

FABRÍCIA DE OLIVEIRA GRANDO

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO
PÚBLICA EM CAMINHO DE PEDESTRES CONSIDERANDO
EFEITOS MESÓPICOS**

Dissertação submetida ao
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade
Federal de Santa Catarina para a
obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil.

Orientador: EneDir Ghisi, PhD.

Florianópolis
2018

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Grando, Fabrícia de Oliveira
Avaliação comparativa de sistemas de iluminação pública em caminho de pedestres considerando efeitos mesópicos / Fabrícia de Oliveira Grando ; orientador, Enedir Ghisi, 2018.
237 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Iluminação pública. 3. Fotometria mesópica. 4. LEDs. 5. Simulação computacional. I. Ghisi, Enedir. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

FABRÍCIA DE OLIVEIRA GRANDO

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO
PÚBLICA EM CAMINHO DE PEDESTRES CONSIDERANDO
EFEITOS MESÓPICOS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “Mestre em Engenharia Civil” e aprovada, em sua forma final, pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 29 de março de 2018.

Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil

Banca Examinadora:

Orientador Prof. Enedir Ghisi, PhD.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Henrique Antônio Carvalho Braga, Dr.
Universidade Federal de Juiz de Fora
(Videoconferência)

Prof^ª. Ana Ligia Papst de Abreu, Dr^ª.
Instituto Federal de Santa Catarina

Prof. Devis Luis Marinoski, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

À minha família, Luiz, Maria Neli, Daniele, Grazielle, Marchello e Maria Eduarda, pelo apoio incondicional e pela paciência com minhas ausências.

Ao professor Eneidir Ghisi pela disponibilidade e compreensão durante toda a pesquisa, pelas contribuições, pelo empenho e seriedade no desempenho das orientações.

À professora Ana Ligia Papst de Abreu e aos professores Henrique Antônio Carvalho Braga e Deivis Luis Marinoski por terem aceitado o convite para avaliar este trabalho.

À minha madrinha, Ana Francisca de Oliveira (*in memoriam*), por seu exemplo de força e alegria de viver.

Ao engenheiro civil Moises João Lopes pelo apoio diário e incondicional, pela presença e ajuda em todas as medições *in loco* e em quase todas as entrevistas.

Ao professor Antônio João do Instituto Federal de Santa Catarina pelo auxílio com as equações iterativas.

Ao engenheiro eletricista Fábio Matys do Departamento de Manutenção Predial e de Infraestrutura e ao eletrotécnico Alexandre Ribeiro de Alencastro, integrante de empresa contratada pela Universidade Federal de Santa Catarina, pelo empenho e disponibilidade com as trocas dos equipamentos durante a pesquisa de campo.

Ao eletrotécnico Cristian Mazzola pelo auxílio na condução das medições de consumo.

Ao Núcleo de Iluminação Moderna da Universidade Federal de Juiz de Fora pela pronta disposição para realizar as medições fotométricas das lâmpadas.

Às colegas e arquitetas Giseli Knak e Vanessa Mendes Argenta pelo apoio e incentivo. Aos colegas e engenheiros eletricistas do Departamento de Projetos de Arquitetura e Engenharia pela paciência e por todas as explicações técnicas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

Aos amigos Cristina Missao Kuba, Miro Lopes da Silva e Juliana Scheffer pela grande ajuda na busca por voluntários para participar da pesquisa.

A todos os voluntários que foram várias vezes ao local de estudo para responder ao questionário.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização desta pesquisa.

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar comparativamente sistemas de iluminação pública instalados em um passeio público para pedestres, em termos quantitativos e qualitativos, considerando os efeitos da visão mesópica. As fontes de luz instaladas e avaliadas foram à base de vapor de sódio em alta pressão, vapor metálico e LED. A instalação pré-existente era composta por lâmpadas à base de vapor metálico, mas não estavam funcionando. Ao final da pesquisa as LEDs permaneceram instaladas para avaliar a durabilidade dos equipamentos. Métodos para incluir os efeitos da visão mesópica foram pesquisados e dois deles foram testados. A avaliação quantitativa fundamentou-se em medições *in loco* dos níveis de iluminância e luminância, e em simulações computacionais utilizando o programa DIALux evo. O aspecto qualitativo compreendeu a aplicação de questionários a usuários do local de estudo e verificou os seguintes temas: aceitabilidade do espaço, orientação espacial e segurança pessoal percebida na utilização do caminho. Ao comparar as condições de maior e menor consumo de energia instaladas – com lâmpada a vapor metálico e com LED – percebeu-se que a economia de energia poderia ser de até 53%, passando de 1.182 kWh para 556 kWh ao ano. A análise de viabilidade financeira revelou que o cenário mais eficiente não seria indicado para substituir a instalação das lâmpadas a vapor metálico, e que o retorno de investimento começaria em pouco mais de treze anos no cenário com LED de menor custo durante sua vida útil. Em todos os temas da análise qualitativa, a tecnologia LED foi a que recebeu melhor avaliação, seguida da vapor metálico e por último da vapor de sódio em alta pressão. Na questão sensação de segurança, 65,5% dos entrevistados declararam que se sentiam seguros com a lâmpada a vapor de sódio instalada, 86,2% com a vapor metálico e 93,1% com a LED. A LED ofereceu maior sensação de segurança, ainda que o nível de iluminamento proporcionado fosse 31% menor que o da lâmpada a vapor de sódio. A pesquisa confirmou os efeitos da visão mesópica. Quando fontes de luz de maior relação S/P (fluxo escotópico/fluxo fotópico) foram utilizadas, a percepção luminosa e a eficiência dos sistemas aumentaram. Pelas estratégias utilizadas para avaliar comparativamente as fontes de luz estudadas, entende-se que a

iluminação de espaços públicos para pedestres baseada na tecnologia LED é a mais vantajosa no momento.

Palavras-chave: iluminação pública; LEDs; lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão; lâmpadas a vapor metálico; visão mesópica; fotometria mesópica; simulação computacional; DIALux; CIE 191:2010.

ABSTRACT

The purpose of this research was to evaluate comparatively street lighting systems installed in a public walk for pedestrians, in quantitative and qualitative terms, considering the effects of mesopic vision. The light sources installed and evaluated were based on high-pressure sodium, metal-halide and LED. The pre-existing equipment was made up of metal-halide lamps, but it was not working. At the end of the research the LED lamps remained installed to evaluate the durability of the equipment. Methods to include the effects of mesopic vision were searched and two of them were tested. The quantitative evaluation was based on measurements of the luminance and illuminance levels, and in computational simulations using the DIALux evo software. The qualitative aspect included the application of questionnaires to users of the test site and verified the following themes: environment acceptability, space orientation and perceived personal danger in the use all over the way. By comparing the conditions of higher and lower installed energy consumption - with metal-halide lamps and with LED - it was noticed that the energy savings could be up to 53%, going from 1,182 kWh to 556 kWh per year. The financial viability analysis of the scenarios revealed that the most efficient scenario would not be indicated to replace the installation with metal-halide. It also revealed that the return on investment would begin in more than thirteen years in the scenario with the least cost LED during its useful life. In all the themes of the qualitative analysis, the LED technology received the most positive scores, followed by the metal-halide and finally the high-pressure sodium. Regarding the sense of personal security, 65.5% of the interviewees stated that they felt safe with the installed high-pressure sodium lamp, 86.2% with metal-halide and 93.1% with LED. The LED provided a greater sense of security, although the level of illumination provided was 31% less than high-pressure sodium lamp. The research confirmed the effects of mesopic vision. When light sources with a higher S/P (scotopic/photopic) ratio were used, the luminous perception and efficiency of the systems increased. By the strategies used to comparatively evaluate the studied light sources, it is noticed that the lighting of pedestrian areas based on LED technology is the most advantageous.

Keywords: street lighting; LED; high-pressure sodium lamps; metal-halide lamps; mesopic vision; mesopic photometry; lighting simulation program; DIALux; CIE 191:2010 report.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Intervalos de visão mesópica	30
Figura 2: Teste 1 – Pessoas paradas olhando para o caminho a ser percorrido com níveis de iluminância fixos	52
Figura 3: Teste 2 – Pessoas caminhando pelo percurso avaliado com níveis de iluminância variando com pedestre	53
Figura 4: Respostas subjetivas médias dadas para duas perguntas em levantamento sobre iluminação em estacionamento iluminado sob diferentes condições de uniformidade	54
Figura 5: Distribuição Espectral – Lâmpada de Mercúrio em Alta Pressão.....	61
Figura 6: Distribuição Espectral – Lâmpada de Vapor de Sódio em Alta Pressão	61
Figura 7: Distribuição Espectral – Lâmpada Vapor Metálico.....	62
Figura 8: Distribuição Espectral – Lâmpada LED	62
Figura 9: Intervalo aproximado de valores de eficiência luminosa para as principais famílias de lâmpada.....	63
Figura 10: Eficiência luminosa e fluxo luminoso	64
Figura 11: Distribuição de intensidade luminosa e distribuição de iluminância no centro da área de tarefa.....	66
Figura 12: Eficácia de aplicação do sistema de luminárias (LSAE) em função da eficiência tradicional da luminária	67
Figura 13: Manutenção do fluxo luminoso	68
Figura 14: Fluxograma do método de pesquisa	76
Figura 15: Mapa do Campus da UFSC com localização do caminho	77
Figura 16: Planta baixa da área	78
Figura 17: Poste com luminária que estava instalada no local ..	79
Figura 18: Vista do Bloco CSE para a escada de acesso ao CCJ com salas de aula térreas com lâmpadas acesas.....	80
Figura 19: Vista do Bloco CSE para a escada de acesso ao CCJ com salas de aula térreas com lâmpadas apagadas	80
Figura 20: Vista do meio do percurso para a escada de acesso ao CCJ com salas de aula térreas com lâmpadas acesas.....	81
Figura 21: Vista do meio do percurso para a escada de acesso ao CCJ com salas de aula térreas com lâmpadas apagadas	81
Figura 22: Vista da escadaria em direção ao bloco do CSE com salas de aula térreas com lâmpadas acesas.....	82

Figura 23: Vista da escadaria em direção ao bloco do CSE com salas de aula térreas com lâmpadas apagadas	82
Figura 24: Lâmpadas instaladas no local	84
Figura 25: Imagens das medições <i>in loco</i>	87
Figura 26: Esfera integradora do NIMO/UFJF	89
Figura 27: Luxímetro Konica Minolta T-10.....	90
Figura 28: Luminancímetro Minolta LS-110.....	91
Figura 29: Wattímetro WT230 Digital Power Meters	92
Figura 30: Fonte de alimentação Tenma 72-7675 Ac 115/230 Vac, 500VA	92
Figura 31: Malha de medição.....	94
Figura 32: Efeitos mesópicos – Áreas de cálculo.....	98
Figura 33: Processo e posicionamento do entrevistado e pesquisadora durante a aplicação do questionário	101
Figura 34: Distribuição proporcional da população noturna do Campus Trindade da UFSC.....	103
Figura 35: Modelos esquemáticos das luminárias	104
Figura 36: Vistas do Bloco CSE para a escada de acesso ao CCJ	119
Figura 37: Vistas do meio do percurso para a escada de acesso ao CCJ.....	120
Figura 38: Vistas da escadaria em direção ao bloco do CSE ..	121
Figura 39: Distribuição de iluminamento horizontal (em lux) no caminho sem lâmpadas instaladas nos postes	123
Figura 40: Distribuição de iluminamento horizontal (em lux) no caminho com lâmpadas instaladas nos postes	124
Figura 41: Posicionamento das lâmpadas dentro das luminárias	127
Figura 42: Iluminamento vertical no caminho (em lux) sem lâmpadas instaladas	128
Figura 43: Iluminamento vertical no caminho (em lux) com lâmpadas instaladas nos postes.....	129
Figura 44: Distribuição de luminâncias horizontais (em cd/m ²) no caminho sem lâmpadas instaladas nos postes	131
Figura 45: Distribuição de luminâncias horizontais (em cd/m ²) no caminho com lâmpadas instaladas nos postes	131
Figura 46: Malha de medição com os pontos entres os postes	134
Figura 47: Resultados da questão 2 que avaliou se as pessoas concordavam que a iluminação no passeio era “boa”, sem lâmpadas instaladas.	140

Figura 48: Resultados da questão 2 que avaliou se as pessoas concordavam que a iluminação no passeio era “boa”, com lâmpadas instaladas.....	140
Figura 49: Resultados da questão 5 que avaliou a concordância para utilizar as mesas do jardim para ler, sem lâmpadas instaladas.	141
Figura 50: Resultados da questão 5 que avaliou a concordância para utilizar as mesas do jardim para ler, com lâmpadas instaladas.	142
Figura 51: Resultados da questão 6 que avaliou a concordância para utilizar o local para sentar e conversar, sem lâmpadas instaladas.	142
Figura 52: Resultados da questão 6 que avaliou a concordância para utilizar o local para sentar e conversar, com lâmpadas instaladas.	143
Figura 53: Resultados da questão 1 que avaliou a possibilidade de ver todo o caminho, sem lâmpadas instaladas.....	145
Figura 54: Resultados da questão 1 que avaliou a possibilidade de ver todo o caminho, com lâmpadas instaladas.....	145
Figura 55: Resultados da questão 3 que avaliou a possibilidade de ver se havia riscos pelo caminho, sem lâmpadas instaladas.	146
Figura 56: Resultados da questão 3 que avaliou a possibilidade de ver se havia riscos pelo caminho, com lâmpadas instaladas.	146
Figura 57: Resultados da questão 8 que avaliou a percepção das pessoas quanto ao ambiente parecer claro ou escuro sem lâmpadas instaladas.....	147
Figura 58: Resultados da questão 8 que avaliou a percepção das pessoas quanto ao ambiente parecer claro ou escuro com lâmpadas instaladas.....	148
Figura 59: Resultados da questão 4 que avaliou a possibilidade de se ver bem o entorno e reconhecer uma pessoa a uma distância entre 3 e 10 m, sem lâmpadas instaladas.....	150
Figura 60: Resultados da questão 4 que avaliou a possibilidade de se ver bem o entorno e reconhecer uma pessoa a uma distância entre 3 e 10 m, com lâmpadas instaladas.....	150
Figura 61: Resultados da questão 7 que avaliou o brilho das lâmpadas instaladas.....	151

Figura 62: Resultados da questão 9 que avaliou a sensação de segurança das pessoas ao andarem sozinhas no caminho à noite, sem lâmpadas instaladas.....	152
Figura 63: Resultados da questão 9 que avaliou a sensação de segurança das pessoas ao andarem sozinhas no caminho à noite, com lâmpadas instaladas.....	152
Figura 64: Comparação entre a imagem gerada pelo DIALux e a situação real quando as lâmpadas a vapor metálico estavam instaladas	154
Figura 65: Comparação entre os valores medidos e simulados com a lâmpada a vapor de sódio utilizando a malha de pontos	155
Figura 66: Comparação entre os valores medidos e simulados com a lâmpada a vapor metálico utilizando a malha de pontos.....	155
Figura 67: Distribuição de iluminamento horizontal do cenário 71 com LED.....	160
Figura 68: Melhor e pior cenários simulados com a lâmpada a vapor de sódio.....	161
Figura 69: Melhor e pior cenários simulados com a lâmpada a vapor metálico	161
Figura 70: Melhor e pior cenários simulados com LED.....	161
Figura 71: Distribuições de iluminamento horizontal do pior e do melhor cenário simulado com cada tipo de lâmpada	162
Figura 72: Ilustrações geradas pelo DIALux do pior e do melhor cenário simulado com cada tipo de lâmpada	163

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de k calculados para cada tipo de fonte de luz	37
Tabela 2: Resultados fotométricos “escotópico adaptado” das luminárias	38
Tabela 3: Características gerais de fontes luminosas	60
Tabela 4: Comparação de várias fontes luminosas.....	69
Tabela 5: Modelo e características das lâmpadas especificadas pelo fabricante	84
Tabela 6: Especificações da esfera integradora.....	89
Tabela 7: Especificações do luxímetro	90
Tabela 8: Especificações do luminancímetro	91
Tabela 9: Especificações do wattímetro	92
Tabela 10: Especificação das luminárias simuladas	105
Tabela 11: Níveis médios mínimos de iluminância fotópica atendidos nas simulações considerando efeitos mesópicos....	109
Tabela 12: Caracterização das fontes luminosas.....	116
Tabela 13: Comparação entre fluxo luminoso, potência e iluminância horizontal média.....	126
Tabela 14: Comparação dos dados coletados em todo o passeio com a NBR 5101/2012	133
Tabela 15: Comparação dos dados coletados entre os postes com a NBR 5101/2012	134
Tabela 16: Inclusão dos efeitos mesópicos	136
Tabela 17: Diferenças entre luminâncias mesópicas e fotópicas (%) calculadas como o sistema mesópico recomendado.....	137
Tabela 18: Resultados das simulações computacionais.....	157
Tabela 19: Custo de instalação inicial	167
Tabela 20: Custo de manutenção durante 20 anos.....	167
Tabela 21: Custo para 20 anos de exploração.....	168
Tabela 22: Análise de viabilidade econômica dos cenários quando comparados à instalação existente com lâmpadas a vapor metálico	173
Tabela 23: Pontos fortes e fracos dos sistemas.....	177

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CEF	Caixa Econômica Federal
CEP	Comitê de Ética em Pesquisa
CCJ	Centro de Ciências Jurídicas
CIE	<i>Commission Internationale de L'Eclairage</i>
CSE	Centro Socioeconômico
DPAE	Departamento de Projetos de Arquitetura e Engenharia
DMPI	Departamento de Manutenção Predial e de Infraestrutura
DOE	<i>United States Department of Energy</i>
IES	<i>Illuminating Engineering Society of North America</i>
IRC	Índice de reprodução de cores
LED	<i>Light emitting diodes</i>
LSAE	<i>Luminaire system application efficacy</i>
NIMO	Núcleo de Iluminação Moderna
SPD	<i>Spectral Power Distribution</i>
SINAPI	Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil
TIR	Taxa interna de retorno
TCC	Temperatura de cor correlata
UFJF	Universidade Federal de Juiz de Fora
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VPL	Valor presente líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	23
1.1 OBJETIVOS	26
1.1.1 Objetivo Geral	26
1.1.2 Objetivos Específicos	27
1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO	27
2. REFERENCIAL TEÓRICO	29
2.1 VISÃO MESÓPICA	29
2.1.1 Inclusão de Efeitos Mesópicos	31
2.1.2 CIE 191:2010 - Fotometria Mesópica com Base no Desempenho Visual	32
2.1.3 Método 1 – Condição Baixo Mesópica	35
2.1.4 Método 2 - Adaptação da tabela mesópica CIE	38
2.1.5 Método 3 – Adaptation SPD e Source SPD	41
2.1.6 Método 4 – CIE 206:2014 - O Efeito da Distribuição Espectral de Potência na Iluminação de Áreas Urbanas e de Pedestres	46
2.2 PERCEPÇÕES PESSOAIS E TAREFAS VISUAIS	48
2.2.1 Orientação Espacial	49
2.2.2 Segurança Pessoal Percebida	50
2.2.3 Segurança Viária e Detecção de Obstáculos	56
2.3 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PARA ESPAÇOS PÚBLICOS	57
2.3.1 Contexto histórico	58
2.3.2 Análise Comparativa	59
2.4 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS	70
2.5 SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA	71
3. MÉTODO	75
3.1 ESTUDO DE CASO – CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO	77
3.2 INSTALAÇÕES	83
3.3 MEDIÇÕES IN LOCO	85
3.3.1 Equipamentos	88
3.3.2 Malha de Medição	93
3.3.3 Verificação na Norma Brasileira de iluminação	95
3.3.4 Inclusão dos efeitos mesópicos	96
3.4 APLICAÇÃO DE QUESTIONÁRIOS	98
3.4.1 Questionário Piloto	99
3.4.2 Amostragem	101
3.5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	103

3.5.1	Detalhes das simulações.....	106
3.5.2	Parâmetros de simulação.....	108
3.5.3	Análise de custos.....	110
3.6	ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS	113
4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	115
4.1	MEDIÇÕES COMPLEMENTARES.....	115
4.2	REGISTRO FOTOGRÁFICO.....	117
4.3	MEDIÇÕES IN LOCO	122
4.3.1	Iluminância horizontal.....	122
4.3.2	Iluminância vertical	127
4.3.3	Luminância horizontal.....	130
4.3.4	Comparação dos dados coletados com a Norma Brasileira	132
4.3.5	Inclusão dos efeitos mesópicos.....	135
4.4	APLICAÇÃO DE QUESTIONÁRIOS	138
4.4.1	Aceitabilidade	139
4.4.2	Orientação Espacial.....	144
4.4.3	Segurança pessoal percebida	148
4.5	SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS	153
4.5.1	Validação do programa DIALux.....	153
4.5.2	Resultados das simulações.....	156
4.5.3	Análise de custos.....	166
4.6	ANÁLISE COMPARATIVA.....	175
5.	CONCLUSÕES	179
5.1	CONCLUSÕES	179
5.2	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	182
5.3	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	183
APÊNDICES	195	
APÊNDICE A – MEDIÇÕES COMPLEMENTARES: CONSUMO DAS LÂMPADAS		197
APÊNDICE B – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO		199
APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO		201
APÊNDICE D – ESTIMATIVO DA POPULAÇÃO NOTURNA		203
APÊNDICE E – VALIDAÇÃO DIALUX EVO.....		205
APÊNDICE F – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS		209
ANEXOS	225	

ANEXO A – SISTEMA MESÓPICO CIE 191:2010.....	227
ANEXO B – ADAPTAÇÃO DA TABELA MESÓPICA CIE 191:2010	231
ANEXO C – REDUÇÃO ESCALONADA EM ILUMINÂNCIA ADOTADA NO REINO UNIDO – CIE 206:2014.....	233
ANEXO D – MEDIÇÕES COMPLEMENTARES: DADOS ESPECTRAIS E FOTOMÉTRICOS.....	235

1. INTRODUÇÃO

“A arquitetura é experimentada com todos os nossos sentidos, incluindo a visão.” (REA, 2000 apud ARAJI; BOUBEKRI; CHALFOUN, 2007, p. 01). Nesta referência, os autores esclarecem que projetar espaços onde os usuários possam se comunicar e operar com relativa facilidade e conforto constitui a atividade profissional para a qual arquitetos são preparados. Assim, é determinante a capacidade de os usuários adaptarem-se às mudanças nas condições dinâmicas do ambiente ao seu redor (REA, 2000 apud ARAJI; BOUBEKRI; CHALFOUN, 2007). Ainda, segundo Haans e Kort (2012) a iluminação pública é onipresente na vida moderna urbana. É necessária para a prevenção da criminalidade, para orientar e evitar obstáculos durante a noite, e para proporcionar sensação geral de segurança para os usuários da via.

Iluminação exterior de qualidade deve comunicar ordem visual, orientação e caráter urbano. Mesmo a colocação do equipamento de iluminação, como postes e luminárias, deve ajudar a determinar a maior parte do caráter visual do ambiente após o anoitecer. Dessa forma, um projeto luminotécnico deve considerar as preocupações de toda a comunidade, resultando em um projeto final planejado, coerente e satisfatório, que leva em conta o contexto ambiental mais amplo da comunidade (IES, 2014). Narendran, Freyssinier e Zhu (2015), em pesquisa de fatores humanos, avaliaram as percepções de segurança e visibilidade de usuários de um estacionamento. Através da verificação de condições diversas de uniformidade de iluminância horizontal, concluiu-se que ao se utilizar uma distribuição de luz mais regular, uma redução no nível de iluminação pode ser aplicada.

Nesse sentido, a preocupação em se utilizar iluminação pública visualmente confortável e que ofereça a devida sensação de segurança aos usuários deve estar alinhada às atuais demandas de redução de consumo de energia elétrica. Situação essa que requer o uso de sistemas de iluminação com maior eficiência energética.

No ano de 2007, o segmento de iluminação pública correspondia a 3% do consumo total de energia elétrica do país

(BRASIL, 2007). Atualmente, o Balanço Energético Nacional engloba o consumo de energia elétrica com iluminação pública no segmento de setor público, juntamente com os demais consumos da categoria, inviabilizando assim a verificação do consumo nacional atual com iluminação pública. No estado de Santa Catarina, 3,53% da energia vendida pela Celesc em 2014 foi utilizada na iluminação pública e corresponderam a 570,89 GWh (CELESC, 2015).

Logo, com o intuito de reduzir os índices de consumo energético dos sistemas de iluminação pública, programas governamentais têm sido implantados em diversos países. Nos EUA, o Departamento de Energia promove ações contínuas de economia de energia dos diversos segmentos. Na área de iluminação há uma grande promoção para o uso da tecnologia de luz de estado sólido, as lâmpadas LEDs, através de programas como o *Solid-State Lighting Program* e o *LED Lighting Facts Program*. No Brasil, o Programa Nacional de Iluminação Pública e Sinalização Semafórica Eficientes, depois denominado Procel Reluz, foi instituído no ano 2000 pela Eletrobrás. O Procel Reluz tem por objetivo a promoção do desenvolvimento de sistemas eficientes de iluminação pública e de sinalização semafórica. No primeiro caso, através da substituição de lâmpadas incandescentes, mistas e a vapor de mercúrio por lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão, a vapor metálico ou luminárias LED, mais eficientes que as anteriores. Outros equipamentos como relés fotoelétricos, reatores, ignitores e luminárias também são considerados no Programa (VASCONCELLOS; LIMBERGER, 2013; ELETROBRAS, 2017). De acordo com Eletrobrás (2017), no ano de 2016 o total de economia de energia elétrica e de redução de demanda no horário de ponta, decorrente das ações desenvolvidas por meio do programa, correspondeu a 62,64 mil GWh e 14,30 GW, respectivamente. O programa já proporcionou a substituição de cerca de 2,78 milhões de pontos de iluminação pública em todo o país desde a sua criação.

É com este propósito que muitos projetos de modernização dos sistemas de iluminação externa têm avançado rapidamente. Antes com a substituição dos antigos sistemas por lâmpadas a vapor de sódio, agora com a utilização de lâmpadas LEDs. E, conseqüentemente, diversas pesquisas comparativas entre sistemas estão sendo realizadas com o objetivo de esclarecerem

as dúvidas que têm surgido dentro da comunidade que estuda sistemas de iluminação.

Dentre as questões levantadas pelos pesquisadores, existem preocupações sobre a diferença de espectro luminoso entre fontes convencionais e LED (DOE, 2016), e a inclusão dos efeitos da visão mesópica nas medições. De acordo com Schreuder (2008), a condição mesópica é experimentada no intervalo entre as condições fotópica e escotópica, ou seja, entre as condições de alta luminância (acima de 3 cd/m^2) e de baixa luminância (abaixo de $0,01 \text{ cd/m}^2$), respectivamente. Essa faixa de luminância intermediária engloba, normalmente, as circunstâncias da iluminação pública. Rea, Bullough e Akashi (2009) apontam que, em uma cena iluminada à noite, fontes de luz a vapor metálico ("brancas") resultam em percepções aumentadas de brilho em comparação com a iluminação de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão ("mais amarelas"). Isso se deve ao fato de haver uma mudança de sensibilidade espectral das células sensoriais do olho em função da distribuição espectral das lâmpadas (EPRI, 2001). Kostic et al. (2012) mencionam que fabricantes de LEDs indicam que a situação em relação a possíveis economias de energia ao aplicar luminárias LED é muito melhor em ambientes externos do que internos, porque, no primeiro caso, os efeitos mesópicos da visão aumentam a eficácia desse tipo de iluminação.

Kostic et al. (2012) avaliaram comparativamente, incluindo os efeitos mesópicos, a utilização das lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e LEDs em ruas e estradas. A pesquisa foi realizada através de simulações computacionais com o programa Ulysse 2.1. Os autores - ao variarem os tipos de lâmpadas, layouts de distribuição e altura de postes e classes de iluminação de vias - concluíram que a economia de energia média é de 19 a 26% quando LEDs são instalados nas classes de vias com luminância média recomendada entre $1,5 \text{ cd/m}^2$ e $0,30 \text{ cd/m}^2$, e que as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão ainda são mais econômicas em vias onde maiores níveis de luminância são solicitados. Rodrigues et al. (2011) analisaram o uso das mesmas tecnologias (vapor de sódio em alta pressão e LED) em via de veículos sob condições reais. Os pesquisadores escolheram uma via existente que possuía lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão instaladas, fizeram a troca de alguns postes por luminárias LED e realizaram medições de luminância.

Em seguida, adaptaram os valores para a condição “baixo mesópica”. Segundo os autores, a iluminância adaptada da luminária com lâmpada de vapor de sódio em alta pressão passaria de 22 lux para 12,7 lux, e uma das luminárias com LED de 9,1 lux para 18,7 lux. O estudo indica que se duas luminárias diferentes, uma com lâmpada de vapor de sódio em alta pressão e outra com LEDs, forem capazes de fornecer o mesmo nível de iluminamento no plano de trabalho, a sensação de luminosidade experimentada pelo usuário com a tecnologia de estado sólido seria melhor. Ambas as pesquisas levaram em consideração o atendimento às normativas específicas quanto aos requisitos mínimos de iluminação necessários para utilização adequada dos espaços.

Porém, também o método de cálculo de inclusão dos efeitos mesópicos tem sido discutido. Uchida et al. (2016) explicam que embora o sistema de fotometria mesópica seja esperado para tornar o projeto de iluminação exterior mais eficiente energeticamente e/ou visualmente eficaz, ainda não há consenso internacional sobre como o sistema de fotometria mesópica deva ser implementado em aplicações de iluminação real. Isso porque, segundo os autores, uma vez que o sistema de fotometria mesópica foi desenvolvido com base no desempenho da tarefa periférica, a luminância de adaptação deveria ser determinada com base no estado de adaptação periférica dos olhos dos observadores.

Com base neste panorama, este trabalho propõe-se a aprofundar a pesquisa na área de iluminação externa em espaços predominantemente usados por pedestres. Neste setor, questões relevantes como o modo como o meio ambiente é percebido e utilizado pelas pessoas são tão importantes quanto a implantação de sistemas com elevada eficiência energética.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar comparativamente sistemas de iluminação pública instalados em passeios públicos para pedestres, em termos qualitativos e quantitativos, considerando os efeitos da visão mesópica.

1.1.2 Objetivos Específicos

Pretende-se alcançar os seguintes objetivos específicos:

- Discriminar as condições reais de passeio de pedestres, sem e com iluminação pública instalada, por meio de medições dos níveis de iluminamento *in loco* com o intuito de avaliar a eficiência energética e o atendimento à normativa brasileira;
- Verificar se a mudança no tipo de iluminação altera o modo como as pessoas sentem-se em relação a sua segurança pessoal e sua facilidade para caminhar em passeios públicos;
- Comparar o desempenho energético de diferentes sistemas de iluminação pública através de simulação computacional;
- Verificar a viabilidade financeira dos sistemas de iluminação pública simulados;
- Avaliar o desempenho de sistemas de iluminação pela a inclusão dos efeitos mesópicos em níveis de luminância medidos e iluminância simulados.

1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho é formado por cinco capítulos e possui seis apêndices e quatro anexos.

Este primeiro capítulo introduziu o tema estudado ao demonstrar a importância da iluminação artificial pública quando se transita à noite. Aponta como a iluminação pública influencia no dia a dia das pessoas e como pesquisadores, entidades governamentais e empresas têm buscado meios para reduzir custos e aumentar a eficiência dos sistemas existentes. Os objetivos geral e específicos da dissertação foram definidos.

A revisão de literatura presente no segundo capítulo norteia e embasa o desenvolvimento da pesquisa. Tal capítulo é dividido em cinco seções: visão mesópica; percepções pessoais e tarefas visuais; sistemas de iluminação para espaços públicos e programas computacionais. A última seção traz uma síntese dos temas abordados no capítulo.

O terceiro capítulo apresenta o método proposto para alcançar os objetivos da pesquisa. Ele está dividido em três partes principais: medições *in loco* de um caminho de pedestres,

aplicação de questionários a usuários locais e simulação computacional de sistemas otimizados para o espaço.

No quarto capítulo estão indicados os resultados alcançados com a aplicação do método proposto e uma análise comparativa dos sistemas de iluminação estudados. Também inclui um registro fotográfico da área realizado durante as medições *in loco*.

O último capítulo apresenta as conclusões gerais deste trabalho, as suas limitações e sugestões para trabalhos futuros.

A pesquisa possui ainda seis apêndices. O primeiro deles demonstra como foram realizados os cálculos de consumo das lâmpadas estudadas. O segundo expõe o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido assinado pelos participantes da pesquisa. O terceiro é referente ao questionário aplicado a usuários de caminho de pedestres pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina. O quarto apêndice sintetiza o levantamento estimativo da população noturna do campus onde se localiza o caminho em estudo. O quinto explica a validação do programa DIALux. O último apêndice traz imagens das simulações computacionais realizadas.

Ao final, são apresentados quatro anexos. Três deles pertencem a metodologias estudadas para aplicação dos efeitos mesópicos e servirão de subsídio para esta e futuras pesquisas. O último apresenta o resultado de medições de dados espectrais e fotométricos realizadas pelo laboratório do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) da Universidade Federal de Juiz de Fora.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

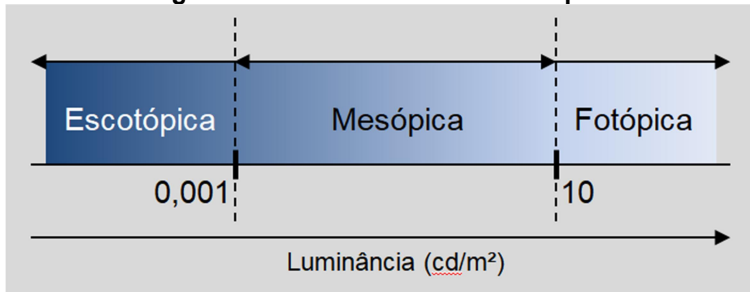
Este capítulo discorre sobre uma revisão de temas que embasarão o desenvolvimento deste estudo. As pesquisas que foram revisadas avaliam os seguintes assuntos: visão mesópica; percepções pessoais e tarefas visuais; sistemas de iluminação para espaços públicos; programa computacional. No final deste capítulo é apresentada uma síntese dos temas abordados.

2.1 VISÃO MESÓPICA

A visão humana é composta por dois distintos sistemas – bastonetes e cones – os quais funcionam de forma diferente, mas trabalham em conjunto para fornecer a nossa visão. Os bastonetes contribuem para a visão periférica e são particularmente eficazes em níveis baixos de luz, sendo mais sensíveis aos tons de cinza e ao movimento. Os cones nos permitem ver as cores e os detalhes, estando concentrados em uma pequena área central da retina, chamada fóvea (EPRI, 2001).

Assim, a visão opera de modo diferente para condições de luz diversas. De acordo com EPRI (2001), a visão fotópica (visão diurna) é definida com níveis relativamente altos de luz, onde os cones estão totalmente ativados. Medidores de iluminação são normalmente ajustados à gama de sensibilidade do olho nesta condição. A visão escotópica (visão noturna) ocorre em níveis de iluminação sob a qual os cones deixam de funcionar, por exemplo, em níveis de iluminância de uma noite estrelada. A visão mesópica, por sua vez, ocorre entre as condições fotópica e escotópica, onde ambos cones e bastonetes são ativos. É geralmente experimentada ao anoitecer e inclui quase todas as situações de iluminação ao ar livre. Com o declínio dos níveis de iluminação, a acuidade da visão focal e da percepção de cores também diminui. Da mesma forma, existe uma mudança de sensibilidade espectral do pico amarelo-verde dos cones para o pico do comprimento de onda azul-verde dos bastonetes. A Figura 1 demonstra as condições da visão em função da luminância.

