uma lente com distribuição luminosa ideal, ou seja, quando toda a luz emitida pela fonte é direcionada para a área de atuação da luminária na via (AAL), figurando um fator de utilização (F_u) unitário.

Como em um caso real isto é impraticável, foi considerado um fator de utilização (F_u) de 70 % como aproximação inicial, que considera que 70 % do fluxo gerado será direcionado para a via e os outros 30 % são direcionados para calçadas e áreas adjacentes. Este valor deve ser posteriormente confirmado através do ensaio da curva de distribuição luminosa do protótipo com a lente escolhida, caso esta lente não represente este valor de F_u , o cálculo deve ser refeito utilizando o valor obtido, ou alterando a lente.

Com isso, o fluxo total (ϕ_t) mínimo a ser fornecido pela luminária permanentemente para garantir os níveis mínimos de iluminância será de:

$$\phi_t = \frac{\phi_u}{F_u} = \frac{7828}{0,7} = 11183lm$$

Como os níveis de iluminância devem ser garantidos para o tempo de vida da luminária, as possíveis perdas durante este período devem ser consideradas. O fator que relaciona estas perdas é o fator de manutenção (FM), que deve ser estipulado para um determinado período e atrelado a um roteiro de manutenção pré-definido. Este fator foi avaliado no item 8.4.

Com este dado pode-se calcular o fluxo luminoso total inicial (ϕ_{ti}) da luminária, e o fluxo total inicial dos LEDs (ϕ_{ti_led}), visto que este será maior que o da luminária, devido às perdas no vidro e na lente. Assim, tendo como base o fluxo luminoso calculado total a ser mantido (ϕ_t), aplica-se a equação (8.3).

$$\phi_{ti_led} = \frac{\phi_t}{MF * Eff_{lente} * Eff_{vidro}} \quad (8.3)$$

Como as lentes para uso em LEDs de potência em geral apresentam valor de eficiência entre 89 % e 93 %, será utilizado para cálculo o valor de 91 %. A eficiência média do vidro incolor de 4 mm, conforme pode ser deduzido pela Figura 2.7, é de aproximadamente 90 %.

Baseado nos fatores de manutenção da Tabela 8.2, pode-se definir qual deve ser a quantidade de fluxo luminoso inicial. Conforme apresentado no Quadro 8.2, foi realizado o cálculo para LEDs operando com corrente de 350 mA e 700 mA em três temperaturas diferentes.

Nota-se também que foi utilizada a taxa de ganho relacionada com a visão mesópica (M/P), conforme visto no item 6.5. Uma vez que os LEDs utilizados terão TCC de 5650 K, e considerando uma luminância de 0,9 cd/m² o fator M/P de 1,12 será utilizado.

Luminária IP6X + Rebel ES						
Corrente no LED - If (mA)	350			700		
Temperatura no LED -Tps (°C)	60 °C	70 °C	80 °C	60 °C	70 °C	80 °C
Fluxo da Luminária mantido (lm):	11183					
Fator de manutenção (FM):	0,75	0,74	0,73	0,71	0,68	0,65
Fluxo inicial da Luminária (lm) :	14911	15112	15319	15751	16446	17205
Fator de Visão M/P (%)	1,12					
Fluxo inicial necessário (lm):	13313	13493	13678	14063	14684	15361
Eff. Lente (%):	0,91					
Eff. Vidro (%) :	0,90					
Fluxo necessário nos LEDs (lm):	16255	16475	16701	17171	17929	18756

Quadro 8.2 - Fluxo Luminoso necessário – temperaturas

No Quadro 8.2 é verificado qual deverá ser o fluxo luminoso produzido pelos LEDs para cada situação, nota-se que se for utilizada a corrente de 350 mA, garantindo-se uma temperatura no ponto de soldagem do LED de 60°C, serão necessários 16255 lm, já se forem considerados LEDs operando em 700 mA e uma temperatura de 80 °C, a quantidade de lumens a ser gerada será de 18756 lm, cerca de 15 % superior.

8.6 Cálculo da quantidade de LEDs

O próximo passo necessário é a definição da quantidade de LEDs a ser utilizada. O LED escolhido, REBEL ES, pode operar em uma ampla faixa de corrente, desde valores da ordem de 100 mA até o máximo de 1000 mA. Obviamente, quanto maior a corrente utilizada maior será sua potência e maior o seu fluxo luminoso.

Embora os testes de depreciação luminosa fornecidos pelo fabricante, baseados na norma LM80 apresentem resultados somente para as correntes de 350 mA, 700 mA e 1000 mA, qualquer outra corrente dentro do seu intervalo de operação poderá ser utilizada. Para criar uma metodologia para avaliação de diferentes situações, foram criadas equações baseadas nos dados do fabricante que representam a variação dos

parâmetros dos LEDs dentro do intervalo de 300 a 700 mA, intervalo este onde apresentam uma variação praticamente linear e então alvo deste estudo.

A Figura 8.13 apresenta este comportamento do fluxo luminoso em relação à corrente de operação para o LED em questão.

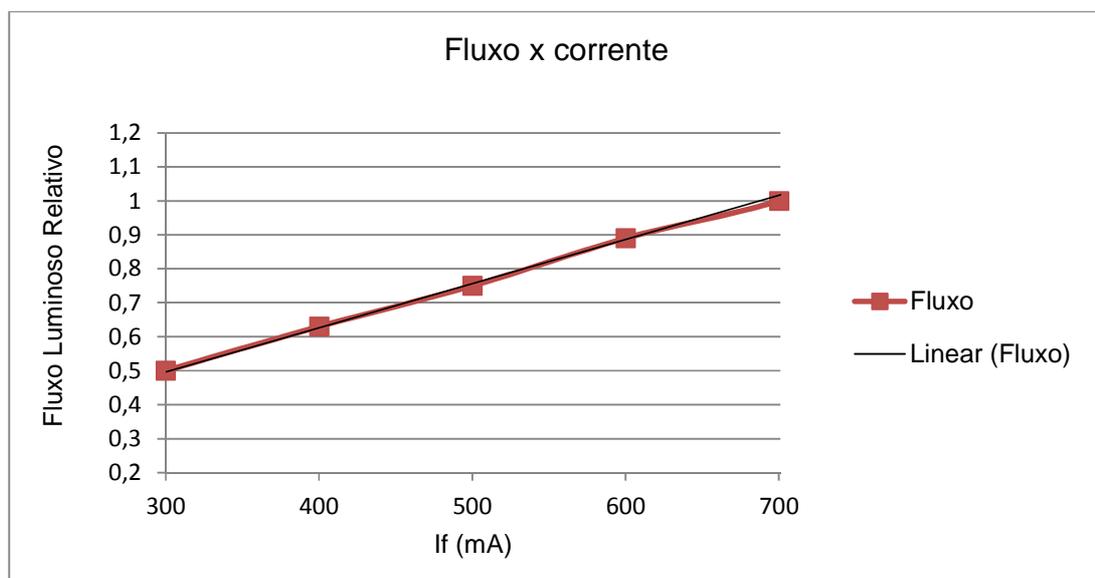


Figura 8.13 - Fluxo Luminoso x Corrente (Rebel ES) (Adaptado de: LUMILEDS, 2011b)

Nota-se que a relação é praticamente linear dentro da faixa de 300 mA a 700 mA, entretanto a proporção entre fluxo e corrente é diferente para níveis de corrente diferentes. Para calcular o fluxo luminoso dentro esta faixa de corrente, é possível ter uma aproximação com a equação (8.4).

$$\Phi_r(if) = 0,0013 * If + 0,107 \quad (8.4)$$

A medida que a corrente aumenta, maiores são as perdas do LED e assim o seu rendimento acaba sendo reduzido. Na Figura 8.14 é apresentada a variação da eficiência à medida que se aumenta a corrente.

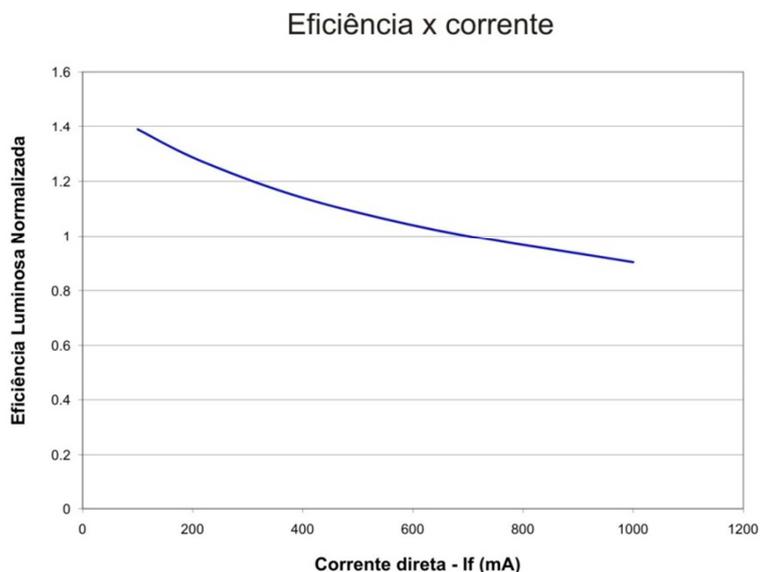


Figura 8.14 - Eficiência pela corrente direta (Adaptado de: LUMILEDS, 2011b)

O gráfico apresenta o valor da eficiência normalizada em 700 mA. Pode-se notar que reduzindo a corrente em 50 %, ou seja, 350 mA, a eficiência aumenta em aproximadamente 18 %.

Outro fator que influencia na quantidade de luz emitida pelos LEDs é a temperatura de operação, sendo que quanto maior for a temperatura, menor será o fluxo gerado. A Figura 8.15 apresenta esta relação para o mesmo LED.

A Figura 8.15 apresenta duas curvas, uma para os LEDs com TCC menor e outra para o LED com TCC de 5650 K, que será o LED utilizado. Para este modelo a variação do fluxo pela temperatura é menos intensa, sendo que para a faixa entre 0 °C e 60 °C é praticamente imperceptível. A partir desta última é que é percebido um maior decréscimo na eficiência, ficando mais acentuada em temperaturas superiores a 100 °C.

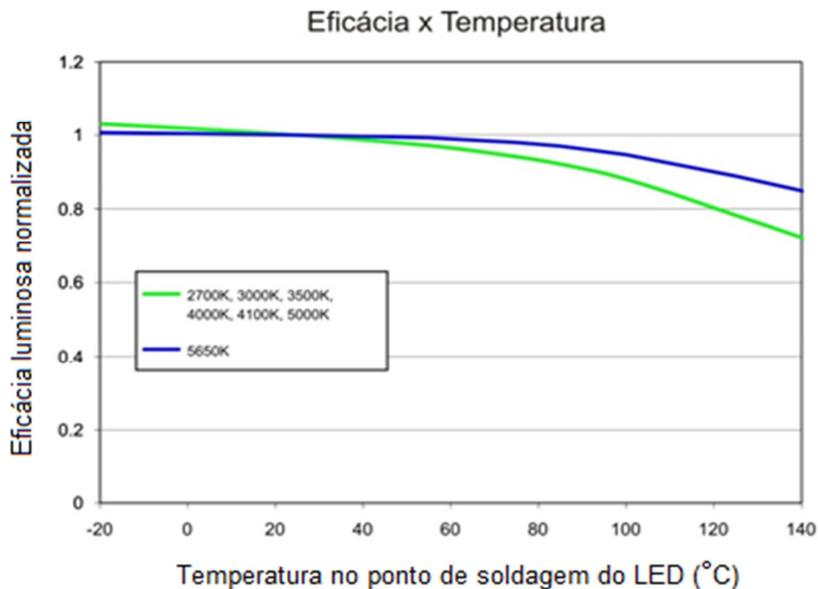


Figura 8.15 - Eficácia x temperatura (Adaptado de: LUMILEDS, 2011b)

Baseado nos dados da Figura 8.15, foram extraídos os valores para a criação do gráfico apresentado na Figura 8.16, onde é apresentada a variação do fluxo dentro do intervalo de 20 °C e 100 °C, uma vez que a operação em temperaturas muito elevadas (acima de 100 °C) acaba reduzindo a expectativa de vida dos LEDs.

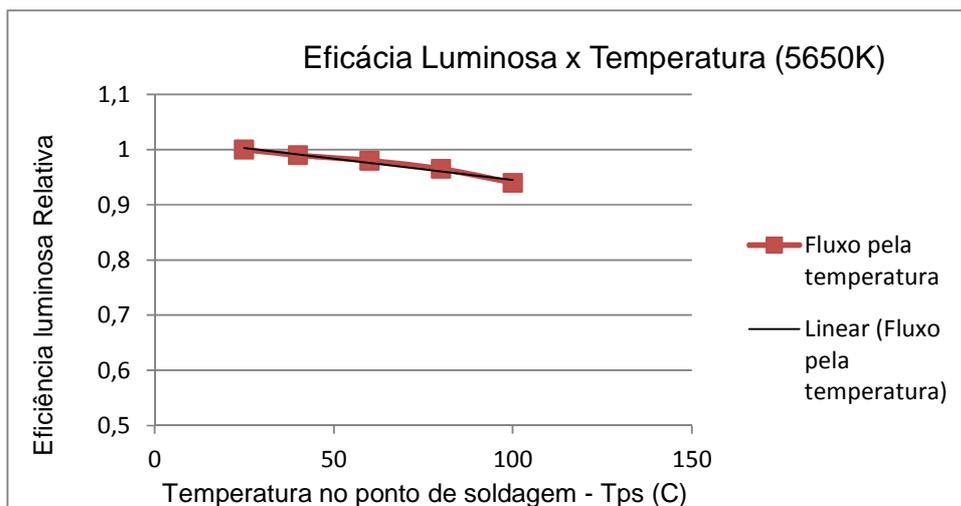


Figura 8.16 - Eficácia luminosa x temperatura de junção (Adaptado de: LUMILEDS, 2011b)

A partir deste intervalo foi possível estimar a equação (8.5) linear citada a seguir para aproximação da variação real do fluxo em função da temperatura (Tps).

$$\Phi_r(Tps) = - 0,0008 * Tps + 1,02 \quad (8.5)$$

Inserindo-se a equação (8.4) em (8.5) tem-se a equação para cálculo do fluxo luminoso relativo em função da corrente e da temperatura.

$$\Phi_r(I_f, Tps) = (0,0013 * I_f + 0,107) * (- 0,0008 * Tps + 1,02) \quad (8.6)$$

Com os dados coletados foi então criada o Quadro 8.3, cuja qual apresenta três cenários para o LEDs operando em 3 níveis de corrente diferentes.

Dados de entrada			
Modelo LED :	REBEL ES (5650K)		
Corrente LED (mA) :	350	500	700
Fluxo final mínimo da luminária (lm):	11183		
Fator de manutenção ¹ (FM) :	0,74	0,72	0,68
Fluxo inicial da Luminária (lm):	15112	15532	16446
Fator de Visão M/F (%)	1,12		
Fluxo inicial necessário (lm):	13493	13868	14684
Eff. Lente (%):	91		
Eff. Vidro (%):	90		
Fluxo LEDs (lm) :	16475	16933	17929
¹ Fator de manutenção para um período de 12 anos com limpeza a cada 4 anos. Considerando temperatura do ponto de soldagem do LED de 70°C. O fator para 500 mA foi encontrado por interpolação.			

Quadro 8.3 - Fluxo luminoso necessário - I_f de 350 / 500 e 700 mA

A partir dos dados iniciais é possível calcular a quantidade de LEDs necessária. Como o LED é um componente com característica de resistência dinâmica, seu valor de

tensão direta (V_f) varia de acordo com a corrente que circula por seu interior. Os fabricantes em geral, disponibilizam esta curva na folha de dados do componente. No caso do LED em questão foram utilizados os dados entre as correntes entre 200 e 700 mA, onde a variação da tensão se apresenta como uma função linear, conforme apresentado na Figura 8.17.

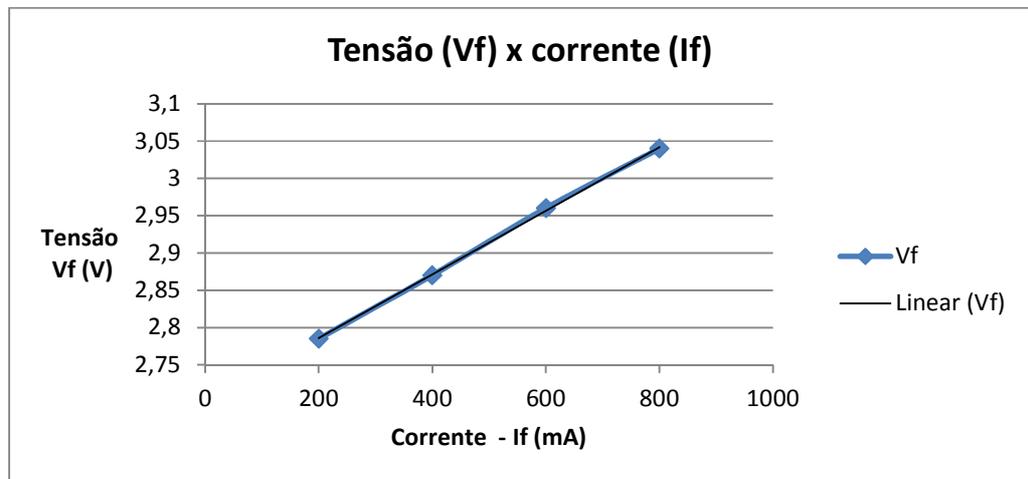


Figura 8.17 - Corrente (If) x tensão (Vf) (Adaptado de: LUMILEDS,2011b)

Nota-se que nesta faixa de corrente a variação da tensão é praticamente linear, desta forma é possível uma aproximação da variação da tensão pela corrente, dada em mA, pela equação (8.7).

$$V_f(I_f) = 0,0004 * I_f + 2,70 \quad (8.7)$$

Esta equação apresenta os valores nominais de V_f em função da corrente de operação para uma temperatura de 25°C.

Como qualquer diodo tradicional, os LEDs apresentam uma variação negativa na tensão direta em relação a sua temperatura de operação. Isto faz com que os LEDs apresentem uma potência ligeiramente menor quando operando em temperaturas mais

elevadas. No caso do LED em questão, a taxa de variação do V_f pela temperatura fica entre -2 e -4 mV para cada grau Celsius, esta variação foi medida para um intervalo da temperatura de junção entre 25°C e 110°C. Com o objetivo de aplicar o valor ao cálculo da quantidade de LEDs utilizada, será utilizado o valor médio de -3 mV/°C (LUMILEDS, 2011b).

Desta forma a partir da equação (8.4), pode-se definir a equação para a tensão direta dos LEDs em função da corrente direta e da temperatura no ponto de soldagem, conforme a equação (8.8).

$$V_f(I_f, T_j) = (0,0004 * I_f + 2,70) - [(T_{ps} - 25) * 0,003] \quad (8.8)$$

Com as equações do LED definidas, pode ser calculado fluxo luminoso efetivo por LED, sua potência e quantidade total de LEDs necessários para a luminária, como apresentado no Quadro 8.4.

Dados Projetados			
Corrente LED – I_f (mA)	350	500	700
Fluxo objetivo do conjunto de LEDs (lm)	16475	16933	17929
Fluxo nominal dos LED @700mA @25°C (lm) :	240	240	240
Temperatura - T_{ps} (°C) :	70	70	70
V_f LED @ T_{ps} @ (V):	2,72	2,78	2,86
Potência por Led (W):	0,95	1,39	2,00
Fluxo Lumin. Efetivo por LED (lm):	131,6	177,2	238,0
Quantidade de LEDs (pç):	126	96	76

Quadro 8.4 - Dados projetados da luminária

Nota-se que quando se aumenta a corrente de operação dos LEDs, é necessário aumentar o fluxo luminoso inicial da luminária, pois os LEDs terão uma depreciação mais acentuada, e com isso o fator de manutenção da luminária será menor conforme visto no Quadro 8.3.

Mesmo sendo necessário um fluxo luminoso maior da luminária quando operando em correntes mais elevadas, a quantidade de LEDs pode ser reduzida de forma significativa. Como atualmente o custo dos LEDs ainda é elevado, os mesmos devem ser aproveitados da melhor forma possível.

Nota-se, conforme o Quadro 8.4 que quando operando a 350 mA seriam necessários 126 LEDs e quando operando em 700 mA esta quantidade se reduz para 76 componentes.

8.7 Avaliação da Potência necessária

A potência da luminária dependerá basicamente da potência do painel de LEDs e da eficiência do driver a ser utilizado. A potência do painel pode ser calculada com base na corrente a ser utilizada e a quantidade de LEDs escolhida. O Quadro 8.5 apresenta esta relação. Para a análise foi considerado um driver com eficiência de 90 %.

Características elétricas			
Corrente LED – If (mA)	350	500	700
Quantidade de LEDs necessária (un):	126	96	76
Potência total de LEDs (W):	119,7	133,2	151,9
Eficiência do driver (%):	90,0	90,0	90,0
Potência Final Driver (W):	133,0	148,0	168,8
Eficiência luminária (lm/W):	101,4	93,7	87,0

Quadro 8.5 - Relação da potência necessária para a luminária proposta

Nota-se pelos dados do Quadro 8.5 que quando a corrente de trabalho dos LEDs é aumentada, sua eficiência se reduz, e conseqüentemente a potência total do conjunto aumenta. Pode ser visto que a eficiência total da luminária em questão varia entre 101,4 lm/W quando operando em 350 mA para aproximadamente 87 lm/W quando

operando em 700 mA. Esta variação representa um consumo extra de cerca de 35,8 W por luminária.

Com isso é importante encontrar a melhor relação do custo/benefício que está relacionada com a quantidade de LEDs. Segundo um estudo publicado pelo DOE, foram estimados valores relativos para os componentes das luminárias de LEDs, como visto na Figura 8.18.

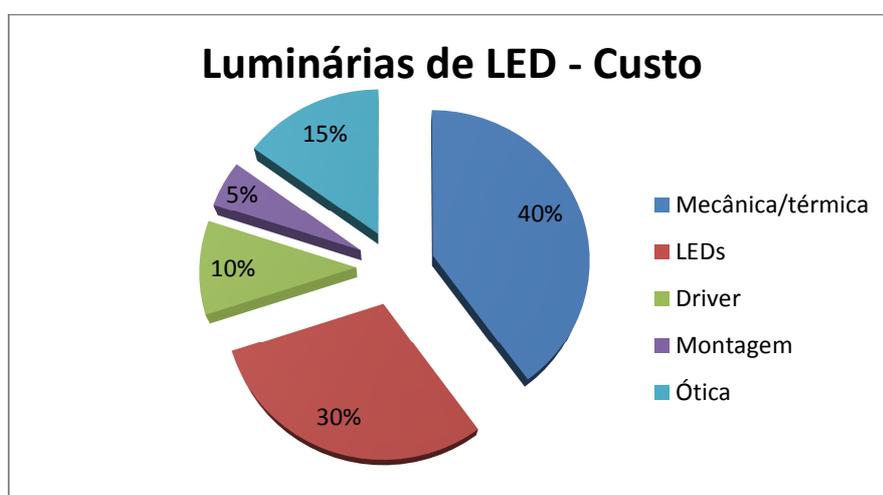


Figura 8.18 - Valores relativos das partes da luminárias de LED (Adaptado de: DOE, 2012)

Com base nestes dados pode-se estimar qual é a representatividade do custo de cada parte da luminária no conjunto completo, sendo que a parte mecânica da luminária que compreende o dissipador térmico e todo o sistema de sustentação, representa cerca de 40 % do seu custo total. O custo dos LEDs somado com o custo da parte ótica representam cerca de 45 %, e os outros 15 % são relativos aos gastos com os drivers e com a manufatura do produto.

Para realizar o estudo da quantidade ideal de LEDs, foi avaliado o tempo do retorno do investimento para cada configuração de corrente. Para determinação do custo por LED, foi realizada uma cotação de uma luminária de LED já existente no mercado similar à projetada neste trabalho, com a empresa Ilumatic. Sendo que o valor cotado para um volume de 1000 peças foi de R\$ 2079,00 (cotação no anexo B).

Com esta cotação e a relação de custo de cada parte da luminária e tendo em vista que a luminária possui 96 LEDs, pode-se dizer que o valor relativo por LED é de R\$ 9,74.

Considerando um mesmo corpo para a luminária, foram simuladas as três condições de corrente para os LEDs, 350 mA, 500 mA e 700 mA. Esta relação foi definida pelo tempo de retorno do investimento da luminária de LED quando comparada com o modelo VSAP. Como referência foi utilizada a mesma luminária para lâmpada VSAP das simulações fotométricas, modelo ILP-2525 também da empresa Ilumatic, cuja cotação para um pedido de 1000 peças, foi de R\$ 344,83 (cotação no anexo A).

Como se sabe, quanto maior for a corrente aplicada a cada LED, maior será seu fluxo luminoso, entretanto sua eficácia diminui. Outro ponto relevante é que com níveis mais elevados de corrente, o fator de depreciação do LED é mais intenso, fazendo com que seja necessário um fluxo luminoso inicial maior, conseqüentemente uma potência maior, conforme pode ser visto no Quadro 8.4 e Quadro 8.5.

Foi então calculado o retorno de investimento do uso de uma luminária de LED em substituição à luminária com lâmpada VSAP. Para tanto foi considerado um valor referência para consumo de energia elétrica de tarifação do tipo B4b (Iluminação Pública) da concessionária de energia RGE, cujo valor é de R\$ 0,239 por kWh (RGE, 2012).