Figura 1: Intervalos de visão mesópica



Fonte: CIE, 2010b

Segundo Rodrigues et al. (2011), todo sistema de iluminação foi concebido para se adaptar a certos requisitos estabelecidos nas normas, as quais visam à adequação da iluminação artificial para a tarefa que está sendo executada. Contudo, os autores mencionam que:

A definição de uso corrente do fluxo luminoso é baseada na resposta fotópica do olho humano. Em muitos casos, tais como aplicações de interiores, esta definição de fluxo luminoso é aceitável, uma vez que os níveis de luminância considerados são relativamente elevados. Mas quando os níveis de luminância são mais baixos, como em aplicações de iluminação pública, este modelo não se encaixa. No caso de iluminação pública, funções de luminosidade escotópicas ou baixo mesópicas poderiam representar melhor a resposta do olho. (SCHREUDER, 2008; REA, 1995 apud RODRIGUES et al. 2011, p. 02 – tradução nossa)

Rea et al. (2004) explicam que medições fotométricas podem ser feitas de maneira precisa com ambas funções de eficiência luminosa – fotópica e mesópica – em qualquer nível de luz. Entretanto, a escolha correta depende da classe de fotorreceptores responsável pela visão em uma aplicação particular. Os autores ressaltam que:

Embora provavelmente nunca se opte por fazer uma medição fotométrica com a função de

eficiência luminosa escotópica em um dia ensolarado brilhante, permanece incerto qual função de eficiência luminosa, ou combinação de funções, deve ser usada sob aplicações noturnas onde fontes de luz elétricas são usadas (por exemplo, dirigir um automóvel à noite). Além disso, à medida que se começa a tentar utilizar combinações das funções fotópicas e escotópicas a níveis de luz em que bastonetes e cones são presumidos ativos, será descoberto que, dependendo da fonte de luz e do nível de luz, mais lúmens podem ser produzidos por lâmpada em níveis de luz mais baixos. (REA et al. 2004, p. 01 e 02 – tradução nossa)

Sob esse ponto de vista, inclusão dos efeitos mesópicos em medições fotométricas, diversos estudos têm sido realizados. O trabalho de Rea et al. (2004) foi um dos primeiros publicados, tendo como objetivo geral estabelecer as bases para o desenvolvimento de um sistema unificado de fotometria para especificar o estímulo luminoso para qualquer distribuição espectral de potência e em qualquer nível de luminância, incluindo a região mesópica. Essa pesquisa, inclusive, faz parte do método adotado na publicação da CIE 191:2010 - Sistema Recomendado para a Fotometria Mesópica com Base no Desempenho Visual. Após essas publicações, outros trabalhos têm se sucedido com vistas a aplicar, aprimorar e preencher algumas lacunas da publicação CIE. Alguns desses baseiam-se especificamente na comparação de diferentes tecnologias de lâmpadas aplicadas em iluminação pública, os quais, como já justificado, têm sido recorrentes devido à introdução da tecnologia LED, a qual tem sua eficácia medida aumentada quando os efeitos mesópicos são considerados.

2.1.1 Inclusão de Efeitos Mesópicos

Na comunidade acadêmica ainda não existe um consenso de como a inclusão dos efeitos mesópicos nas medições fotométricas deva ser realizada. Kostic et al. (2012) justificam que embora a publicação 191:2010 da CIE seja de enorme importância, essa não contém instruções claras para aplicação prática em iluminação de ruas e vias da tabela mesópica

proposta, também não há recomendações sobre o uso de luminâncias mesópicas no processo de design, nem dispositivos de medição capazes de medir luminâncias mesópicas. Assim, diferentes estudos têm sido publicados na busca por um método ideal.

A seguir, a norma CIE 191:2010 e publicações relevantes da área serão apresentadas com o intuito de elaborar um método de inclusão dos efeitos mesópicos em iluminação externa que possa ser aplicado nos dados que serão medidos e simulados.

2.1.2 CIE 191:2010 - Fotometria Mesópica com Base no Desempenho Visual

A recomendação CIE 191:2010, a qual aborda a fotometria mesópica com base no desempenho visual de tarefas, tem como objetivo principal estabelecer um sistema de fotometria mesópica baseado em funções de sensibilidade espectral que obedeça às leis de aditividade.

Segundo os autores, entre os requisitos do sistema recomendado está que o sistema, dentro de possíveis limitações, forneça uma correlação com o desempenho visual sob uma variedade de diferentes condições e propicie um resultado que seja significativo em relação à psicofísica visual humana. Tal desempenho visual refere-se a tarefas de reconhecimento, detecção de contraste, tempo de reação e velocidade do desempenho. O grau de correlação com o desempenho da tarefa foi utilizado como um critério na determinação do sistema recomendado. Os outros critérios foram a utilidade prática do sistema e o requisito de manter a aditividade, que é pressuposto da fotometria CIE.

Com base nestes critérios, o sistema recomendado pela CIE para a fotometria mesópica baseado no desempenho visual descreve a eficiência luminosa espectral na região mesópica, como uma combinação linear da função de eficiência luminosa espectral fotópica e da função de eficiência luminosa espectral escotópica. Como consequência, estabelece uma transição gradual entre estas duas funções ao longo da região mesópica e depende das condições de adaptação visual. As Equações 1 e 2 formam o referido sistema.

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

para $0 \leq m \leq 1$

e

$$L_{mes} = \frac{683}{V_{mes}(\lambda_0)} \int V_{mes}(\lambda) L_e(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

Onde:

$V_{mes}(\lambda)$ é a eficiência luminosa espectral na região mesópica;

$V(\lambda)$ é a eficiência luminosa espectral na região fotópica;

$V'(\lambda)$ é a eficiência luminosa espectral na região escotópica;

m é um coeficiente cujo valor depende das condições de adaptação visual;

$M(m)$ é uma função de normalização tal que $V_{mes}(\lambda)$ atinge um valor máximo de 1;

$V_{mes}(\lambda_0)$ é o valor de $V_{mes}(\lambda)$ a 555 nm;

L_{mes} é a luminância mesópica;

$L_e(\lambda)$ é a radiação espectral em $W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot nm^{-1}$;

Se $L_{mes} \geq 5,0 \text{ cd/m}^2$, então $m = 1$;

Se $L_{mes} \leq 0,005 \text{ cd/m}^2$, então $m = 0$.

O coeficiente de adaptação e a luminância mesópica podem ser calculados usando uma aproximação iterativa por meio das Equações 3 e 4, como segue:

$$m_0 = 0,5$$

$$L_{mes,n} = \frac{m_{(n-1)}L_p + (1 - m_{(n-1)})L_s V'(\lambda_0)}{m_{(n-1)} + (1 - m_{(n-1)})V'(\lambda_0)} \quad (3)$$

$$m_n = a + b \log_{10}(L_{mes,n}) \text{ para } 0 \leq m_n \leq 1 \quad (4)$$

Onde:

L_p é luminância fotópica do campo de adaptação visual (cd/m^2);

L_s é luminância escotópica do campo de adaptação visual (cd/m^2);

$V'(\lambda_0) = 683/1699$, é o valor da função de eficiência luminosa espectral escotópica a $\lambda_0=555 \text{ nm}$;

a e b são parâmetros que têm os valores $a = 0,7670$ e $b = 0,3334$;
n é o passo de iteração.

O valor de luminância mesópica obtido por meio das Equações 3 e 4 é a luminância mesópica do campo de adaptação visual. A luminância mesópica de objetos no campo de adaptação visual é obtida de acordo com as Equações 1 e 2 usando o valor de m determinado para o campo de adaptação.

É apresentada pelos autores a definição da relação S/P (*Scotopic / Photopic*) como sendo a razão entre os fluxos luminosos da fonte de luz avaliada de acordo com a função CIE de eficiência luminosa espectral escotópica e de eficiência luminosa espectral fotópica, respectivamente. O método de cálculo deste parâmetro, conforme CIE (2010b), está indicado no Anexo A.

No Anexo A também são apresentadas as tabelas disponibilizadas pela CIE contendo os valores do coeficiente de adaptação e da luminância mesópica para este sistema em função da luminosidade fotópica e da relação S/P da fonte de luz. Para Kostic e Djokic (2011), o resultado mais importante do sistema mesópico CIE é representado pela tabela que contém os valores de luminâncias mesópicas e que correspondem a luminâncias fotópicas selecionadas (dentro da faixa de $0,01-4,5$ cd/m^2) para índices S/P de lâmpadas relevantes (Anexo A, Tabela A.2).

Ao demonstrarem os resultados dos testes de desempenho visual realizados – testes de contrastes com objetos no eixo e fora do eixo, tempo de resposta, contraste de limites – para se chegar ao sistema fotométrico adotado, os pesquisadores concluíram que a idéia fundamental para se usar uma abordagem visual baseada em desempenho para o desenvolvimento de um sistema de fotometria mesópica é que o sistema proposto permita que as previsões de desempenho da tarefa a ser realizada esteja em concordância razoável com a capacidade real para realizar essas tarefas. Mas enfatizam que nenhum sistema de fotometria poderá descrever completamente as interações complexas do sistema visual humano (CIE, 2010b).

Por fim, a CIE (2010b) apresenta uma tabela comparativa mostrando as diferenças entre os valores de luminância calculados utilizando o sistema recomendado e os calculados

com a função de eficiência luminosa espectral fotópica. Segundo os autores,

A tabela mostra que as lâmpadas com uma saída relativamente alta na região de comprimento de onda curto (relação S/P > 1) resultam em valores de luminância aumentados quando medidos usando o sistema recomendado, enquanto que as lâmpadas com saída relativamente alta na região de comprimento de onda longo resultam em diminuição valores de luminância. (CIE 2010b, tradução nossa)

Desse modo, utilizando o sistema recomendado para a fotometria mesópica para calcular a luminância eficaz das fontes de luz, em vez de utilizar a função de eficiência luminosa espectral fotópica atual, os resultados serão alterados significativamente. Como exemplo, mencionam que com uma luminância fotópica de 1 cd/m^2 , a utilização do sistema recomendado resulta em uma variação de -5% a +15% para lâmpadas com relações S/P entre 0,5 (lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão) e 2,5 (lâmpadas a vapor metálico); a $0,3 \text{ cd/m}^2$ a variação está entre cerca de -10% e + 30%.

2.1.3 Método 1 – Condição Baixo Mesópica

Inicialmente, por se tratar de produção nacional, apresenta-se um estudo realizado por um grupo de pesquisa pertencente à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). Os pesquisadores Rodrigues et al. (2011) desenvolveram uma análise e comparação fotométrica entre conceitos de diferentes sistemas de iluminação pública, utilizando luminárias LEDs e luminárias com lâmpada de sódio em alta pressão.

Foi montado um estudo de caso com medição fotométrica em via de veículos dentro da UFJF com postes e luminárias com lâmpadas a vapor de sódio de 250 W existentes e luminárias LEDs de baixa e alta potências. As medições dos fluxos luminosos fotópico e escotópico de fontes de luz utilizadas em iluminação pública (vapor de sódio em alta pressão, vapor metálico e LED) foram realizadas em uma esfera integradora.

Os autores, a partir da avaliação da resposta do olho sob diferentes condições de luminância, concluíram que sob a

condição mesópica de 0,3 cd/m² de luminância a resposta ocular é muito parecida com a resposta sob a condição escotópica de 0,01 cd/m². Portanto, inferiram que considerar condições escotópicas em estradas para adaptar a fotometria não implica em grande desvio da realidade mesópica da resposta ocular e que os valores fotométricos escotópicos adaptados são representativos. Também consideram que o erro por meio da resposta escotópica é menor do que quando se utiliza uma condição fotópica, quando a condição é baixo mesópica.

Para adaptar a iluminância medida, o método aplicado é baseado na definição fotópica clássica da unidade fotométrica de iluminância. Os autores utilizaram um fator de conversão das iluminâncias fotópicas, medidas por luxímetros convencionais (em lux), para encontrar as iluminâncias escotópicas. Conhecendo as relações entre os fluxos escotópico e fotópico tem-se a relação S/P, neste trabalho também denominada fator "k" da fonte de luz em estudo. O método desenvolvido utiliza o lúmen fotópico e, analogamente, o chamado "lux escotópico eficaz" (ou lux'), utilizando o fluxo luminoso escotópico na sua definição. Desse modo, a relação entre as duas unidades análogas foram derivadas para encontrar as Equações 5 e 6. A fim de se obter uma relação que é dependente da eficiência luminosa de cada fonte, incluiu-se a potência de consumo (Equação 7) e rearranjou-se até a Equação 8. Assim, dados fotométricos obtidos com equipamentos calibrados para visão fotópica (tais como luxímetros) podem ser derivados em dados escotópicos equivalentes, para cada tipo de tecnologia, desde que os fluxos escotópico e fotópico sejam conhecidos para a fonte de luz estudada.

$$\frac{lux'}{lux} = \frac{lm'/m^2}{lm/m^2} \quad (5)$$

$$\frac{lux'}{lux} = \frac{lm'}{lm} \quad (6)$$

$$\frac{lux'}{lux} = \frac{lm'}{lm} \cdot \frac{W^{-1}}{W^{-1}} \quad (7)$$

$$lux' = \frac{lm'/W}{lm/W} lux \quad (8)$$

Onde:

lm é o fluxo luminoso fotópico (lúmens);

lm' é o fluxo luminoso escotópico (lúmens');

lux é a iluminância fotópica (lux);

lux' é a iluminância escotópica eficaz (lux');

m^2 é a área de incidência do fluxo luminoso (metro quadrado);

W é a potência de consumo (watt).

A Tabela 1 mostra o fator k de algumas fontes que tiveram os fluxos luminosos (escotópico e fotópico) medidos na esfera integradora. É possível observar que o fator k é mais baixo para luzes com espectro concentrado no amarelo, como as lâmpadas de sódio em alta pressão. Rodrigues et al. (2011) concluíram que as luminárias LED apresentaram maior eficiência luminosa na resposta visual escotópica.

Tabela 1: Valores de k calculados para cada tipo de fonte de luz

FORTE LUMINOSA	Eficiência fotópica (lm/W)	Eficiência escotópica (lm'/W)	k
Sódio a alta pressão	77	44,4	0,577
LED de baixa potência	46,2	94,5	2,05
LED de alta potência	85,9	167,8	1,95

Fonte: Rodrigues et al. (2011), pg. 6

A Tabela 2 mostra que os sistemas com luminárias LED são de algum modo equivalentes, e tem uma iluminância mais elevada adaptada, em comparação com a luminária com lâmpada de sódio em alta pressão quando considerada a condição “escotópica adaptada” ou “baixo mesópica”, de acordo com a análise proposta na pesquisa.

Tabela 2: Resultados fotométricos “escotópico adaptado” das luminárias

TECNOLOGIA DA LUMINÁRIA	E_{med} (lux)	E'_{med} (lux')
Sódio a alta pressão de 250 W	22 lux	12,7 lux'
LED de baixa potência	9,1 lux	18,7 lux'
LED de alta potência	8,8 lux	17,2 lux'

Fonte: Rodrigues et al. (2011), pg. 6

O estudo é concluído com uma análise de retorno de investimentos para substituição do sistema atual de iluminação pública e uma simulação no programa DIALux da área em questão com lâmpadas a vapor de sódio de menor potência, já que o sistema existente estava superdimensionado. Os pesquisadores concluíram que a proposta de substituição do sistema atual de iluminação com lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão por LEDs é economicamente viável, pois o retorno ocorre antes de terminar o tempo de vida das próprias luminárias LED. Contudo, as conclusões preliminares apresentadas no trabalho são apenas sobre dois modelos de luminárias e outros equipamentos devem ser avaliados para resultados mais conclusivos sobre o conjunto resultante da tecnologia LED no mercado.

2.1.4 Método 2 - Adaptação da tabela mesópica CIE

De maneira similar ao método anterior, apresentam-se as pesquisas realizadas por Kostic e Djokic (2011) e Kostic et al. (2012). Esses pesquisadores adaptaram os efeitos da visão mesópica através da relação S/P dos fluxos escotópico e fotópico utilizando como base a Tabela CIE de luminâncias mesópicas (Anexo A). O intuito foi estabelecer um método de inclusão dos efeitos mesópicos enquanto as normas e recomendações válidas, bem como os dispositivos de medição fotométricos, permanecem em uso.

Em sua pesquisa Kostic e Djokic (2011) apresentam duas tabelas, presentes no Anexo B. A primeira tabela (Tabela B.1) é derivada da Tabela CIE e é gerada pela aplicação do

procedimento iterativo em que se baseia o sistema mesópico CIE, valores intermediários de luminância mesópica foram inseridos na faixa de 0,1 a 3 cd/m², abrangendo mais luminâncias do que a tabela original da CIE. A segunda tabela (Tabela B.2), denominada como Tabela de Luminância Fotópica Corrigida, apresenta luminâncias fotópicas para todas as relações S/P relevantes que criam um desempenho visual equivalente ao criado pela luminância fotópica produzida por uma fonte de luz padrão. Segundo os autores, uma vez que a fonte de luz mais comum na iluminação rodoviária é uma lâmpada de sódio em alta pressão de relação S/P de aproximadamente 0,65, este tipo de lâmpada foi utilizada como padrão. Como exemplo de aplicação da tabela, é apresentado o cálculo de equivalência de uma lâmpada a vapor metálico de relação S/P de aproximadamente 1,55. Conforme demonstrado no trabalho, ao considerar o nível de luminância mesópica, uma lâmpada de vapor metálico de luminância igual a 0,4290 cd/m² é equivalente, em termos de desempenho visual, a uma lâmpada de vapor de sódio de luminância igual a 0,50 cd/m².

Segundo os autores, a Tabela de Luminância Fotópica Corrigida permite que os profissionais de iluminação de estradas façam cálculos e medições com os equipamentos e parâmetros atuais para condições fotópicas. Para tanto, basta retirar da tabela a luminância fotópica solicitada pela normativa, a qual depende do tipo de classe de iluminação, levando em conta a relação S/P (determinada pelo fabricante) da fonte de luz escolhida.

Kostic e Djokic (2011) usam os dados da Tabela de Luminância Fotópica Corrigida com a intenção de ajudar no processo de tomada de decisão de escolha do tipo de lâmpada a ser usada em iluminação externa. Eles trazem algumas comparações entre as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e vapor metálico, as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão padrão (amarelas) e brancas, as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e LEDs, e as lâmpadas a vapor metálico e LEDs, com base na sua eficácia em iluminação de ruas e estradas. Os autores esclarecem que, em alguns países, lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão padrão estão sendo substituídas por lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão que possuem temperatura de cor e índice de reprodução de cores corrigidos. Elas são chamadas de lâmpadas de vapor de

sódio em alta pressão brancas e estão disponíveis com um IRC > 60. No entanto, a eficácia luminosa fotópica é até 20% inferior a das lâmpadas a vapor de sódio padrão e custam cerca de duas vezes mais. Com base em uma análise simplificada do consumo de energia elétrica, os resultados mostraram que lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão padrão ainda são mais vantajosas para uso em iluminação rodoviária do que lâmpadas a vapor metálico e lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão brancas, mesmo quando os efeitos mesópicos são levados em consideração. Mas salientam que eficiência e aspectos de manutenção e financeiros não devem representar critérios decisivos para iluminar lugares onde pessoas se reúnem ou lugares com intensa atividade de pedestre. No caso dos LEDs constatou-se uma maior eficiência quando comparados às lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e a vapor metálico, mas que as possíveis economias de energia quando os LEDs são usados são menores do que as declaradas pelos fabricantes de LEDs.

Em Kostic et al. (2012) é apresentado um estudo de caso para verificar comparativamente lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e LEDs em sistemas de iluminação pública de ruas urbanas incluindo os efeitos da visão mesópica. Utilizando a Tabela de Luminância Fotópica Corrigida de Kostic e Djokic (2011), os autores, por meio do programa computacional Ulysse 2.1 da Schröder, simularam vias de diferentes classes de iluminação variando dados como layout de distribuição, distanciamento e altura de postes; comprimento do braço e inclinação da luminária; potência de instalação e dimensionamento das vias. Através da tabela apresentada na pesquisa pode-se inferir que a situação em que a utilização de luminárias LED foi mais vantajosa apresentou as seguintes características: via com duas faixas classe de iluminação M5, postes unilaterais espaçados a 48,0 m com 8,0 m de altura, braço da luminária com 0,5 m sem inclinação, luminância média de 0,42 cd/m², potência de 65 W, entre outros fatores. Neste caso específico a redução de potência instalada ao se utilizar LEDs chegou a 43% quando comparada a lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão.

A partir das simulações, os autores concluíram que a economia de energia ao utilizar LEDs em vez de luminárias a vapor de sódio em alta pressão são muitas vezes insignificantes

se os efeitos mesópicos não estiverem incluídos. Quando considerados, a economia média de energia é de 19% a 26% para layouts com postes unilaterais, intercalados e opostos. Advertiram que luminárias LED não são indicadas em vias classe M1 (luminância média de 2,0 cd/m²), onde maiores níveis de luminância são solicitados em normativas. Ao final, uma análise de custos também é apresentada, concluindo que os LEDs são convenientes para iluminação arquitetônica e merecem ser considerados para uso na iluminação ambiente.

Para esta pesquisa, entende-se que os trabalhos apresentados, embora similares, complementam-se, pois apresentam medições *in loco* e simulações computacionais, estratégias essas que serão adotadas neste trabalho. As próximas publicações são mais recentes e revisam o método utilizado pelos primeiros.

2.1.5 Método 3 – *Adaptation SPD e Source SPD*

Em sua pesquisa, Uchida et al. (2016) desenvolveram um método de simulação para determinar a luminância de adaptação a fim de possibilitar a implementação do sistema de fotometria mesópica CIE. Eles explicam que a luminância de adaptação deve ser determinada com base no estado de adaptação periférica dos olhos dos observadores, uma vez que o sistema de fotometria mesópica foi desenvolvido com base no desempenho da tarefa periférica. O estudo dos autores propõe um método de simulação numérica para luminâncias de adaptação periférica para cenas mesópicas iluminadas ao ar livre, levando em conta três fatores em uma determinada área de medição: movimentos oculares, efeito de luminância circundante no sistema visual dos observadores e distribuições de luminância. Após aplicação do método proposto, foi constatado que em situações de menor movimento ocular, como ao se dirigir um automóvel, a luminância de adaptação pode ser prevista com a luminância média da superfície da estrada. Para situações de maior movimento ocular, caso dos pedestres, a utilização da luminância média da superfície também funciona para a maioria das cenas, mas subestima a luminância de adaptação para circunstâncias que têm fontes de alta luminância ao redor da área de medição.

Tendo essa análise como pressuposto, Uchida e Ohno (2016) apresentam dois métodos simplificados para medir a luminância mesópica uma vez que, segundo eles, não há nenhum método de medição de campo que seja acordado ou aprovado em qualquer comunidade de iluminação. O primeiro deles é denominado como *Adaptation Spectral Power Distribution* (Adaptação de Distribuição Espectral de Potência), e pressupõe que as distribuições espectral de potência (SPDs) da luz refletida nos pontos de teste da superfície da estrada são as mesmas do campo de adaptação. O segundo método, denominado como *Source SPD*, pressupõe que as SPDs da luz refletida são iguais ao SPD da fonte de luz que ilumina a superfície. O objetivo dos autores é que medições fotométricas mesópicas de campo possam ser realizadas sem o auxílio de instrumentos "medidores de luminância S/P (escotópica/fotópica)" e "medidores de iluminância S/P", considerando-se que equipamentos específicos para esse tipo de medição ainda não estão disponíveis comercialmente. Shpak et al. (2012) apud Uchida e Ohno (2016), relataram uso em laboratório de um medidor de luminância S/P com campo de visão de 2°. O equipamento pode medir o nível de luminância de 0,005 cd/m² com 1% de desvio padrão da média por integração em 2 segundos, o que indica que equipamentos deste tipo já estão em desenvolvimento.

2.1.5.1 Adaptation SPD

O método de medição de campo simplificado assume que todos os pontos de teste no campo de adaptação têm a mesma distribuição espectral de potência que o campo de adaptação. Desta maneira, evita-se o uso de um medidor de luminância S/P que tenha um campo de visão pontual, embora permaneça a necessidade de um medidor de luminância S/P que tenha um campo de visão maior e mais luz incidente.

Os autores explicam que determinando o coeficiente de adaptação a partir da luminância fotópica e escotópica do campo de adaptação da mesma maneira que o método CIE 191 - Equações 3 e 4 - e assumindo que a SPD do ponto de teste é aproximadamente igual ao do campo de adaptação, a luminância escotópica do ponto de teste pode ser aproximada a partir da luminância fotópica do ponto de teste e da razão da luminância

de adaptação escotópica para a luminância de adaptação fotópica (Relação S/P). Assim, a partir de derivações do sistema CIE, o método é composto pelas Equações 9 e 10.

$$F_{mes}(L_{v,a}; R_{SP,a}) = \frac{L_{mes;m,a}}{L_{v,a}} = \frac{m + (1 - m)R_{SP,a}V'(\lambda_0)}{m + (1 - m)V'(\lambda_0)} \quad (9)$$

$$\tilde{L}_{mes;m,t} = F_{mes}(L_{v,a}; R_{SP,a}) \cdot L_{v,t} \quad (10)$$

Onde:

$F_{mes}(L_{v,a}; R_{SP,a})$ é fator de aumento mesópico;

$L_{mes;m,a}$ é a luminância de adaptação mesópica (cd/m^2);

$L_{v,a}$ é a luminância de adaptação fotópica (cd/m^2);

m é um coeficiente cujo valor depende das condições de adaptação visual;

$L_{mes;m,t}$ é a luminância mesópica no ponto de teste t (cd/m^2);

$R_{SP,a}$ é a relação S/P da fonte de luz a .

Contudo, tendo em vista que este método assume que a SPD relativa de cada ponto de teste é a mesma que a do campo de adaptação, quando as SPDs são diferentes pode haver erro. Não uniformidade da refletância espectral entre pontos de teste no campo, variações de SPD da iluminação instalada em diferentes direções e existência de outros tipos de fontes de luz que têm diferentes SPDs da iluminação instalada são alguns dos prováveis motivos que podem ocasionar erro no método.

Ao simular distribuições de erro para diferentes fontes de luz (vapor de sódio em alta pressão, vapor metálico e LED - relação S/P 0,65, 1,69 e 2,49, respectivamente) em níveis de luminância variável (de $0,1 \text{ cd/m}^2$ a $2,0 \text{ cd/m}^2$), os autores observaram que os erros são distribuídos em maior alcance para níveis de luminância de adaptação mais escuros, abaixo de $0,5 \text{ cd/m}^2$. Por exemplo, os erros da luminância mesópica em $0,1 \text{ cd/m}^2$ da luminosidade de adaptação fotópica para quase todos os pontos de teste estão dentro de $+1,2\%$ a $-3,0\%$, sendo que somente três exceções estão fora desta faixa (níveis de refletância em pontos de teste sobre material usado para reparar fissuras em estradas). Notaram também, que a extensão do erro variou entre fontes de luz, sendo maior para fontes de luz com relação S/P mais alta; dessa forma, o LED possuiu a maior

distribuição de erro. Ainda assim os índices variam entre +1,2% e -6,0%. Os erros médios desviam-se ligeiramente de zero para níveis de adaptação mais baixos, enquanto para níveis mais altos a proximidade do zero é maior. Uchida e Ohno (2016) mencionam que este desvio é causado principalmente pelas tintas coloridas (tintas amarelas, especificamente) no campo de adaptação, cuja refletância espectral difere muito daquela dos pontos de teste (asfalto).

2.1.5.2 Source SPD

Este método de aproximação assume que todas as SPDs do campo de adaptação e dos pontos de teste são as mesmas que a SPD conhecida da fonte de luz instalada. A partir disso, a luminância de adaptação escotópica é aproximada a partir da luminância de adaptação fotópica e da relação S/P de fonte luminosa, conforme Equação 11.

$$L'_{v,a} \simeq R_{SP,S} \cdot L_{v,a} \quad (11)$$

Onde:

$L'_{v,a}$ é a luminância escotópica de adaptação (cd/m^2);

$L_{v,a}$ é a luminância fotópica de adaptação (cd/m^2);

$R_{SP,S}$ é a relação S/P da fonte de luz.

O coeficiente de adaptação e a luminância de adaptação mesópica são calculados usando as Equações iterativas 3 e 4 do método CIE 191. E a luminância mesópica do ponto de teste calculada da mesma maneira que no método *Adaptation SPD*.

Todavia, Uchida e Ohno (2016) lembram que a luz que atinge os olhos dos observadores normalmente é refletida a partir da superfície da estrada ou de outros objetos no campo, e o método proposto não leva em consideração a refletância espectral dos objetos que refletem a luz. Portanto, uma possível fonte de erro pode ser causada quando a refletância espectral não é neutra. E, como no *Adaptation SPD*, a não uniformidade das SPDs também pode interferir no resultado.

Para este método, as simulações de erro foram conduzidas da mesma maneira que no método anterior. E, de maneira similar, os erros são distribuídos em uma faixa mais ampla para

luminâncias de adaptação menores, bem como para maiores diferenças absolutas da relação S/P. O erro médio também aumenta com a diminuição da luminância de adaptação. Contudo, o método *Source SPD* apresenta uma faixa de 3-6% para o erro médio em luminâncias de adaptação baixa, ficando mais impreciso que o método anterior. Para os autores, esse desvio das SPDs dos pontos de teste da SPD de origem é devido à refletância espectral dos pontos de teste. Assim, empregando a Equação 12, um método de correção utilizando a refletância espectral típica do ponto de teste é proposto quando a refletância espectral típica do ponto de ensaio é conhecida.

$$L'_{v,a} = c \cdot R_{SP,S} \cdot L_{v,a} \quad (12)$$

Onde:

$L'_{v,a}$ é a luminância escotópica de adaptação (cd/m^2);

c é o fator de correção para a relação S/P da fonte;

$L_{v,a}$ é a luminância fotópica de adaptação (cd/m^2);

$R_{SP,S}$ é a relação S/P da fonte de luz.

Embora o fator de correção c varie dependendo da combinação da fonte de luz e do ponto de teste, os valores dos fatores de correção para várias fontes de luz são semelhantes para a refletância espectral típica de uma superfície de estrada. Isso ocorre porque as superfícies de estrada usuais têm ampla refletância espectral, o que significa refletância não-zero em toda a faixa espectral visível (UCHIDA, OHNO; 2016, tradução nossa).

Isto posto, ao repetir as simulações de erro incluindo o fator de correção proposto, a magnitude do erro encontrada foi quase a mesma que a do método *Adaptation SPD*. Porém, os autores apontam que este método tem o mérito único de que medidores de luminância S/P não são mais necessários desde que a distribuição espectral de potência da fonte de origem seja conhecida antecipadamente.

Por fim, uma vez que o método *Source SPD* baseia-se na distribuição espectral da fonte utilizada na instalação de iluminação, a existência de diferentes cores de fontes (ou

objetos), tais como janelas expostas perto da instalação de iluminação, provoca um erro nas luminâncias mesópicas dos pontos de teste (UCHIDA; OHNO, 2016). Os autores finalizam esta pesquisa trazendo simulações de erro conduzidas para uma cena iluminada onde LEDs são empregadas como fontes principais e os pontos de teste também são acidentalmente iluminados por lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão. Os resultados apontam que a magnitude do erro médio é de 4,6% no pior caso (15% da iluminação vinda de lâmpadas de vapor de sódio), e na maioria dos casos, o erro médio é menor que 3%.

2.1.6 Método 4 – CIE 206:2014 - O Efeito da Distribuição Espectral de Potência na Iluminação de Áreas Urbanas e de Pedestres

Em 2014, com vistas a complementar a normativa CIE 191:2010 sobre fotometria mesópica, a mesma entidade publicou um relatório técnico específico para iluminação externa em áreas urbanas e caminhos para pedestres: CIE 206:2014 - O Efeito da Distribuição Espectral de Potência na Iluminação de Áreas Urbanas e de Pedestres. Uma vez que a publicação anterior destaca o efeito da visão mesópica em motoristas rodoviários, esta publicação tem como foco os pedestres de áreas urbanas. Assim, o relatório se propôs a apresentar um resumo das pesquisas recentes sobre as implicações do espectro da lâmpada em tarefas consideradas importantes para os pedestres.

Segundo o relatório, há diferença nas necessidades de iluminação para a realização de tarefas visuais de pedestres em comparação com condutores. Os autores esclarecem que em ruas residenciais e zonas de pedestres (parques, calçadas), a iluminação pública deve permitir aos usuários discernir obstáculos ou outros perigos no seu caminho, estar ciente da presença de outros pedestres, amigáveis ou não, que podem estar próximos e, que a iluminação deve aumentar a percepção de segurança. Para os pedestres, o brilho é importante porque uma iluminação mais brilhante tende a produzir níveis mais altos de segurança percebida em um local específico (CIE, 2014). Essas e outras necessidades serão vistas de maneira aprofundada na próxima seção deste capítulo, específica sobre impressões pessoais. Finalmente, o relatório examina a interação entre distribuição espectral de potência e iluminamento, mas não

examina os efeitos da distribuição espacial ou uniformidade de iluminação.

Após apresentação e análise das pesquisas, a CIE infere que a distribuição espectral de potência da lâmpada, a qual influencia no reconhecimento da cor, interfere na detecção de obstáculos, na aceitabilidade e no brilho espacial. Para o reconhecimento facial, porém, ainda não existe consistência suficiente entre os estudos para extrair quaisquer declarações conclusivas quanto ao efeito da SPD da fonte luminosa. A conclusão dos autores é de que uma distribuição espectral de potência desejável é aquela que tem um largo espectro, isto é, emissão em toda a gama visível. Esta distribuição tenderia a assegurar valores mais elevados de índices de distribuição de cores e de relação S/P, e assegurar a estimulação de ambos os fotorreceptores (cones e bastonetes). Dessa forma, a evidência experimental sugere que uma iluminação com maiores valores de IRC e relação S/P seria vantajosa para pedestres em ruas residenciais, uma vez que melhoram o desempenho das tarefas e que menores índices de iluminância poderiam ser empregados (CIE, 2014).

Embora a CIE não apresente neste relatório os níveis de iluminamento a serem adotados, como em CIE 115:2010, é demonstrado, de modo exemplificativo, como países como o Reino Unido e a Itália têm tratado o tema em suas normativas nacionais. Especificamente no Reino Unido, a recomendação inglesa BS 5489-1:2013 traz instruções de como aplicar as recomendações CIE de fotometria mesópica através de uma abordagem escalonada para especificar os níveis de iluminância.

Esta orientação recomenda que a iluminância fotópica seja reduzida utilizando uma escala não uniforme de acordo com a relação S/P e o nível de adaptação, de modo que uma relação S/P maior permita uma iluminância fotópica menor, mas apenas quando se utilizam lâmpadas com um índice geral de reprodução de cores CIE igual ou maior que 60 (CIE, 2014, tradução nossa).

Ainda são apresentadas tabelas trazendo os níveis calculados, sendo a redução do iluminamento em função da relação S/P calculada utilizando o sistema recomendado pela

CIE para a fotometria mesópica - CIE 191:2010. As tabelas foram desenvolvidas tendo como base a lâmpada de preferência quando as normas nacionais foram criadas; por exemplo, no Brasil o maior uso é de lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão, então ao atender as exigências da norma utilizando este tipo de lâmpada as condições de iluminação seriam satisfatórias. Como na Europa tanto lâmpadas a vapor de sódio de baixa pressão quanto de alta pressão ainda estão largamente em uso, são apresentadas duas tabelas de acordo com essas lâmpadas. O que a aproximação apresentada nas tabelas faz é manter a luminância mesópica igual sob tipos diferentes de lâmpada. O Anexo C deste trabalho traz a tabela que tem como base lâmpadas de sódio em alta pressão.

De maneira similar, ressalta-se que também a IES em sua recomendação técnica IES RP-20 revisada de 2016, recomenda o uso de lâmpadas com um índice de reprodução de cores superior a 60 para situações que requeiram maior segurança (IES, 2016).

2.2 PERCEPÇÕES PESSOAIS E TAREFAS VISUAIS

Do mesmo modo que um arquiteto estuda o programa de necessidades de um cliente ao dar início a um projeto arquitetônico, um profissional ao executar um projeto luminotécnico de uma iluminação externa deve em primeiro lugar entender quais são as necessidades visuais básicas e prioritárias de quem o contrata.

O projeto de iluminação deve seguir um processo planejado para transformar uma ideia numa proposta realizável que satisfaça ao comitente e aos usuários do espaço, do ponto de vista técnico, econômico e seja de mínimo impacto ambiental. (MASCARÓ, 2006, p. 111).

Algumas das necessidades são consenso entre autores e manuais técnicos (CIE, 2000; MASCARÓ, 2006; ABNT, 2012; IES, 2014), tais como orientação espacial, segurança pessoal percebida, segurança viária, identidade e ambiência, promoção do espaço urbano. De maneira similar, a CIE (2014) define que a iluminação rodoviária deve permitir que usuários da via (motoristas, ciclistas, pedestres) sejam capazes de movimentar-

se em segurança; que pedestres vejam perigos, orientem-se, reconheçam outros pedestres e se sintam seguros e, que a iluminação melhore a aparência noturna do ambiente. Além dessas necessidades, um sistema eficiente energeticamente também é citado como premissa de projeto conforme já explicitado.

A seguir, algumas das necessidades dos usuários serão conceituadas, pois embasarão a pesquisa qualitativa que será realizada junto aos usuários da área de estudo de caso. Pesquisas qualitativas discutindo interações entre atividades visuais e distribuições espectrais de potência de fontes luminosas e uniformidade de iluminamento também serão apresentadas.

2.2.1 Orientação Espacial

Tendo como foco o processo de orientação dentro de um espaço urbano, Lynch (1999) elucida que todo animal que transita tem como atividades indispensáveis estruturar e identificar o ambiente que o circunda. O que une estrategicamente essas atividades é uma imagem mental generalizada do meio ambiente que o indivíduo retém daquele espaço exterior. Esta imagem interpreta informações e comanda ações, e é consequência da percepção imediata e da memória de outras experiências.

Essas imagens do meio ambiente, segundo Lynch (1999, p. 16), “[...] são o resultado de um processo bilateral entre o observador e o meio”. O meio ambiente diferencia e relaciona as situações do cotidiano, e o observador seleciona, organiza e dá sentido aquilo que vivencia, conforme seus objetivos e sua habilidade de adaptação.

Todas as pessoas necessitam orientar-se para poder andar de um lugar a outro, esta tarefa torna-se mais difícil em um espaço complexo como o de um campus universitário. A orientação, vista como um pré-requisito fundamental para a acessibilidade espacial, é um processo cognitivo que implica na capacidade do indivíduo de mentalmente saber onde está e para onde deseja ir. Esse processo do indivíduo em perceber e tratar as informações necessárias para seu deslocamento resulta das

informações contidas no ambiente e da habilidade para interpretar estas informações (ELY et al., 2008).

Sendo essa capacidade de movimentar-se de forma independente uma necessidade básica de todo usuário, Lynch (1999) acrescenta que a imagem clara do ambiente permite ao indivíduo deslocar-se facilmente e depressa encontrando os destinos desejados. Também que o meio ambiente organizado pode servir como uma forte referência, tornando-se um organizador de atividade, crença ou conhecimento. Ao indivíduo dar-se-á, inclusive, uma sensação de segurança.

Mascaró (2006) comenta especificamente sobre a orientação sob a ótica da iluminação artificial externa:

Na cidade, uma orientação adequada supõe a capacidade para identificar nomes de ruas, números de edifícios e outros elementos do entorno urbano. Um espaço bem iluminado junto a uma boa sinalização facilita a orientação. A iluminação diferenciada mudando a cor da luz para vias de circulação e vias de acesso favorece a guia e orientação visual. A iluminação de edifícios importantes da cidade, tais como torres de igrejas, arranha-céus, pontes, monumentos etc., além de destacá-los pode fazê-los servir de centro de referência. (MASCARÓ, 2006, p. 113)

Tendo esse conceito como base, para auxiliar a orientação de pedestres e motoristas, a NBR 5101:2012 (ABNT, 2012) recomenda que em travessias de pedestres e cruzamentos urbanos com alta movimentação de pessoas sejam instaladas lâmpadas com temperatura de cor diferente das instaladas nas vias, assim como maiores níveis de iluminamento.

2.2.2 Segurança Pessoal Percebida

A ausência do medo de perigo imediato de um indivíduo enquanto transita por um ambiente específico é que define a segurança pessoal percebida. Esse medo generalizado de se tornar uma vítima está associado a contextos sociais e espaciais específicos e a traços relacionados à ansiedade geral da pessoa (BLÖBAUM; HUNECKE, 2005).

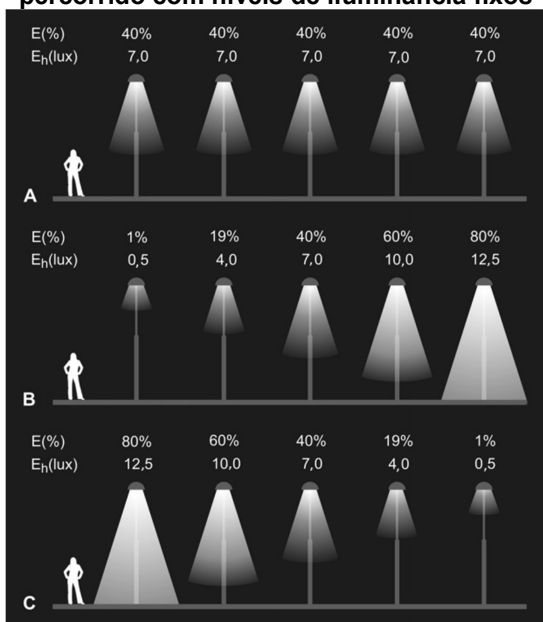
A relação entre a iluminação noturna e a segurança pessoal percebida ao se caminhar pelas ruas é intuitivamente forte. Contudo, pouco conhecimento prático existe sobre o tema. Com o objetivo de economia de energia e redução de poluição luminosa, estudos de novas tecnologias têm caminhado para implantação de sistemas dinâmicos de iluminação pública que se adaptam continuamente à presença e ao comportamento dos usuários. A partir disso, surgiram questionamentos sobre o efeito da iluminação percebida, não só sobre a quantidade de iluminação, mas também sobre em quais lugares os pedestres necessitam de mais luz para se sentirem seguros (HAANS; KORT, 2012). Além disso, Rea, Bullough e Brons (2014), em análise sobre a influência da distribuição espectral de fontes de luz para iluminação pública, concluíram que o senso pessoal de segurança em um estacionamento possui maior correlação com as percepções de brilho de cena do que com os níveis de iluminâncias fotópicas. Rea, Bullough e Akashi (2009) – após a realização de cinco diferentes experimentos (três de impressões subjetivas sobre segurança, um de reconhecimento facial e um de testemunha ocular) com pessoas em cenas noturnas – concluíram que para a mesma iluminância fotópica, as cenas iluminadas por lâmpadas a vapor metálico são vistas como mais seguras do que aquelas iluminadas por lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão.

Segundo Haans e Kort (2012), a sensação de segurança imediata pode ser baseada em três variáveis: **perspectiva** (o quão distante o pedestre consegue ver ao seu redor e analisar se há ou não perigo); **escape** (se no meio existem rotas em potencial para fuga); e **ocultação** (pontos cegos no caminho onde infratores poderiam se esconder). Em todas as variáveis a iluminação adequada influencia diretamente nas sensações individuais, seja propiciando maior visibilidade a longas distâncias e aumentando a perspectiva, seja indicando rotas alternativas durante o percurso, seja iluminando uniformemente e evitando sombras.

Em experimento realizado no campus universitário da Eindhoven University of Technology (Países Baixos) pelos pesquisadores Haans e Kort (2012) foi testada a percepção de voluntários quanto a sua sensação de segurança quando submetidos a diferentes condições de luz em determinados locais. Dois testes foram realizados utilizando três condições de

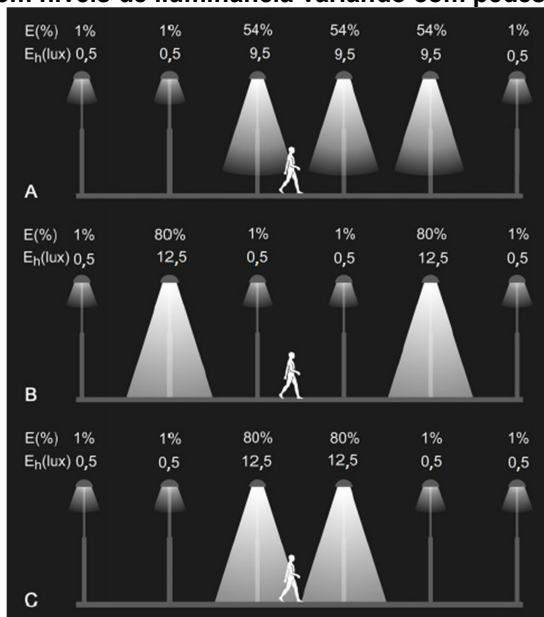
luz (uma uniforme, uma com mais luz sobre a pessoa e menos no entorno, uma com mais luz no entorno e menos sobre a pessoa) em dois locais distintos. O primeiro com pessoas em pontos fixos olhando para o caminho a ser seguido e o segundo com pessoas caminhando. As Figuras 2 e 3 apresentam ilustrações explicativas realizadas pelos autores para demonstrar as condições de iluminação dos experimentos. A conclusão a que chegaram os pesquisadores foi de que uma elevada sensação de segurança é associada com alta perspectiva e escape, mas de baixa ocultação, como já era esperado. Contudo, ao contrário do que se esperava, a perspectiva foi aumentada quando havia mais luz sendo oferecida nas imediações dos participantes, ao invés de mais luz sobre o caminho que havia pela frente (HAANS; KORT, 2012).

Figura 2: Teste 1 – Pessoas paradas olhando para o caminho a ser percorrido com níveis de iluminância fixos



Fonte: HAANS; KORT, 2012, p. 346

Figura 3: Teste 2 – Pessoas caminhando pelo percurso avaliado com níveis de iluminância variando com pedestre



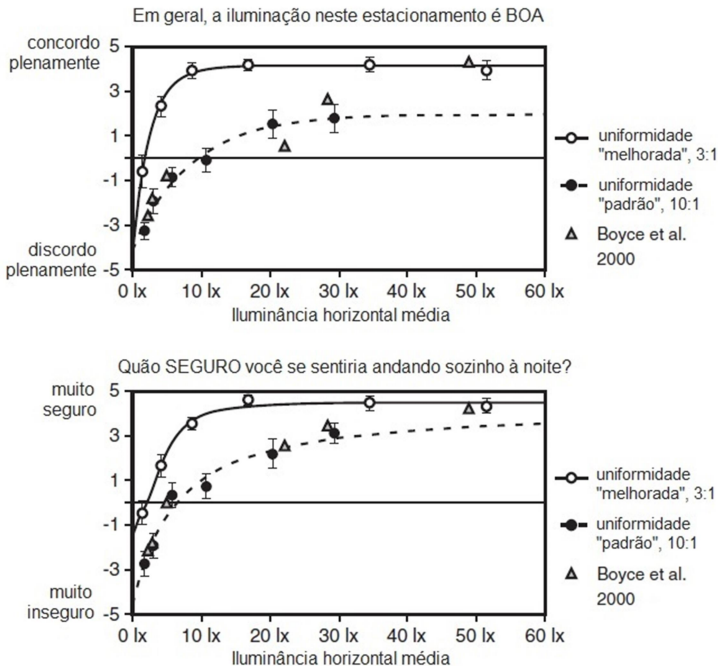
Fonte: HAANS; KORT, 2012, p. 349

Narendran, Freyssinier e Zhu (2015) pesquisaram fatores humanos e avaliaram através de questionário quais condições de uniformidade de iluminância propiciam maior percepção de segurança e maior capacidade de ver ao redor e à distância. Os objetivos do trabalho foram testar a relação entre a uniformidade de iluminância horizontal e o nível de luz com a aceitação do usuário em estacionamentos; após, verificar se uma iluminação uniforme pode ser aplicada usando um nível de luz médio mais baixo; e, por fim, avaliar o potencial de redução de energia de iluminação uniforme, como a fornecida por muitas fontes de LEDs, em comparação com lâmpadas de descarga de alta intensidade tradicionalmente grandes e únicas. O estudo de campo foi realizado em um pátio de estacionamentos e contou com quinze voluntários pertencentes à comunidade local. Para avaliar os diferentes níveis de uniformidade foram instalados postes temporários com luminárias a LED dimerizáveis. Doze cenários foram montados contendo duas condições de uniformidade (uma melhorada e uma padrão) em seis níveis de

luz nominais (2,0 lux, 5,0 lux, 10,0 lux, 20,0 lux, 40,0 lux e 60,0 lux).

A Figura 4 apresenta os resultados para duas das perguntas realizadas, contendo além dos resultados pesquisados, resultados de uma pesquisa realizada por Boyce et al. (2000) apud Narendran, Freyssinier e Zhu (2015) em estudo similar realizado com níveis de uniformidade padrão e iluminâncias médias horizontais diferentes. As avaliações, segundo os autores, apontaram de maneira consistente que, quando comparados com a condição de "uniformidade padrão" (proporção 10:1), as percepções dos sujeitos sobre a qualidade elevada da iluminação e como eles se sentem seguros sob a condição de "uniformidade melhorada" (proporção 3:1) atingiram classificações mais elevadas em níveis de iluminação reduzidos.

Figura 4: Respostas subjetivas médias dadas para duas perguntas em levantamento sobre iluminação em estacionamento iluminado sob diferentes condições de uniformidade



Assim, para os autores citados, ao aumentar a uniformidade da iluminância pode-se permitir o uso de níveis mais baixos iluminância, o que conseqüentemente resulta em menor uso de energia. Os parâmetros indicados são de uma iluminância média de 9,0 lux (podendo variar de 4,5 lux a 13,5 lux). Após esta definição, a pesquisa procedeu a uma avaliação de diferentes tipos de luminárias para verificar a distribuição luminosa dessas. Os resultados desta etapa serão vistos na seção 2.3.2, em Análise Comparativa.

Outro fator relevante que influencia na sensação de segurança quando se transita à noite é o reconhecimento de pessoas se aproximando ou nos arredores. De acordo com a CIE (2000), reconhecer se a outra pessoa é, provavelmente, amigável, indiferente ou agressiva em tempo suficiente para se ter qualquer resposta adequada é o necessário para se fornecer o senso de segurança pessoal. O relatório técnico CIE 206:2014 avaliou a influência do tipo de lâmpada na capacidade de reconhecimento facial com base em seis experimentos. Em três estudos (RAYNHAM; SAKSVIKRØNNING, 2003; YAO; SUN; LIN, 2009; KNIGHT; VAN KEMENADE, 2006 citados por CIE, 2014), foi relatado que o reconhecimento facial foi afetado pelo tipo de lâmpada: lâmpadas a vapor metálico e fluorescentes proporcionaram melhor reconhecimento facial quando comparadas a lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão, para uma mesma iluminância vertical. Por outro lado, em outros três estudos (ALFERDINCK et al., 2010; REA; BULLOUGH; AKASHI, 2009; BOYCE; REA, 1990 citados por CIE, 2014), foi relatado que o tipo de lâmpada não teve efeito significativo sobre o reconhecimento facial. Embora a análise em conjunto dos estudos não forneça dados conclusivos suficientes para inferir que há influência da distribuição espectral no reconhecimento facial, espera-se que uma iluminação com maior relação S/P melhore a detecção de pedestres na visão periférica. Essa dedução tem como base o estudo desenvolvido por Eloholma et al. (2003 apud CIE, 2014), o qual comparou a visibilidade no eixo e fora do eixo em via iluminada por lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão e a vapor metálico. Em um longo túnel subterrâneo, os observadores foram instruídos a indicar a que distância eles poderiam apenas detectar um pedestre andando em direção a eles. Em uma das séries ensaiadas o desempenho foi melhor sob as lâmpadas a vapor metálico com visualização

fora do eixo (20°): o pedestre podia ser identificado com uma luminância fotópica menor sob lâmpadas a vapor metálico ($\sim 0,0025 \text{ cd/m}^2$) do que com lâmpadas a vapor de sódio ($\sim 0,0035 \text{ cd/m}^2$).

Dada essa insegurança que se tem ao se caminhar à noite, a CIE (2000) em seu Relatório Técnico nº136 (Guia para Iluminação de Áreas Urbanas) apresentou um novo parâmetro alternativo de desenho, o qual deve complementar a iluminância horizontal a nível do solo: a iluminância semi-cilíndrica a 1,5 m acima do nível do solo. Para reconhecer qualquer sinal de hostilidade e tomar uma ação evasiva ou defensiva, a distância mínima exigida é, segundo pesquisas consultadas pela CIE, 4,0 m à frente do observador. Assim, o parâmetro considera que a iluminância vertical a 1,5 m (altura média do rosto humano a partir do nível do solo) irá fornecer os requisitos de visibilidade adequada.

2.2.3 Segurança Viária e Detecção de Obstáculos

Além da segurança pessoal percebida, outra maneira de uma pessoa sentir-se segura ao andar pela rua durante a noite é que ela possa ver os obstáculos que possam estar a sua frente, e também que os condutores da via adjacente sejam capazes de vê-la. De acordo com a CIE (2014), é importante notar a diferença de natureza dessas necessidades: sem um movimento seguro seria difícil caminhar ao longo de uma rua; sem uma sensação geral de segurança, alguém poderia escolher não andar pela rua.

Em pesquisa em laboratório, Fotios e Cheal (2009) investigaram o efeito da fonte de luz, iluminância e idade do observador sobre a capacidade de detectar obstáculos na visão periférica sob condições mesópicas. Os autores definem obstáculo como uma irregularidade que pode ocasionar um tropeço, ou um objeto que se aproxima e não é notado a tempo para evitar colisão. Os obstáculos potenciais incluem irregularidades no pavimento (laje de pavimentação levantada, tampa de câmara de inspeção, buraco no pavimento), obras de construção, bicicletários, automóveis estacionados em calçadas, mobiliário urbano etc. Nesta pesquisa foram examinadas quais as condições necessárias para que uma laje de pavimentação levantada seja detectada sob diferentes condições de

distribuição espectral e iluminamento. Para os testes utilizaram-se dois tipos de lâmpadas a vapor metálico (2700 K e 4200 K) e uma a vapor de sódio em alta pressão padrão, sob iluminâncias de 0,2 lux, 2,0 lux e 20 lux, medidas na superfície de pavimentação simulada. Os observadores foram separados em duas faixas etárias: jovens, idade inferior a 45 anos; e mais velhos, idade superior a 60 anos.

Após os testes, os pesquisadores Fotios e Cheal (2009) concluíram que o tipo de lâmpada pode afetar a detecção de obstáculos e que o efeito é fraco quando se aproxima do estado fotópico e aumenta à medida que a luminância diminui através da faixa mesópica em direção ao escotópico. Com 0,2 lux, a lâmpada de vapor metálico de 4200 K (que possui a relação S/P mais elevado das três) proporcionou melhores condições para a detecção dos obstáculos; enquanto a lâmpada a vapor de sódio (de relação S/P mais baixa) forneceu condições mais pobres. Contudo, não houve diferenças estatisticamente significativas entre as alturas de detecção para as três fontes de luz a 2,0 e 20 lux. A diferença entre os observadores mais velhos e os mais jovens foi de que a 0,2 lux os indivíduos mais velhos tenderam a exigir que os obstáculos fossem mais elevados do que para os indivíduos jovens, mas a 20 lux não houve diferença na altura de detecção para os dois grupos etários.

Por fim, acidentes envolvendo pedestres constituem uma elevada percentagem de todos os acidentes rodoviários, especialmente durante a noite e o entardecer. Muitas das ocorrências ocorrem em locais movimentados como próximos a paradas de ônibus e entradas de estações de trens. Supõe-se que as velocidades de tráfego geralmente mais baixas nas áreas residenciais transmitam uma falsa sensação de segurança aos pedestres. Mesmo que a causa relativa à alta incidência de acidentes nestas ruas seja desconhecida, o fato não pode ser ignorado e padrões adequados e apropriados de iluminação devem ser fornecidos para que o número de ocorrências seja reduzido (CIE, 2000).

2.3 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO PARA ESPAÇOS PÚBLICOS

Para compreender os sistemas de iluminação pública hoje aplicados, primeiramente será apresentada uma contextualização histórica das fontes de luz. Na sequência, uma

análise comparativa entre os tipos de lâmpadas utilizados será apresentada com o intuito de avaliar algumas das características das tecnologias em conjunto.

2.3.1 Contexto histórico

A evolução dos sistemas de iluminação pública, proveniente das lâmpadas elétricas como são conhecidas hoje, acompanha os avanços tecnológicos, principalmente os advindos da Revolução Industrial. A instalação das primeiras lâmpadas no Brasil data do final do século XIX, tendo sido colocadas no estado do Rio de Janeiro. Paralelamente, os lampiões a gás resistiam à nova tecnologia. Em 1916 havia em São Paulo 864 lâmpadas elétricas e 8.605 lampiões a gás. Contudo, foi a partir da segunda metade do século XX que preocupações com o rendimento energético dos sistemas tiveram maior avanço. Nos anos 60 e 70 houve melhora na eficácia das lâmpadas e a maior luminância das fontes exigiu melhor controle do brilho e do sistema ótico das luminárias. Também surgiram nessa data importantes avanços na discussão de temas específicos como a cor (MASCARÓ, 2006).

A partir desse panorama, as primeiras lâmpadas instaladas foram as do tipo incandescentes. A lâmpada a vapor de mercúrio foi inventada em 1931, mas até sua produção e utilização comercial em larga escala alguns anos foram necessários. Foi a partir da década de 60 que se iniciou a utilização em massa das lâmpadas de descarga. Nessa mesma década surgiram as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão e de vapor metálico (VASCONCELLOS; LIMBERGER, 2013).

No Brasil, a Eletrobrás estimou que em 2012 existiam cerca de 15 milhões de pontos de iluminação pública instalados. Grande parte desses, mais de 60%, já convertidos para tecnologia de lâmpadas de descarga a vapor de sódio. Contudo, ainda há mais de 30% de lâmpadas a vapor de mercúrio e outra parte de lâmpadas mistas, fluorescentes e incandescentes (VASCONCELLOS; LIMBERGER, 2013). Atualmente, a tecnologia LED (*lighting emitting diode*) também tem sido aplicada na iluminação pública.

Nos Estados Unidos, estima-se que em 2013 o uso de LEDs neste segmento já detinha uma participação de mercado de 14%, enquanto as tecnologias de sódio em alta pressão e de

vapor metálico constituíam a maioria do restante. O Departamento de Energia do país prevê que esse número subirá rapidamente para 50% no ano de 2017 e que em 2030 quase 100% das vendas de equipamentos para ruas e avenidas será a base de LED (DOE, 2014a).

Contudo, apesar da grande divulgação quanto à eficiência energética do produto baseado em LED, informações acerca de sua real durabilidade e de seu custo de manutenção a médio e longo prazo ainda estão sendo construídas.

2.3.2 Análise Comparativa

Inúmeras são as pesquisas que têm publicado avaliações comparativas dos sistemas de iluminação pública. E, como já explicitado na seção de visão mesópica, muito disso se deve à grande propaganda acerca da elevada eficiência energética da tecnologia LED. E junto com uma alta expectativa muitas dúvidas surgiram quanto à qualidade dos produtos LED.

Nesta seção, serão apresentados dados publicados pela IES através de sua revista de Recomendações Práticas para Iluminação de Áreas de Estacionamento (IES RP-20-14, 2016), resultados de pesquisas relevantes da área, relatórios de instituições governamentais e catálogos de grandes fabricantes.

Primeiramente, a Tabela 3 reúne as características de lâmpadas utilizadas em iluminação externa. Comparadas as tecnologias é possível verificar significativas diferenças entre cada uma, principalmente no que se refere à reprodução de cores. No mercado americano de luminárias LED cerca de 50% dos produtos possui um índice de reprodução de cores na faixa dos 70. E outra grande parcela de LEDs apresenta índices de reprodução de cores superiores a 80%. Ainda que apresentem índices mais baixos quando comparadas a luminárias LED de uso interno, muitas aplicações de iluminação de área externa têm requisitos mais baixos para a qualidade da cor, o que torna o perfil de desempenho adequado (DOE, 2016). Também chamam à atenção as características das lâmpadas LED que não apresentam limite de faixa superior, uma vez que os valores têm crescido velozmente, e a ampla gama de opções de temperaturas que cor disponível. As lâmpadas de sódio de baixa pressão destacam-se por apresentarem o pior desempenho em termos de disponibilidade de potência e opção única para a

temperatura de cor, contudo, apresentam destaque positivo na eficiência luminosa.

Tabela 3: Características gerais de fontes luminosas

FORTE LUMINOSA	Potência da lâmpada (W)	Eficiência luminosa (lm/W)	Vida média nominal (H)	IRC	Temperatura de cor (K)
LED	20 +	90 + *	50.000 +	80 + *	2.6000 – 10.0000
Vapor de mercúrio	50 – 1.000	40 - 60	Até 24.000+	15 - 50	3.200 – 6.800
Sódio em alta pressão	35 - 1.000	70 – 140	Até 40.000	22 – 30	1.900 – 2.100
Vapor metálico (quartzo)	32 - 2.000	64 – 110	Até 20.000	62 – 75	3.200 – 4.500
Vapor metálico (cerâmica)	15 - 830	80 – 120	Até 30.000	Até 95	2.800 – 4.500
Sódio de baixa pressão	18 – 180	Até 180	14.000 a 18.000	Menos de 44	1.700

* LED de cor branca por conversão por fósforo

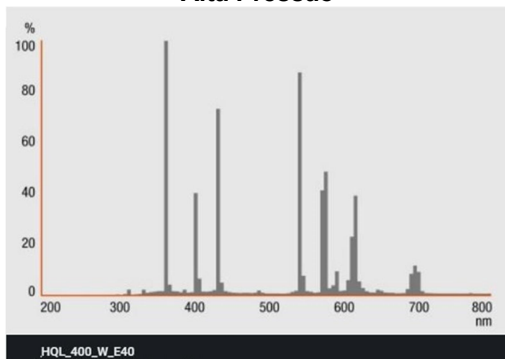
Fonte: IES, 2011 apud IES, 2016, p. 34 (adaptada)

Com o intuito de comparar os índices de reprodução de cores do conjunto de lâmpadas, as Figuras 5 a 8 apresentam a distribuição espectral de cada tecnologia. Correspondem a produtos fabricados pela OSRAM para aplicações em iluminação pública. Porém, como não são disponibilizadas distribuições espectrais para luminárias, caso dos LEDs, foi escolhida uma lâmpada LED de temperatura de cor de 4000 K. De acordo com relatório de 2014 do programa CALiPER do Departamento de Energia dos EUA, os primeiros produtos LEDs de iluminação da área externa eram conhecidos por altas temperatura de cor correlata, cerca de 6500 K. No relatório daquele ano, porém, 4000 K e 5000 K foram os mais comuns, demonstrando um movimento para a redução da temperatura de cor (DOE, 2014b).

Confirmando a tendência, no relatório de 2016 ainda mais produtos apresentaram temperatura de cor mais baixas: aproximadamente 12% das luminárias listadas para ruas e estradas apresentaram temperatura de cor de 3000 K ou inferior, e 37% um valor nominal de 4000 K (DOE, 2016).

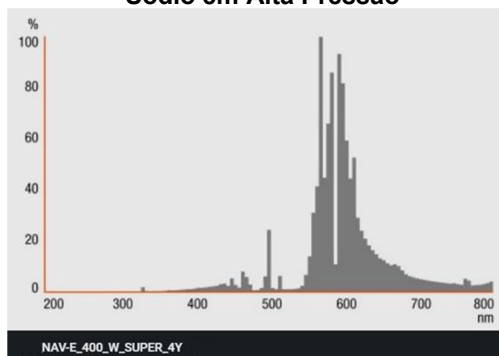
Como visto na Tabela 3, os índices de reprodução de cores são distintos. Destacando-se as lâmpadas a vapor metálico e as lâmpadas LED pela elevada abrangência no espectro e maior proporção de radiação de curto comprimento de onda que as lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão.

Figura 5: Distribuição Espectral – Lâmpada de Mercúrio em Alta Pressão



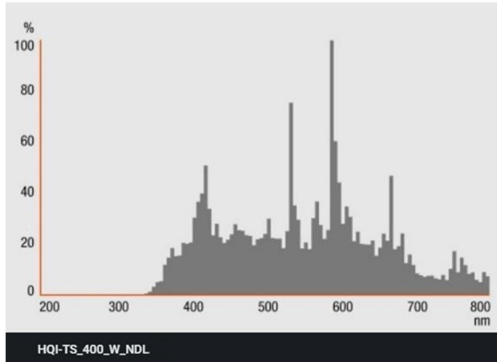
Fonte: OSRAM, 2016a.

Figura 6: Distribuição Espectral – Lâmpada de Vapor de Sódio em Alta Pressão



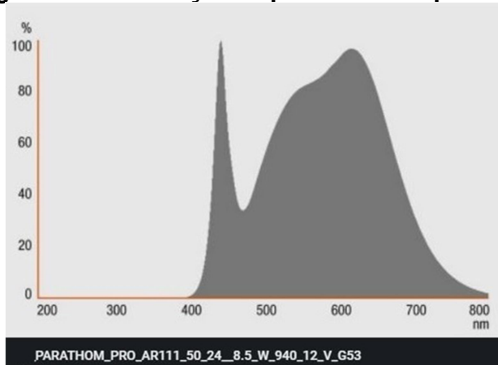
Fonte: OSRAM, 2016a

Figura 7: Distribuição Espectral – Lâmpada Vapor Metálico



Fonte: OSRAM, 2016a

Figura 8: Distribuição Espectral – Lâmpada LED



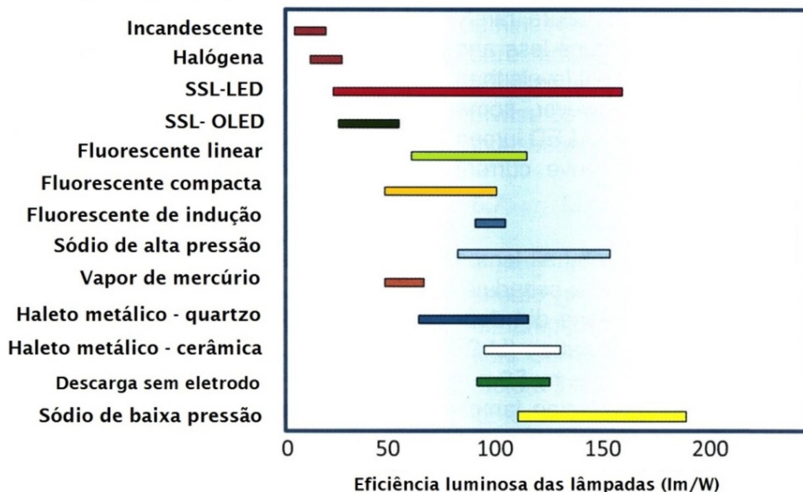
Fonte: OSRAM, 2016b

Rea, Bullough e Brons (2014) analisaram especificamente a influência da distribuição espectral de fontes de luz para iluminação exterior. Segundo os autores, fontes com maior proporção de radiação de curto comprimento de onda são vistas como mais brilhantes para a mesma iluminância fotópica. Em análise comparativa com a tecnologia de vapor de sódio em alta pressão, mencionam que poderia ser aplicada uma redução de 46% no nível de iluminância fotópica horizontal em um estacionamento ao utilizar um sistema de iluminação com LEDs de temperatura de cor de 6500 K, mantendo níveis iguais de brilho percebido e o mesmo senso de segurança pessoal. Essa mudança reduziria a demanda de energia elétrica em 35% em

comparação com a fonte de luz de vapor de sódio em alta pressão. De acordo com o Departamento de Energia dos EUA, no caso das luminárias de rua e estradas, a tendência linear média indica que para cada aumento de 1000 K na temperatura de cor a eficácia aumenta em 2,7 lm/W. Em termos práticos, por exemplo, uma fonte média de 3000 K seria cerca de 9,5 lm/W menos eficaz do que uma fonte de 6500 K (DOE, 2016). Mas como foi citado, as fontes de 6500 K estão cada vez menos disponíveis no mercado.

A Figura 9 apresenta um dos mais relevantes itens na escolha da lâmpada para a iluminação externa: a eficiência luminosa (lm/W). Destacam-se as fontes a vapor de sódio, de alta e de baixa pressão, e a LED por seus elevados rendimentos. Tal fato explica, em parte, a permanência de uso das lâmpadas a vapor de sódio no mercado com índices de reprodução de cores tão baixos mesmo após o lançamento de novos produtos de melhor qualidade, como os a vapor metálico.