O tempo para análise foi de 12 anos, sendo que foram estipulados períodos de manutenção de 4 em 4 anos, onde no caso do LED será feita somente a limpeza, e no caso das VSAP, além da limpeza será realizada a troca da lâmpada. Sendo assim, foi considerado que o custo de manutenção dos dois modelos de luminárias são equivalentes, no caso da luminária VSAP foi acrescido ao custo de manutenção o valor de R\$ 39,89 referente ao da lâmpada, que deverá ser trocada a cada 4 anos. Através destes dados foi criado o gráfico relativo apresentado na Figura 8.19 onde apresenta o tempo de retorno do investimento relacionado com o custo dos LEDs, operando em três níveis de corrente diferentes.

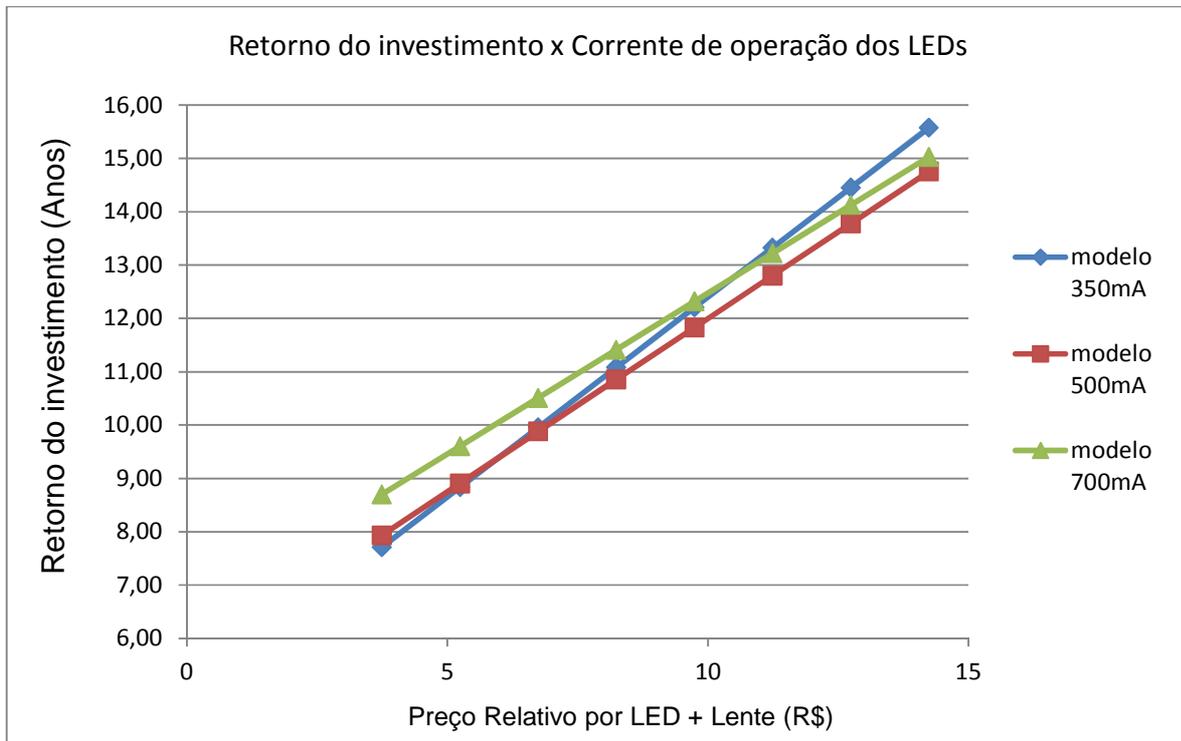


Figura 8.19 - Retorno do investimento x custo LED

Nota-se que à medida que o valor dos LEDs aumenta, torna-se mais viável o uso de correntes maiores, consequentemente o uso de uma menor quantidade de LEDs. Entretanto, com a redução do valor individual, torna-se mais vantajoso o uso de uma quantidade maior e menor corrente, o que permite uma melhor eficiência do sistema.

No cenário atual, onde preço por LED e parte ótica é de R\$ 9,74, a corrente que apresenta o mais curto retorno de investimento é de 500 mA. Com base nesta análise, esta foi a corrente de operação considerada para o protótipo, onde é possível atingir uma eficiência final de 93,7 lm/W, e uma potência total da luminária de aproximadamente 148 W conforme pode ser visto no Quadro 8.5.

8.8 Avaliação das Lentes

As lentes da luminária serão as responsáveis pela correta distribuição da luz na via em avaliação. Sendo que sua função é fundamental para o correto aproveitamento da luz emitida. É possível a fabricação de uma lente específica baseado na distribuição luminosa necessária. Entretanto como é um processo oneroso e complexo, para este trabalho foi optado pelo uso de lentes já disponíveis no mercado que apresentem uma distribuição próxima à definida para a via sob análise. Existem atualmente vários fabricantes no mundo que possuem lentes para uso com luminárias ILP, sendo algumas aqui citadas: Kathod, Fraen, Ledil, LEDlink, Brightlx. A seguir serão avaliados alguns modelos para verificação do mais adequado para a proposta de via em questão. Cabe lembrar que todos os casos foram simulados para a mesma via e para uma luminária com a mesma fonte luminosa.

8.8.1 Simulações com diferentes Lentes

Com o objetivo de encontrar uma lente que possa atender a curva definida na Figura 8.8 foram então avaliados 4 casos distintos, sendo que os modelos de lentes que apresentaram resultados mais próximos são apresentados a seguir:

Caso 1: Sem o uso de Lentes

A luminária pode ser construída sem a utilização de lentes, contudo neste caso a quantidade de fluxo luminoso dirigida para a via não é controlado fazendo com que o fluxo luminoso seja disperso em outras direções.

Quando não são utilizadas lentes a distribuição da luz é praticamente a mesma do que a distribuição natural dos LEDs. A curva de distribuição é apresentada na Figura 8.20.

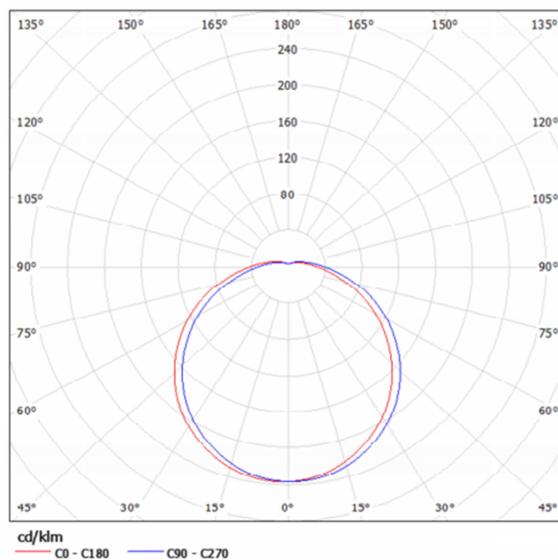


Figura 8.20 - Distribuição da luminária sem o uso de lentes

Esta curva gera uma distribuição na via conforme apresentado na Figura 8.21 e as curvas de iso-iluminância na Figura 8.22. Nota-se que há uma elevada concentração de luz em pontos específicos e na região entre os postes a luminosidade é reduzida.

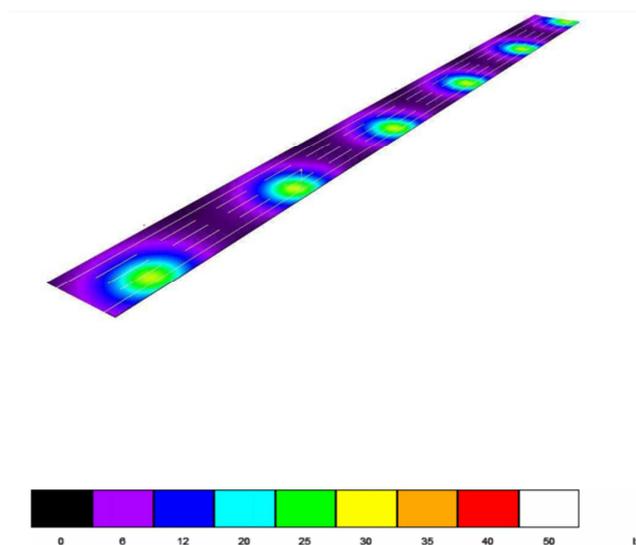


Figura 8.21 - Luminária sem lentes

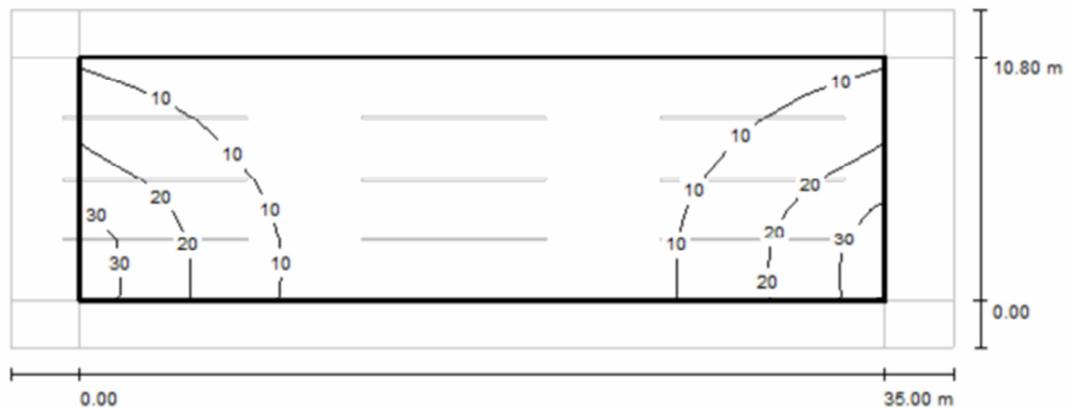


Figura 8.22 - Linhas de iso-iluminância Luminária sem lentes

Os dados obtidos são indicados na Tabela 8.3.

Tabela 8.3 - Valores simulados caso 1

Valores simulados - caso 1			
Emed (lux)	Emáx (lux)	Emin(lux)	Uo
11	32	2,5	0,23

Caso 2: Uso de lentes modelo A e modelo B juntas;

Neste caso foi realizada a adaptação de duas lentes diferentes, aqui denominadas como modelo A e modelo B, para encontrar uma distribuição com resultado próximo a distribuição planejada. Uma vez que a distância entre as lentes no interior da luminária é muito menor ($\ll 5$ vezes) que a distância entre a luminária e a via, pode-se considerar que o conjunto das lentes, mesmo que com distribuições luminosas diferentes, geram uma distribuição relativa única, como sendo uma única fonte luminosa.

Foram utilizados então, os dois tipos de lentes com as respectivas distribuições, conforme apresentado na Figura 8.23 e Figura 8.24.



Figura 8.23 - Lentes modelo a) - assimétrica e modelo b) - simétrica

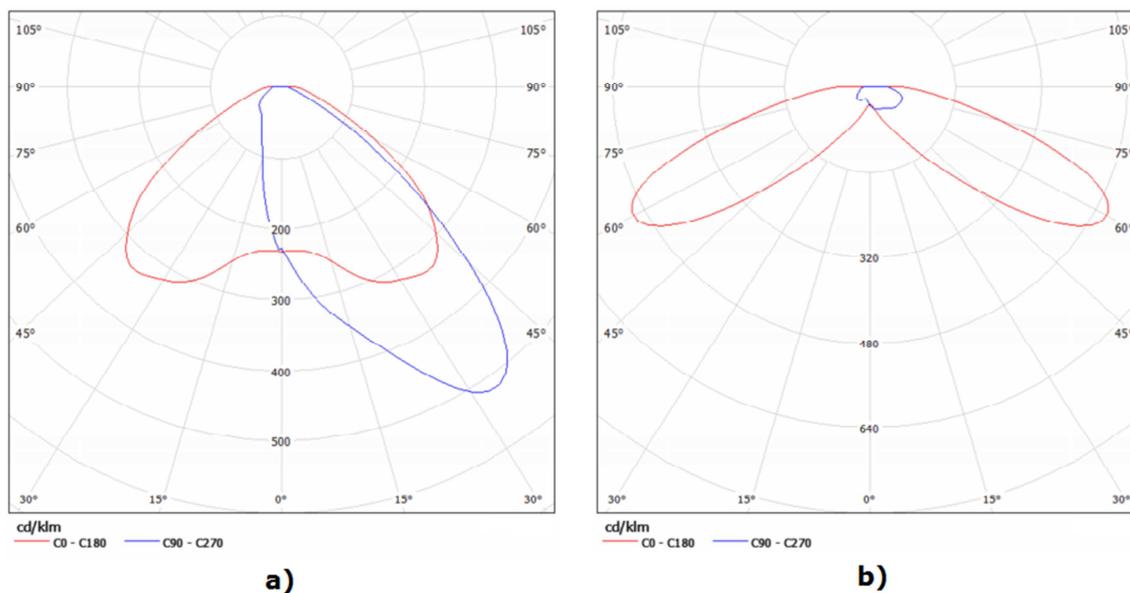


Figura 8.24 - Distribuição dos modelos: a) assimétrica b) simétrica.