Figura 9: Intervalo aproximado de valores de eficiência luminosa para as principais famílias de lâmpada

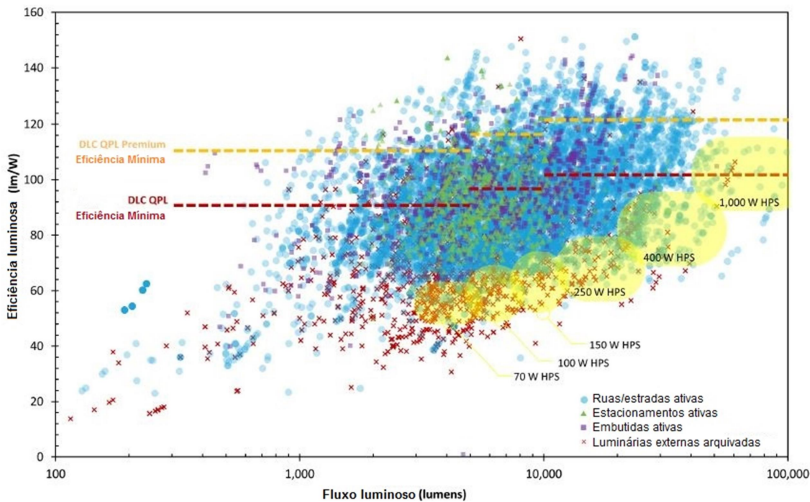


Fonte: IES, 2016, p. 12

Segundo relatório do programa CALIPER de 2014, a eficácia de produtos de iluminação externa a LED tem aumentando cerca de 10 lm/W por ano. Nas análises daquele

ano o desempenho médio foi em torno de 80-90 lm/W, sendo que os produtos mais eficazes apresentaram em torno de 120-150 lm/W (DOE, 2014b). No relatório seguinte de 2016, o produto de maior eficácia é um TLED de 190 lm/W. Um gráfico comparativo entre os produtos LED testados e fontes padrão de vapor de sódio em alta pressão de diferentes potências é apresentado na Figura 10. É possível verificar, pela Figura 10, que os produtos LED oferecem alternativas mais eficientes quando comparados aos produtos de vapor de sódio em alta pressão. O relatório indica que alguns produtos LED oferecem a mesma quantidade de luz utilizando um terço da potência de uma luminária com lâmpada a vapor de sódio em alta pressão, especialmente quando comparadas a versões de baixo consumo como as fontes de vapor de sódio de 70 W. O relatório conclui que os três tipos de luminárias de área externa listadas (rua/estradas, estacionamentos e de embutir) têm uma eficácia média inferior a dos três tipos de luminárias interiores testadas, embora as diferenças sejam relativamente pequenas (DOE, 2016).

Figura 10: Eficiência luminosa e fluxo luminoso



Fonte: DOE, 2016, p. 3

Sob um ponto de vista similar, a LSAE (*luminaire system application efficacy*) é utilizada para avaliar a eficiência energética de luminárias. Projetada para quantificar o

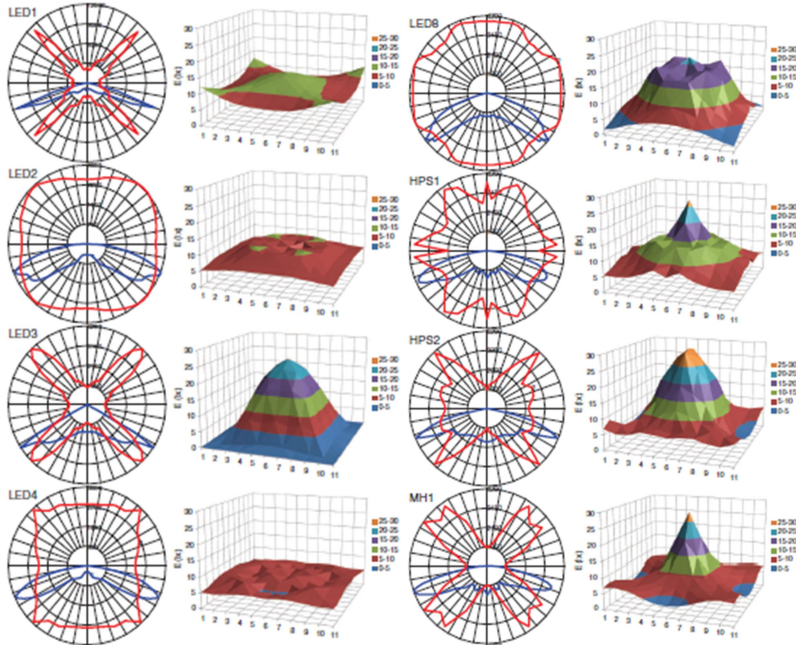
desempenho de uma luminária usando qualquer tipo de fonte de luz, o parâmetro LSAE utiliza a unidade lm/W e avalia o atendimento às necessidades da aplicação da luminária e seu consumo de energia. Narendran, Freyssinier e Zhu (2015), após estudarem os fatores humanos acerca dos benefícios de uma uniformidade melhorada da iluminância em um estacionamento, como já visto em seção anterior, avaliaram distintas fontes de luz em diferentes luminárias para aplicação em iluminação pública. Através de simulação computacional, utilizando o programa Visual Professional 2.6, os autores compararam um projeto de luminária LED personalizado e otimizado (LED1) com luminárias comerciais. Os produtos de mercado incluíam duas soluções de sódio em alta pressão (HPS), duas a vapor metálico (MH) e cinco luminárias de LED.

A Figura 11 apresenta a distribuição de intensidade luminosa e a distribuição de iluminância de algumas das luminárias estudadas. Os autores indicam que luminárias como as LED1, LED2 e LED4 apresentam maior eficácia de aplicação, uma vez que distribuem a luz de maneira mais uniforme e reduzem o fluxo luminoso no centro da distribuição. Após, perceberam que, através de uma uniformidade melhorada, o valor de iluminância médio pode ser mais baixo se for mais uniforme.

As Figuras 11 e 12; segundo Narendran, Freyssinier e Zhu (2015); demonstram que embora seja potencialmente mais eficiente criar distribuições uniformes de iluminância com LEDs, também é possível perder completamente o alvo. Isso é percebido nas luminárias LED3 e LED8, que mesmo sendo constituídas por LEDs altamente eficazes, foram concebidas para substituir diretamente produtos a vapor de sódio em alta pressão ou a vapor metálico e assim terem distribuições de intensidade luminosa semelhante. Fato que torna sua eficácia de aplicação muito baixa quando se considera a uniformidade melhorada. Assim, os resultados das simulações mostraram que uma luminária LED otimizada (modelada para o uso específico) pode ser aproximadamente 50% mais eficiente energeticamente fornecendo a mesma iluminância média no solo, quando comparada às luminárias com lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão, e com melhor uniformidade. Desse modo, uma vez que é possível direcionar a luz de forma eficiente para onde é

necessário, luminárias LED podem ser projetadas para ter uma eficácia de aplicação muito maior.

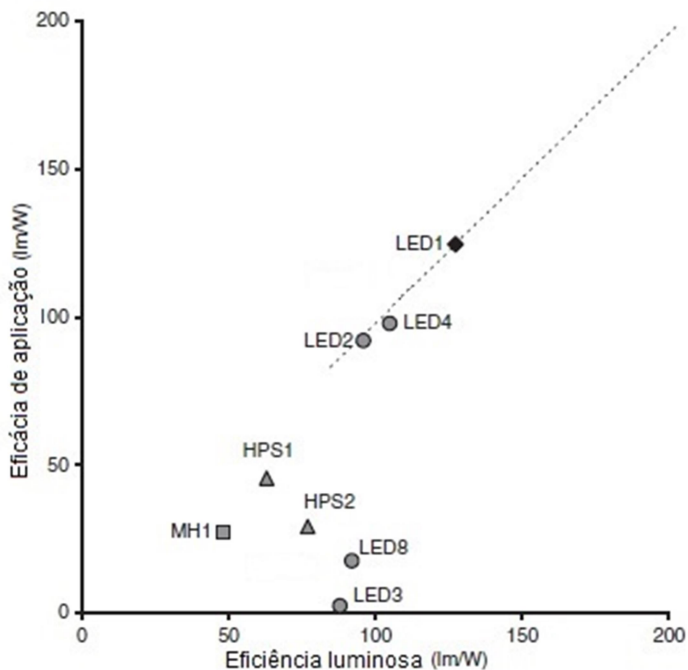
Figura 11: Distribuição de intensidade luminosa e distribuição de iluminância no centro da área de tarefa



Fonte: NARENDRAN, FREYSSINIER E ZHU, 2015, p. 11 e 12

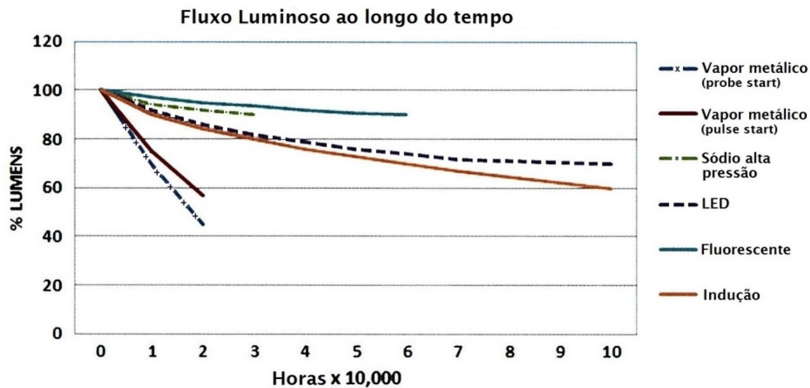
De modo semelhante, Nardelli et al. (2016), ao avaliarem fontes de iluminação para uso geral, salientam que a característica dos LEDs em distribuírem a luz de maneira unidirecional, e não omnidirecional como outras fontes, é um fator relevante a ser analisado durante a definição de um novo sistema de iluminação ou de um retrofit. Se não for bem avaliada, uma distribuição da luz inadequada poderá causar desconforto aos usuários.

Figura 12: Eficácia de aplicação do sistema de luminárias (LSAE) em função da eficiência tradicional da luminária



Fonte: NARENDRAN, FREYSSINIER E ZHU, 2015, p. 15

Outro parâmetro de grande importância na escolha da tecnologia é a verificação da curva de manutenção do fluxo luminoso em função da vida da lâmpada, apresentada na Figura 13. Ela descreve como a saída de luz da fonte muda ao longo do tempo, fornecendo dados significativos do ponto de vista energético. A IES (2016) explica que durante a sua vida, o fluxo luminoso emitido pela maioria das lâmpadas diminui gradualmente. Esta redução gradual da saída de luz com o tempo de queima é chamada de depreciação lumínica (ou depreciação luminosa). Curvas de manutenção do fluxo luminoso de lâmpadas ilustram porcentagens "iniciais" (primeiras 100 horas) da produção luz até qualquer momento operacional subsequente.

Figura 13: Manutenção do fluxo luminoso

Fonte: IES, 2016, p. 12

Pela Figura 13 destacam-se negativamente as lâmpadas de vapor metálico, as quais rapidamente diminuem em muito seu fluxo luminoso. Segundo Nardelli et al. (2016), também os LEDs, mesmo possuindo uma boa manutenção de lúmen, são motivo de preocupação quanto a redução da iluminância ao longo da vida útil, ocasionando um obstáculo à implementação da fonte. Isto porque a saída do lúmen pode ser reduzida em até 30%. Outros sistemas de iluminação também possuem esta característica, mas ela não é tão perceptível devido a menor vida útil das fontes luminosas. Esses dados são especialmente relevantes para dimensionar a manutenção do sistema através de trocas programadas, uma vez que a substituição das lâmpadas deverá acontecer quando o fluxo luminoso projetado já não estiver mais sendo atingido.

Em conclusão aos parâmetros apresentados, a IES (2016) apresenta uma tabela comparativa de várias fontes. Neste trabalho são apresentadas somente as fontes aplicáveis para a iluminação externa, haja vista a revista tratar também da iluminação de garagens e trazer outras fontes de luz como as lâmpadas fluorescentes. Ao final da Tabela 4 a IES faz sua indicação se a lâmpada é recomendável ou não para o uso em estacionamentos externos, onde somente a lâmpada a vapor de sódio de baixa pressão é desaconselhável. Salienta-se que a tecnologia a vapor de mercúrio não estava na tabela original.

Tabela 4: Comparação de várias fontes luminosas

FORTE LUMINOSA / CARACTERÍSTICA	Sódio em alta pressão	Vapor metálico	Sódio de baixa pressão	LED
Eficácia do sistema (desempenho aceitável por W)	Moderado a alto	Moderado	Moderado	Alto
Eficiência (lm/W)	Alto a muito alto	Moderado a alto	Alto a muito alto	Alto
Vida nominal	Longa	Moderada a longa	Moderada	Longa a muito longa
Manutenção de lúmen	Bom	Regular a bom	Bom	Bom
Controle óptico	Bom	Bom	Ruim	Muito bom
Reprodução de cores	Ruim a regular	Bom a muito bom	Ruim	Muito bom
Brilho	Alto a muito alto	Alto a muito alto	Moderado	Alto
Limites de posição de operação	Nenhum	Alguns	Alguns	Nenhum
Compacidade	Regular a bom	Regular a bom	Ruim	Muito bom
Tempo de partida (atingir fluxo luminoso máximo)	Lento	Lento	Muito lento	Imediato
Estacionamentos	Aceitável	Aceitável	Ruim	Aceitável

Fonte: IES, 2016, p. 8 (adaptada)

Informações específicas acerca de análise do ciclo de vida e análise de custos não serão aqui tratadas com profundidade, mas poderão ser encontradas em outras fontes de pesquisa. Jiang et al. (2015), por exemplo, analisaram comparativamente o custo-benefício de sistemas existentes de vapor de sódio em alta pressão com novos sistemas a vapor metálico, LED, indução e plasma. Os autores concluíram que, pela análise de custo do

ciclo de vida, todos os tipos alternativos de dispositivos de iluminação (LED, plasma e indução) são mais rentáveis do que os de vapor de sódio em alta pressão de 400 W existentes. Mas, em comparação com as atuais luminárias com lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão de 250 W, apenas quatro dos seis dispositivos de iluminação alternativa testados são mais rentáveis e dois (LED 200 W e Plasma 295 W) são menos rentáveis; e que apenas uma é mais rentável que as atuais luminárias em altura de vapor de sódio de 1000 W, a luminária de LED de 392 W testada. Quanto ao período de retorno do investimento, os pesquisadores concluíram que para substituir uma luminária atual com lâmpada de 250 W por uma luminária de LED, plasma ou indução testada levaria cerca de seis anos ou mais; para substituir uma luminária com lâmpada de 400 W levaria três anos ou mais e apenas um ano para uma luminária de 392 W LED usada no lugar da luminária com lâmpada de vapor de sódio em alta pressão de 1000 W. Rodrigues et al. (2011) e Kostic et al. (2012) também incluíram cálculos de retornos de investimentos em suas pesquisas e ambos concluíram que, em maioria, as soluções utilizando luminárias LED são mais rentáveis quando comparadas aos sistemas com lâmpadas de vapor de sódio em alta pressão, mas salientam que outras pesquisas são necessárias.

2.4 PROGRAMAS COMPUTACIONAIS

Programas de simulação para desenvolvimento de projetos luminotécnicos são empregados para calcular, avaliar e planejar a iluminação de espaços internos ou externos. Utilizados por pesquisadores e profissionais do setor de iluminação, tais programas permitem desenhar espaços e inserir lâmpadas e luminárias para avaliação projetual das condições de iluminamento de ambientes que são calculadas pelo programa.

Vários são os programas disponíveis no mercado para projetos de iluminação natural e artificial. Alguns dos programas específicos para iluminação artificial foram desenvolvidos pelos próprios fabricantes de materiais elétricos. Entre eles estão os programas Ulysse da Schréder e Calculux da Philips Electronics. Embora esses programas sejam similares a outros, eles só são compatíveis com seus próprios produtos. O que inviabiliza seu

uso quando se deseja comparar materiais de diferentes fabricantes.

Entre os programas mais utilizados por projetistas de iluminação artificial estão o DIALux e o DIALux evo desenvolvidos pela empresa DIAL e o Relux desenvolvido pela Relux Informatik AG.

A empresa alemã disponibiliza o DIALux por meio de download em seu site. Segundo a DIAL (2017), ele está disponível em 25 línguas e importa e exporta arquivos 2D e 3D para programas CAD que contenham extensão *dwg* e *dxf*. É possível visualizar cômodos individuais, andares inteiros, edifícios e cenas ao ar livre. O programa calcula iluminação interior e exterior integradas, iluminação pública, iluminação de emergência e quadras esportivas.

O programa Relux tem origem suíça e suporta arquivos em formatos *rlx* (Relux), *rfa* (Revit), *dwg* (AutoCAD), *ldt* (Eulum), *ies* (IES), sendo compatível com sistemas CAD e BIM. O programa é capaz de simular luz artificial e luz do dia. E calcula projetos de iluminação de interiores, exteriores e rodovias (RELUX, 2017).

Estes dois programas citados são gratuitos e trabalham em parceria com as principais fabricantes mundiais de produtos de iluminação. As empresas, por meio de *plug-in*, fornecem a planilha de dados (dados fotométricos e características técnicas) de suas lâmpadas e luminárias para ser inserida no programa. Isto possibilita que os produtos disponíveis no mercado sejam escolhidos por meio de um catálogo diretamente nos programas.

2.5 SÍNTESE DA REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresentou a revisão de literatura que norteará a execução desta pesquisa. No estudo luminotécnico de ambientes externos, constatou-se que o tipo de iluminação a ser instalada influencia diretamente nos resultados que serão alcançados; seja na disponibilidade de iluminamento, seja em como a fonte de luz será percebida pelo usuário. Assim, a revisão abordou a influência da visão mesópica, a percepção pessoal ao se transitar pela noite e os fatores técnicos que igualmente influenciam na escolha de determinado sistema de iluminação pública.

A compilação de alguns estudos sobre os efeitos da visão mesópica retratou a evolução da investigação sobre o tema e

mostrou que muitas questões ainda estão em aberto. Pelas pesquisas apresentadas, verificou-se a atual discussão sobre como os efeitos mesópicos devem ser incluídos nos cálculos luminotécnicos, tanto medidos quanto projetados. E, embora não haja um consenso sobre como estes devem ser incluídos nos cálculos, CIE (2010b), Rodrigues et al. (2011), Kostic et al. (2012), CIE (2014) e Uchida e Ohno (2016) concordam que, quando os efeitos mesópicos são levados em conta, sistemas compostos por lâmpadas com maior relação S/P apresentam maior eficiência luminosa do que lâmpadas com menor relação. Sendo assim, a potência instalada poderia ser menor sem que houvesse prejuízo no nível de iluminação percebido pelos usuários. E apesar da norma brasileira não incorporar este tema, outras normas internacionais vistas em CIE (2014) já estão incluindo este conceito.

Da mesma maneira, estudos sobre como as pessoas percebem os espaços à noite sob iluminação artificial estão em desenvolvimento. Em Fotios e Cheal (2009), Rea, Bullough e Brons (2014), Rea, Bullough e Akashi (2009) e CIE (2014), averiguou-se a interferência da distribuição espectral da fonte de luz em percepções pessoais envolvendo questões de sensação de segurança, detecção de obstáculos, percepções de brilho, aceitabilidade do espaço. Muitos dos resultados dessas pesquisas apontam que fontes de luz com maior relação S/P propiciam melhores condições de visibilidade e maior sensação de segurança quando comparadas com fontes de menor relação, apesar dos resultados não serem todos conclusivos a respeito da influência direta do tipo de lâmpada.

Além disso, a análise comparativa dos sistemas utilizados em iluminação pública foi apresentada com o intuito de avaliar as características técnicas de cada tipo de lâmpada. Como descrito, lâmpadas a vapor metálico mesmo apresentando grandes vantagens quando os efeitos da visão mesópica são considerados, devido a sua elevada relação S/P, melhores índices de reprodução de cores e disponibilidade de temperaturas de cor, perdem espaço no mercado quando comparadas às lâmpadas a vapor de sódio. As últimas, mesmo com menor relação S/P, apresentam elevada manutenção de lúmen e maior eficiência luminosa em comparação às primeiras. Neste sentido, a tecnologia LED tem apresentado resultados relevantes os quais unem os pontos fortes de suas antecessoras.

Finalmente, inúmeros são os programas computacionais que auxiliam no planejamento e no cálculo de projetos de iluminação natural e artificial. A escolha do programa mais adequado se dará com as necessidades de cada projeto.

3. MÉTODO

Neste capítulo é apresentado o método utilizado nesta pesquisa. Logo, aqui estão detalhadas as características das medições, pesquisas de opinião, as simulações e as formas para inclusão dos efeitos mesópicos.

Esta pesquisa é dividida em três partes: uma de caráter quantitativo, uma de caráter qualitativo e outra computacional. A primeira e segunda partes foram realizadas de maneira simultânea. A primeira avaliou a iluminação de um percurso de pedestres, seguindo as orientações da norma brasileira para iluminação pública, sob diferentes condições de iluminação: sem lâmpada instalada, lâmpadas a vapor de sódio, a vapor metálico e LEDs. Conjuntamente, a segunda parte consistiu na aplicação de questionários a usuários locais no trecho de estudo, a fim de coletar as impressões pessoais acerca dos espaços pelo qual transitam, sob os diferentes tipos de fonte luminosa. A terceira etapa consistiu na simulação computacional de diferentes cenários com o objetivo de avaliar qual dos sistemas de iluminação é melhor em termos de eficiência energética. Os cenários foram fundamentados nos dados coletados na primeira parte da pesquisa e na revisão bibliográfica das atuais tecnologias de mercado. Nas simulações foram mantidas fixas as características gerais do espaço, como vegetação e largura do passeio. E foram variáveis os sistemas de iluminação, como tipos de lâmpadas, de luminárias e locação dos postes. Entendeu-se necessária essa variação dos sistemas haja vista a relação dessas características com os objetivos da pesquisa. Após as simulações uma análise simplificada de custos foi realizada.

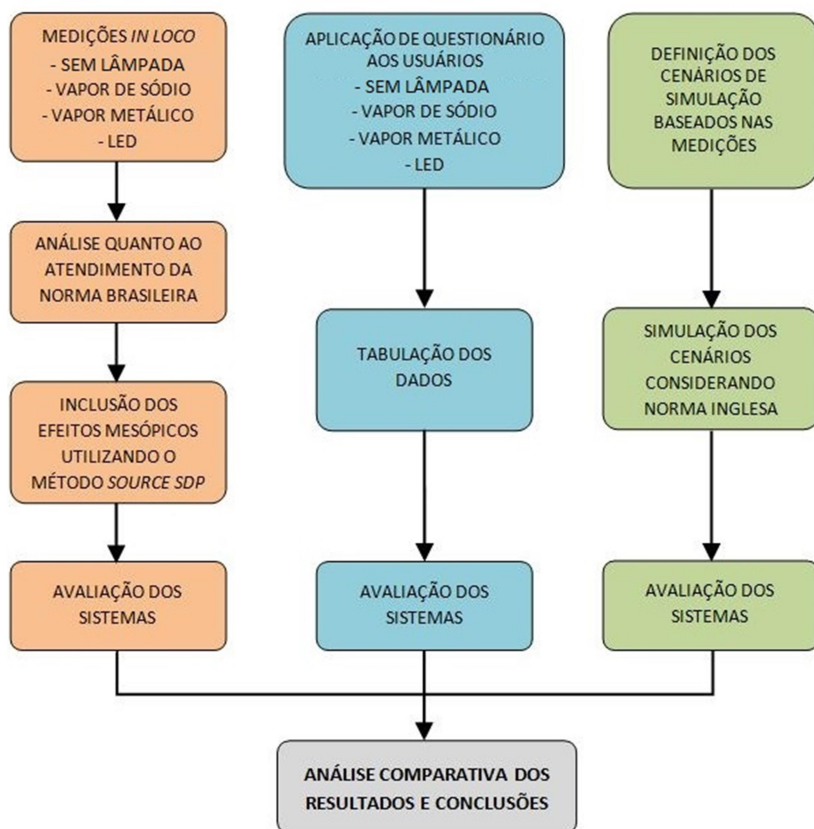
Os efeitos da visão mesópica foram avaliados nas três etapas da pesquisa de maneira distinta. Na primeira parte, níveis de luminância foram medidos, além dos níveis de iluminância solicitados pela norma brasileira, e foram adaptados utilizando o método *Source SPD*, proposto por Uchida e Ohno (2016). Na segunda etapa, a qualitativa, as respostas foram comparadas entre os sistemas estudados, levando em conta os valores de iluminamento encontrados na etapa anterior. Na terceira parte, foram utilizados os parâmetros de iluminância recomendados pela norma inglesa BS 5489-1 (Tabela Anexo C.1) para inclusão dos efeitos mesópicos da visão nos dados simulados para a análise comparativa da eficiência energética dos sistemas. Essa

adequação dos dados é especialmente importante, pois o modo como o usuário vê os espaços é alterado dependendo da distribuição espectral da lâmpada.

Ao final de cada parte uma análise comparativa dos sistemas foi realizada com o intuito de avaliar as fontes de luz utilizadas. Por fim, uma análise geral das três etapas em conjunto é apresentada.

A Figura 14 mostra o fluxograma do método apresentado neste trabalho.

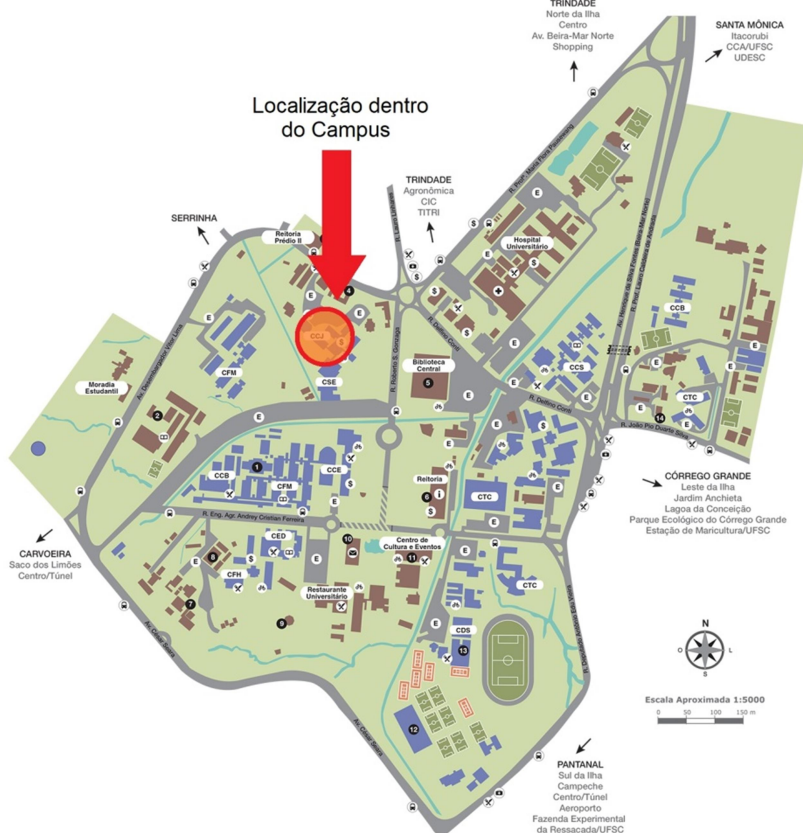
Figura 14: Fluxograma do método de pesquisa



3.1 ESTUDO DE CASO – CARACTERIZAÇÃO DO ESPAÇO

Com o intuito de se definir uma base real para as entrevistas e simulações, escolheu-se como estudo de caso um percurso de pedestres localizado nos limites do Campus da Universidade Federal de Santa Catarina, cidade de Florianópolis/SC. A localização do caminho está indicado na Figura 15.

Figura 15: Mapa do Campus da UFSC com localização do caminho



Fonte: UFSC, 2017 (adaptada)

O caminho foi escolhido por apresentar um trajeto conformado e ser dotado de sistema de iluminação pública instalado, porém não funcionando. Também não faz confronto com nenhuma via para veículos, fato esse determinante, pois não é interesse deste projeto a influência da luz dos carros no trajeto. Em seu entorno possui edificações de ensino de elevado fluxo de pedestres à noite, com aulas após as 18h para alunos dos cursos noturnos pertencentes ao Centro Socioeconômico (CSE) e ao Centro de Ciências Jurídicas (CCJ), além de servir de passagem para muitos outros locais como Fórum, estacionamento, pontos de ônibus, biblioteca universitária etc.

O trecho de estudo faz a ligação entre o bloco central do CSE, o qual abriga diversas salas de aula e administrativas, e o estacionamento que fica em frente ao acesso principal do CCJ e do Fórum. Este estacionamento é uma das rotas de entrada principais para acessar a universidade. Com uma extensão de aproximadamente 40 m, o caminho é constituído por um calçamento de 1,50 m de largura, além de vegetação alta e outros equipamentos urbanos como bancos e mesas em um dos lados do percurso, no outro lado faz divisa com uma edificação do CSE. A Figura 16 apresenta a planta baixa do trecho de estudo. Nesta imagem é possível verificar que além dos três postes da área de estudo existe mais um instalado próximo ao estacionamento. Este poste tem aproximadamente 20 m de altura e possui três pétalas de luminárias instaladas, contudo, ele não estava funcionando e não havia previsão de manutenção.

Figura 16: Planta baixa da área



O sistema de iluminação era composto por três postes com altura de 4,00 m, os quais estavam com lâmpadas queimadas (Figura 17). Assim, para remediar em parte a falta de iluminação foi instalado sobre o bloco de ligação do CSE um refletor com fluxo luminoso direcionado para o caminho de pedestres, mas, devido à vegetação alta, ele iluminava somente parte do percurso. O refletor foi instalado em data anterior ao início desta pesquisa por solicitação da administração do Centro de ensino. A operação do refletor era automática por fotocélula. Também, como existem salas de aulas e administrativas próximas, parte da iluminação era suprida pela luz que sai pelas janelas quando existem atividades nas salas.

Figura 17: Poste com luminária que estava instalada no local



O registro fotográfico (Figuras 18 a 23) ilustra essa situação. O local foi fotografado à noite, sendo as primeiras fotografias por volta das 20h e as outras após as 22h, logo depois do término das aulas. Para melhor entendimento da situação, as cenas foram fotografadas a 1,50 m de altura com o auxílio de um tripé. As configurações da máquina fotográfica foram mantidas as mesmas para ambas as situações (às 20h, lâmpadas das salas acesas, e às 22h, lâmpadas das salas apagadas): sem flash, tempo de exposição 0,5 s, abertura da lente f2/8, sensibilidade ISO-100.

Figura 18: Vista do Bloco CSE para a escada de acesso ao CCJ com salas de aula térreas com lâmpadas acesas



Figura 19: Vista do Bloco CSE para a escada de acesso ao CCJ com salas de aula térreas com lâmpadas apagadas

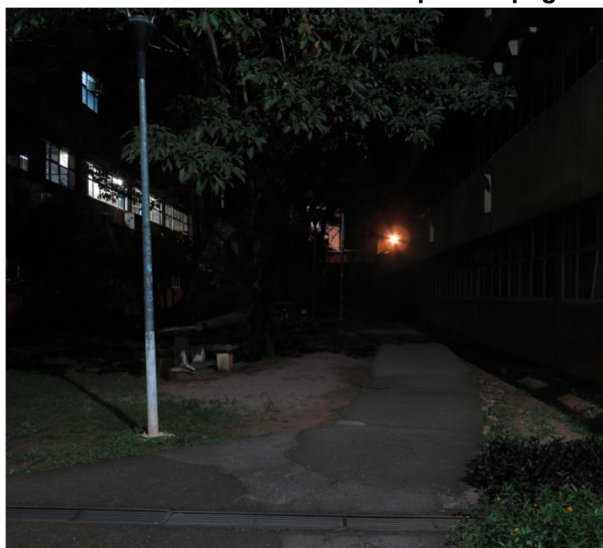


Figura 20: Vista do meio do percurso para a escada de acesso ao CCJ com salas de aula térreas com lâmpadas acesas



Figura 21: Vista do meio do percurso para a escada de acesso ao CCJ com salas de aula térreas com lâmpadas apagadas



Figura 22: Vista da escadaria em direção ao bloco do CSE com salas de aula térreas com lâmpadas acesas



Figura 23: Vista da escadaria em direção ao bloco do CSE com salas de aula térreas com lâmpadas apagadas



Pelas imagens percebe-se claramente a influência da iluminação proveniente das salas; sem estas o local ficava praticamente no escuro. Também é possível observar a existência de uma fonte de luz intensa de “cor amarela” nas Figuras 18 e 19; essa luz é proveniente de outro refletor existente na área do estacionamento. Essa fonte não ilumina a área de estudo, mas ofusca os pedestres que se dirigem à escada.

3.2 INSTALAÇÕES

A troca das lâmpadas dos três postes foi realizada pelo Departamento de Manutenção Predial da UFSC, e acompanhadas pela pesquisadora, haja vista os postes serem em altura e haver necessidade de desligamento da energia no momento da manutenção. A primeira troca ocorreu depois de finalizada a primeira etapa de medições e entrevistas: sem iluminação nos postes. Após, em cada etapa de medição foram instaladas três lâmpadas de mesma tecnologia, uma em cada poste. As lâmpadas a vapor metálico foram fornecidas pela UFSC, com o objetivo de testar as lâmpadas que a universidade tem disponíveis para substituição nos postes já existentes no campus. As lâmpadas fornecidas são as usadas pela UFSC para manutenção de luminárias externas e foram devolvidas no final desta pesquisa. As lâmpadas a vapor de sódio e LED foram adquiridas em comércio local pela pesquisadora. As lâmpadas a vapor de sódio, em princípio, seriam disponibilizadas pela UFSC, mas no momento da instalação não havia quantidade suficiente em estoque. Atualmente, a UFSC utiliza para manutenção das luminárias externas tanto lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão quanto lâmpadas a vapor metálico, priorizando a substituição pelo mesmo tipo de lâmpada que já estava instalada na luminária quando a lâmpada queimou. A Figura 24 apresenta as lâmpadas que foram utilizadas na pesquisa: vapor de sódio em alta pressão (a), vapor metálico (b) e LED bulbo (c). A Tabela 5 contém a marca, o modelo e as características das lâmpadas especificadas pelos fabricantes.

Figura 24: Lâmpadas instaladas no local

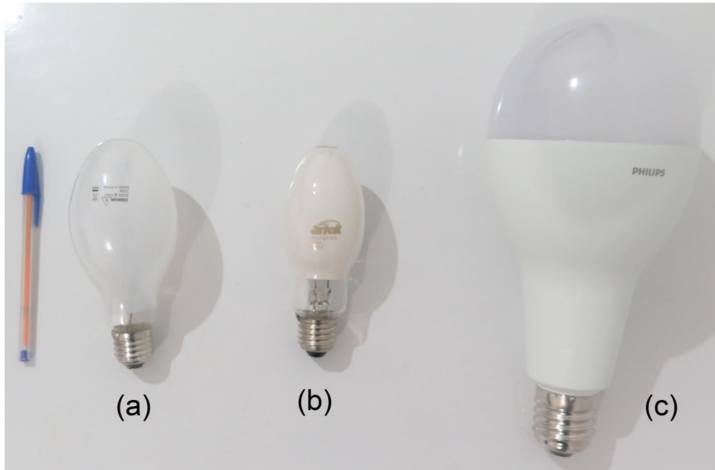


Tabela 5: Modelo e características das lâmpadas especificadas pelo fabricante

Lâmpada	Marca	Modelo	Potência (W)	Fluxo luminoso. (lm)	TCC (K)
Vapor de sódio	Osram	SON-E (NAV)	70	6020	2000
Vapor metálico	Artek	ALVMT-ED	70	5600	4200
LED bulbo	Philips	LEDBulb 45W A125	45	5000	6500

A lâmpada LED modelo bulbo com controlador integrado foi escolhida com o objetivo de facilitar a troca das lâmpadas e simplificar o processo de manutenção durante esta pesquisa. Pois se manteve o mesmo tipo de base de encaixe das lâmpadas: E27 ou E40, sendo necessário somente um adaptador de base. Contudo, para aplicações externas em iluminação pública, o modelo LED recomendado é o planar com fixação em posteamento. Este modelo acomoda o módulo óptico na posição horizontal, em paralelo com a pista, com o fluxo totalmente direcionado para baixo.