Nota-se que a lente simétrica tem seu ponto de maior intensidade no sentido longitudinal ($0^\circ - 180^\circ$), no ângulo próximo a 60° , isto possibilita que a luz atinja pontos mais afastados do poste. Nesta lente a distribuição no sentido transversal é

praticamente desprezível. Já a lente assimétrica possui no sentido transversal (90° - 270°), seu ponto de maior intensidade próximo ao ângulo de 30° , e atua como complemento da lente simétrica para o espalhamento transversal. No sentido transversal, esta lente direciona a luz em somente um sentido, ou seja, a luz proveniente dos LEDs será espalhada somente para o lado da via, e assim não atingirá as casas.

Com o objetivo de aproximar a distribuição luminosa à curva ideal projetada em Figura 8.8 foi criada uma curva juntando os dois modelos A e B na proporção de 1:3, ou seja, 1 lente modelo A para cada 3 lentes do modelo B, sendo que a curva resultante é apresentada na Figura 8.25. Esta curva pode ser gerada por softwares específicos para projetos de lentes e luminárias, como por exemplo, o Software PHOTÓPIA da empresa LTI Optics (LTI Optics, 2012).

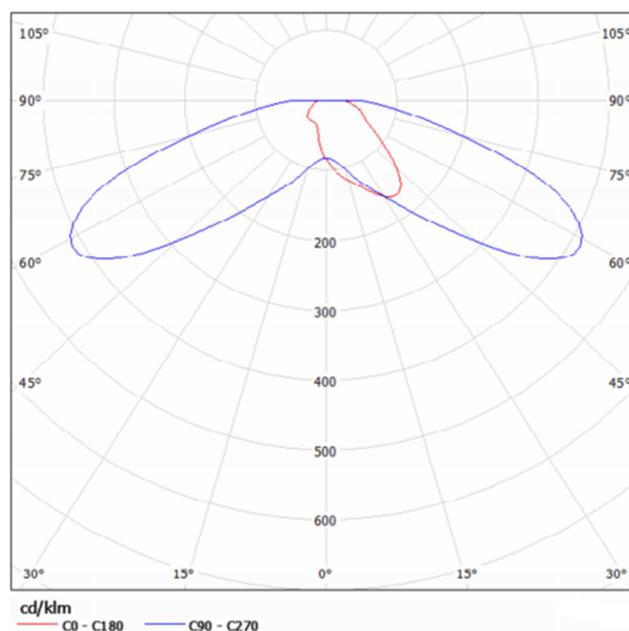


Figura 8.25 - Distribuição arranjo lentes modelo A e B na proporção de 1:3

Com este arranjo foi realizada a distribuição na mesma via sob análise e foi encontrada a distribuição conforme apresentada na Figura 8.26.

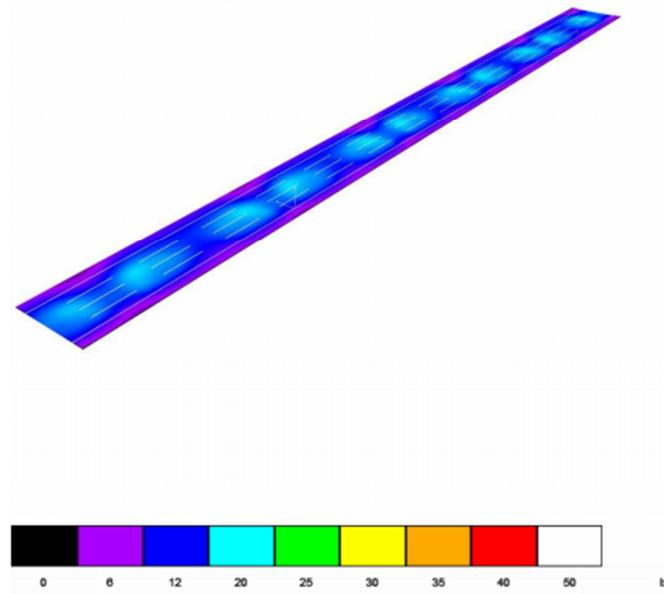


Figura 8.26 - Distribuição luminosa lentes A + B (proporção 1:3)

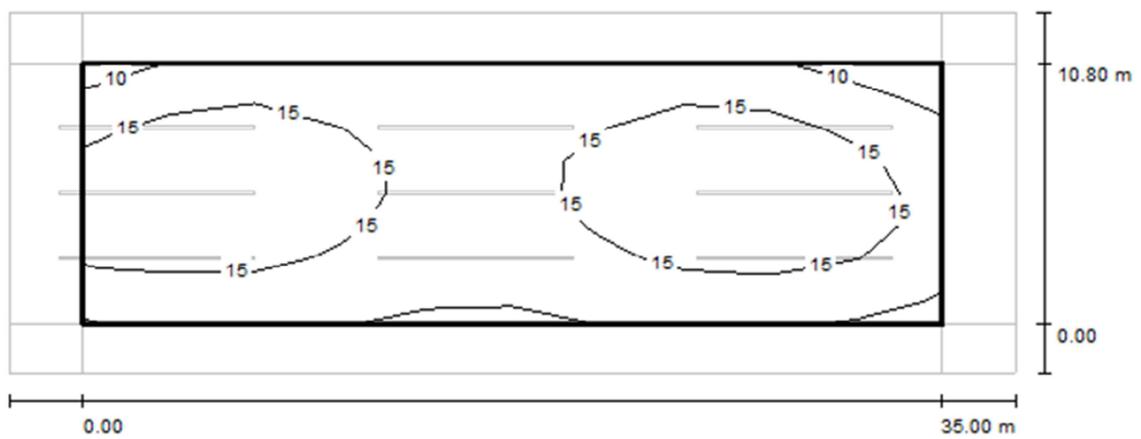


Figura 8.27 - Linhas de iso-iluminância lentes A + B (proporção 1:3)

Os dados obtidos são indicados na Tabela 8.4

Tabela 8.4 - Valores simulados caso 2

Valores simulados - caso 2			
Emed (lux)	Emáx (lux)	Emin(lux)	Uo
15	20	7,6	0,52

Caso 3: Uso de lentes do modelo C

Neste caso, foi utilizado um único bloco de lentes do modelo C, o qual é constituído de 4 lentes iguais. Em um projeto de uma luminária, onde vários LEDs são necessários, esta forma auxilia na montagem, pois ao invés da fixação de uma lente para cada LED, torna-se necessária a fixação de uma única lente para cada 4 LEDs.

Como um processo de montagem automático destas lentes seria bastante complexo, o fabricante sugere que sejam fixadas manualmente. Assim este conjunto poderia ser uma opção interessante. A Figura 8.28 ilustra a lente em questão.



Figura 8.28 - Lentes modelo C

A distribuição luminosa desta lente é apresentada na Figura 8.29.

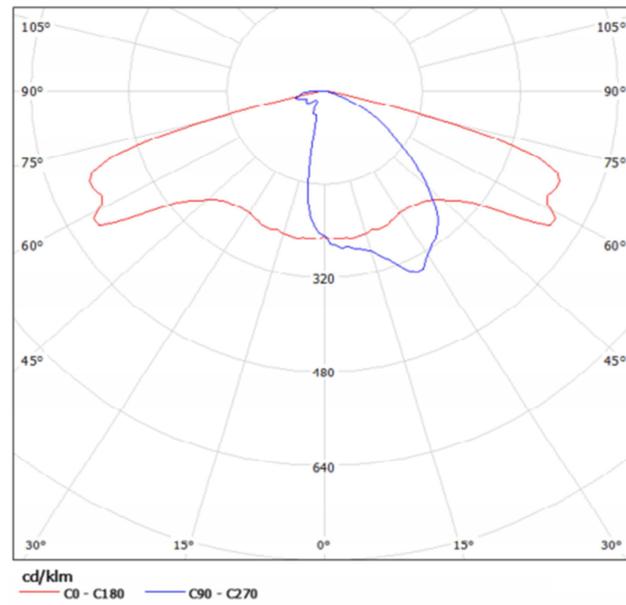


Figura 8.29 - Distribuição da lente do modelo C

Foi então realizada a simulação na mesma via em questão sendo que os resultados são apresentados na Figura 8.30 e na Figura 8.31.

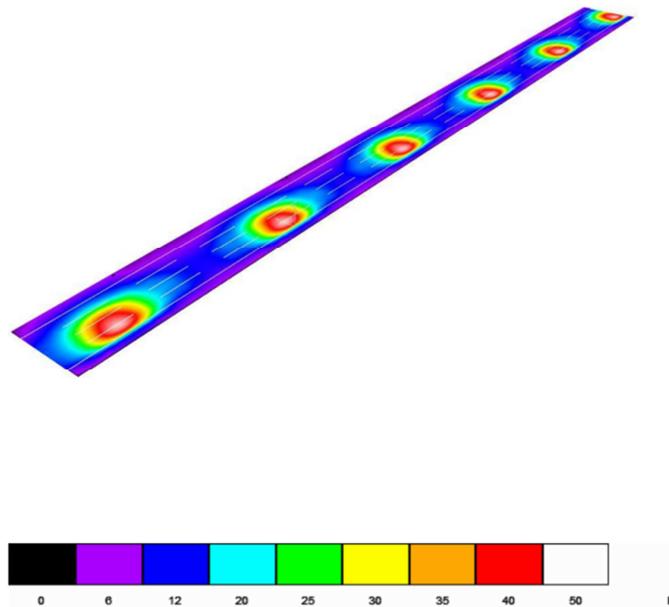


Figura 8.30 - Simulação distribuição Modelo C

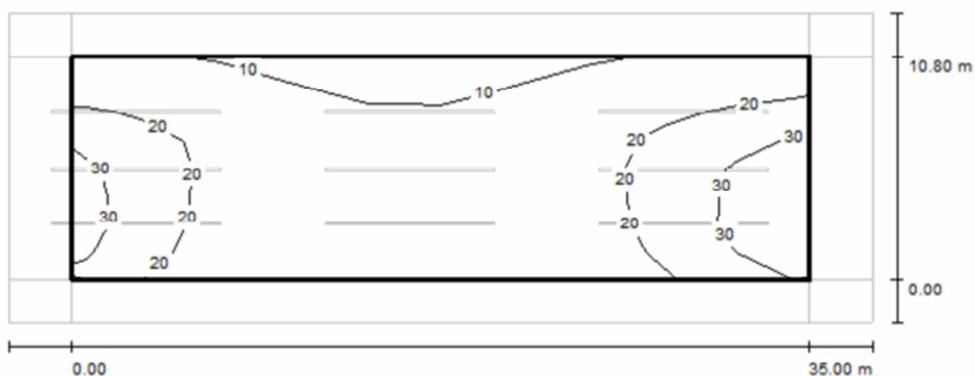


Figura 8.31- Linhas de iso-iluminância lentes modelo C

Os dados obtidos são indicados na Tabela 8.5

Tabela 8.5 - Valores simulados caso 3

Valores simulados - caso 3			
Emed (lux)	Emáx (lux)	Emin(lux)	Uo
18,0	37	9,6	0,54

Caso 4: Uso de lentes modelo D

Neste caso foi utilizada uma lente única de outro fabricante, denominada como tipo D. O desenho da lente em questão é apresentado na Figura 8.32.



Figura 8.32 - Lente modelo D

Sua distribuição luminosa característica é apresentada Figura 8.33. Para verificar a distribuição desta lente na via foi realizada a simulação fotométrica com a curva polar disponibilizada pelo fabricante, conhecida como arquivo "IES". O resultado é apresentado na Figura 8.34 e Figura 8.35.

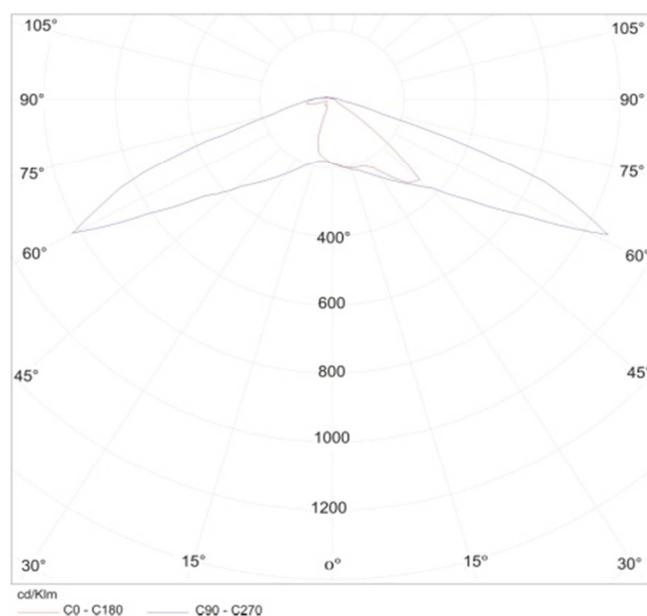


Figura 8.33 - Distribuição lente Modelo D.

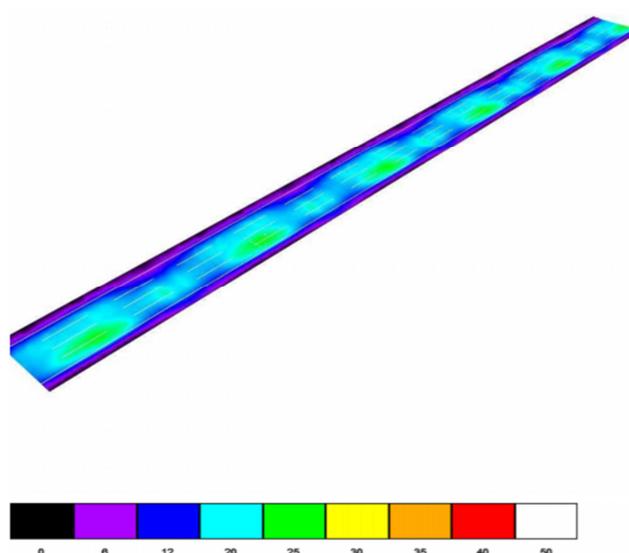


Figura 8.34 - Simulação distribuição Modelo D

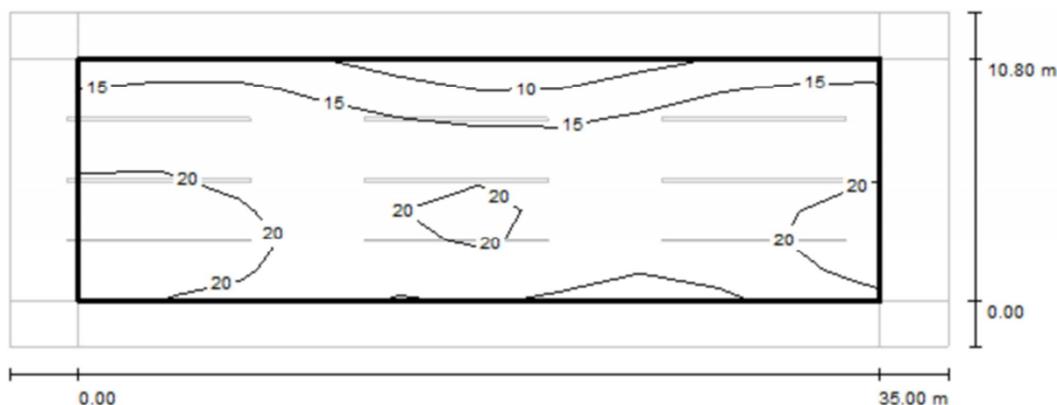


Figura 8.35 - Curvas de iso-iluminância lentes modelo D

Os dados específicos coletados desta simulação são apresentados na Tabela 8.6.

Tabela 8.6 - Valores simulados no caso 4

Valores simulados - caso 4			
Emed (lux)	Emáx (lux)	Emin (lux)	Uo
20	27	8,9	0,45

Com estes ensaios é possível comparar os resultados dos 4 casos, visto que realizadas as simulações considerando o mesmo valor de fluxo luminoso, e mesmo fator de manutenção, com o objetivo de definir qual a melhor lente a ser utilizada.

Como para o cálculo da quantidade de LEDs, o fator M/P foi considerado, reduzindo-se assim o fluxo luminoso a ser gerado pela luminária, aqui se pode reapplicá-lo no valor das iluminâncias, sendo que estes valores aumentarão na mesma proporção de 12 % ($M/P=1,12$). Com isso conforme pode ser visto na parte inferior do Quadro 8.6, o valor mínimo de iluminância de 20 lux é atingido para o caso 4, que utiliza a lente do tipo D.

Simulações das Diferentes opções de Lentes				
Caso	1	2	3	4
Modelo da lente	*	A+B	C	D
Fluxo Luminoso inicial (lm)	13868			
Fator de manutenção (Limpeza 4 anos)	0,72			
Fluxo luminoso efetivo (lm)	9986			
Simulações (M/F=1)				
Emed (lux)	11,0	15,0	18,0	20
Emáx (lux)	32,0	20,0	37,0	27
Emin(lux)	2,5	7,6	9,6	8,9
Uo	0,23	0,52	0,54	0,45
Simulações (M/F=1,12)				
Emed (lux)	12,3	16,8	20,2	22,4
Emáx (lux)	35,8	22,4	41,4	30,2
Emin(lux)	2,8	8,5	10,8	10
Uo	0,23	0,52	0,54	0,45

Quadro 8.6 - Ensaios simulados das lentes

Como as lentes não foram projetadas especialmente para esta aplicação, pode-se dizer que os valores foram satisfatórios. Entretanto, somente as lentes dos casos 3 e 4 atingiram o requisito mínimo, indicando que são as lentes que possuem o maior fator de utilização para a via proposta. Como a lente do caso 4 apresentou o maior valor, esta será a lente utilizada para a montagem do protótipo.

Por comparação, pode-se perceber que a distribuição da lente em questão, apresentada na Figura 8.33, é a mais parecida com a distribuição projetada teoricamente e apresentada na Figura 8.8.

8.9 Montagem da luminária

Conforme a avaliação anterior, a lente escolhida foi a lente do modelo D, simulada no caso 4. Utilizando os mesmos LEDs anteriores, considerando a corrente de 500 mA, o projeto da luminária é resumido pelo Quadro 8.7.

Dados de entrada	
Modelo LED :	REBEL ES (5650K)
Corrente LED (mA) :	500
Fluxo final mínimo da luminária (lm):	11183
Fator de manutenção ¹ (FM) :	0,72
Fluxo inicial da Luminária (lm):	15532
Fator de Visão M/F (%)	1,12
Fluxo inicial necessário (lm):	13868
Eficiência da Lente (%) :	91
Eficiência do Vidro (%) :	90
Fluxo LEDs (lm) :	16933
¹ Fator de manutenção para um período de 12 anos com limpeza a cada 4 anos. Considerando temperatura no ponto de soldagem de 70°C.	
Dados Projetados	
Corrente LED – If (mA):	500
Fluxo objetivo do conjunto de leds (lm):	16933
Fluxo nominal dos LED @700mA @25°C (lm) :	240
Temperatura do ponto de soldagem do LED (°C) :	70
Vf LED @ temp @ corrente(V):	2,78
Potência por Led (W):	1,39
Fluxo Lumin. Efetivo por led (lm):	177,2
Quantidade de LEDs (pç):	96
*Fluxo inicial da luminária já considerando as perdas das lentes e vidro de proteção.	
Características elétricas	
Corrente LED – If (mA)	500
Quantidade de LEDs necessária (pc):	96
Potência total de LEDs (W):	133,2
Eficiência do driver (%) :	90,0
Potência Final Driver (W):	148,0
Eficiência luminária (lm/W):	93,7

Quadro 8.7 - Cálculo quantidade de LEDs para protótipo

Nota-se que para atingir os 13868 lm, foram calculados 96 LEDs. Assim o protótipo foi montado com esta quantidade, sendo que para a alimentação dos LEDs foi utilizado um driver da marca Intral, que opera com 4 canais independentes de 500mA, modelo IES 4x500/150, o qual apresenta uma eficiência de 90 % (INTRAL, 2012).

O Quadro 8.7 mostra que a potência total calculada do sistema deverá ser de aproximadamente 148 W. O protótipo da luminária montada é apresentado na Figura 8.36. Esta luminária protótipo foi ensaiada no goniofotômetro sendo que a curva da distribuição luminosa coletada é representada na Figura 8.37.



Figura 8.36 - Protótipo da luminária montada

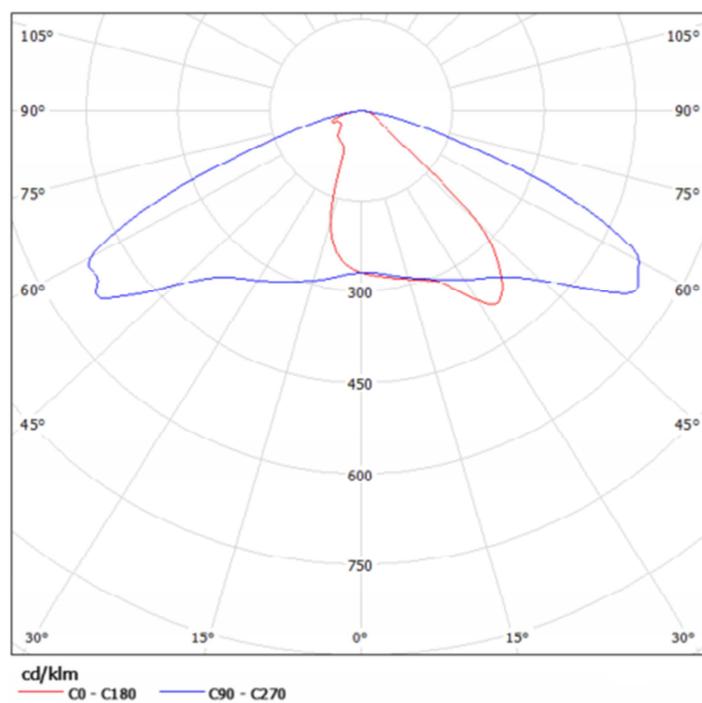


Figura 8.37 - Distribuição luminosa do protótipo com lente do fabricante D

Nota-se que a distribuição da luminária montada foi muito similar à distribuição utilizada para a simulação apresentada na Figura 8.33. Quanto ao fator de utilização, a Figura 8.38, apresenta a curva gerada pelo goniofotômetro.

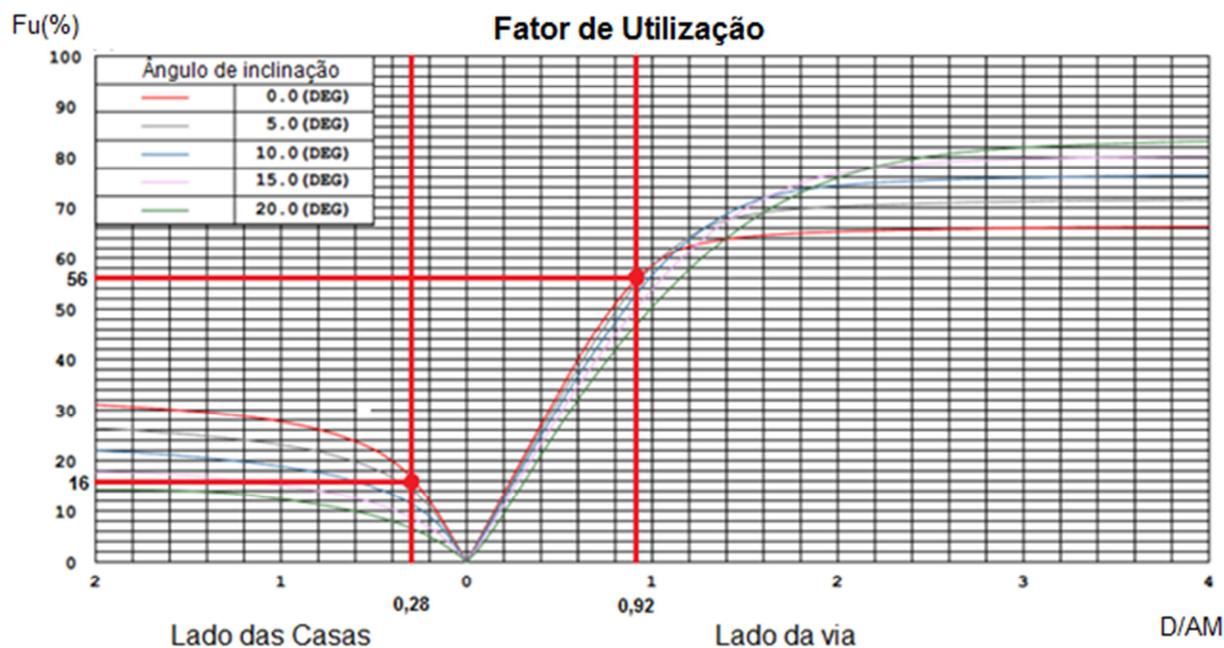


Figura 8.38 - Curva do fator de utilização do protótipo

Percebe-se que as medidas da abscissa deste gráfico são as medidas transversais relativas da via, que são dadas em razão da altura de montagem, tanto para o lado das casas quanto para o lado da via. Neste caso, a largura da via sendo analisada é de 10,8 metros, o avanço da luminária é de 2,5 metros e a altura de montagem é de 9 metros. Como a linha de referência passa pelo centro da luminária, isto indica que há 2,5 metros (0,28 D/AM) para o lado das casas e 8,3 metros (0,92 D/AM) para o lado da via.

Considerando estes dados e considerando o ângulo de inclinação da luminária de 0°, encontra-se pelo gráfico da Figura 8.38 um coeficiente de utilização de 0,56 para o lado da via e cerca de 0,16 para o lado das casas, isso gera um fator de utilização

total de 0,72, que é muito próximo ao fator de 0,70 considerado para o projeto. Os valores elétricos reais coletados no protótipo são apresentados na Tabela 8.7.