Além da troca das lâmpadas, foi necessário fazer a troca das luminárias instaladas (Figura 17). Na ocasião da primeira troca de lâmpadas constatou-se que a base de encaixe das lâmpadas a vapor metálico instaladas era RX7S, e não E27 ou E40 como se esperava. Como a universidade não possuía disponibilidade de fornecimento e troca do equipamento em tempo hábil, procedeu-se uma pesquisa de mercado para aquisição de novas luminárias. Durante este processo verificou-se que luminárias públicas de passeios de pedestres com base E27 e E40 estão sendo retiradas do mercado, restando muito poucas opções de compra, e que luminárias LED planar estão substituindo esses produtos. As novas luminárias foram adquiridas pela pesquisadora na região de Florianópolis em um fabricante local, e foram adaptadas para que pudessem atender aos três tipos de lâmpadas em estudo. Após a instalação das luminárias e lâmpadas pelo Departamento de Manutenção Predial da UFSC, foi desligado o refletor que estava instalado sobre o bloco central do CSE para que seu fluxo luminoso não influenciasse na pesquisa.

3.3 MEDIÇÕES *IN LOCO*

O método de medição da área foi baseado na ABNT NBR 5101/2012 – Iluminação Pública – Procedimento (ABNT, 2012). Em vias de pedestres, a norma brasileira estabelece valores a serem cumpridos para a iluminância horizontal média, para a relação de uniformidade mínima da iluminância horizontal e para a iluminância vertical média. Tendo em vista que o objetivo deste trabalho é a comparação de sistemas de iluminação pública, quatro etapas de medição foram realizadas: uma medição preliminar sem lâmpadas funcionando, uma com lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão, uma com lâmpadas a vapor metálico e uma com lâmpadas LED.

Assim, para exame de conformidade com a norma, uma malha para verificação detalhada foi definida para o trecho de estudo. Após demarcação no passeio da malha, os valores de iluminância horizontal foram medidos ponto a ponto por meio de um luxímetro (em lux) com o equipamento apoiado sobre o pavimento e anotados em planilha. Por se tratar de medição de iluminação artificial sem influência de iluminação natural, o valor de iluminância foi tomado assim que se tornou estável no visor

do equipamento, uma única vez por ponto em cada etapa de medição. As medições foram realizadas no segundo semestre de 2017 entre os meses de julho e novembro, no período noturno sem influência de luz do sol, em noites de céu claro e com as lâmpadas das salas adjacentes desligadas. Para isso, foi necessário que as medições fossem realizadas em dias não letivos, como recessos, feriados e finais de semana.

A medição dos níveis de iluminância vertical foi realizada no eixo central da calçada por meio de um luxímetro (em lux) fixado sobre um tripé a 1,50 m de altura. Os valores foram tomados nos dois sentidos de caminhada: da escadaria para o hall do CSE e do hall para a escadaria. O valor de iluminância foi tomado assim que se tornou estável no visor do equipamento, uma única vez por ponto em cada etapa de medição. Para não haver sombra da pesquisadora sobre a fotocélula durante a medição, foi utilizado um cabo auxiliar do próprio equipamento o qual permite separar a fotocélula do equipamento de leitura. Desse modo, a parte do equipamento que contém a fotocélula foi fixada no tripé, e a leitura foi realizada sem sombrear a fotocélula (Figura 25b).

Além dos níveis de iluminância, a etapa de medição verificou os níveis de luminância da área de estudo. O levantamento foi realizado com o auxílio de um luminancímetro (em cd/m^2) e utilizou a mesma malha de pontos da iluminância. A velocidade de resposta de medição do aparelho foi configurada em FAST, pois as medições foram realizadas sob condições normais de iluminação. O aparelho foi fixado em um tripé e a altura foi ajustada em 1,50 m, esta distância entre o aparelho e o passeio foi adotada em função da altura do observador ao perceber o caminho. Com o aparelho apontado para a calçada, o foco foi ajustado e o gatilho ativado, por aproximadamente 2 segundos, até que o valor da luminância apareceu no visor. Em cada ponto o alvo foi verificado para que não caísse sobre a marcação de tinta acrílica utilizada para marcar a malha de medição, e sim ao lado da tinta sobre o concreto. Também houve o cuidado para que nem o tripé nem a pesquisadora fizessem sombra sobre o ponto durante a medição. O procedimento foi repetido para cada ponto da malha, uma única vez, e os valores anotados em planilha específica. As medições foram realizadas na mesma noite em que foram medidos os níveis de iluminância. Mesmo que o requisito de luminância seja exigido pela NBR

5101/2012 apenas para vias de veículos de tráfego intenso, esses valores fizeram parte da inspeção, pois servirão como base para inclusão dos efeitos mesópicos através do método *Source SPD*.

A Figura 25 demonstra o procedimento adotado nas medições.

Figura 25: Imagens das medições *in loco*



(a) medição de iluminamento horizontal

(b) medição de iluminamento vertical



(c) medição de luminância

De maneira complementar às medições *in loco*, características técnicas das lâmpadas foram medidas. Uma vez que a relação S/P das lâmpadas não é fornecida pelo fabricante, foi realizada a medição em esfera integradora dos fluxos luminosos fotópico e escotópico para cálculo da relação. Também foi medido o índice de reprodução de cores de cada fonte de luz estudada. A esfera integradora trabalha em conjunto com um espectrômetro, uma lâmpada padrão e um microprocessador que executa as funções de controle, interface e monitoramento do sistema para medição do fluxo luminoso. Após levantamento por laboratórios que poderiam realizar este procedimento, os equipamentos desta pesquisa (uma lâmpada de cada tipo e um conjunto de reator/ignitor/capacitor) foram enviados via Correios à Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) para realização das medições dos dados espectrais e fotométricos das fontes. O trabalho foi executado no laboratório do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) pelo mestrando em engenharia elétrica Lucas H. G. Resende, sob os cuidados do Professor Henrique A. C. Braga.

Ainda, foi realizada a medição de consumo das lâmpadas com o objetivo de comparar os dados encontrados com as medições *in loco* e as respostas do questionário. Esta medição também foi realizada pelo laboratório NIMO da UFJF. Foi utilizado um wattímetro digital de valor RMS (*Root Mean Square*) verdadeiro e foram medidos a potência de entrada e o fator de potência de cada lâmpada. No caso das lâmpadas de descarga foi medido o conjunto lâmpada mais reator, no caso da LED bulbo foi medida a lâmpada mais o controlador integrado. O Apêndice A contém mais detalhes das medições de consumo e dos cálculos de consumo anual.

3.3.1 Equipamentos

Com o propósito de caracterizar as fontes de luz estudadas e realizar as medições no local de estudo, os seguintes equipamentos foram utilizados.

3.3.1.1 Esfera integradora

Para medição em laboratório do índice de reprodução de cores e dos fluxos luminosos fotópico e escotópico das lâmpadas instaladas em campo, o NIMO/UFJF utilizou uma esfera

integradora marca Labsphere, modelo LMS-400 e um espectrômetro modelo CDS 2100. A Tabela 6 apresenta algumas de suas especificações e a Figura 26 demonstra o equipamento fechado e aberto.

Tabela 6: Especificações da esfera integradora

Diâmetro	40 polegadas
Refletância (alcance visível)	>97%
Lâmpada padrão de calibração	SCL-1400
Comprimento máximo da lâmpada	61 cm
Potência máxima da lâmpada	1.500 W

Fonte: Pereira, 2015

Figura 26: Esfera integradora do NIMO/UFJF



Fonte: Resende, 2017

3.3.1.2 Luxímetro

Para medição do nível de iluminamento da área de estudo, foi utilizado um luxímetro marca Konica Minolta, modelo Illuminance Meter T-10. O equipamento utiliza como receptor uma fotocélula de silício. A Tabela 7 apresenta suas características e a Figura 27 traz sua imagem.

Tabela 7: Especificações do luxímetro

Faixa de Medição	0,01 a 299900 lux
Resposta espectral relativa (f_1')	valor de saída de $V(\lambda)$... dentro 6% CIE
Correção do cosseno (f_2)	$\pm 3\%$

Figura 27: Luxímetro Konica Minolta T-10



3.3.1.3 Luminancímetro

Para medição dos níveis de luminância da área de estudo, foi utilizado um luminancímetro marca Minolta, modelo Luminance Meter LS-110. O equipamento utiliza como receptor uma fotocélula de silício filtrada para corresponder de modo aproximado à resposta de luminosidade fotópica CIE. A Tabela 8 apresenta suas características e a Figura 28 traz sua imagem.

Tabela 8: Especificações do luminômetro

Faixa de Medição	FAST: 0,01 a 999900 cd/m ² SLOW: 0,01 a 499900 cd/m ²
Precisão	0,01 a 9,99 cd/m ² : ± 2% ± 2 dígitos do valor medido 10,00 cd/m ² ou mais: ± 2% ± 1 dígito do valor medido
Distância do foco	de 1014 mm ao infinito
Área mínima do alvo	∅ 4,8 mm a uma distância de 1014 mm

Figura 28: Luminômetro Minolta LS-110

3.3.1.4 Wattímetro e Fonte de alimentação

Para medição da potência de entrada e do fator de potência, foram utilizados um wattímetro digital marca Yokogawa, modelo WT230 e uma fonte de alimentação marca Tenma, modelo 72-7675. A Tabela 9 apresenta as características do wattímetro e as Figura 29 e 30 trazem as imagens dos equipamentos.

Tabela 9: Especificações do wattímetro

Precisão	0,1% da leitura + 0,1% da faixa
Alcance de frequência	DC, 0,5 Hz a 100 kHz
Faixa de entrada efetiva	1 a 130% da faixa nominal

Figura 29: Wattímetro WT230 Digital Power Meters



Fonte: Braga, 2018

Figura 30: Fonte de alimentação Tenma 72-7675 Ac 115/230 Vac, 500VA



Fonte: Braga, 2018

Os equipamentos utilizados na pesquisa (luxímetro e luminancímetro) pertencem ao Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon) da UFSC e possuem calibração certificada de fábrica. A esfera integradora, o wattímetro e a fonte de alimentação pertencem ao laboratório NIMO da UFJF.

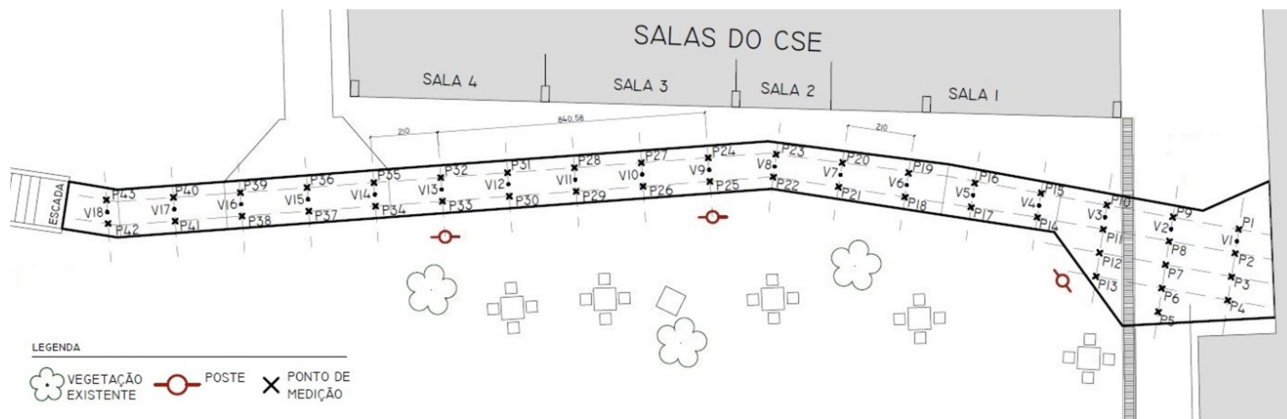
3.3.1.5 Equipamentos auxiliares

Além desses equipamentos, uma Trena Eletrônica (marca Fluke, modelo 414D) e uma Máquina Fotográfica (marca Canon, modelo PowerShot G16 com lente original) foram utilizadas. Outros acessórios, ainda, foram necessários para auxiliar no processo de levantamento, como tinta acrílica para marcação dos pontos de medição, trena comum, pranchetas, planilhas.

3.3.2 Malha de Medição

Por se tratar de um trecho de estudo com passeio assimétrico e distribuição de luminárias não equidistantes, decidiu-se por medir todo o calçamento para melhor entendimento da situação. A malha de medição foi formada conforme os critérios definidos na NBR 5101/2012 (ABNT, 2012), tomando como base a distância entre os postes instalados paralelos ao passeio (8,40 m). Assim, as linhas transversais estão espaçadas a uma distância média de 2,10 m. Para verificação de calçadas menores que 3,0 m de largura a norma indica apenas um eixo central para as linhas longitudinais, contudo, decidiu-se por adotar o procedimento para calçadas acima de 3,0 m de largura, com dois eixos, para se ter valores mais precisos de iluminamento horizontal. Ao total foram medidos 43 pontos por tipo de tecnologia de lâmpada, mais a medição inicial quando não havia lâmpadas funcionando. O nível de iluminamento vertical foi medido no centro da calçada, utilizando apenas um eixo. A Figura 31 apresenta a planta baixa do trecho com a demarcação dos pontos de medição, onde P1 a P43 são os pontos de medição horizontal no nível do solo e V1 a V18 são os pontos de medição vertical a 1,50 m de distância do piso.

Figura 31: Malha de medição



3.3.3 Verificação na Norma Brasileira de iluminação

Terminadas as medições sem lâmpadas e as medições associadas a cada tipo de tecnologia foi verificado se os níveis de iluminamento do espaço atendiam aos requisitos da NBR 5101/2012 (ABNT, 2012). Os caminhos dentro de um campus universitário são considerados Vias para Tráfego de Pedestres. Na norma, essas vias são classificadas de acordo com o tráfego de pessoas: de vias de uso noturno intenso (P1) até vias de pouco uso (P4). Neste trabalho, baseado em observações locais acerca do fluxo de pedestres, o trecho estudado será considerado como classe P2 (Vias de grande tráfego noturno de pedestres, por exemplo, passeios de avenidas, praças, áreas de lazer).

Para estas vias, a norma estabelece que a iluminância horizontal média mínima deve ser de 10 lux e que o menor valor de iluminância medido deve ser necessariamente superior a 1 lux. A iluminância horizontal média é obtida pela média aritmética das leituras realizadas. Por sua vez, o fator de uniformidade mínimo da iluminância deve ser de 0,25 (ABNT, 2012). O fator de uniformidade foi obtido por meio da Equação 13.

$$U = \frac{E_{\min}}{E_{\text{med}}} \quad (13)$$

Onde:

U é o fator de uniformidade;

E_{\min} é a iluminância horizontal mínima medida (lux);

E_{med} é a iluminância horizontal média (lux).

A norma brasileira também recomenda que em espaços públicos com predominância de pedestres a “iluminação destes espaços deve permitir no mínimo a orientação, o reconhecimento mútuo entre as pessoas, a segurança para o tráfego de pedestres e a identificação correta de obstáculos” (ABNT, 2012, p. 16). Para tanto, indica que o iluminamento médio mínimo necessário para ser possível o reconhecimento facial é de 3 lux. A iluminância vertical média foi obtida pela média aritmética das leituras realizadas nos dois sentidos de caminhada no percurso.

3.3.4 Inclusão dos efeitos mesópicos

Uma vez que as pesquisas em iluminação sob níveis mesópicos são baseadas no conceito de luminância, essa etapa da pesquisa utilizou os níveis de luminância medidos para incluir os efeitos da visão mesópica. Assim, após as medições das luminâncias associadas a cada lâmpada, os valores foram adaptados utilizando o método *Source SPD*. Este método foi escolhido, pois, como citado por Uchida e Ohno (2016) no Capítulo 2, ele não necessita de medidores de luminância S/P, somente é necessário que se saiba a relação S/P da fonte de luz instalada no local. Este método não foi aplicado nos dados de luminâncias coletados quando não havia lâmpadas, apenas nos dados das medições com as fontes de luz ligadas, pois o método é fundamentado na relação S/P da fonte de luz instalada.

Considerando que a luminância fotópica de adaptação pode ser prevista como a luminância média da superfície da estrada para a maioria das cenas, conforme proposto por Uchida et al. (2016). A luminância escotópica de adaptação pôde ser calculada, através do método proposto por Uchida e Ohno (2016), a partir da Equação 12, já descrita anteriormente.

$$L'_{v,a} = c \cdot R_{SP,s} \cdot L_{v,a} \quad (12)$$

Onde:

$L'_{v,a}$ é a luminância escotópica de adaptação (cd/m^2);

c é o fator de correção para a relação S/P da fonte, para concreto = 0,865;

$L_{v,a}$ é a luminância fotópica de adaptação (cd/m^2);

$R_{SP,s}$ é a relação S/P da fonte de luz s .

Segundo Uchida e Ohno (2016), embora o fator de correção c varie dependendo da combinação da fonte de luz e do ponto de teste, os valores dos fatores de correção para várias fontes de luz são semelhantes para a refletância espectral típica de superfícies utilizadas em pavimentos. Em seu estudo, os autores indicam que para superfícies de concreto a média dos fatores de correção é 0,865. Entretanto, esse valor não pode ser utilizado quando a iluminação for composta por lâmpadas de sódio de baixa pressão, porque essa produz luz

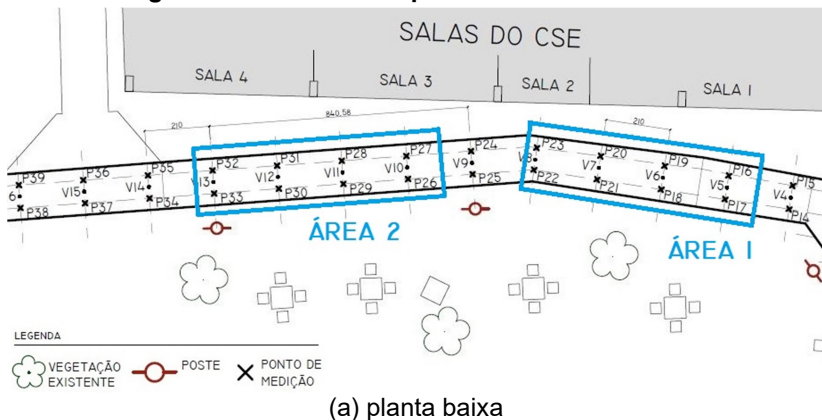
predominantemente de um comprimento de onda; fato que não se aplica a esta pesquisa.

No passo seguinte ao cálculo da luminância escotópica de adaptação, o coeficiente de adaptação e a luminância mesópica foram calculados usando o sistema iterativo composto pelas Equações 3 e 4 do método CIE 191:2010 já descritas. Os cálculos foram realizados com o auxílio de planilhas do programa computacional Excel.

O método proposto assume que todas as distribuições espectrais de potência do campo de adaptação e dos pontos de teste são as mesmas da distribuição espectral de potência conhecida da fonte de luz instalada. Assim, para minimizar os erros, é importante que não existam tipos diferentes de fontes de luz iluminando o local de estudo. Nesta pesquisa, os efeitos mesópicos foram calculados para duas áreas do percurso estudado. Em cada uma das áreas, oito pontos de medição foram incluídos nos cálculos. A primeira área correspondeu à área de visão próxima ao entrevistado enquanto ele respondia à primeira etapa do questionário. A segunda área correspondeu à visão da pessoa no meio do percurso olhando em direção à escadaria. Elas foram definidas por apresentarem pouca influência de outras fontes luminosas e por possuírem distribuição de luminância mais uniforme. A Figura 32 mostra a demarcação das áreas e a região do passeio correspondente à segunda área de cálculo. O objetivo de analisar duas áreas diferentes foi verificar a variação do fator de aumento mesópico em função do nível de luminância fotópica.

Na pesquisa de Uchida e Ohno (2016) os dados calculados foram validados com a medição *in loco* dos níveis utilizando medidores de luminância S/P. Como nesta pesquisa medidores S/P não estão disponíveis, para validar o método de inclusão dos efeitos mesópicos, os dados calculados para as duas áreas foram comparados com os dados da tabela que consta na normativa da CIE (2010b). Esta tabela apresenta em pontos percentuais as diferenças entre luminâncias fotópicas e luminâncias mesópicas calculadas como o sistema mesópico recomendado pela CIE em função da relação S/P das fontes.

Figura 32: Efeitos mesópicos – Áreas de cálculo



3.4 APLICAÇÃO DE QUESTIONÁRIOS

Visando entender as necessidades e percepções dos usuários acerca do trecho em estudo sob diferentes condições de iluminação, decidiu-se aplicar questionários a transeuntes, tanto trabalhadores quanto alunos do campus universitário. O entendimento das necessidades faz-se fundamental para que o projetista compreenda e incorpore no projeto de iluminação pública as condições esperadas pela comunidade usuária. Assim, tendo como referência as pesquisas realizadas por

Narendran, Freyssinier e Zhu (2015) e Rea, Bullough e Akashi (2009), o questionário observará os seguintes aspectos:

- Aceitabilidade de modo geral e para interação social;
- Orientação espacial e capacidade de deslocar-se pelo local;
- Segurança pessoal percebida para utilizar o caminho, incluindo percepção de brilho.

Aplicado pela pesquisadora, o questionário contendo nove perguntas subjetivas foi respondido por usuários da comunidade universitária no local de estudo a partir de dois pontos fixos: em frente ao hall do bloco central do CSE, no sentido da escadaria, e em frente à escadaria, no sentido oposto. As perguntas foram aplicadas em quatro etapas distintas, uma com a situação até então existente (sem lâmpadas instaladas) e uma para cada tipo de tecnologia de lâmpada, em data conjunta à realização das medições de iluminação do local. Como nas medições, as entrevistas foram realizadas no segundo semestre de 2017, no período noturno (após as 19h) e com as luzes das salas adjacentes do CSE preferencialmente desligadas.

Esta parte da pesquisa foi submetida ao Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos (CEPSH - UFSC), tendo sido aprovada conforme o Parecer nº 2.376.985 de 2017 (CEP, 2017). O Termo de Consentimento Livre e Esclarecido gerado está presente no Apêndice B.

3.4.1 Questionário Piloto

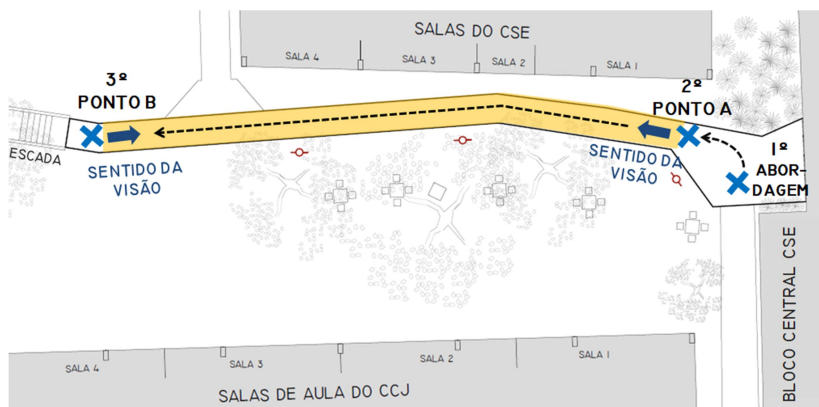
O questionário piloto foi aplicado para verificar a clareza das perguntas e o tempo de aplicação, em data anterior à primeira troca de lâmpadas. As perguntas foram respondidas por cinco pessoas que passaram no trecho de estudo, sendo quatro estudantes e um funcionário com idades entre 19 e 37 anos. Foram realizadas questões preliminares perguntando idade, vínculo com a universidade (aluno ou trabalhador), onde a pessoa estava antes de chegar ao local de estudo (se em um lugar bem iluminado ou não) e se ela estava caminhando sozinha ou acompanhada. Entende-se que as últimas perguntas são necessárias, pois influenciarão nas respostas ao questionário.

Por exemplo, se ela vinha de um local bem iluminado, como uma sala de aula, tenderá a achar o trecho de estudo mais escuro. Se ela estava caminhando acompanhada tenderá a sentir-se mais segura ao andar pelo local. O questionário piloto foi composto por três páginas: uma página de rosto, contendo os dados do entrevistado e os dados do local no momento da entrevista, e duas páginas iguais contendo dez questões subjetivas. A primeira página foi preenchida pela pesquisadora e as demais pelo entrevistado.

A abordagem ocorreu em frente à saída do hall do bloco central do CSE, com pessoas que caminhavam em ambos os sentidos do trecho de estudo. Após a abordagem e aceite de participação, foi explicado ao entrevistado o intuito desta pesquisa, perguntados os dados pessoais do entrevistado e preenchidos os dados do local. Esse momento inicial foi importante para que a pessoa pudesse ambientar sua visão à luminosidade do local de estudo. Depois do momento inicial, o entrevistado foi acompanhado pela pesquisadora até o Ponto A (Figura 33) e solicitou-se que respondesse às questões com relação a sua sensação sobre o passeio considerando o calçamento até a escadaria existente no final do percurso. Respondida a segunda página, a pessoa foi convidada a caminhar até o Ponto B (Figura 33). No ponto B, o entrevistado respondeu a terceira página, a qual continha as mesmas questões já respondidas. Neste ponto ele estava de frente para o bloco central do CSE, e o percurso era considerado até a entrada desse bloco. Neste ponto foi necessária a utilização de iluminação direcionada ao texto, uma vez que a falta de iluminação no local dificultava muito a leitura. Essa iluminação extra foi feita pela pesquisadora através da lanterna do telefone celular.

Em todas as etapas o entrevistado foi acompanhado pela pesquisadora. No momento das questões subjetivas foi mantido silêncio para que o entrevistado pudesse analisar a área, interpretar e responder as questões. As questões subjetivas não foram lidas previamente em conjunto, assim, à medida que dúvidas surgiam essas foram esclarecidas. Ao final do preenchimento foi perguntado ao entrevistado o grau de dificuldade e entendimento quanto às perguntas. O tempo médio de aplicação das cinco entrevistas foi de 6 minutos cada.

Figura 33: Processo e posicionamento do entrevistado e pesquisadora durante a aplicação do questionário



Dado este panorama, observou-se que não houve dificuldade para se preencher o questionário piloto, sendo necessários apenas alguns ajustes no questionário final. Entre os ajustes necessários estão o modo como a descrição das salas com luzes acesas estava sendo registrada e a inclusão da palavra “ofuscamento” na questão do questionário sobre brilho. Essa questão foi a que mais gerou dúvida aos entrevistados. Provavelmente por não haver nenhuma luminária com lâmpada instalada no momento da entrevista. Também foi retirada uma pergunta preliminar que verificava o conhecimento do usuário sobre a área de estudo. Como se decidiu padronizar as entrevistas a frequentadores usuais do espaço, essa não se fez mais necessária.

Por fim, o procedimento de aplicação testado foi aprovado. E como houve representativa diferença entre a percepção das pessoas do Ponto A para o Ponto B, decidiu-se manter estes dois pontos de questionamento, A e B. O questionário final aplicado contendo as nove questões está descrito no Apêndice C.

3.4.2 Amostragem

O número de usuários entrevistados foi embasado em estudos similares realizados por Narendran, Freyssinier e Zhu

(2015), Rea, Bullough e Akashi (2009), Haans e Kort (2012) e Fotios e Cheal (2009), os quais entrevistaram entre 15 e 31 observadores em suas pesquisas. Neste trabalho, houve dois grupos de participantes. Escolhidos de forma aleatória, o primeiro grupo avaliou o espaço quando não havia iluminação instalada, sendo as entrevistas realizadas durante o recesso de meio de ano, quando a influência da iluminação das salas pode ser reduzida. Foi composto por 22 pessoas, sendo 12 mulheres e 10 homens com idades entre 19 e 56 anos. O segundo grupo avaliou o espaço sob os três sistemas de iluminação. Este foi composto pelos participantes iniciais e mais 10 pessoas. Após algumas desistências, o grupo final que respondeu às quatro etapas de entrevistas foi composto por 29 pessoas, sendo 18 mulheres e 11 homens com idades entre 18 e 56 anos (média de 29 anos e desvio padrão de 8 anos).

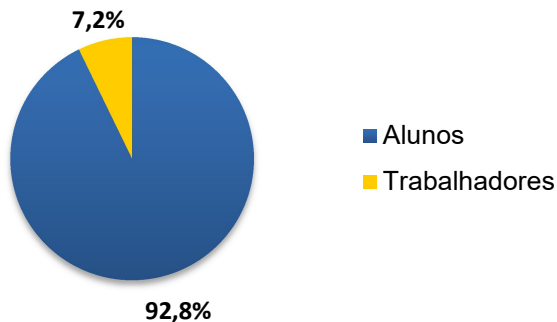
Para verificar a representatividade da amostra de usuários para responderem ao questionário, um levantamento estimativo da população noturna do Campus Trindade da UFSC e da região onde estão localizados o CSE e o CCJ foi desenvolvido. Estes dados estão presentes no Apêndice D. O levantamento foi realizado utilizando contatos telefônicos, consultas em páginas da internet e mensagens via correio eletrônico a diferentes setores da universidade (UFSC, 2017).

A população universitária durante o período noturno é de aproximadamente 7.500 no Campus Trindade, das quais 2.300 pessoas compõem a região do CCJ/CSE, e constitui-se basicamente das seguintes categorias (Figura 34):

- a) Alunos: graduação, pós-graduação e cursos de línguas estrangeiras;
- b) Trabalhadores: professores, técnico-administrativos e funcionários terceirizados.

Contudo, existem incertezas quanto à população total levantada. Essas provêm do fato de que alguns usuários não são possíveis de se estimar, como exemplificado no Apêndice D.

Figura 34: Distribuição proporcional da população noturna do Campus Trindade da UFSC



Para finalizar a parte qualitativa da pesquisa, após a aplicação dos questionários nas quatro etapas de entrevistas (sem e com lâmpadas), os dados foram tratados e, juntamente com os valores de iluminação medidos, foi realizada uma análise comparativa das impressões pessoais das quatro situações.

3.5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

Após as medições *in loco* e aplicação do questionário, cenários de simulação foram montados com o objetivo de avaliar qual sistema de iluminação pública é melhor em termos de eficiência energética quando os efeitos da visão mesópica são considerados.

Tendo como base o trabalho desenvolvido por Kostic et al. (2012), alguns parâmetros dos sistemas de iluminação pública foram variados para análise. De maneira precípua, para alcançar os objetivos deste trabalho, diferentes tecnologias fontes de luz foram a base para os cenários e nortearam a estrutura das simulações:

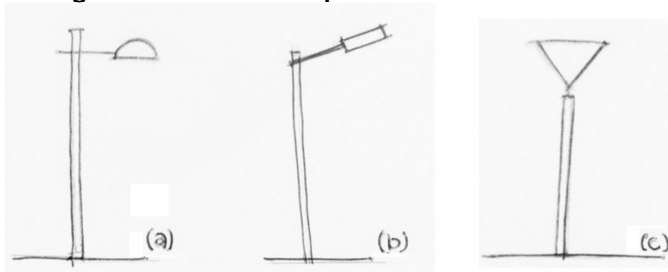
1. Vapor de sódio em alta pressão;
2. Vapor metálico;
3. LEDs.

Complementarmente, para verificação da eficiência dos sistemas, distintas potências de produtos foram testadas enquanto foi sendo ajustado o distanciamento entre os postes.

Além disso, a disposição e a altura dos postes foram variadas, preservando-se o posicionamento lateral, externo ao passeio, haja vista se tratar de caminho relativamente estreito onde um posteamento central atrapalharia o trânsito das pessoas.

Por fim, três modelos de luminárias também fizeram parte dos cenários (Figura 35): luminária com braço reto (a), luminária com braço inclinado 10° (b) e luminária com eixo central e iluminamento por reflexão do fluxo luminoso (c).

Figura 35: Modelos esquemáticos das luminárias



Desse modo, por combinação, 72 cenários de simulação resultaram do agrupamento das seguintes variáveis objetos de estudo:

- Tipos de lâmpadas – 3 tipos;
- Potências das lâmpadas – 2 condições para cada lâmpada;
- Disposição dos postes – 2 condições;
- Altura dos postes – 2 condições;
- Luminárias – 3 modelos.

Os modelos de lâmpadas e luminárias foram escolhidos com base nas recomendações da literatura e na disponibilidade do mercado atual, para que características especificadas pelos fabricantes pudessem servir de dados de entrada no programa computacional. Os produtos escolhidos são fabricados pela empresa Schröder. A decisão final que norteou a escolha deste fabricante foi amparada na quantidade e qualidade das informações disponibilizadas por cada empresa. Foi fundamental que a empresa possuísse parceria com a DIAL para *download* dos *plug-ins* e acesso aos catálogos eletrônicos. A Tabela 10

apresenta os dados dos produtos utilizados nas simulações disponibilizados pelo *plug-in* da Schröder.

Tabela 10: Especificação das luminárias simuladas

Luminária	Lâmpada	Potência lâmpada (W)	Modelo da lâmpada	Fluxo luminos. (lm)	Referência Schröder
LUMINÁRIA COM BRAÇO RETO	Sódio a alta pressão	70	NAV-T 70 W SUPER	6600	CITEA MINI 1627 / 981815
		100	NAV-T 100 W SUPER	10700	CITEA MINI 1627 / 990681
	Vapor metálico	70	POWERSTAR HQI-E 70 W/WDL CL	5200	CITEA MINI 1627 / 294563
		150	POWERSTAR HQI-E 150 W/WDL CL	12900	CITEA MINI 1627 / 294551
	LED	19	16 LEDS 350 mA	2656	CITEA NG MINI 5139 / 388042
		27	24 LEDS 350 mA	3984	CITEA NG MINI 5139 / 388022
LUMINÁRIA COM BRAÇO INCLINADO	Sódio a alta pressão	70	SON-T+ 70 W	6600	NANO 2 2048 / 320211
		100	SON-T+ 100 W	10700	NANO 2 2048 / 290591
	Vapor metálico	70	CDM-TT 70 W	7500	NANO 2 2048 / 320201
		100	CDO-TT Plus 100 W	10700	NANO 2 2048 / 320221
	LED	20	16 LEDS 350 mA	2656	AMPERA MINI 5139 / 356712
		27	24 LEDS 350 mA	3984	AMPERA MINI 5139 / 356712

Tabela 10: Especificação das luminárias simuladas (cont.)

LUMINÁRIA CENTRAL	Sódio a alta pressão	100	SON-T 100 W	10700	ALURA 1584 / 981097
		150	SON-T 150 W	17500	ALURA 1584 / 221796
	Vapor metálico	70	CDM-T 70	6600	ALURA 1577 / 980234
		150	CDM-T 150	14000	ALURA 1630 / 984441
	LED	27	16 LEDS 500 mA	3453	ALURA 5068 / 333942
		36	32 LEDS 350 mA	5312	ALURA 5068 / 33395S

3.5.1 Detalhes das simulações

Assim como em Rodrigues et al. (2011), esta pesquisa utilizou o programa DIALux, desenvolvido pela empresa alemã DIAL, em versão atualizada - DIALux evo 6.2. A geração evo do DIALux, lançada em 2012, permite a integração de espaços internos e externos e também a análise conjunta dos ambientes. Os cálculos são apresentados como uma unidade completa, uma vez que os ambientes individuais e a área externa são fotometricamente integrados por janelas de vidro. Para possibilitar essa simulação de cenas maiores e mais complexas, o método de cálculo do software teve que ser aprimorado e o método denominado "*photon shooting*" foi adotado. A geração anterior utiliza o método de radiação (DIAL, 2017).