Tabela 8.7 - Dados ensaio do protótipo

Modelo	Potência (W)	Corrente (A)	Tensão (V)	Fator de potência	Fluxo luminoso	Eficiência
Protótipo	145,4	0,673	220 V	0,98	13975 lm	95,7 lm/W

A temperatura medida no ponto de soldagem dos LEDs (Tps) no protótipo ensaiado, após estabilização térmica, foi de 52 °C para uma temperatura ambiente de 25 °C. Isso explica porque o fluxo luminoso do protótipo ficou ligeiramente maior do que o projetado, visto que este havia sido projetado para uma temperatura Tps de 70 °C. Baseado no *datasheet* do LED, esta diferença de 18 °C no Tps representa um acréscimo de 0,9 % no fluxo final, valor este muito próximo à diferença de fluxo entre o projetado e o obtido no protótipo.

Cabe lembrar também que o fluxo luminoso dos LEDs considerado no projeto, é o fluxo mínimo que o fabricante garante para a condição sob análise. Isso quer dizer que os LEDs podem ter apresentado fluxos ligeiramente maiores do que o projetado, bem como as variações de rendimento da lente, driver e vidro também podem ter sido ligeiramente diferentes. De qualquer forma, o protótipo apresentou resultados muito próximos com os do projetado, o que justifica a metodologia utilizada.

A seguir, foi utilizada a curva fotométrica do protótipo para a simulação na via, com o objetivo de comprovar a obtenção dos requisitos mínimos de iluminância na via.

O resultado da simulação final é apresentado na Figura 8.39.

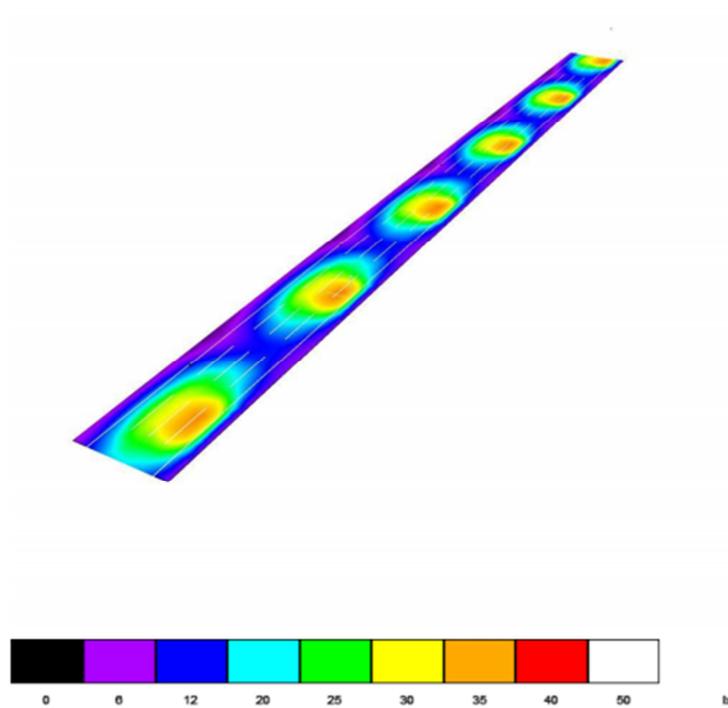


Figura 8.39 - Simulação do protótipo na via

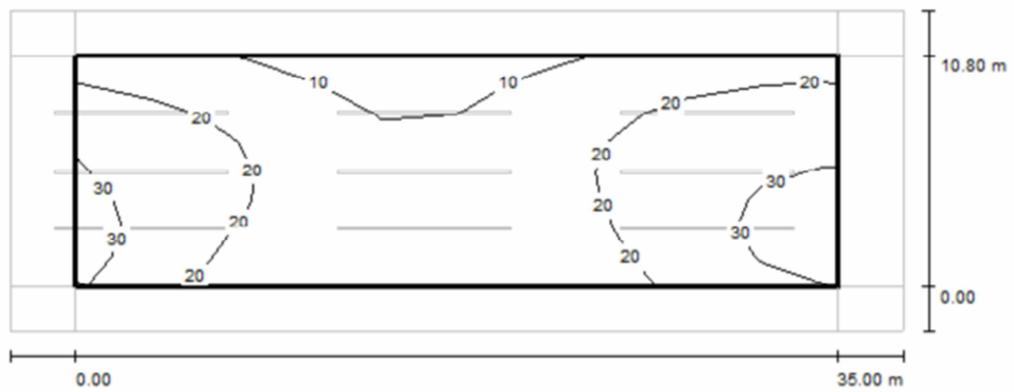


Figura 8.40 - Linhas de iso-iluminância protótipo

Os resultados coletados da simulação são os apresentados no Quadro 8.8.

Simulações do Protótipo	
Caso	1
Modelo da lente	Modelo D
Fluxo Luminoso inicial (lm)	13975
Fator de manutenção (Limpeza a cada 4 anos)	0,72
Fluxo luminoso efetivo final - 12 anos (lm)	10062
Simulações (M/P=1)	
Emed (lux)	19
Emáx (lux)	34
Emin(lux)	5,9
Uo	0,32
Simulações (M/P=1,12)	
Emed (lux)	21,3
Emáx (lux)	38,1
Emin(lux)	6,7
Uo	0,32

Quadro 8.8 - Dados fotométricos finais da simulação do protótipo

Com isso, comprova-se que o protótipo atinge os valores mínimos estipulados de iluminância quando o fator de visão mesópica (M/P) é considerado. O fator de uniformidade, embora tenha reduzido de 0,36 no modelo simulado, para 0,32 ainda se encontra acima do valor mínimo estipulado pela norma que é de 0,3.

8.10 Comparação dos resultados

Conforme a análise realizada no item 8.9, tem-se que a luminária de LED montada, com a potência de 145,4 W atingiu os níveis de iluminância e de uniformidade da via de acordo com a norma brasileira NBR 5101. Para obter um resultado similar utilizando lâmpadas de vapor de sódio, seriam necessários 278 W.

Além da redução no consumo de energia, no sistema proposto não seriam necessárias substituições das lâmpadas ou luminárias durante 12 anos, mas apenas uma limpeza periódica a cada 4 anos. Cabe lembrar que para a consideração do fator de manutenção das luminárias VSAP, também foi considerada a limpeza da luminária a

cada troca de lâmpada. Segue no Quadro 8.9 uma comparação entre o modelo de luminária com lâmpada VSAP e o protótipo desenvolvido.

Comparativo Luminária VSAP x Luminária LED		
Luminária	VSAP*	LED Protótipo
Potência da lâmpada/LEDs (W)	250	*
Potência Driver/Reator (W)	28	*
Potência total (W)	278	145,6
Análise do fluxo luminoso		
Fluxo luminoso lâmpada/LEDs (lm)	33200	16933**
Rendimento da luminária (%)	71%	82,5%**
Fluxo luminoso inicial (lm)	23572	13975
Fator M/F (%)	92%	112%
Fluxo luminoso efetivo (lm)	21686	15652
Fator de utilização	0,52	0,72
Fluxo luminoso efetivo dirigido para a via (lm)	11282	11269,4
Fator de manutenção	0,72	0,72
Fluxo luminoso final dirigido para a via (lm)	8123	8114
Relação lúmens efetivos na via/Watt (lm/W)	29,2	55,7
Análise da iluminância na Via		
Iluminância média	23,9	21,3
Iluminância máxima	66,2	38,1
Iluminância mínima	7,5	6,7
Fator de uniformidade	0,32	0,32
Análise do consumo		
Uso diário (h)	12	12
Consumo de energia anual (kWh)	1217,64	637,728
Custo da energia*** (R\$/kWh)	R\$ 0,24	R\$ 0,24
Gasto com energia anual (R\$)	R\$ 291,02	R\$ 152,42
* Lâmpada OSRAM NAV-T 250 SUPER 4Y + Luminária Ilumatic ILP2525 + Reator Intral RVSI 250W		
** Fluxo inicial e rendimento estimados pelos dados teóricos dos LEDs.		
***Tarifa B4b - Concessionária de Energia RGE		

Quadro 8.9 - Comparativo luminária VSAP x Protótipo da Luminária de LED

Nota-se pelos dados do Quadro 8.9 que os gastos com energia elétrica com a luminária de LED representam cerca de 52 %, em relação à luminária com lâmpada VSAP. A cotação dos produtos disponíveis no mercado mostra que o valor da luminária para VSAP é de R\$ 304,94 e o valor da lâmpada VSAP é de cerca de R\$ 39,89, o que totaliza R\$ 344,83. Considerando que ao longo dos 12 anos serão necessárias mais 2

lâmpadas, uma vez que o tempo médio de vida das lâmpadas VSAP é de 4 anos, tem-se um investimento total de R\$ 424,61.

No caso da Luminária de LED cotada, com potência de 156 W e 13.000 lm, portanto similar ao projeto realizado, foi orçado um preço de R\$ 2079,00.

A luminária de Sódio necessita de manutenção a cada 4 anos, sendo que necessita da troca da lâmpada e limpeza da luminária. No caso da luminária de LED, não é necessária a troca da luminária mas mantém-se a limpeza. Embora tenha um custo de manutenção menor é difícil determinar qual seria a diferença. Por isso para o cálculo do retorno de investimento será considerada somente a economia em energia elétrica. No caso da luminária de LED obtém-se uma redução anual de consumo de R\$ 138,60, considerando o custo da energia elétrica de R\$ 0,239/kWh, como definido na seção 1.4 para a tarifa do tipo B4b. Assim, o retorno do investimento direto considerando a diferença de investimento atual se daria em cerca de 11,9 anos.

Entretanto, como as luminárias de LED são produtos recentes, seus preços ainda são elevados. Segundo dados da publicação do DOE conforme Figura 8.41, mostra que em 3 anos o custo da luminária reduzirá para 66 % do custo atual, e em 2020, ou seja em 8 anos, o custo da luminária seria de 34 % do custo atual.

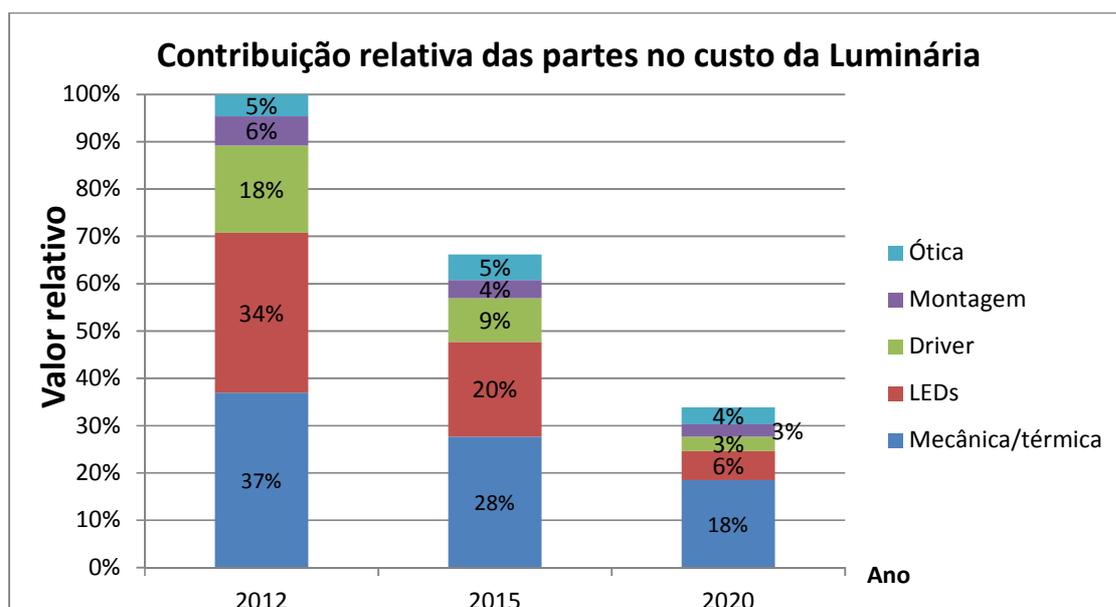


Figura 8.41 - Evolução do custos das luminárias de LED (Adaptado de DOE,2010)

A tendência do custo das luminárias VSAP é se manter, visto que esta já é uma tecnologia sólida e mostrou-se estável durante os últimos anos conforme pode ser visto na Figura 1.3. Desta forma, considerando o custo da luminária VSAP fixo, teríamos que em 2015 o retorno do investimento da utilização da luminária de LED se daria em cerca de 7 anos e em 2020 onde o custo reduziria para cerca de 34 % do atual e o tempo de retorno seria de apenas 3 anos.

Cabe lembrar que o custo orçado foi para uma quantidade relativamente pequena se comparado com a quantidade de pontos de ILP das grandes cidades. Assim, para um projeto de maior grandeza, o preço atual da luminária poderia ser reduzido e o retorno de investimento poderia se dar em períodos menores mesmo na atualidade, uma vez que o número de aplicações começa a aumentar. O custo de produção das luminárias, como o de qualquer produto industrializado, está inversamente relacionado com a quantidade produzida visto que o custo fixo da empresa para produção poucas unidades é praticamente o mesmo que para a produção de altas quantidades. Isso se aplica também a todos os materiais que constituem a luminária, assim com o aumento do volume os custos tendem a se reduzir.

Nota-se ainda que a economia foi avaliada somente na forma direta, entretanto como a redução de potência é na ordem de 52 % isto poderia trazer inúmeros benefícios de forma indireta, como por exemplo a redução dos investimentos em ampliação de usinas de energia elétrica e redes de distribuição.

CONCLUSÃO

A presente dissertação apresentou uma forma para definição do fluxo luminoso, bem como da distribuição luminosa e da quantidade de LEDs necessária para a aplicação destes em iluminação pública. Foi realizada uma revisão bibliográfica dos princípios básicos da luz, as características da cor emitida como também a avaliação da distribuição luminosa da luz e como se comporta quando é refletida ou refratada. Também foram explorados alguns conceitos para a confecção de luminárias de ILP, as classificações das luminárias, os índices de proteção contra penetração de sujeira e os fatores que influenciam nas perdas luminosas ao longo de sua vida dentre outros. Este estudo foi apresentado tanto para os modelos convencionais com lâmpadas VSAP, como para o modelo proposto construído com LEDs.

Foi avaliado como ocorre a depreciação luminosa das lâmpadas VSAP, e a depreciação da luminária considerando diferentes modelos de lâmpadas e aplicações em ambientes com níveis de poluição, uma vez que este é um fator que influencia significativamente no fator de manutenção da luminária. O objetivo foi de observar o comportamento da depreciação do fluxo luminoso em cada aplicação ao longo da vida da luminária.

O trabalho também aborda os requisitos mínimos para ILP definidos por norma a serem garantidos no Brasil. Com base nisso, foi apresentada uma metodologia para a aquisição da curva de distribuição luminosa ideal da luminária. A metodologia trata do equacionamento para a definição da intensidade luminosa necessária em cada direção, sendo possível com isso, representar graficamente a curva de distribuição luminosa ideal da luminária.

Com os valores das intensidades luminosas em cada direção definidos, foi possível definir o fluxo luminoso necessário. Com o auxílio do software MATHCAD, foi gerada a curva polar ideal com base nos dados projetados. A partir desta curva foram analisadas diferentes opções de lentes no mercado, que apresentassem um comportamento similar. O objetivo foi permitir a confecção do protótipo que reproduzisse os dados do estudo, sem a necessidade do desenvolvimento de uma lente

especial. Esta curva polar de distribuição de intensidade luminosa foi gerada a partir das características físicas da via escolhida, sendo que neste caso foi escolhida uma via do tipo V2, que corresponde a uma via com espaçamento entre postes de 35 metros, altura de montagem da luminária de 9 metros, e iluminância média mínima na via de 20 lux, de acordo com a norma brasileira NBR 5101. Para tal aplicação foi considerada uma vida útil para o sistema de 12 anos. Como a limpeza da luminária tem forte impacto no fator de manutenção e com o objetivo de alcançar o melhor aproveitamento possível foi definido que a luminária de LED deve ser limpa a cada 4 anos, período este que é similar ao de manutenção das luminárias VSAP tradicionais, visto que as lâmpadas VSAP começam a apresentar altos índices de mortalidade após este período.

Desta forma, para o projeto da luminária de LED foi encontrado, um fator de manutenção 0,72. Com esse dado foi possível determinar que seu fluxo luminoso inicial deverá ser de 13868 lm. Desta forma mesmo com a depreciação ao final do prazo projetado a luminária ainda irá atender os requisitos especificados pela norma em questão.

A fim de definir a quantidade de LEDs necessária foi realizada a avaliação dos LEDs em três diferentes níveis de corrente distintos com o objetivo de verificar a melhor relação entre a quantidade de LEDs, a eficiência do sistema com o menor tempo de retorno do investimento.

A análise mostrou que para atingir o fluxo proposto seriam necessários 126 LEDs se operando em 350 mA, 96 LEDs operando em 500mA ou 76 LEDs operando em 700 mA. Neste caso avaliando o custo por LED, níveis de depreciação e os valores típicos de custo da energia elétrica, constatou-se que no atual cenário a aplicação com retorno de investimento mais rápido é com a utilização de 96 LEDs operando com 500 mA. Nota-se, entretanto, que a medida que o custo dos LEDs reduzir, torna-se mais vantajoso optar por níveis de corrente maiores e uma menor quantidade de LEDs.

Foi então montado o protótipo que apresentou um fluxo luminoso de 13975 lm, praticamente o mesmo do projeto, e uma potência total de 145,6 W. Com este fluxo e com a lente escolhida os níveis de iluminância mínima da via e fator de uniformidade foram atingidos de forma satisfatória, conforme pôde ser visto nas simulações realizadas.

Sabe-se que para esta mesma configuração de via, são em geral utilizadas lâmpadas VSAP de 250 W sendo que, juntamente com um reator e luminária específicos, também atendem os requisitos fotométricos da norma em questão, como também comprovado pelas simulações. Entretanto se a lâmpada VSAP escolhida apresentar uma depreciação mais acentuada, os níveis mínimos de luminosidade não são garantidos. O consumo de energia elétrica total, com a solução tradicional é de 278 W por ponto.

Com isso conclui-se que para a mesma aplicação, quando utiliza-se a luminária de LED pode-se garantir os níveis de luminosidade exigidos pela norma, com um consumo de 52% do normalmente utilizado pela solução com luminárias de ILP com lâmpadas VSAP. Assim o consumo de energia elétrica gasto com as luminárias de ILP pode reduzir consideravelmente, gerando uma economia para as prefeituras e consequentemente para a população.

Por fim, embora ainda não reconhecido por muitas especificações de ILP a coloração da luz com temperatura de cor correlata na faixa mais fria, em torno de 5650K, ainda gera um ganho extra de luminosidade no ambiente de cerca de 12 %, devido à maior sensibilidade do olho humano para esta temperatura de cor quando na condição mesópica, ou seja visão características de ambientes com baixa luminosidade, conforme já estudado e avaliado pela CIE. Como esta condição não é ainda reconhecida por norma, o projeto foi realizado para garantir os limites da norma NBR 5101, desconsiderando este ganho extra.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABILUX. **3ª Reunião do Grupo de Trabalho sobre Lâmpadas Mercuriais da Câmara Técnica do CONAMA - Dados Técnicos de Lâmpadas contendo Mercúrio – 2001 – Associação Brasileira da Indústria de Iluminação - Brasília, DF, disponível em: <<http://www.mma.gov.br/conama/processo.cfm?processo=02000.001522/2001-43>>.**

Acesso em: março de 2011.

_____. disponível em: <<http://www.abilux.com.br/noticias83.asp>>. Acesso em 12 de julho de 2011.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15129:2004, Luminárias para Iluminação Pública – Requisitos Particulares**, ABNT, Agosto de 2004.

_____. **NBR 5101- Iluminação Pública**, Fevereiro de 2012.

_____. **NBR 5461 – Iluminação – Terminologia**, Dezembro de 1991.

_____. **NBR IEC 60598-1:2010 – Luminárias: Parte1: Requisitos Gerais e Ensaios**, 2010

_____. ABNT, disponível em: <<http://www.abnt.org.br>>. Acesso em 12 de outubro de 2012.

AGÊNCIA CAMARA DE NOTÍCIAS. **Norma da Aneel sobre iluminação pública prejudica municípios, diz confederação**, disponível em: <<http://www2.camara.gov.br/agencia/noticias/CIDADES/197990-NORMA-DA-ANEEL-SOBRE-ILUMINACAO-PUBLICA-PREJUDICA-MUNICIPIOS,-DIZ-CONFEDERACAO.html>>. Acesso em: Setembro de 2012.

ANEEL. **RESOLUÇÃO N.º 456, DE 29 DE NOVEMBRO DE 2000**, disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/cedoc/res2000456.pdf>>. Acesso em: 02 de julho de 2011.

ASSIST. **LED Life for General Lighting: Recommendations for Definition and Specifications of Useful Life for Light-emitting Diode Light Sources**, Volume 1, Issue 7, April, 2006. Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/ASSIST-LEDLife-revised2007.pdf>>. Acesso em: Julho de 2012.

_____. **Minimizing Flicker from SSL Systems**, Disponível em: <<http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/flicker.asp>>. Acesso em: Julho de 2012.

_____. **Outdoor Lighting: Visual Efficacy**, Volume 6, Issue 2, Janeiro de 2009

_____. **Recommendations for Evaluating Parking Lot Luminaries**, Volume 7, Issue 3, Janeiro de 2010.

BERMAN, S. **The Coming Revolution in Lighting Practice**, [1995?] Disponível em: <<http://www.ecofitlighting.com/files/Photopic%20vs%20Scotopic%20technical%20paper.pdf>>. Acesso em: 09 de novembro de 2011.

BURINI JUNIOR, E.C.; et al. **Iluminação Pública no século XXI**, VI Workshop de Pós-Graduação e Pesquisa do Centro Paula Souza, São Paulo, 2011

CEB, **Luminárias para Iluminação Pública CEB - Especificação Detalhada de Materiais - NTD 3.38**, Outubro de 2007.

CEMIG, **Especificação Técnica Luminárias para Iluminação Pública - ND 2.6**, Data: 01 abril de 2008.

CIE. Commission internationale E`Claire **CIE-140: Technical Report - Road Light Calculations**, Rev. 2, Dezembro 2006.

_____. **CIE 154:2003 The Maintenance of Outdoor Lighting Systems**, Janeiro de 2003.

_____. **CIE 191:2010 Recommended System for Mesopic Photometry Based on Visual Performance**. Setembro de 2010.

CEIP, **Especificação Técnica Luminárias para Iluminação Pública**, CEIP ESP n° 02 data: 13 de agosto de 2007. Disponível em: <<http://www.navirai.ms.gov.br/files/ANEXO%20CEIP%20ESPECIFICA%C3%87%C3%83O%20TECNICA%20DOS%20MATERIAIS%20EL%C3%89TRICOS.pdf>>. Acesso em: 23 de agosto de 2012.

CITY OF SAN JOSE. **Public Street lighting Design guide**, fevereiro de 2011, Disponível em: < <http://www.sanjoseca.gov/DocumentCenter/Home/View/242>>. Acesso em: 10 de junho de 2011.

CHROMPACK. **Luxímetros analógicos e Digitais**, disponível em: <http://www.chrompack.net/index.php?page=luximetros_des>. Acesso em: 10 de agosto de 2012

COPEL. **Manual de Iluminação Pública**, Órgão Emissor: Copel Distribuição, SED, DNGO, VNOT, Fevereiro de 2012 Disponível em: <[http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/F5F8DB1E97503339032574F1005C8FF9/\\$FILE/MANUAL_IlluminacaoPublica.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/pagcopel2.nsf/0/F5F8DB1E97503339032574F1005C8FF9/$FILE/MANUAL_IlluminacaoPublica.pdf)>. Acesso em: 24 de março de 2012.

COSTA, G. J. **Iluminação Econômica**. Porto Alegre: EDIPUCRS. 2004.

CPFL, **Especificação Técnica Iluminação Pública - Luminária Integrada**, documento Nº 2807 Versão 2.2, Fevereiro de 2008.

CREE. **Datasheet LED XT-E**, Disponível em: <<http://www.cree.com/led-components-and-modules/products/xlamp/discrete-directional/xlamp-xte-white>>. acesso em: 10 de agosto de 2012a.

_____. **Thermal management, application note CLD AP 05 Rev.2 - 2010** Disponível em: <<http://www.cree.com/products/pdf/XLampThermalManagement.pdf>>. acesso em 23 de julho de 2011

_____. web site do fabricante, disponível em: <<http://www.cree.com>>. Acesso em 10 de junho de 2012b.

DALLA COSTA, M. A. **Compensación de resonancias acústicas en lámparas de descarga en halogenuros metálicos por médio de onda cuadrada de baja frecuencia: Caracterización de lámparas y propuesta de nuevas topologías de alimentación**. Gijón, 2008. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Universidad de Oviedo.

DAHAN, W.; ANGELO, B. **Practical LED Light Measurement (Gigahertz-Optik)**, disponível em: <http://www.gigahertz-optik.de/files/lpr_16_gigahertz_online.pdf>. Acesso em 10 de agosto de 2012.

DOE. **Outdoor Lighting with LEDs: City of Oakland**, CA Street Lighting Report Brief PNNL-SA-60356, May 2008.

_____. **Solid-State Lighting Research and Development: Manufacturing Roadmap**, August of 2012, disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/ssl_manuf-roadmap_august2012.pdf>. Acesso em: 10 de novembro de 2012.

DUMS, J. F. **Reator eletrônico de único estágio e elevado fator de potência, baseado na topologia “Charge-Pump Voltage Source” para lâmpadas de vapor de**

sódio de alta pressão. Florianópolis, 2005. 177f. Tese de Mestrado em Energia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina.

ELETROBRÁS. **Iluminação Pública no Brasil.** disponível em: <<http://www.eletronbras.gov.br/elb/procel>>. Acesso em 13 de junho de 2011.