Segundo o desenvolvedor, a validação dos cálculos gerados foi realizada pela DIAL através de testes segundo a norma CIE 171:2006 – Teste de Casos para Avaliar a Precisão dos Programas Computacionais de Iluminação, a qual orienta como testar a precisão dos cálculos realizados pelos programas (DIAL, 2017). Mangkuto (2015) também avaliou a versão DIALux evo 4.1 de acordo com a normativa CIE e concluiu que o programa apresenta uma excelente concordância com os valores de referência para cenas com fontes de luz pontual e uma boa concordância com os valores de referência em casos com reflexão difusa. E que o programa considera nos cálculos a

conservação do fluxo luminoso, mas que não inclui a variação da transmissão angular relativa proveniente de diferentes ângulos de incidência. O autor aponta como pontos fortes a alta precisão na simulação de fonte de luz pontual, reflexão difusa e inter-reflexão. Pontos fracos foram encontrados para simulações de cenas exteriores com luz do dia (MANGKUTO, 2015).

Antes de iniciar o uso do programa foi necessário fazer o download dos catálogos eletrônicos de lâmpadas e luminárias dos fabricantes, por meio de *plug-ins*, no site de cada empresa, como já explicitado.

Inicialmente, foi realizada a modelagem do espaço de estudo, o mesmo em que foram realizadas as medições e entrevistas. Para tanto, um arquivo tipo CAD, de extensão *.dwg*, previamente elaborado, foi importado para a base do programa contendo o caminho de pedestres estudado e a projeção dos prédios circundantes. Dentre as opções iniciais para modelagem dos ambientes, a opção “Planejamento de Áreas Externas e Edificações” é a que mais se assemelha com o objeto desta pesquisa e também poderia servir como base para modelagem. Também foram aplicadas as texturas em pisos e paredes externas; por exemplo, pavimento de concreto e gramado em pisos, e revestimento de tijolos à vista e pintura branca nas paredes. Para isso foi utilizada a biblioteca de materiais que vem instalada no programa, a qual fornece os índices de reflexão e espelhamento dos materiais. Esses índices foram verificados em Pereira e Souza (2005).

Para validar os resultados do programa, os sistemas de iluminação a vapor de sódio em alta pressão e a vapor metálico que foram instalados e medidos *in loco* foram simulados. A empresa que produziu as luminárias instaladas no local não possui parceria com a DIAL nem fornece as distribuições fotométricas de seus produtos, então, luminárias semelhantes às instaladas foram utilizadas no processo de validação. A luminária escolhida foi a Citea da empresa Schréder. O posicionamento dos postes e a altura de instalação das luminárias foram mantidos. E as características das fontes luminosas foram inseridas no programa conforme encontradas nas medições complementares. A iluminância horizontal média e o fator de uniformidade da iluminância foram calculados de acordo com a NBR 5101/2012 (ABNT, 2012). Uma malha de pontos igual à utilizada nas medições *in loco* foi inserida no programa, para

reduzir o erro da comparação entre os métodos. Os dados simulados foram comparados aos dados medidos. Os resultados estão descritos no próximo capítulo e no Apêndice E.

Posteriormente à validação do programa e à modelagem básica do ambiente, iniciou-se a etapa de colocação das luminárias, as quais foram posicionadas de maneira isolada no programa. Assim, cenários de simulação foram montados tendo como base o tipo de lâmpada: vapor de sódio a alta pressão, vapor metálico e LED. Foram vinte e quatro cenários para cada tipo de lâmpada, onde foram variados tipos de luminárias, alturas de poste, potência de lâmpada e disposição dos postes, conforme explicado na seção anterior.

Finalizada a disposição de luminárias e lâmpadas, o cálculo dos níveis de iluminância horizontal e de iluminância vertical na calçada foi realizado pelo programa. Para o cálculo da iluminância horizontal foi definido um plano de trabalho no nível 0,0 m. A grade de verificação foi disposta conforme a realizada para a verificação *in loco*, para possibilitar uma comparação posterior. O cálculo da iluminância vertical foi realizado no nível 1,5 m. Para demonstrar os cálculos, o programa gera três modos de visualização do espaço: curvas de iluminâncias, curvas de iluminâncias com cores falsas e numérico ponto a ponto. Também, apresenta uma tabela com a iluminância horizontal média, a iluminância vertical média e o coeficiente de uniformidade encontrados.

3.5.2 Parâmetros de simulação

Para se avaliar a eficiência energética dos sistemas incluindo os efeitos da visão mesópica, a iluminância horizontal média encontrada teve que estar de acordo com o disposto na norma inglesa BS 5489-1 (BSI, 2013) para a iluminância horizontal média mínima, presente no Anexo C, a qual já contempla os efeitos mesópicos. Para tanto foi necessário conhecer o índice de reprodução de cores (nessa norma tratado por R_a) e a relação S/P da fonte de luz adotada no projeto. No caso do índice de reprodução de cores, este dado comumente é fornecido pelo fabricante. Entretanto, como a relação S/P não costuma vir informada, foi utilizada a mesma relação encontrada para as lâmpadas instaladas *in loco*. O requisito de uniformidade

mínimo da iluminância foi verificado conforme a normativa brasileira: 0,25.

Um cenário somente foi considerado adequado se atendesse aos requisitos descritos. Se após a simulação, as normativas não fossem atendidas, o cenário era modificado até que contemplasse o solicitado. Assim, o distanciamento dos postes foi variado. Cada cenário foi finalizado quando alcançou o nível mínimo para a iluminância horizontal ou o fator mínimo de uniformidade. Foram consideradas situações ideais as que apresentaram níveis de iluminação o mais próximo possível da normativa inglesa, uma vez que o que se procura investigar é o sistema mais eficiente.

Como neste trabalho o passeio está sendo considerado como classe P2 (ABNT, 2012), por equivalência de nível de iluminância fotópica inicial, foi adotada a classe S2 da norma inglesa BS 5489-1 (BSI, 2013). Com base nesta norma e nas medições complementares, os níveis de referência de nível médio mínimo de iluminação estão descritos na Tabela 11.

Tabela 11: Níveis médios mínimos de iluminância fotópica atendidos nas simulações considerando efeitos mesópicos

Tecnologia	IRC	Relação S/P	Iluminância fotópica (lux)
Vapor de sódio	< 60	0,5	10,0
Vapor metálico	> 60	1,4	9,0
LED	> 60	2,3	8,1

Os cenários foram simulados considerando apenas a iluminação do passeio. Luzes das salas circundantes e do acesso coberto ao hall do CSE foram “desligadas” para não influenciarem no nível de iluminação do percurso.

Finalmente, com os cenários montados, verificou-se qual a melhor situação em termos de eficiência energética e potência instalada que pode ser proposta para a área de estudo quando a visão mesópica é considerada.

3.5.3 Análise de custos

Com base no trabalho de Kostic et al. (2012), uma análise econômica foi realizada de maneira simplificada com o objetivo de verificar a viabilidade de instalação dos sistemas, uma vez que o cenário mais eficiente pode ser financeiramente impeditivo quando comparado a cenários menos eficientes. Nesta análise foram considerados os custos iniciais de instalação e os custos de eletricidade e de manutenção ao longo do tempo de exploração dos sistemas. Foi adotado um período de exploração dentro da faixa de 20-30 anos, pois de acordo com Kostic et al. (2012), este é o período habitual de utilização dos sistemas.

Os custos dos equipamentos (postes, luminárias, lâmpadas, reatores) que fazem parte do sistema foram estimados conforme pesquisa de mercado. O custo da mão de obra para instalação dos equipamentos foi estimado conforme o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI) que é elaborado pela Caixa Econômica Federal (CEF) em parceria com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e é atualizado mensalmente. A Tabela SINAPI utilizada é referente à região de Santa Catarina, publicada em janeiro de 2018 com valores relativos a pesquisas de dezembro de 2017 (CEF, 2018).

Para manutenção do sistema foram considerados os custos de troca das lâmpadas e/ou luminárias. Segundo consulta realizada à fabricante Schröder através do engenheiro José Augusto Ramos, a vida útil estimada dos LEDs é de 100.000 horas a uma temperatura média noturna de 25°C (RAMOS, 2018). As fabricantes Philips e GE, em seus catálogos eletrônicos mais recentes de produtos, também indicam que a manutenção da emissão de lúmens dos LEDs é de 100.000 horas com a mesma temperatura ambiente de 25° (GE, 2018; PHILIPS, 2018). Tomando como base o tempo de consumo diário estabelecido pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para fins de faturamento da energia elétrica destinada à iluminação pública de 11 horas e 52 minutos (BRASIL, 2010), estima-se que a durabilidade das luminárias LEDs seja de pouco mais de 20 anos. Assim, com o objetivo de calcular um custo simplificado de manutenção das luminárias considerou-se vida útil de 20 anos. Neste cálculo foi considerada a troca de lâmpadas e reatores das luminárias a vapor de descarga ao

longo do tempo. Como a expectativa de duração dos LEDs é superior ao período estipulado não foi considerado nenhum custo adicional para essa tecnologia. Também não foram incluídos custos quanto à limpeza periódica dos equipamentos; como ela deve ser realizada em todos os equipamentos não existe diferença teórica de valores.

Para simplificar a análise, os valores de material e mão de obra foram retirados de composições da Tabela SINAPI que considera um valor para cada tipo de tecnologia de lâmpada de 150 W. Embora lâmpadas de menor potência (70 e 100 W) tenham um custo levemente menor. A troca das lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão é realizada a cada quatro anos (KOSTIC et al., 2012). A vida útil das lâmpadas a vapor metálico consideradas nesta pesquisa é em média de 10.000 horas, gerando uma troca a cada dois anos. O custo dos reatores externos foi estimado igualmente para as duas tecnologias, pois na Tabela SINAPI só existem valores para reatores de lâmpadas a vapor de sódio. Como os valores de mercado são bastante similares entre os reatores, esta aproximação não irá causar diferença significativa. Inclusive, os reatores instalados na pesquisa de campo podiam ser usados para ambas as tecnologias de lâmpadas. A vida útil dos reatores deve ser de pelo menos 10 anos (ABNT, 2011; ABNT, 2015).

O custo de eletricidade foi estimado considerando o consumo de energia, o número de horas que o equipamento fica ligado por noite e o custo da energia fornecida pela concessionária. O procedimento adotado foi o seguinte:

- a. O consumo estimado de energia para os cenários simulados teve como base o número de lâmpadas em cada cenário e a potência especificada pelo fabricante. Aos cenários com lâmpadas de descarga foi adicionada a perda de potência relativa aos reatores, considerada como 15 W por lâmpada para fins de cálculo;
- b. Calculada a potência instalada, esta foi multiplicada pelo número de horas especificado pela ANEEL (BRASIL, 2010) para se obter o consumo anual de cada sistema;
- c. O custo anual de energia foi resultado da multiplicação do consumo anual pelo valor do kWh pago pela UFSC. Em consulta realizada a técnicos do Departamento de Projetos de Arquitetura e Engenharia da universidade, observou-se que a média de custo por kWh em 2017 foi

de R\$ 0,62 para as unidades da UFSC no Campus Trindade, excluindo-se o Hospital Universitário (SCHEFFER, 2018).

Finalizado o levantamento de custos durante a vida útil de cada cenário simulado, uma análise financeira foi realizada para os cenários mais econômicos de cada tipo de lâmpada. A análise financeira compõe o valor presente líquido, a taxa interna de retorno, o *payback* simples e o *payback* descontado dos cenários citados. Os cálculos foram realizados através de planilhas do programa Excel, versão 2007. Uma taxa de 6,0% foi considerada para fins de cálculo. Ela refere-se à variação acumulada do CUB/m² nos doze meses anteriores a janeiro de 2018 em Santa Catarina (SINDUSCON, 2018).

Para cálculo da taxa interna de retorno foi montada uma planilha no Excel contendo despesas (valores negativos) e receitas (valores positivos) que ocorrem anualmente durante a vida útil de um sistema de iluminação. Com o fluxo de caixa organizado por ano, foi utilizada a função “TIR” do Excel. A função “TIR” fornece a taxa interna de retorno de uma sequência de fluxos de caixa. O retorno financeiro foi considerado como a economia de energia (em R\$) de cada cenário comparado com a instalação medida *in loco* com as lâmpadas a vapor metálico. Esta situação foi escolhida, pois no início da pesquisa as lâmpadas instaladas no local eram a vapor metálico. Contudo, elas não estavam funcionando e não puderam ser medidas. Além da economia com energia, também foi considerado como retorno financeiro a economia com a manutenção que seria necessária para funcionamento do sistema instalado com as lâmpadas a vapor metálico. Nos cenários com lâmpadas a vapor de sódio e vapor metálico, os gastos com manutenção foram considerados despesas.

O valor presente líquido foi calculado por meio da Equação 14.

$$VPL = \sum_{j=1}^n \frac{\text{valores}_j}{(1 + \text{taxa})^j} \quad (14)$$

Onde:

VPL é o valor presente líquido (R\$);

n é o número de fluxos de caixa na lista de valores, ou número de anos de vida útil do sistema;

j é o período genérico, percorrendo todo o fluxo de caixa;

valores representam pagamentos e receitas (R\$);

taxa é a taxa de desconto sobre o intervalo de um período (%).

Concluída a análise financeira, considerações foram realizadas em conjunto com os resultados das simulações computacionais.

3.6 ANÁLISE COMPARATIVA DOS RESULTADOS

Finalizadas as três etapas do método – medição *in loco*, aplicação de questionário e simulações computacionais –, os resultados foram analisados conjuntamente.

A análise qualitativa foi executada a partir das respostas dos questionários. Foi avaliado se a alteração do tipo de iluminação influenciou a maneira como os usuários se sentiram em relação a sua segurança pessoal e capacidade de locomover-se.

A análise quantitativa foi realizada, em pontos percentuais, com base nos dados estimados para o consumo de energia dos sistemas. Os consumos estimados dos sistemas instalados nas medições e dos sistemas projetados nas simulações foram comparados para avaliar se a inclusão dos efeitos mesópicos gerou a economia esperada quando fontes de luz com relação S/P mais elevada são escolhidas.

Por fim, foram elencados os pontos fortes e os pontos fracos de cada sistema de iluminação. Entre os pontos que foram avaliados estão os seguintes:

- Manutenção;
- Eficiência energética;
- Preferências pessoais para utilização do espaço;
- Influência do sistema na sensação de segurança pessoal;
- Custos;
- Influência dos efeitos mesópicos nos resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados encontrados nesta pesquisa. Em primeiro lugar estão apresentados dados provenientes das medições complementares e um registro fotográfico das três tecnologias de lâmpadas instaladas no local de estudo. Esses dados servirão de apoio para melhor avaliar as seções seguintes de medições *in loco*, aplicação de questionários e simulações computacionais.

4.1 MEDIÇÕES COMPLEMENTARES

As medições complementares para caracterizar as fontes luminosas foram executadas em duas etapas pelo NIMO/UFJF: medição de dados fotométricos e espectrais e medição de potência de entrada e fator de potência. A Tabela 12 apresenta um resumo dos dados extraídos nas medições e dos dados especificados pelos fabricantes de cada tipologia. Os dados faltantes não foram fornecidos pelos fabricantes nem na própria embalagem do produto nem em catálogo *on line*.

O Apêndice A contém o detalhamento da medição de potência e o cálculo do consumo anual. E o Anexo D contém outras informações das medições dos dados fotométricos e espectrais, como o diagrama de cromaticidade e o gráfico da curva espectral de cada fonte ensaiada.

A Tabela 12 aponta algumas diferenças entre os dados especificados pelos fabricantes e as características medidas. Entre estas destacam-se o fluxo luminoso fotópico e a temperatura de cor correlata da lâmpada de vapor metálico, os quais ficaram com valores abaixo do esperado. O fluxo luminoso apresentou redução de 23,5%. A lâmpada de vapor de sódio também apresentou fluxo luminoso inferior ao especificado, 16% a menos. Por outro lado, a lâmpada LED bulbo apresentou um fluxo luminoso 10% maior.

Tabela 12: Caracterização das fontes luminosas

Características gerais	Lâmpada de sódio em alta pressão		Lâmpada de vapor metálico		Lâmpada LED bulbo	
	ESPEC.	MEDIDO	ESPEC.	MEDIDO	ESPEC.	MEDIDO
Fluxo fotópico (lm)	6.020	5.056	5.600	4.285	5.000	5.511
Fluxo escotópico (lm')	-	2.691	-	6.145	-	12.650
TCC (K)	2.000	1.919	4.200	3.575	6.500	6.427
IRC	≤ 25	10,07	-	63,45	> 80	84,69
S/P	-	0,5322	-	1,4340	-	2,2954
Potência da lâmpada (W)	70	72,3	70	76	45	42,8
Eficiência luminosa da lâmpada (lm/W)	86	69,9	80	56,4	111	128,8
Consumo anual do conjunto (kWh)	-	378,1	-	394,1	-	185,4
Vida útil (H)	24.000	-	10.000	-	25.000	-

Devido à diferença significativa encontrada entre os dados fotométricos medidos e os especificados pelos fabricantes, o laboratório NIMO realizou novas medições dos equipamentos enviados. A segunda medição apresentou resultados semelhantes à primeira, ou seja, os erros em comparação com os dados dos fabricantes continuaram altos. Segundo o laboratório, foi constatado que, em geral, os reatores entregam às lâmpadas uma potência inferior à prevista, quando se aplica a tensão nominal (220 V). Tal fato pode explicar os fluxos fotópicos medidos terem sido menores que os especificados. Porém, em exemplares de lâmpadas de sódio e metálicas pertencentes ao laboratório, os erros (em comparação com dados de placa) nos fluxos foram inferiores a 5%, o que descarta algum problema no equipamento de medição (BRAGA, 2018).

Analisando a potência dos equipamentos, as lâmpadas de descarga consumiram mais energia do que o previsto, e a lâmpada LED pouco menos. Estes dados em conjunto com os anteriores (fluxo luminoso) caracterizam a eficiência luminosa do conjunto. Como as lâmpadas de descarga tiveram resultados piorados para fluxo luminoso e potência, a eficiência luminosa também reduziu. No caso da lâmpada de vapor de sódio, ela diminuiu de 86 para 69,9 lm/W, ou seja, 18,7% de redução. A lâmpada a vapor metálico foi de 80 para 56,4 lm/W, redução de 29,5%. A LED bulbo teve sua eficiência luminosa aumentada de 111 para 128,8 lm/W, ou + 16,0%. Outro dado relevante que pode ser avaliado por meio da Tabela 12 é o consumo anual do conjunto de iluminação instalado. Enquanto a eficiência luminosa leva em consideração somente a potência da lâmpada, o cálculo do consumo anual incluiu também as perdas de energia dos equipamentos auxiliares (reator/capacitor/ignitor) das lâmpadas de descarga. Desse modo, o consumo das lâmpadas de sódio e de vapor metálico apresentaram valores semelhantes: 378,1 e 394,1 kWh, respectivamente. A LED bulbo mostrou-se até 53% mais econômica que as anteriores, com um consumo anual de 185,4 kWh.

Em análise preliminar da Tabela 12, a lâmpada LED demonstrou ser mais vantajosa quando comparada às demais em termos de eficiência luminosa, índice de reprodução de cores e consumo de energia anual. Todavia, o número de amostras de lâmpadas medidas foi reduzido, restringindo-se às instaladas nesta pesquisa. Para maiores conclusões, novas medições com um número maior de amostras devem ser realizadas. As próximas seções farão outras análises dos sistemas que incluirão os dados de temperatura de cor correlata e relação S/P.

4.2 REGISTRO FOTOGRÁFICO

Os registros fotográficos foram executados nas mesmas noites em que foram realizadas as medições *in loco*. Para melhor entendimento da situação, as cenas foram fotografadas a 1,50 m de altura com o auxílio de um tripé. A posição das fotos e as configurações da máquina fotográfica foram mantidas as mesmas para todas as tecnologias de lâmpada: sem flash, tempo de exposição 0,5 s, abertura da lente f2/8, sensibilidade do sensor ISO-100. As Figuras 36 a 38 apresentam as fotografias

do local. Cada figura mantém o local e a mostra o ambiente sob os três tipos de iluminação.

A Figura 36 apresenta fotografias tiradas logo na saída do bloco central do CSE. Uma vez que a área coberta em frente ao hall possui iluminação formada por lâmpadas fluorescentes, é possível perceber a influência da luminosidade destas lâmpadas nas imagens. Na região próxima à grelha de drenagem (borda inferior das imagens) a cor da luz é mais uniforme e intensa em todas as situações, e à medida que se percorre o caminho em direção ao estacionamento do CCJ a cor da iluminação externa vai ficando mais evidente.

Nas imagens da Figura 37, fotografadas no meio do percurso, é possível ver a iluminação externa sem a influência de outras fontes de luz. Nestas imagens percebe-se a diferença de temperatura de cor das tecnologias e também a influência do IRC na visualização dos materiais do ambiente. Destaca-se a cor verde da grama que é percebida de maneira bastante distinta nas três imagens. Pela Figura 37 também é possível observar que a escadaria permaneceu com iluminação insuficiente sobre ela. Nessas imagens ela quase nem aparece. Este fato será melhor evidenciado na seção seguinte, onde os níveis de iluminamento próximos à escadaria foram medidos. Salienta-se porém que, visualmente no local, o olho humano adaptou-se de modo que pudesse ver a escadaria, mesmo sob baixa iluminação. Dado esse relatado durante as entrevistas.

Por fim, a Figura 38 mostra imagens fotografadas logo na base da escadaria em direção ao bloco central do CSE. Nessas imagens é onde a diferença de TCC das fontes é observada com maior evidência. A lâmpada a vapor de sódio bastante amarelada, a lâmpada a vapor metálico com cor branca e a lâmpada LED ainda mais branca, quase azulada. Ao final do percurso vê-se a área coberta em frente ao CSE iluminada por lâmpadas fluorescentes. E também se percebe o baixo nível de iluminamento próximo à escadaria. Outro dado que pode ser observado na Figura 38 é a distribuição de luz na área de convivência. Mesmo que os níveis de iluminamento não tenham sido medidos nestes locais, os entrevistados foram questionados sobre a utilização do espaço. Pelas fotos infere-se que a maior intensidade de luz sobre as mesas e seu entorno foi proporcionada pelas lâmpadas a vapor de sódio, seguidas pelas LEDs e por último pelas lâmpadas a vapor metálico.

Figura 36: Vistas do Bloco CSE para a escada de acesso ao CCJ



(a) lâmpada a vapor de sódio

(b) lâmpada a vapor metálico

(c) LED

Figura 37: Vistas do meio do percurso para a escada de acesso ao CCJ

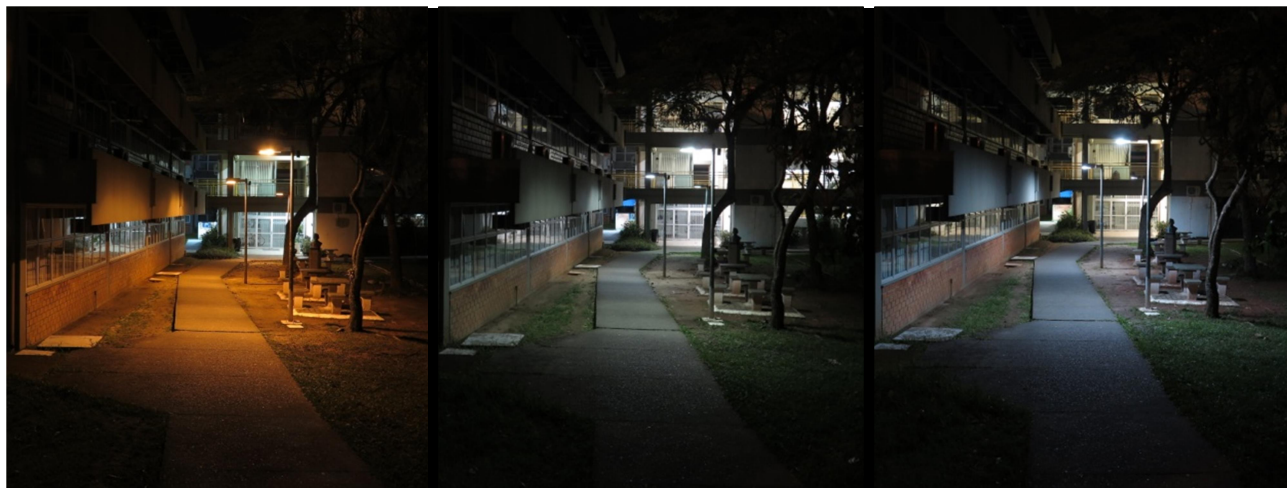


(a) lâmpada a vapor de sódio

(b) lâmpada a vapor metálico

(c) LED

Figura 38: Vistas da escadaria em direção ao bloco do CSE



(a) lâmpada a vapor de sódio

(b) lâmpada a vapor metálico

(c) LED

4.3 MEDIÇÕES *IN LOCO*

As medições no local foram realizadas em quatro etapas e seguiram a seguinte ordem:

1. Sem lâmpada funcionando nos postes e com refletor sobre o bloco central do CSE;
2. Lâmpada a vapor de sódio instalada nos postes e sem refletor;
3. Lâmpada a vapor metálico instalada nos postes e sem refletor;
4. Lâmpada LED bulbo instalada nos postes e sem refletor.

Em todas as etapas as luzes das salas adjacentes ao caminho, do CSE e do CCJ, estavam desligadas. A exceção foi de uma medição de iluminância horizontal realizada na primeira etapa, sem luzes, que objetivou verificar a influência da iluminação das salas.

4.3.1 Iluminância horizontal

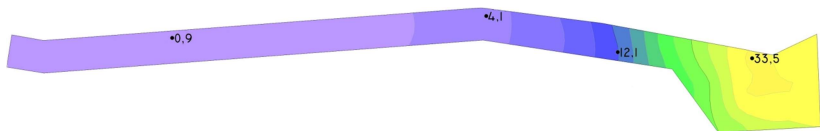
Para demonstrar as medições de iluminância horizontal realizadas, as Figuras 39 e 40 apresentam imagens com cores falsas que representam a distribuição de iluminação do local. Após medição ponto por ponto, os dados foram inseridos no programa Surfer 14 para modelagem da superfície e geração das imagens (GOLDEN SOFTWARE, 2018).

A Figura 39 ilustra a distribuição de iluminância do caminho de pedestres no começo desta pesquisa, quando não havia lâmpadas externas funcionando nos postes existentes. Existia apenas um refletor instalado sobre o bloco central do CSE. Na Figura 39a observa-se a relevância deste na iluminação do percurso. Esta fonte instalada no alto do prédio e direcionada para o trajeto era capaz de iluminar cerca de 30% do percurso de maneira suficiente. Contudo, o restante do caminho possuía um iluminamento inferior a 5 lux, com vários pontos com níveis inferiores a 1 lux. O ponto da malha registrado com maior nível foi de 33,5 lux e de menor nível de 0,9 lux. A iluminância horizontal média calculada através dos pontos medidos foi de 12,0 lux e o fator de uniformidade da iluminância foi 0,07.

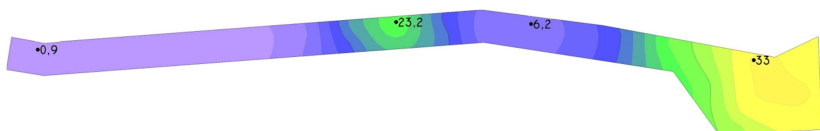
A medição representada pela Figura 39b foi realizada sob as mesmas condições da verificação anterior, mas com uma das salas do CSE com as luzes internas acesas. Comparando as Figuras, percebe-se o aumento significativo da iluminação no percurso. No ponto de maior aditividade, logo abaixo da janela, houve um acréscimo de 21 lux. Assim, se houvesse janelas em todo o percurso e estas ficassem sempre acesas, elas seriam suficientes para iluminar o passeio.

Entretanto esse fato não pode ser considerado, uma vez que a iluminação do percurso não pode depender do uso das salas. Durante as medições verificou-se que fora do horário letivo a movimentação de pessoas no local é frequente. Mesmo em finais de semana à noite havia uso de salas do CCJ em seus andares superiores e trânsito de pedestres que utilizavam o campus como passagem.

Figura 39: Distribuição de iluminamento horizontal (em lux) no caminho sem lâmpadas instaladas nos postes



(a) sem influência de iluminação interna das salas



(b) com influência da iluminação interna da janela

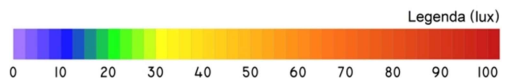
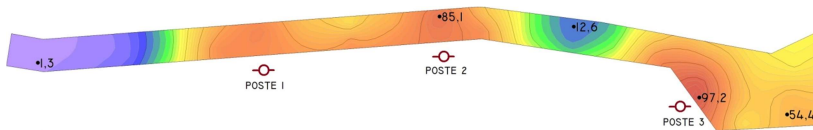
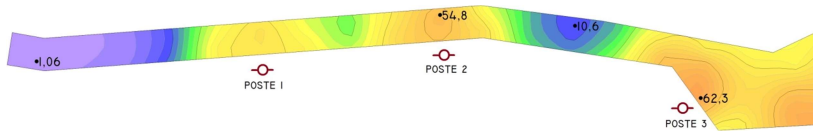


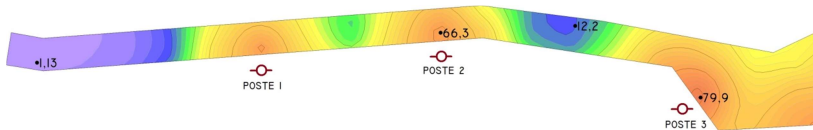
Figura 40: Distribuição de iluminação horizontal (em lux) no caminho com lâmpadas instaladas nos postes



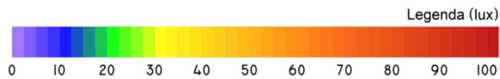
(a) lâmpadas a vapor de sódio



(b) lâmpadas a vapor metálico



(c) LEDs



A primeira lâmpada instalada no percurso foi a vapor de sódio em alta pressão. Para que se pudesse avaliar somente a iluminação dos postes, o refletor foi desligado. Pela Figura 38a observam-se três áreas de maior concentração de luz, áreas essas sob as luminárias. Nestes locais foram registrados os níveis de iluminância mais altos da malha, com 85,1 e 97,2 lux. Percebe-se uma boa distribuição de luz na área entre os postes 1 e 2, distantes 8,4 m entre si. Entre os postes 2 e 3 a uniformidade não é tão boa pois a distância entre eles é maior, aproximadamente 11 m. Esse fato gerou uma sombra acentuada no percurso, nesta região um dos pontos da malha foi registrado com 12,6 lux. A Figura 36 ilustra essa situação.

Existe uma elevação no nível do iluminamento próximo ao acesso coberto (lado direito da Figura 40a), isso se deve à iluminação da área do acesso que é composta por lâmpadas

fluorescentes, as quais acabam complementando a iluminação do passeio. Nesta parte a maior iluminância registrada foi 54,4 lux. Por fim, na parte esquerda da Figura 40a nota-se uma queda elevada no nível do iluminamento. Como no final do percurso não há poste de iluminação instalado, a área junto à escadaria permaneceu escura. Nesta região registraram-se níveis próximos a 1 lux. A iluminância horizontal média foi 45,9 lux e o fator de uniformidade da iluminância, 0,03.

Na sequência foi instalada a lâmpada a vapor metálico e foi mantido o refletor desligado. A distribuição de iluminamento horizontal desta etapa está representada na Figura 38b. Observa-se pela imagem que a distribuição é bastante similar à analisada anteriormente: área escura junto à escadaria (à esquerda da Figura 40b), boa uniformidade entre os postes 1 e 2, área de sombra entre os postes 2 e 3, maiores níveis abaixo das luminárias e pequena elevação de iluminamento próximo ao acesso coberto. Uma vez que as luminárias do local foram mantidas, a distribuição em si não poderia realmente ser muito diferente. Destaca-se, porém, que o nível de iluminamento geral do passeio foi reduzido em cerca de 30%, a média passou de 45,9 lux com a lâmpada a vapor de sódio para 31,4 lux com a lâmpada a vapor metálico. Nesta etapa os maiores níveis medidos foram 54,8 e 62,3 lux. O menor nível manteve-se próximo a 1 lux, mas nenhum abaixo deste valor. O fator de uniformidade da iluminância foi 0,03.

A última lâmpada instalada foi a LED bulbo. A imagem com cores falsas que representa sua distribuição de iluminância é o da Figura 40c. Esta tecnologia apresentou uma distribuição de luz semelhante às anteriores e níveis bastante próximos aos da lâmpada a vapor metálico. Os maiores níveis medidos continuaram sendo abaixo dos postes com valores de 66,3 e 79,9 lux. O menor nível manteve-se próximo a 1 lux, como nos demais casos, com nenhum abaixo deste valor. A iluminância horizontal média foi 35,0 lux e o fator de uniformidade da iluminância, 0,03.

A Tabela 13 traz os valores de iluminância horizontal média e fator de uniformidade para compará-los com o fluxo luminoso medido e a potência de cada fonte de luz instalada. Observa-se que os dados apresentam certa incoerência: a lâmpada LED, de maior fluxo luminoso, não foi a fonte de luz que apresentou o maior nível de iluminamento. Tal fato é proveniente

de a luminária não ser totalmente adequada para a dimensão desta fonte. Como a lâmpada ficou mais confinada, o fluxo luminoso não foi refletido pelo equipamento com tanta eficiência quanto às demais lâmpadas.

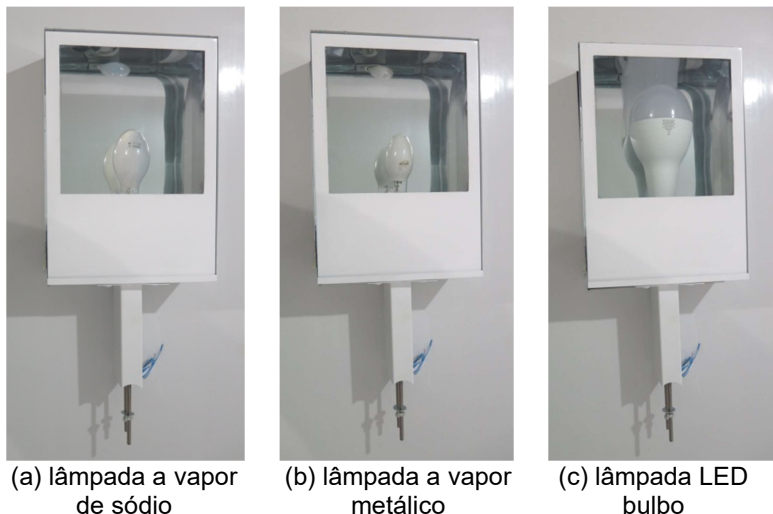
Tabela 13: Comparação entre fluxo luminoso, potência e iluminância horizontal média

Tipo de lâmpada	Fluxo luminoso (lm)	Potência instalada (W)	Iluminância horizontal média (lux)	Fator de uniformidade da iluminância
Sem lâmpada	–	–	12,0	0,07
Vapor de sódio em alta pressão	5.056	87,3	45,9	0,03
Vapor metálico	4.285	91,0	31,4	0,03
LED bulbo	5.511	42,8	35,0	0,03

A Figura 41 mostra como cada lâmpada ficou posicionada dentro das luminárias. As fotos foram tiradas antes da instalação das luminárias nos postes. O teste foi realizado para avaliar justamente o posicionamento de cada lâmpada.