ENERGYSTAR. **Energy Star TM-21 calculator,** disponível em: <<http://www.energystar.gov/TM-21calculator>>. Acesso em: 20 de junho de 2011.

FARRINGTON, D.P.; WELSH B. C. **Effects of improved street lighting on crime: a systematic review, Home Office Research,** Development and Statistics Directorate, August 2002.

FENG, Z.; LUO, Y.; HAN, Y. **"Design of LED freeform optical system for road lighting with high luminance/illuminance ratio"** , October 2010 / Vol. 18, No. 21 / OPTICS EXPRESS

FRAYTAG, J.; et al. **Lighting Systems Energy Efficiency based on Different Human Visual Conditions,** Federal University of Santa Maria – UFSM -Group of Intelligence in Lighting – GEDRE , INDUSCON 2010

FRÓES DA SILVA, L.L. **Iluminação Pública no Brasil: Aspectos Energéticos e Institucionais.** Dissertação - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2006.

GE. GENERAL ELETRIC. **Guia de consulta técnica.** Descarga de alta intensidade. 2002.

_____. **datasheet Luminária GE LED Area Lighter.** disponível em: <www.gelighting.com/eu>. Acesso em junho de 2012a.

_____. **HID lamps,** disponível em <http://www.gelighting.com/au/lighting_applications/downloads/ps_lucalox.pdf>. Acesso em agosto de 2012b.

GUARDIAN. **Especificação técnica do vidro float incolor**, Guardian Brasil, a Ciência do Vidro, 27 de junho de 2011.

HARGROVES, R.A. **Road Lighting**, *IEE PROCEEDINGS*, Vol. 130, Pt. A, No. 8, NOVEMBER 1983

HEP. **Website da empresa HEP**. Disponível em: <<http://www.hepgroup.com>>. Acesso em: 20 de agosto de 2012.

HOOF,V.V.; VANHOOYDONCK, L.; VERCALSTEREN, A.; **Study for the European Commission DGTREN unit D3 - Final Report Lot 9: Public street lighting**, January of 2007.

IES. **The Illuminating Engineering Society of North America**. Disponível em: <<http://www.ies.org>>. Acesso em: 20 de julho de 2012.

_____. **IES LM 79-08 – Electrical and Photometrical Measurements of Solid State Lighting Products**, New York, 2008a.

_____. **IES LM 80-08 - Approved Method for Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources**, New York, 2008b.

_____. **IES TM-21-11 - Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources**, New York, 2011.

_____. **IES TM-15-07 - Luminaire Classification System for Outdoor Luminaries**, New York, 2007

_____. **IES LM 75-01 - Goniophotometer Types and Photometric Coordinates**, 2001

_____. **Lighting Handbook, Reference and Application**, ninth edition, 2000

_____. **Roadway Lighting RP-8-00, American National Standard Practice for Roadway Lighting**, junho de 2000.

ILUMATIC. **Catálogo técnico Luminária ILP 2525 -250W**, agosto de 2012

INTRAL. **Catálogo técnico driver IES 4x500/150**, Julho de 2012.

_____. **Catálogo geral de produtos INTRAL**, abril de 2012a.

ITAIPU. Website da empresa. Disponível em: <http://www.itaipu.gov.br/energia/producao-ano-ano>. Acesso em: 04 de julho de 2011.

JOSEFOWICZ, J.; DEBBIE, H. **Vision & Exterior Lighting: Shining Some Light on Scotopic & Photopic Lumens in Roadway Conditions**, Novembro de 2008.

KAUFFMAN, R. **Calculating Light Loss Factors for LED Street Lighting Systems**, 2011 Southeast region Workshop, Tampa-Florida DOE 2011. Disponível em: http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2011msslsc_kauffman_lightloss.pdf. Acesso em: 13 de março de 2012.

KONICA MINOLTA. **Measurement Fundamentals**. Disponível em: <http://www.konicaminolta.com>. Acesso em: 22 de agosto de 2012.

LEWIN, I. **Lamp Color and Visibility in Outdoor Lighting Design, Lighting Sciences Inc.**, Dezembro 1999. Disponível em : <http://www.usd.edu/~schieber/materials/lewin-ctida.pdf>. Acesso em: 13 de dezembro de 2011.

LICHT. *Licht Wissen 03 – Roads, Paths and Squares*, Disponível em: <http://www.licht.de/fileadmin/shop-downloads/lichtwissen03_road_paths.pdf>. Acesso em: 23 de agosto de 2011.

LITTELFUSE, *PLED Open LED Protectors*, Agosto de 2012. Disponível em: <http://www.littelfuse.com/products/led-protectors/led-protector/pled-5-qfn/~media/Files/Littelfuse/Technical%20Resources/Documents/Data%20Sheets/Littelfuse_LED_Protector_PLED5_QFN_Datasheet.pdf>. Acesso em: 10 de novembro de 2012.

LTI Optics. Software Photópia ,Website da empresa. Disponível em: <<http://www.ltioptics.com>>. Acesso em: 23 de agosto de 2012.

LUGINBUHL,C.B.; WALKER, C.E.; WAINSCOAT, R.J. *Lighting and Astronomy*, American Institute of Physics, 2009. Disponível em: <http://www.darkskiesawareness.org/files/PTarticle_Lighting&Astronomy.pdf>. Acesso em: 12 de novembro de 2011.

LUMIÈRE. *Uso de leds na iluminação pública*, Por: Heitor Scalabrini Costa e Silvio Diniz. Disponível em: <http://www.jornaldainstalacao.com.br/img/artigos/artigo_agosto>. Acesso em: agosto de 2012.

LUMILEDS. Website da empresa. Disponível em: <<http://www.philipslumileds.com>>. Acesso em: 12 de julho de 2011

_____. *Technical Datasheet DS61*, Luxeon Rebel ES, 2011b

_____. *Datasheet LED Luxeon R*. Disponível em <<http://www.philipslumileds.com/products/luxeon-r>>. Acesso em: 20 de agosto de 2012.

_____. *Evaluating the Lifetime Behavior of LED Systems*, maio de 2004. Disponível em: <<http://www.philipslumileds.com/uploads/167/WP15-pdf>>. Acesso em: 12 de agosto de 2012.

MARCHESAN, T. B. **Integração de conversores estáticos aplicados a sistemas de iluminação pública**, Santa Maria, 2007. Tese de Doutorado em Energia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria.

MASAKI O.; YOSHIHARU C. **Street Lighting with LED Light Sources**, AN - OSRAM, January of 2009.

MENTOR. Website da empresa. Disponível em <<http://www.mentor.com>>. Acesso em: 15 de junho de 2012.

MORANTE, P. **Mesopic Street Lighting Demonstration and Evaluation Final Report**, LRC -Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, New York, Janeiro de 2008.

NELPAG. **Environmental e Biological consequences**, Disponível em: <<http://nelpag.harvee.org/bio-effects>>. Acesso em 07 de julho de 2011.

OSRAM. **High-pressure sodium lamps Technical Information**. Disponível em: <http://www.osram.fr/global/pdf/Professional/General_Lighting/High_pressure_discharge_lamps/107T001GB.pdf>. Acesso em: 23 de agosto de 2012a.

_____. **Lâmpadas de Descarga**, disponível em: <<http://www.osram.com.br>>. Acesso em: 12 de abril de 2012b.

PERIN, A. J.; et al. **Design Of an Electronic Driver For LEDs**. In: 9^o Brazilian Power Electronics conference, 2007

PHILIPS. **Manual de Iluminação**. Eindhoven, Holanda: Philips Lighting Division, 1986.

_____. **Catálogo Lâmpadas SON 250W**, disponível em:
<http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/323174/son_323174_ffs_brp.pdf>. Acesso em:
23 de julho de 2012.

_____. **Datasheet Luminária Speed Star**, Disponível em:
<http://download.p4c.philips.com/l4bt/3/330540/speedstar_bgp321_330540_ffs_aen.pdf
>. Acesso em: 23 de junho de 2012.

PHILIPS, HADCO. **Information Brief – Relative and Absolute Photometry, Rev.3**,
Maio de 2011, disponível em:
<[http://www.hadco.com/Hadco/Upload/Content/downloads/techpaper/Philips_Hadco-
information_Brief_Absolute_And_Relative_Photometry.pdf](http://www.hadco.com/Hadco/Upload/Content/downloads/techpaper/Philips_Hadco-information_Brief_Absolute_And_Relative_Photometry.pdf)>. Acesso em: 19 de maio de
2012.

PROCEL. **RELUZ: manual de instruções** – Ed. Atual. – Rio de Janeiro :
ELETROBRÁS, 2004

PUC-RIO. **Teoria Eletromagnética da Polarização da Luz**, Disponível em:
<http://www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/3955/3955_3.PDF>. Acesso em 10 de março
de 2013.

RICHMAN, E. **Understanding IES LM-79 & IES LM-80**, Pacific Northwest National
Laboratory, maio 2009. Disponível em:
<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lightfair8_richman-ies.pdf>.
Acesso em : 12 de abril de 2012

RGE, **página da internet da empresa Rio Grande Energia**., Disponível em:
<[http://www.rge-rs.com.br/ServiccedilosOnline/Tarifas/tabid/75/language/en-
US/Default.aspx](http://www.rge-rs.com.br/ServiccedilosOnline/Tarifas/tabid/75/language/en-US/Default.aspx)>. Acesso em: 12 de dezembro de 2012.

RODRIGUES, C.R.B.S.; et al. **Um Estudo Comparativo de Sistemas de Iluminação Pública: Estado Sólido e Lâmpadas de Vapor de Sódio em Alta Pressão**, INDUSCON, 2010 9th IEEE/IAS International conference.

RODRIGUES, C.R.B.S.; et al. **Emprego de LEDs como Alternativa para sistemas de Iluminação Pública**, Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nimo/files/2012/06/nimo-ufjf-mai2012-red.pdf>>. Acesso em: 12 de agosto de 2012.

RORIZ, M.; SANTOS, J.C.P.; **Influência do ângulo de incidência na transmitância de luz natural através de materiais transparentes**, Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, Porto Alegre, 2007.

RYER, A. **Light Measurement Handbook**, International Light Inc. 1998

SALES, R.P. **LED, O NOVO PARADIGMA DA ILUMINAÇÃO PÚBLICA**, Dissertação de mestrado, LACTEC, Paraná

SANDERS, A.; SCOTT, A. **Review of Luminaire Maintenance Factors Report**, 2008

SCHREDER. **Datasheet Luminária Piano**, disponível em: <<http://www.schreder.com/SiteCollectionDocuments/Products/PianoMini/PIANO-Mini-English-Brochure-V1.pdf>>. Acesso em: junho de 2012.

SCHREUDER, D. **Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception**, Springer, 2008.

SCHUBERT, E. F. **Light-Emitting Diodes**, second edition, Cambridge, 2006

SKAVRONECK, S.; STENSTRUP, A. **Mercury: In Your Community and the environment**, October 1998.

SOLIDWORKS, **Website da empresa**, disponível em: <<http://www.solidworks.com>> Acessado em: 10 de junho de 2012.

TEEM, *Technical Report: Suitability of LED for Road Lighting in Malaysia*, Ed.1, Fevereiro de 2012

TICHELEN, P. Van, GEERKEN, T.;JASEN, B.;BOSCH, M. V.; **Final Report Lot 9: Public street lighting.** Disponível em: <<http://www.eup4light.net/assets/pdf/files/Final/VITOEuPStreetLightingFinal.pdf>>. Acesso em: 10 de junho de 2011.

VISERA, **LED Package,** disponível em: <http://www.viseratech.com/html/English/VisEra_LED_Package_Technology.htm>. Acesso em: 05 de dezembro de 2012.

YI, D.;et al. **Freeform LED lens for uniform illumination**, OPTICS EXPRESS, Vol. 16, No. 17 / Aug. 2008. Disponível em: <<http://www.opticsinfobase.org/abstract.cfm?uri=oe-16-17-12958>>. Acesso em: 27 de agosto de 2011.

ZUKAUSKAS, A., SHUR, M.S., CASKA, R. **Introduction to Solid-State Lighting**, New York, EUA, 2002.

APÊNDICES

APÊNDICE A – TRABALHOS FUTUROS

Com o desenvolvimento deste trabalho foram evidenciados dois pontos de grande interesse para evolução do mesmo: O primeiro é a necessidade do desenvolvimento de uma lente específica para cada tipo de via, com o intuito de aproveitar ao máximo o fluxo luminoso emitido pela lâmpada, aumentando o fator de utilização. O segundo ponto é o desenvolvimento de um sistema que compense a redução do fluxo luminoso da luminária, causado pelos fatores do ambiente e pela própria depreciação dos LEDs. No projeto atual, é necessário um fluxo luminoso inicial mais elevado, para manter os limites mínimos no término de sua vida útil. Com o sistema de compensação, a luminária poderia apresentar inicialmente uma potência reduzida, e aumentar gradativamente à medida que seu fluxo luminoso efetivo diminui.