Ressalta-se que havia certa dúvida quando à distribuição de iluminância da lâmpada LED bulbo. Isto porque a lâmpada utilizada possui dimensões físicas maiores do que as comumente aplicadas neste tipo de luminária. Tanto que a luminária teve que ser adaptada em fábrica para suportar o equipamento. Contudo, em comparação às demais fonte de luz, o equipamento demonstrou-se satisfatório para a aplicação em termos de distribuição de luz, mesmo tendo perdido eficiência. Para aplicações futuras no campus uma nova luminária deverá ser analisada para que a perda não seja tão grande. Por se tratar de um novo produto, as lâmpadas ficarão instaladas para avaliar sua durabilidade e serão monitoradas pelo Departamento de Manutenção Predial e de Infraestrutura da UFSC para verificar sua vida útil.

Figura 41: Posicionamento das lâmpadas dentro das luminárias



4.3.2 Iluminância vertical

Com o objetivo de analisar os níveis de iluminância vertical, as Figuras 42 e 43 apresentam os resultados das medições. Cada Figura contém duas sequências de pontos as quais representam a posição de medição em função do sentido de caminhada pelo percurso: quem vai do estacionamento para o hall do CSE (em vermelho) e quem vai do hall para o estacionamento (em azul). A linha tracejada desenhada nas figuras indica o nível de iluminância de 3 lux. Como define a NBR 5101/2012, este é o nível de iluminância médio mínimo necessário para reconhecimento facial a uma distância de 4 m (ABNT, 2012).

A Figura 42 mostra a medição realizada quando não havia lâmpadas funcionando nos postes, apenas o refletor instalado sobre o CSE e a iluminação do acesso coberto do hall. Percebe-se de maneira evidente a influência destas fontes de luz. As áreas mais próximas ao CSE foram as que registraram maior valor. E à medida que a pessoa se afastava o nível de iluminamento no seu rosto diminuía. No sentido contrário, a pessoa ficava com o refletor atrás de si, ou seja, com o rosto sempre na sombra. O nível de iluminância médio vertical no

sentido “estacionamento para hall” foi de 10,1 lux, e no sentido “hall para estacionamento” de 0,9 lux.

A Figura 43a apresenta os resultados para a primeira lâmpada instalada: vapor de sódio em alta pressão. Observa-se que os níveis variam de acordo com o posicionamento dos postes. Os pontos V09 e V13 representam o ponto marcado sob as luminárias. Ao contrário da iluminância horizontal, estes não são os pontos de maior nível de iluminação vertical. Isto ocorre porque a luz encontra-se sobre a cabeça da pessoa. Os maiores níveis foram registrados nos pontos logo atrás das luminárias, pois são nestes que a fonte ilumina mais o rosto. Os níveis mais baixos registrados foram os próximos à escadaria, uma vez que ali não tem poste de iluminação funcionando, com vários valores medidos abaixo de 3 lux. Considerando-se uma pessoa parada logo na base da escada (ponto V18), olhando para o hall, ela não seria capaz de reconhecer uma pessoa vindo na sua direção quando esta estivesse a cerca de 8 m (ponto V14) ou menos dela. Mas como o passeio é longo, ela poderia reconhecer algum sinal de perigo antes de a pessoa chegar nesta distância. O nível de iluminância médio vertical no sentido “estacionamento para hall” foi de 24,2 lux, e no sentido oposto de 18,9 lux.

Figura 42: Iluminamento vertical no caminho (em lux) sem lâmpadas instaladas

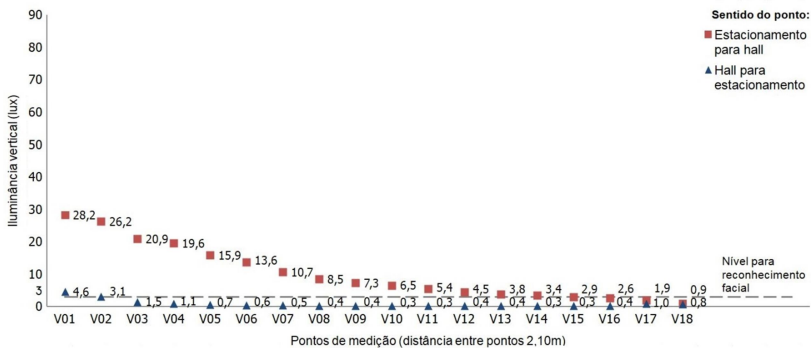
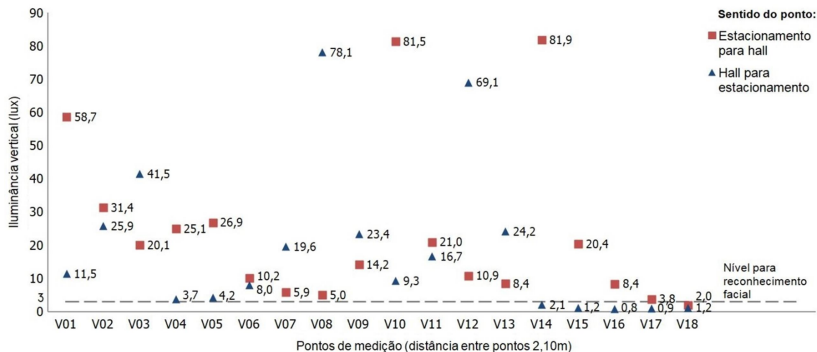
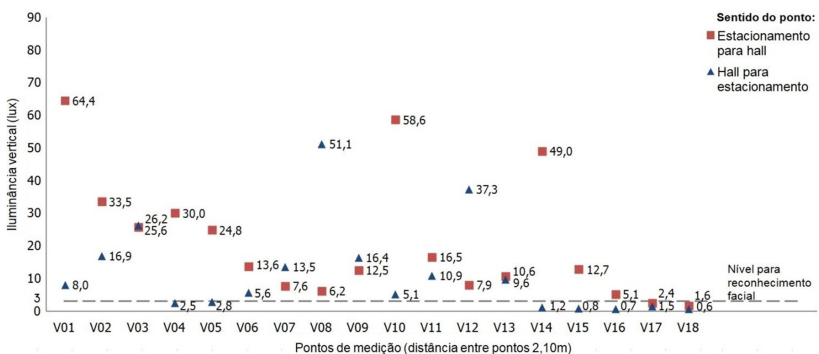


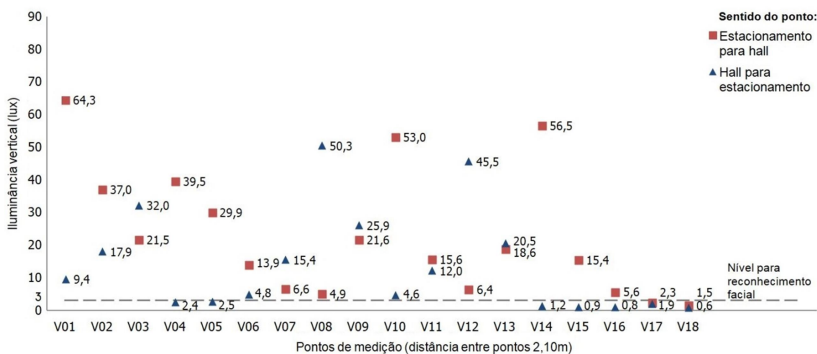
Figura 43: Iluminamento vertical no caminho (em lux) com lâmpadas instaladas nos postes



(a) lâmpadas a vapor de sódio



(b) lâmpadas a vapor metálico



(c) LEDs

Os níveis de iluminância vertical obtidos por meio da lâmpada a vapor metálico são mostrados na Figura 43b. A distribuição de luz foi bastante similar à da lâmpada de vapor de sódio: níveis baixos sob as luminárias e os mais altos logo atrás delas. E apresentou a mesma deficiência de iluminação na região próxima a escada, com níveis abaixo de 3 lux nos 8 m finais do percurso para que vem no sentido do hall para o estacionamento. Nesta etapa de medição o nível de iluminância médio vertical no sentido “estacionamento para hall” foi de 21,2 lux, e no sentido “hall para estacionamento” de 11,7 lux. Tal redução da média condiz com o menor fluxo luminoso da lâmpada de vapor metálico em comparação à tecnologia anterior.

Por fim, a Figura 43c mostra os níveis medidos com as lâmpadas LEDs bulbo instaladas. Esta fonte de luz e a de vapor metálico apresentaram níveis e distribuições muito próximos. O nível de iluminância médio vertical no sentido “estacionamento para hall” foi de 23,0 lux, e no sentido “hall para estacionamento” de 13,8 lux.

A avaliação da iluminância vertical, além de ser um dos requisitos da norma brasileira a serem cumpridos (ABNT, 2012), servirá de subsídio para analisar os resultados das percepções pessoais relatadas nas entrevistas. O fato de as médias das lâmpadas de vapor metálico e LED ficarem próximas será especialmente relevante para avaliar se a percepção das pessoas mudou em relação ao reconhecimento facial.

4.3.3 Luminância horizontal

Para ilustrar as medições de luminância horizontal, as Figuras 44 e 45 apresentam imagens com cores falsas que representam a distribuição dos níveis de luminância do local. Assim como os resultados de iluminância, os dados foram inseridos no programar Surfer 14 para modelagem da superfície e geração das imagens. Cada imagem apresenta o valor mínimo e o valor máximo medido na malha.

Figura 44: Distribuição de luminâncias horizontais (em cd/m^2) no caminho sem lâmpadas instaladas nos postes

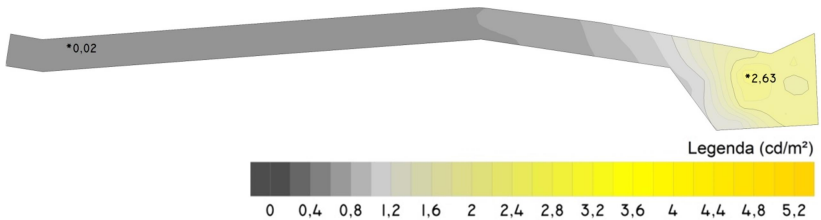
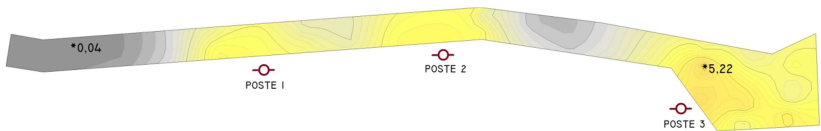
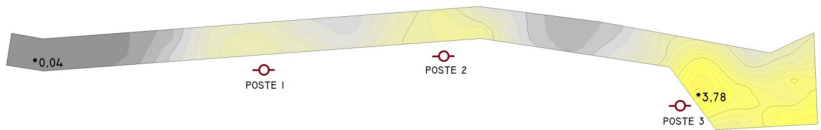


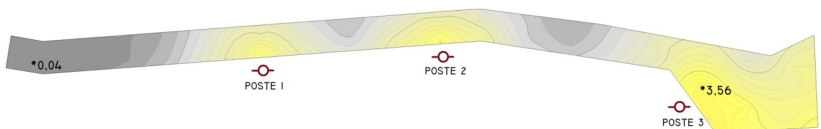
Figura 45: Distribuição de luminâncias horizontais (em cd/m^2) no caminho com lâmpadas instaladas nos postes



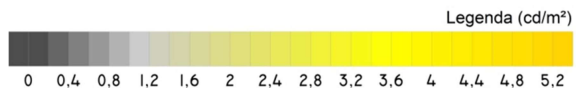
(a) lâmpadas a vapor de sódio



(b) lâmpadas a vapor metálico



(c) LEDs



A Figura 44 apresenta a distribuição de luminância do caminho quando não havia lâmpadas funcionando, apenas o refletor e a luz do acesso coberto. Como imaginado, visualmente a distribuição geral é similar à distribuição de iluminação já

discutida. Nesta etapa, a luminância média foi $0,67 \text{ cd/m}^2$, o menor valor encontrado foi $0,02 \text{ cd/m}^2$ e o maior, $2,63 \text{ cd/m}^2$.

As distribuições de luminâncias obtidas com as lâmpadas instaladas nos postes são apresentadas na Figura 45. Assim como examinado na iluminância horizontal, observa-se pelas imagens: área escura junto à escadaria (à esquerda da imagem), boa uniformidade entre os postes 1 e 2, área de sombra entre os postes 2 e 3, maiores níveis abaixo das luminárias e pequena elevação de iluminamento próximo ao acesso coberto. Com a lâmpada a vapor de sódio, a luminância média foi $2,21 \text{ cd/m}^2$, o menor valor encontrado foi $0,04 \text{ cd/m}^2$ e o maior, $5,22 \text{ cd/m}^2$. A lâmpada a vapor metálico e a LED novamente apresentaram valores medidos bastante parecidos. Com a primeira, a luminância média foi $1,53 \text{ cd/m}^2$, o menor valor encontrado foi $0,04 \text{ cd/m}^2$ e o maior, $3,78 \text{ cd/m}^2$. A luminância média da LED foi $1,52 \text{ cd/m}^2$, o menor valor encontrado foi $0,04 \text{ cd/m}^2$ e o maior, $3,56 \text{ cd/m}^2$.

Após apresentação dos dados coletados nas medições *in loco*, as seções seguintes fazem uma comparação dos dados coletados com o que é recomendado pela norma brasileira de iluminação. E analisam os dados sob os efeitos da visão mesópica.

4.3.4 Comparação dos dados coletados com a Norma Brasileira

Segundo a NBR 5101/2012, os requisitos a serem atendidos em vias para tráfego de pedestres são iluminância horizontal média e fator de uniformidade. Além destes, a norma recomenda que em espaços públicos com predominância de pedestres o nível de iluminância médio mínimo necessário para reconhecimento facial seja de 3 lux, “sendo que sobre a superfície não pode haver valores inferiores a 1 lux” (ABNT, 2012, p. 16).

A Tabela 14 apresenta os resultados das medições realizadas. A etapa de medição onde não existiam lâmpadas instaladas no local foi incluída apenas para comparativo do “antes e depois” das instalações das lâmpadas. Para avaliar a iluminância média vertical geral do percurso uma média aritmética dos valores encontrados para os dois sentidos de caminhada do caminho foi calculada.

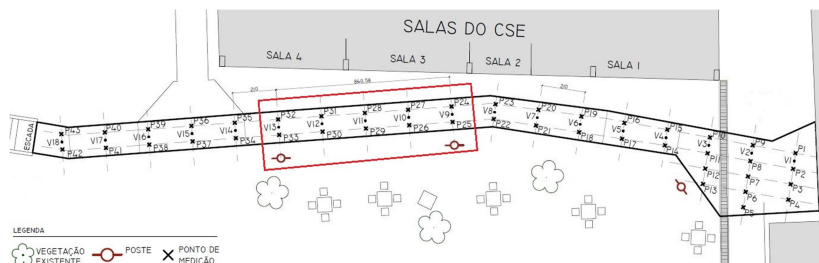
Pela Tabela 14 verifica-se que nenhuma das tecnologias adotadas foi satisfatória no atendimento à normativa. Em nenhum dos casos a distribuição de iluminação foi suficientemente uniforme para cumprir o fator de uniformidade mínimo de 0,25, ficando com valores abaixo do necessário. Pela análise da iluminância horizontal anteriormente realizada (Figuras 39 e 40), esse fato já era esperado, pois a distribuição apresentou locais de sombra, principalmente próximo à região da escada.

Tabela 14: Comparação dos dados coletados em todo o passeio com a NBR 5101/2012

Lâmpada	Iluminância horizontal média (lux)	Fator de uniformidade da iluminância	Iluminância vertical média (lux)	Nível mínimo ponto (lux)	Atendimento à norma
Sem lâmpada	12,0	0,07	5,5	NÃO	NÃO
Vapor de sódio	45,9	0,03	21,6	SIM	NÃO
Vapor metálico	31,4	0,03	16,5	SIM	NÃO
LED bulbo	35,0	0,03	18,4	SIM	NÃO
Mínimo exigido, classe P2	10,0	0,25	3,0	1,0	

De modo complementar, a Tabela 15 faz uma comparação dos dados coletados somente na área compreendida entres os postes que estão alinhados e distantes 8,4 m entre si com os requisitos da normativa brasileira. A Figura 46 demarca o local. Esta análise faz-se relevante para avaliar se as soluções aqui adotadas - altura e distância entre postes, tipo de luminária etc. - poderiam ser aplicadas em outros caminhos do campus. Para cálculo da iluminância horizontal média e fator de uniformidade foram usados os pontos P24 a P33, para cálculo da iluminância vertical média foram usados os pontos V9 a V13 da malha de medição.

Figura 46: Malha de medição com os pontos entres os postes



Neste caso, a Tabela 15 indica que as soluções adotadas mostraram-se satisfatórias no atendimento à NBR 5101/2012. Contudo, os valores apontam um superdimensionamento do sistema de iluminação, apresentando níveis bem acima dos mínimos exigidos. Este fato gera menor eficiência do conjunto e maior gasto de recursos da universidade, tanto de material/mão de obra quanto de consumo de energia elétrica. Uma provável solução seria aumentar a distância adotada entre os postes, haja vista o fator de uniformidade poder ser reduzido. Na etapa de simulações computacionais esse assunto é aprofundado. Desse modo, conclui-se que as soluções deste caminho de pedestres não poderiam ser replicadas para outros percursos do campus.

Tabela 15: Comparação dos dados coletados entre os postes com a NBR 5101/2012

Lâmpada	Iluminância horizontal média (lux)	Fator de uniformidade da iluminância	Iluminância vertical média (lux)	Nível mínimo ponto (lux)	Atendimento à norma
Sem lâmpada	2,0	0,70	2,9	SIM	NÃO
Vapor de sódio	65,9	0,65	27,9	SIM	SIM
Vapor metálico	38,2	0,61	18,5	SIM	SIM
LED bulbo	43,8	0,43	22,4	SIM	SIM
Mínimo exigido, classe P2	10,0	0,25	3,0	1,0	

4.3.5 Inclusão dos efeitos mesópicos

Conforme discutido no capítulo 3, o método para inclusão dos efeitos mesópicos nos dados coletados é baseado no trabalho desenvolvido por Uchida e Ohno (2016). Este método de aproximação denominado *Source SPD* assume que todas as distribuições espectrais de potência do campo de adaptação e dos pontos de teste são as mesmas da distribuição espectral de potência conhecida da fonte de luz instalada. As Áreas 1 e 2 definidas para cálculo foram demarcadas na Figura 32.

A luminância escotópica correspondente a cada ponto foi calculada conforme a Equação 12. Após, a luminância mesópica de adaptação foi calculada para cada ponto utilizando o sistema iterativo composto pelas Equações 3 e 4 do método CIE 191:2010. Por fim, uma média aritmética dos valores de luminância mesópica foi realizada e o fator de aumento mesópico foi calculado conforme a Equação 9 descrita no capítulo 3. A Tabela 16 contém um resumo dos resultados encontrados nas Áreas 1 e 2.

Verifica-se que, conforme previsto, em ambos os casos há uma redução no nível de luminância percebida quando os fatores mesópicos são incluídos na análise da lâmpada de vapor de sódio. Na área 1 a redução foi de 4,5% e na área 2, 2,3%. Também se confirma o aumento de percepção do nível para as lâmpadas a vapor metálico e LED. Considerando as áreas 1 e 2, respectivamente, os aumentos foram de 2,4% e 2,0% para a primeira lâmpada e de 9,4% e 6,7% para a segunda.

De acordo com o documento CIE (2010b), quanto menor o nível de luminância maior será a alteração de sua aparente eficácia. A normativa da CIE cita o seguinte exemplo: com uma luminância fotópica de 1 cd/m^2 , a utilização do sistema recomendado resulta em uma variação entre -5% e +15% para as lâmpadas com relações S/P entre 0,5 e 2,5; com $0,3 \text{ cd/m}^2$ a variação está entre -10% e +30%. Conforme mostra a Tabela 16, essa projeção confirmou-se em escala próxima de valores.

Tabela 16: Inclusão dos efeitos mesópicos

Área	Lâmpada	Lumin. média fotópica (cd/m ²)	Lumin. média escotópica (cd/m ²)	Lumin. média mesópica (cd/m ²)	Fator de aumento mesópico	Variação (%)
1	Vapor de sódio (S/P 0,53)	1,30	0,60	1,24	0,955	-4,5
	Vapor metálico (S/P 1,43)	0,97	1,20	0,99	1,024	+2,4
	LED bulbo (S/P 2,29)	1,00	1,99	1,09	1,094	+9,4
2	Vapor de sódio (S/P 0,53)	2,49	1,15	2,44	0,977	-2,3
	Vapor metálico (S/P 1,43)	1,37	1,70	1,40	1,020	+2,0
	LED bulbo (S/P 2,29)	1,50	2,98	1,60	1,067	+6,7

Como nesta pesquisa medidores S/P não estão disponíveis, para validar o método de inclusão dos efeitos mesópicos, os dados da Tabela 16 foram comparados com os da Tabela 17 que consta na normativa da CIE (2010b). Os grifos da Tabela 17 correspondem às faixas de luminância medidas nesta pesquisa. Analisando as duas tabelas, verifica-se que a variação encontrada para a lâmpada a vapor de sódio em alta pressão ficou dentro do esperado pela tabela CIE. A uma luminância fotópica de 1,3 cd/m² a diferença foi de -4,5%, com esperado entre -6 e -4%. Com a luminância fotópica de 2,49 cd/m² a diferença foi de -2,3%, com esperado entre -2% e -3%. Para as lâmpadas a vapor metálico e LED a variação encontrada foi levemente inferior ao que era esperado pela normativa CIE. Considerando a lâmpada a vapor metálico com uma luminância fotópica de 0,97 cd/m² a diferença foi de +2,4% e com uma luminância fotópica de 1,37 cd/m² a diferença foi de +2,0%, enquanto o esperado seria entre +3% e +5%. Para a LED a uma

luminância fotópica de 1,0 cd/m² a diferença foi de +9,4%, com esperado em 12%. E a uma luminância fotópica de 1,5 cd/m² a diferença foi de +6,7%, com esperado em +9%. Na prática, pelos dados calculados com o método de Uchida e Ohno (2016), o aumento de percepção da luminância proporcionado pelas lâmpadas a vapor metálico e LED seria menor do que o previsto pela CIE (2010b).

Tabela 17: Diferenças entre luminâncias mesópicas e fotópicas (%) calculadas como o sistema mesópico recomendado

Lâmpada	Relação S/P	Luminância Fotópica (cd/m ²)							
		0,03	0,1	0,3	0,5	1	1,5	2	3
Sódio de baixa pressão ~	0,25	-52%	-29%	-18%	-14%	-9%	-6%	-5%	-2%
	0,45	-34%	-21%	-13%	-10%	-6%	-4%	-3%	-2%
Sódio em alta pressão ~	0,65	-20%	-13%	-8%	-6%	-4%	-3%	-2%	-1%
	0,85	-8%	-5%	-3%	-3%	-2%	-3%	-1%	0%
Vapor metálico branco quente ~	1,05	3%	2%	1%	1%	1%	0%	0%	0%
	1,25	13%	8%	5%	4%	3%	2%	1%	1%
	1,45	22%	15%	9%	7%	5%	3%	3%	1%
	1,65	32%	21%	13%	10%	7%	5%	4%	2%
	1,85	40%	27%	17%	13%	9%	6%	5%	3%
LED branco frio ~	2,05	49%	32%	21%	16%	11%	8%	6%	3%
	2,25	57%	38%	24%	19%	12%	9%	7%	4%
Vapor metálico luz do dia ~	2,45	65%	43%	28%	22%	14%	10%	8%	4%
	2,65	73%	49%	31%	24%	16%	12%	9%	5%

Fonte: CIE, 2010b, p. 68 (adaptada)

Ainda que os resultados encontrados não tenham contemplado totalmente o esperado pela CIE (2010b), os valores ficaram próximos, com diferenças de até 1% com as lâmpadas a vapor metálico e até 2,6% com as LEDs. Uma possível causa para esta diferença entre o esperado pela CIE e o calculado nesta pesquisa talvez seja a aplicação do fator de correção sugerida por Uchida e Ohno (2016). Este fator leva em

consideração o pavimento da calçada responsável por refletir a luz, no caso da área de estudo: concreto. Contudo, para uma melhor validação do método o ideal seria o uso de um equipamento de medição S/P.

Embora o aumento da eficácia percebida dos sistemas tenha sido inferior ao esperado, lembra-se que o percurso possui um superdimensionamento no seu sistema de iluminação, com níveis superiores ao recomendado. Quando estes níveis de iluminação são reduzidos, a eficácia percebida é aumentada, e uma maior economia de recursos pode ser alcançada.

4.4 APLICAÇÃO DE QUESTIONÁRIOS

A aplicação dos questionários aos participantes desta pesquisa foi realizada em quatro etapas e seguiram a mesma ordem das medições *in loco*: sem lâmpadas nos postes e com refletor sobre o CSE; lâmpada de vapor de sódio, vapor metálico e LED – todas sem o refletor. O sistema com lâmpadas a vapor de sódio ficou instalado por quatro semanas (período de 02 a 27 de outubro de 2017) e o sistema com lâmpadas a vapor metálico, por três semanas (período de 27 de outubro a 14 de novembro de 2017). As LEDs bulbo continuam instaladas para verificar a durabilidade dos equipamentos (período de 14 de novembro até a data atual).

A etapa inicial buscou qualificar o espaço do modo como ele estava no início da pesquisa para comparação desses resultados com os das lâmpadas instaladas. Foi possível verificar se a percepção do local mudou dependendo do ponto de análise em que a pessoa estava. Como não havia lâmpadas funcionando, a questão 7 não foi respondida nesta etapa. Cada questão respondida pelos 22 participantes resultou em um gráfico de barras. As barras com tom mais forte referem-se ao ponto de resposta quando o entrevistado estava em frente ao hall do CSE olhando para o estacionamento. O tom mais claro refere-se ao ponto oposto, no pé da escada olhando para o hall.

As respostas das etapas seguintes foram agrupadas em um gráfico por questão. Cada cor refere-se a uma lâmpada instalada e o tom da cor refere-se ao sentido de visão. Cada questão foi respondida por 29 pessoas. Por esse motivo os dados dos gráficos “sem” e “com lâmpadas” não foram

agrupados para que não houvesse distorção no momento de interpretar os resultados.

No questionário aplicado, as perguntas foram organizadas de modo que a resposta de uma questão não influenciasse na resposta da seguinte. Por exemplo, a pergunta que avaliou diretamente a sensação de segurança foi a última, uma vez que ao alterar sobre a segurança no local a pessoa poderia avaliar de outra forma o quão claro/escuro o lugar parecia ou se ela era capaz ou não de reconhecer alguém vindo em sua direção. Em virtude disso, os gráficos das questões serão reorganizados em três temas para melhor avaliação:

1. Aceitabilidade de modo geral e para interação social: questões 2, 5 e 6;
2. Orientação espacial e capacidade de deslocar-se pelo local: questões 1, 3 e 8;
3. Segurança pessoal percebida para utilizar o caminho, incluindo percepção de brilho: questões 4, 7 e 9.

4.4.1 Aceitabilidade

O quesito “aceitabilidade” refere-se a preferências pessoais em si. As questões 2, 5 e 6 foram realizadas com o intuito de analisar a opinião dos usuários acerca da aceitação da iluminação externa do caminho em termos gerais e da vocação do local para atividades de interação social. Uma vez que o percurso em estudo possui mesas e bancos ao longo de seu trajeto estas questões envolveram a avaliação de espaço como um todo. Para isso duas perguntas sobre capacidade de utilização das mesas para ler no local à noite e sobre utilização do pátio como ambiente de encontro e lazer foram incluídas. As Figuras 47 a 52 mostram as respostas para as questões referentes à aceitação.

As Figuras 47 e 48, relativas à questão 2, apresentam os resultados do questionamento “a iluminação neste percurso é BOA?”. Na fase inicial da pesquisa a maioria dos entrevistados discordou fortemente dessa afirmação; 97,7% discordaram em maior ou menor grau. Não houve diferença significativa de percepção dependendo do ponto de resposta em que ela estava. Com o decorrer das trocas das lâmpadas a percentagem de aceitação foi aumentando, indo de 79,3% com a lâmpada a vapor de sódio para 96,6% com a LED (Figura 48).

Figura 47: Resultados da questão 2 que avaliou se as pessoas concordavam que a iluminação no passeio era “boa”, sem lâmpadas instaladas.

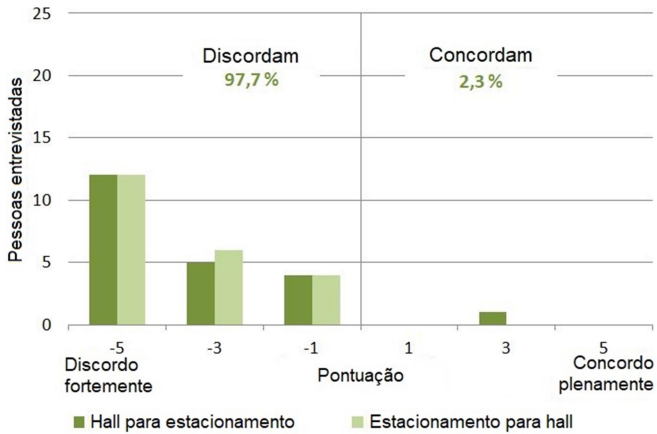
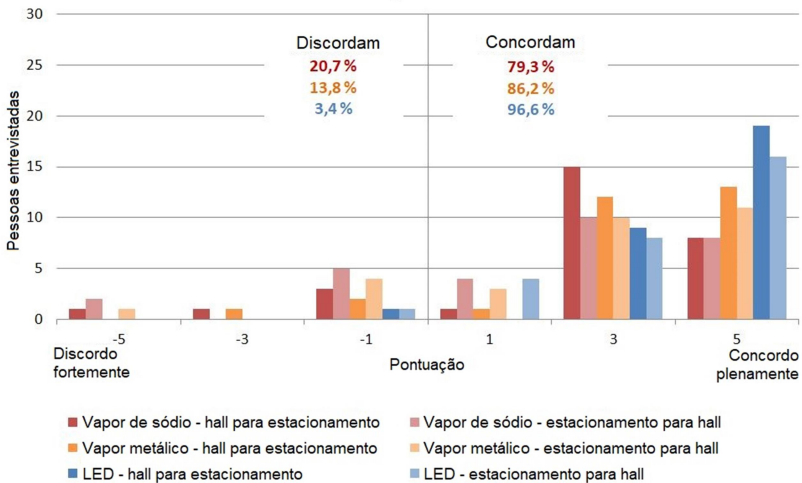


Figura 48: Resultados da questão 2 que avaliou se as pessoas concordavam que a iluminação no passeio era “boa”, com lâmpadas instaladas.



Durante o processo de entrevistas, algumas pessoas comentaram que deveria ser colocado mais um poste junto à escada, pois, como visto na seção de iluminação horizontal,

aquela área continuou levemente escura. Este é o provável motivo pelo qual algumas pessoas continuaram a discordar da afirmação.

As Figuras 49 e 50 referem-se à utilização das mesas para ler. Como na pergunta anterior, 97,7% dos entrevistados disseram que a iluminação na região das mesas não os permitia ler. Com a instalação da lâmpada a vapor de sódio a aceitação melhorou, indo de 2,3% para 56,9%. O melhor nível foi com a lâmpada LED, chegando a 86,2%.

Como discutido na seção de registro fotográfico, as imagens sugerem que a maior intensidade de luz sobre as mesas foi proporcionada pelas lâmpadas a vapor de sódio, seguidas pelas LEDs e por último pelas lâmpadas a vapor metálico. Contudo, não foram realizadas medições dos níveis de iluminância sobre as mesas.

Figura 49: Resultados da questão 5 que avaliou a concordância para utilizar as mesas do jardim para ler, sem lâmpadas instaladas.

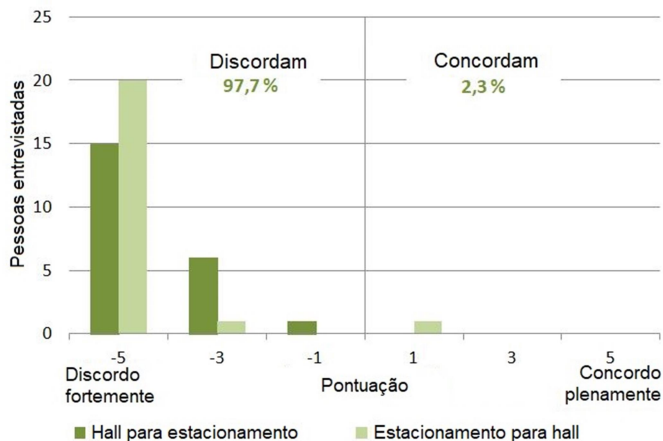
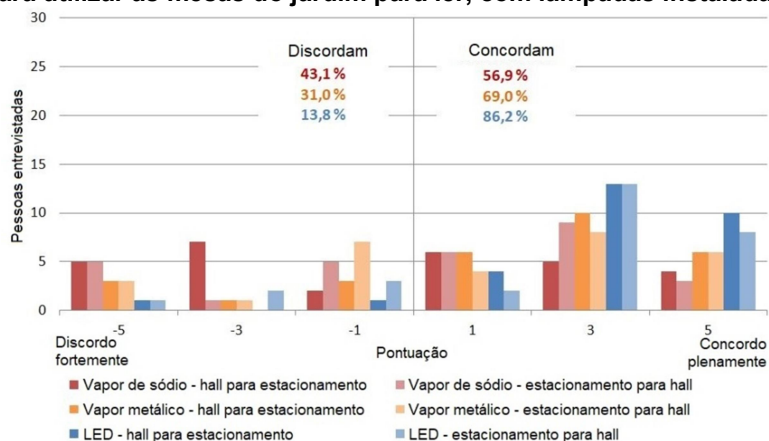


Figura 50: Resultados da questão 5 que avaliou a concordância para utilizar as mesas do jardim para ler, com lâmpadas instaladas.



A terceira e última indagação sobre aceitabilidade questionou os participantes sobre o uso do local como ambiente de encontro. As Figuras 51 e 52 referem-se a esta pergunta. Mesmo sem iluminação externa, 20,5% das pessoas responderam que o ambiente era confortável para interagir com amigos. Entre as três lâmpadas instaladas a que gerou maior satisfação foi a lâmpada LED, alcançando um nível de concordância de 98,3%.

Figura 51: Resultados da questão 6 que avaliou a concordância para utilizar o local para sentar e conversar, sem lâmpadas instaladas.

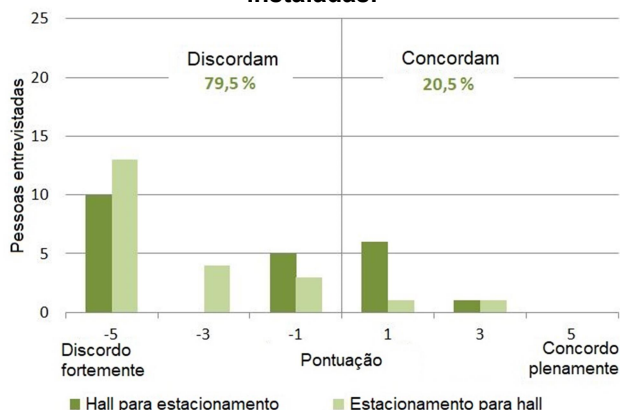
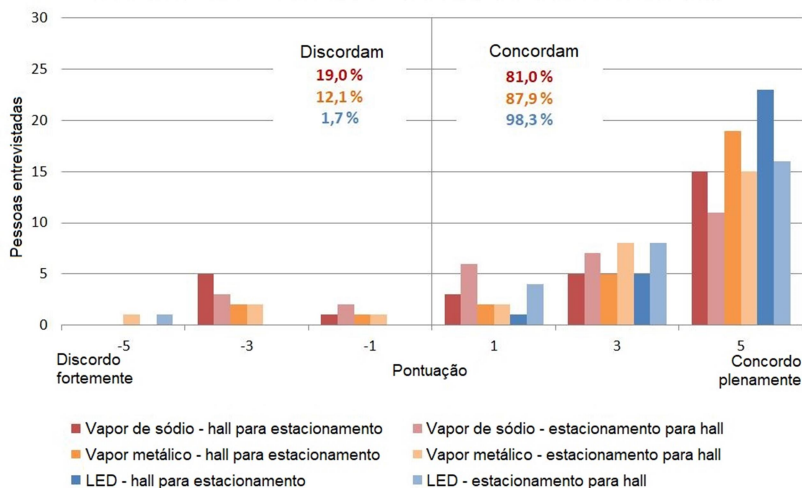


Figura 52: Resultados da questão 6 que avaliou a concordância para utilizar o local para sentar e conversar, com lâmpadas instaladas.



Adicionalmente às questões levantadas, o uso do local foi observado durante as medições *in loco* e entrevistas. Antes de instalar a iluminação, a utilização das mesas era esporádica. Vez ou outra alguma mesa estava ocupada. Após a primeira instalação, lâmpada a vapor de sódio, o uso das mesas tornou-se frequente durante o período letivo. Na noite seguinte a esta instalação todas as mesas estavam ocupadas durante o intervalo das aulas. Esse fato chamou a atenção, pois a concentração de pessoas usualmente era em frente à entrada do CCJ, onde também há mesas. Mas com a iluminação do local parte das pessoas passou a utilizar o espaço em estudo para convívio social. Na etapa final das entrevistas, com as LEDs instaladas, era frequente encontrar pessoas que utilizavam as mesas para jogar baralho.

Isto posto, as questões referentes ao quesito aceitabilidade apontaram a preferência pessoal para que o local fosse melhor iluminado. Entre as lâmpadas instaladas, a LED foi a que gerou maior concordância com as afirmações sugeridas, seguida da lâmpada a vapor metálico e por último a vapor de sódio.

4.4.2 Orientação Espacial

Para avaliar a orientação espacial e a capacidade das pessoas deslocarem-se pelo local, três perguntas foram incluídas no questionário. As questões 1 e 3 avaliaram a possibilidade de ver o percurso como um todo e de ver se existiam obstáculos pelo passeio. O trajeto foi considerado como sendo logo à frente do hall do CSE até o pé da escada, cerca de 40 m. A questão 8 avaliou a percepção das pessoas quanto ao ambiente parecer claro ou escuro. Esta última questão também interfere na sensação de segurança do usuário.

Com o objetivo de auxiliar na avaliação das questões lembra-se que os níveis médios de iluminação horizontal do local foram de 45,9 lux com a lâmpada a vapor de sódio em alta pressão, 31,4 lux com a lâmpada a vapor metálico e 35,0 lux com a LED. E os índices de reprodução de cores medidos pelo NIMO foram 10, 63 e 85, respectivamente, para a lâmpada a vapor de sódio, a vapor metálico e LED.

As Figuras 53 e 54 mostram os resultados da questão 1. Ao serem questionadas sobre a possibilidade de ver todo o trajeto a ser percorrido, a maioria das pessoas respondeu que eram capazes de ver o percurso mesmo sem iluminação nos postes. A percentagem de concordância foi de 56,8% e de discordância de 43,2%. Assim, pode-se dizer que mesmo sob níveis baixos de iluminação o olho humano adapta-se para ver o ambiente.

Depois de instalada a lâmpada a vapor de sódio a percentagem de pessoas que concordaram ver todo o caminho subiu para 91,4%. Com a lâmpada a vapor metálico o percentual reduziu para 89,7% e voltou a subir com a lâmpada LED, chegando a 100% de concordância. Ou seja, embora o nível de iluminação tenha sido 23% mais baixo que o da lâmpada a vapor de sódio, mais pessoas declararam ser capazes de ver o trajeto quando as lâmpadas LEDs estavam montadas. Ressalta-se que este item foi o único do questionário que recebeu uma aprovação de 100%.

Figura 53: Resultados da questão 1 que avaliou a possibilidade de ver todo o caminho, sem lâmpadas instaladas.

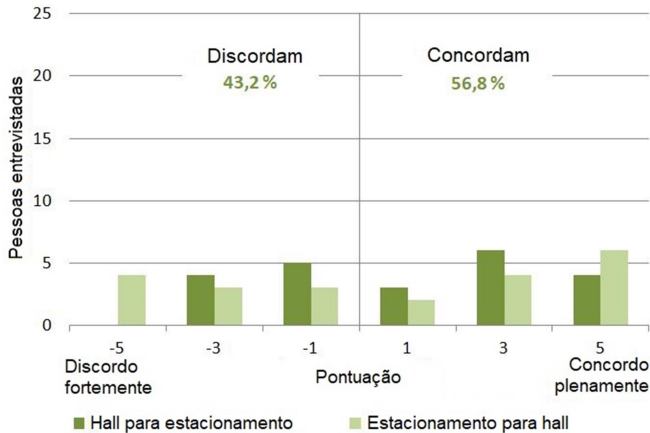
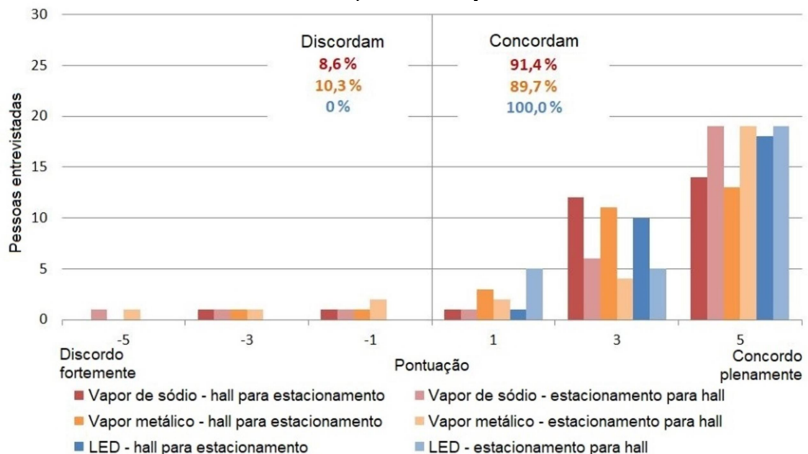


Figura 54: Resultados da questão 1 que avaliou a possibilidade de ver todo o caminho, com lâmpadas instaladas.



As Figuras 55 e 56 referem-se às respostas da questão 3. Nela as pessoas foram indagadas se poderiam ver se o caminho possuía riscos de tropeços ou obstáculos, como buracos ou irregularidades na superfície. Novamente, mesmo sob baixo nível de iluminação boa parte dos participantes, 40,9%, respondeu ser capaz de perceber algum risco. Com a instalação da lâmpada a vapor de sódio o percentual subiu para 86,2%, mas ainda

houve pessoas que “discordaram fortemente” da afirmação. Com as lâmpadas de luz mais “branca” e com maior índice de reprodução de cores, o percentual foi de 91,4% com a lâmpada a vapor metálico e 96,6% com a LED.

Figura 55: Resultados da questão 3 que avaliou a possibilidade de ver se havia riscos pelo caminho, sem lâmpadas instaladas.

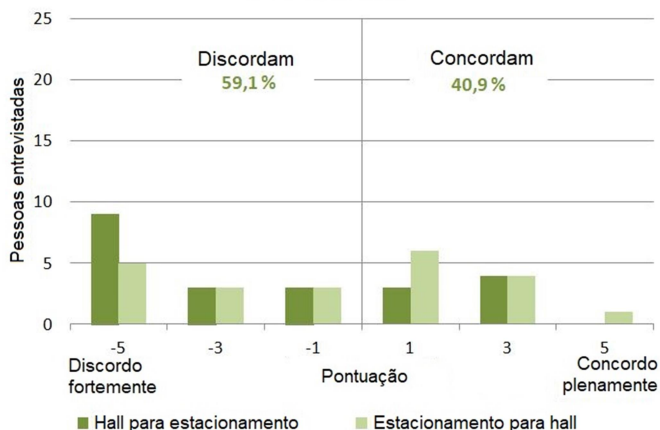
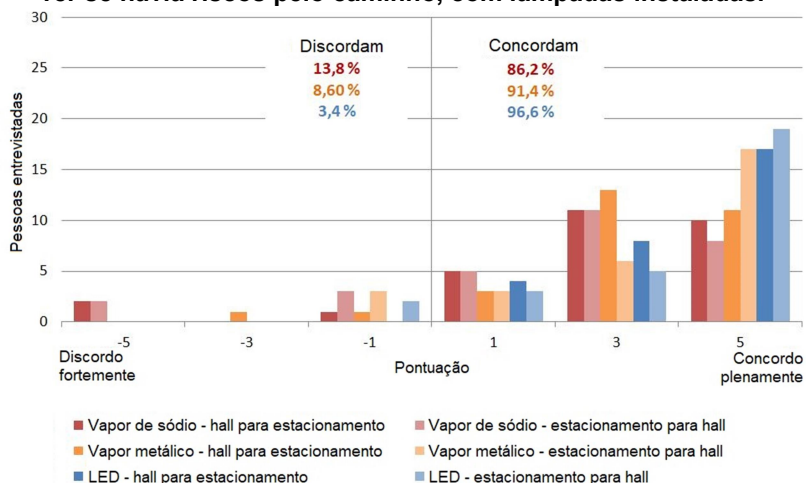


Figura 56: Resultados da questão 3 que avaliou a possibilidade de ver se havia riscos pelo caminho, com lâmpadas instaladas.



A outra questão do tema orientação espacial avaliou se os usuários do local consideravam o ambiente em geral “mais claro” ou “mais escuro”. Como dito, a indagação da questão 8 também se refere à percepção de segurança das pessoas. As Figuras 57 e 58 apontam as respostas.

No primeiro momento, sem lâmpadas nos postes, quase a totalidade das pessoas declarou que o ambiente parecia escuro, 95,5%. Sendo que, quando posicionadas no pé da escadaria (sentido estacionamento para hall), a maioria afirmou que o local era “muito escuro”. Nessa posição quase não havia luz no entorno da pessoa. No sentido oposto, a maioria declarou que o ambiente era “moderadamente escuro”.

Figura 57: Resultados da questão 8 que avaliou a percepção das pessoas quanto ao ambiente parecer claro ou escuro sem lâmpadas instaladas.

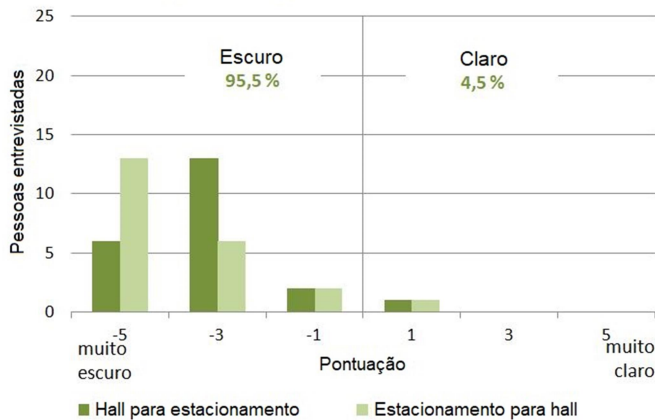
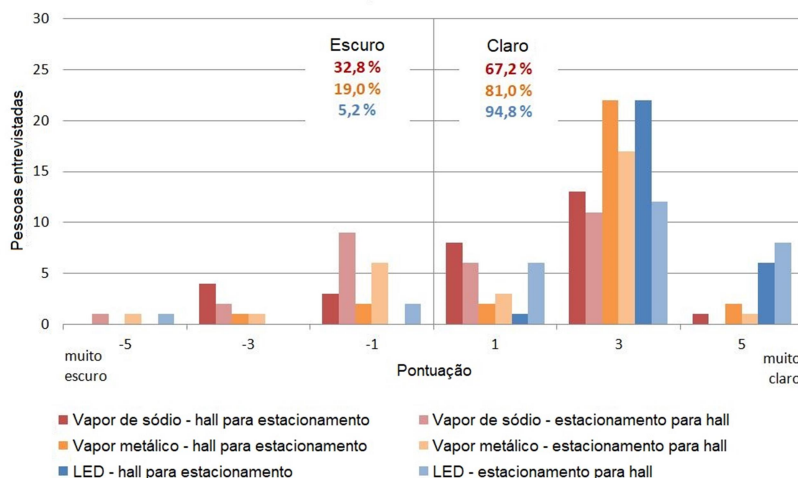


Figura 58: Resultados da questão 8 que avaliou a percepção das pessoas quanto ao ambiente parecer claro ou escuro com lâmpadas instaladas.



Durante o período em que as lâmpadas a vapor de sódio estavam instaladas, 32,8% das pessoas entrevistadas continuaram declarando que o ambiente parecia escuro. Com a instalação das outras lâmpadas os percentuais diminuíram para 19,0% com a lâmpada a vapor metálico e 5,2% com a LED. Nas três lâmpadas a maioria das pessoas considerou o local “moderadamente claro”, com predominância desta resposta quando se estava posicionado na área mais iluminada do percurso (sentido hall para estacionamento). No sentido oposto de posicionamento visual, houve respostas de que o ambiente permaneceu “muito escuro”.

4.4.3 Segurança pessoal percebida

A questão da segurança pessoal percebida foi avaliada por meio de uma pergunta direta no questionário, a questão 9. Além desta, outras duas foram incluídas para apoiar a análise. Estas questionaram se o entrevistado poderia reconhecer uma pessoa vindo em sua direção e como ele percebia o brilho causado pelas lâmpadas instaladas nas luminárias.

Entre estes itens, o primeiro respondido foi a questão 4, as Figuras 59 e 60 mostram suas respostas. Como visto no

referencial teórico, para que uma pessoa possa reconhecer qualquer sinal de hostilidade e possa tomar uma ação evasiva ou defensiva, a distância mínima exigida é de 4,0 m (CIE, 2000). A ABNT (2012) indica que a esta distância o nível de iluminância médio vertical seja superior a 3 lux para ser possível o reconhecimento facial. No decorrer da aplicação dos questionários algumas pessoas costumavam transitar pelo local, assim, o entrevistado procurava olhar as pessoas passando para fazer sua avaliação.

Durante a primeira etapa de aplicação do questionário o nível de iluminamento médio vertical foi de 10,2 lux de quem vinha em direção ao hall, e de 0,9 lux para quem vinha em direção ao estacionamento. Analisando a Figura 59 percebe-se a influência desses níveis nas respostas. Em geral, 75% das pessoas responderam não serem capazes de reconhecer alguém vindo em sua direção. Quando responderam a questão no pé da escadaria (estacionamento para hall), apenas duas pessoas responderam poder reconhecer alguém vindo.

Com as lâmpadas instaladas a percentagem de participantes que declaram reconhecer alguém vindo aumentou. Com a lâmpada a vapor de sódio 77,6% concordou poder reconhecer, com a lâmpada a vapor metálico, 86,2%, e com a LED 98,3% dos entrevistados concordaram. O maior número de respostas negativas foi registrado quando o questionário era respondido no pé da escadaria. Essas respostas coincidem com os níveis medidos. Como visto na seção de medições *in loco*, todas as lâmpadas apresentaram baixo nível de iluminamento vertical na região próxima à escadaria. Neste local foram medidos vários níveis abaixo dos 3 lux.

Destaca-se ainda que apesar de apresentarem níveis próximos de iluminamento médio vertical (16,5 lux para lâmpada de vapor metálico e 18,4 lux para LED – menos de 2 lux de diferença), houve diferença significativa nas respostas da indagação. Em comparação com a lâmpada a vapor metálico, 12,1% a mais das pessoas declarou poder reconhecer alguém quando as LEDs estavam instaladas.

Figura 59: Resultados da questão 4 que avaliou a possibilidade de se ver bem o entorno e reconhecer uma pessoa a uma distância entre 3 e 10 m, sem lâmpadas instaladas.

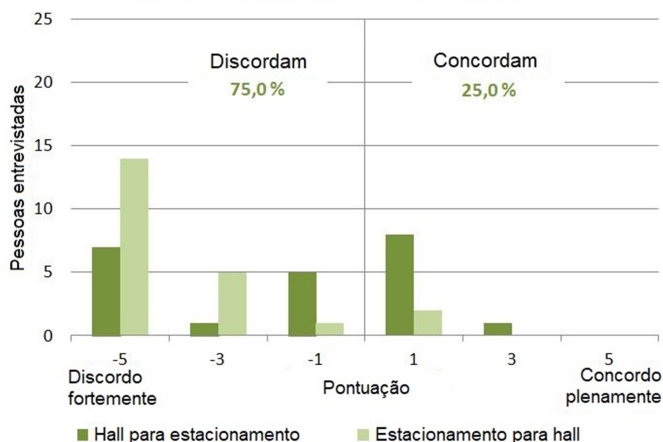
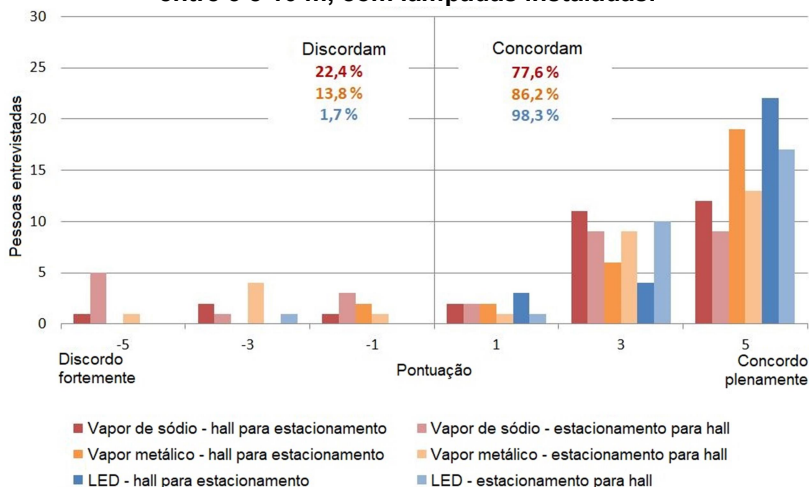


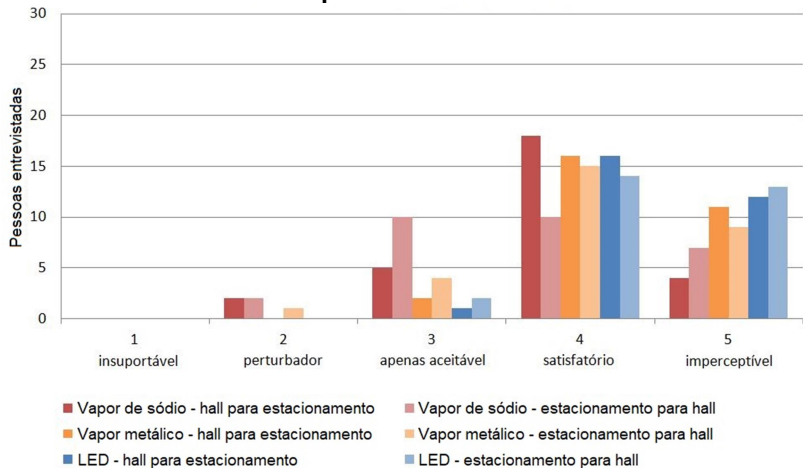
Figura 60: Resultados da questão 4 que avaliou a possibilidade de se ver bem o entorno e reconhecer uma pessoa a uma distância entre 3 e 10 m, com lâmpadas instaladas.



A questão de número 7 das entrevistas solicitou que os usuários classificassem o brilho proporcionado pelas fontes luminosas instaladas. Como no início da pesquisa os postes não estavam funcionando, somente a Figura 61 traz suas respostas.

Nesta análise poucas pessoas classificaram o brilho como perturbador, e nenhuma pessoa qualificou o brilho como insuportável. A maioria dos entrevistados disse que o brilho emitido pelas fontes era satisfatório. E a lâmpada com mais respostas “imperceptível” foi a LED.

Figura 61: Resultados da questão 7 que avaliou o brilho das lâmpadas instaladas.



O último item do questionário avaliou o quanto os entrevistados se sentiriam seguros se estivessem andando sozinhos à noite naquele percurso. As Figuras 62 e 63 trazem as respostas. Antes de realizar a colocação das lâmpadas nos postes, 86,4% das pessoas declararam que se sentiriam inseguras se tivessem que passar sozinhas no local. Com a instalação das fontes luminosas os níveis de sensação de segurança percebida aumentaram. Com a lâmpada a vapor de sódio 65,5% dos entrevistados declaram se sentir seguros, com a vapor metálico 86,2% e com a LED 93,1%. Sendo que nas três lâmpadas a maioria dos usuários entrevistados declarou sentir-se “moderadamente seguro”.

Comparando os resultados dos dois pontos de entrevistas, o nível de segurança percebida foi declarado maior quando as pessoas responderam o questionário posicionadas em frente ao hall, ou seja, quando havia mais luz sendo oferecida em torno dela e menos luz sobre o caminho que havia pela frente. Esta

conclusão foi a mesma encontrada pelos pesquisadores Haans e Kort (2012) em experimento realizado na Eindhoven University of Technology.

Figura 62: Resultados da questão 9 que avaliou a sensação de segurança das pessoas ao andarem sozinhas no caminho à noite, sem lâmpadas instaladas.

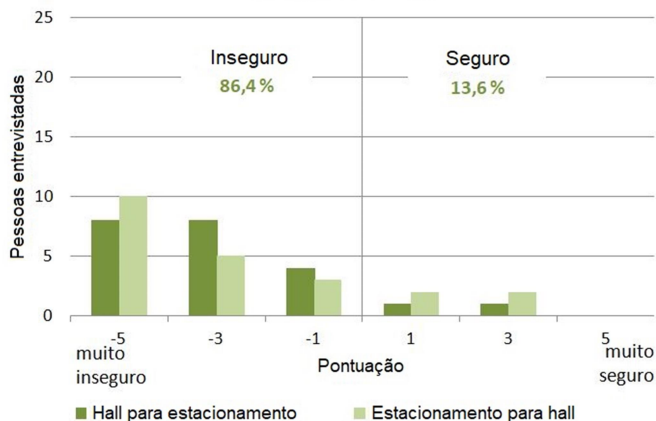
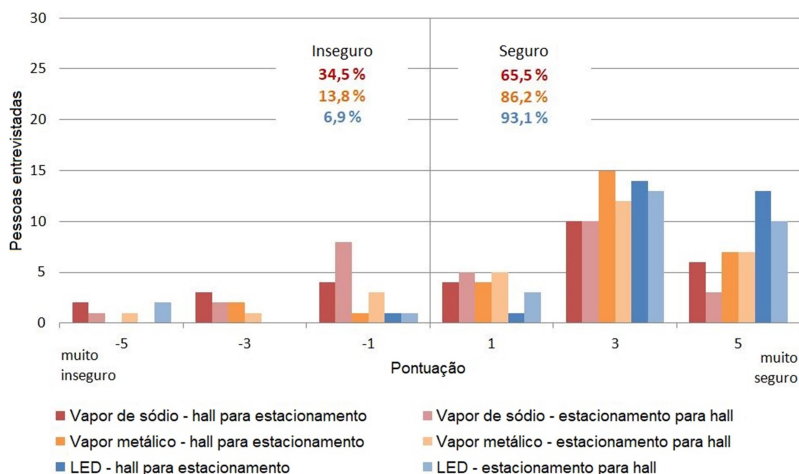


Figura 63: Resultados da questão 9 que avaliou a sensação de segurança das pessoas ao andarem sozinhas no caminho à noite, com lâmpadas instaladas.



Desse modo, por meio das perguntas realizadas observou-se que a sensação de segurança percebida está diretamente ligada a como o espaço público é iluminado. Nesta pesquisa, independente do tipo de iluminação instalada, o nível de segurança declarado pelos entrevistados aumentou consideravelmente, de 13,6% para 65,5% com a primeira fonte de luz funcionando.

Para as três questões do item segurança, a lâmpada que apresentou mais pontos positivos foi a LED. Ressaltando-se as respostas da questão 9, onde houve significativa diferença entre o nível de segurança proporcionado pela lâmpada a vapor de sódio, 65,5%, e a lâmpada LED, 93,1%. Estes dados demonstram que não apenas o nível de iluminamento deve ser levado em consideração, mas temperatura de cor e índice de reprodução de cores também são importantes e influenciam diretamente nas percepções dos usuários. Mesmo com um nível de iluminamento 31% maior que a LED, a lâmpada a vapor de sódio proporcionou nível de segurança menor.

4.5 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As simulações computacionais foram conduzidas conforme descrito no capítulo 3. Nesta seção é apresentado o processo da validação do programa DIALux, os resultados das simulações computacionais e a análise de custo.

4.5.1 Validação do programa DIALux

Para modelagem do espaço de estudo, uma planta baixa do local em AutoCAD foi importada para o DIALux, e o percurso, os prédios circundantes e o mobiliário urbano foram modelados no próprio programa. Após a modelagem, realizou-se a simulação dos sistemas de iluminação a vapor de sódio e a vapor metálico que foram medidos *in loco*. Esta etapa constituiu-se de uma validação do programa DIALux *evo* e está detalhada no Apêndice E deste trabalho. Em síntese, a empresa que produziu as luminárias instaladas no local não possui parceria com a DIAL nem fornece as distribuições fotométricas de seus produtos, e, mesmo que fornecesse, as luminárias tiveram que ser adaptadas para suportarem a lâmpada LED. Então, foram utilizadas luminárias semelhantes às instaladas. Para

comparação, a Figura 64 apresenta a imagem simulada pelo programa com a lâmpada a vapor metálico e a foto do local com a mesma lâmpada instalada.

Figura 64: Comparação entre a imagem gerada pelo DIALux e a situação real quando as lâmpadas a vapor metálico estavam instaladas

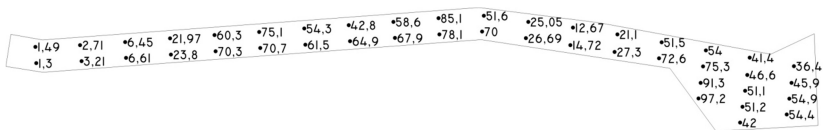


(a) imagem gerada pelo DIALux

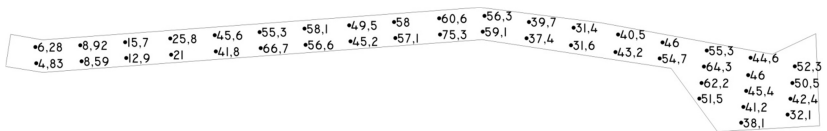
(b) foto do local

Os dados gerados pelo programa ficaram próximos ao medidos no local. Com a lâmpada a vapor de sódio a diferença entre o nível médio de iluminamento medido e o simulado foi de -6,7%, com a lâmpada a vapor metálico foi de +14,3%. A maior variação encontrada deu-se justamente na distribuição da luz pelas luminárias, uma vez que as luminárias simuladas distribuíram melhor o fluxo luminoso gerado pelas fontes. Isso proporcionou um fator de uniformidade melhor que o medido no local. Com a lâmpada a vapor de sódio o fator de uniformidade medido foi de 0,03 e o simulado de 0,11, com a lâmpada a vapor metálico o fator medido foi de 0,03 e o simulado de 0,13. As Figuras 65 e 66 comparam os dados medidos com os simulados através da malha de pontos utilizada nas medições.

Figura 65: Comparação entre os valores medidos e simulados com a lâmpada a vapor de sódio utilizando a malha de pontos

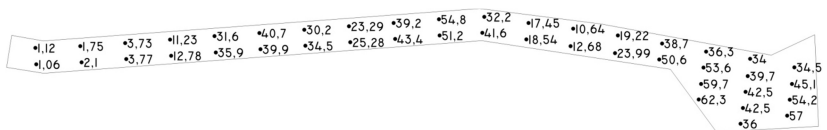


(a) medição *in loco* com lâmpada a vapor de sódio

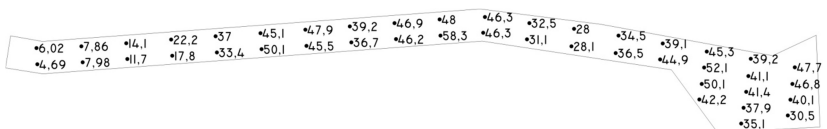


(b) simulação no DIALux com lâmpada a vapor de sódio

Figura 66: Comparação entre os valores medidos e simulados com a lâmpada a vapor metálico utilizando a malha de pontos



(a) medição *in loco* com lâmpada a vapor metálico



(b) simulação no DIALux com lâmpada a vapor metálico

A lâmpada LED bulbo não foi simulada, pois, como ela teve sua distribuição luminosa prejudicada pela dimensão da lâmpada em relação à luminária, não seria possível simular essa situação. Com as lâmpadas simuladas, uma simulação mais precisa somente seria possível com a inserção no programa da mesma luminária instalada. Assim, considerando a validação executada por Mangkuto (2015) e a simulação realizada com as fontes de luz instaladas, acredita-se que o programa DIALux evo atendeu aos requisitos desta pesquisa e foi utilizado para simular os cenários propostos.

4.5.2 Resultados das simulações

A Tabela 18 apresenta os resultados encontrados para os 72 cenários simulados. Com o objetivo de encontrar um resultado válido, foi necessário testar de duas a quatro luminárias no local e variar o distanciamento entre os postes. O número de tentativas realizadas para alcançar um resultado satisfatório foi de quatro vezes em média. Cada cenário foi finalizado quando alcançou o nível mínimo para a iluminância horizontal ou o fator mínimo de uniformidade. Na maioria dos casos o parâmetro determinante foi o fator de uniformidade, o que resultou em vários cenários com níveis de iluminação acima do necessário. O distanciamento dos postes foi o máximo possível dentro dos parâmetros citados para que os dados encontrados possam servir de apoio para estudo de outros percursos de pedestres que sejam mais longos que este em análise.

A última coluna da Tabela 18 apresenta o valor total da potência instalada no percurso. Neste cálculo, para as lâmpadas de descarga foi incluída a potência da lâmpada e de um reator de 15 W de perda, para as luminárias LEDs planar foi considerada somente a potência da luminária. Após, o valor da potência foi multiplicado pelo número de luminárias necessárias. Deste modo, os cenários que apresentaram a menor potência instalada foram os de número 49 a 52: duas luminárias LED planar com braço reto e 38 W de potência total (em destaque na Tabela 18).

Outros itens destacados na Tabela 18 referem-se aos cenários que apresentaram a maior distância entre os postes, 30 metros. Esta distância foi alcançada com todas as lâmpadas simuladas. Estão destacados na Tabela 18 os cenários com maior fator de uniformidade. Eles foram os de número 44, 66 e 71 com fator de uniformidade de 0,68, 0,74 e 0,68, respectivamente, sendo que dois deles com LEDs e um deles com lâmpadas a vapor metálico. Levando em conta a potência instalada do conjunto, destaca-se o cenário 71, pois utilizou duas luminárias ao invés de três como os cenários 44 e 66. Nesta simulação foram colocadas duas luminárias LED com eixo central com altura de 5 metros, dispostas paralelas entre si e distantes 21 metros e potência total instalada de 72 W. Ela apresentou nível médio de iluminação horizontal de 8,9 lux e nível médio de iluminação vertical a 1,5 m de 6,1 lux. O menor

nível de iluminação horizontal foi registrado com 6,1 lux e o maior com 11,6 lux.

Tabela 18: Resultados das simulações computacionais

Cenário	Lâmpada	Luminária	Potência (W)	H (m)	Disposição dos postes	Nº postes	D (m)	Iluminância horizont (lux)	Fator uniformidade	Iluminância vertical lux)	Potência instala. (W)		
1	VAPOR DE SÓDIO EM ALTA PRESSÃO	Braço reto	70	4	Paral.	3	17	49,4	0,26	30,6	255		
2				Interc.	3	18	45,8	0,25	27,4	255			
3				6	Paral.	2	29	25,1	0,28	10,7	170		
4				Interc.	2	28	27,2	0,25	12,5	170			
5				100	4	Paral.	3	18	57,1	0,27	38,3	345	
6					Interc.	3	18	57,3	0,27	37,9	345		
7			6		Paral.	2	30	34,2	0,26	14,0	230		
8			Interc.		2	29	34,4	0,26	14,2	230			
9			Braço inclinado		70	4	Paral.	3	17	40,9	0,34	27,6	255
10						Interc.	2	21	35,2	0,25	23,7	170	
11				6		Paral.	2	27	23,4	0,28	12,8	170	
12				Interc.		2	27	24,1	0,29	12,8	170		
13		100		4		Paral.	2	22	53,6	0,26	37,3	230	
14				Interc.		2	21	54,4	0,25	35,6	230		
15			6	Paral.	2	30	35,1	0,27	17,4	230			
16			Interc.	2	30	37,0	0,28	18,9	230				
17			Eixo central	100	4	Paral.	2	25	14,1	0,28	9,4	230	
18					Interc.	2	27	13,4	0,26	8,4	230		
19		5			Paral.	2	25	11,1	0,44	6,8	230		
20		Interc.			2	26	11,3	0,45	6,5	230			
21		150			4	Paral.	2	25	15,5	0,27	10,5	330	
22					Interc.	2	24	14,6	0,27	10,0	330		
23			5	Paral.	2	25	12,6	0,41	7,7	330			
24			Interc.	2	24	12,2	0,47	7,5	330				

* H é a altura de instalação da luminária. D é o distanciamento entre os postes.

Tabela 18: Resultados das simulações computacionais (cont.)

Cenário	Lâmpada	Luminária	Potência (W)	H (m)	Disposição dos postes	Nº postes	D (m)	Iluminância horizont (lux)	Fator uniformidade	Iluminância vertical lux)	Potência instala. (W)
25	VAPOR METÁLICO	Braço reto	70	4	Paral.	3	17	38,3	0,26	22,3	255
26				Interc.	3	18	31,9	0,25	16,2	255	
27			6	Paral.	2	26	21,3	0,26	11,2	170	
28				Interc.	2	26	22,3	0,25	11,6	170	
29			150	4	Paral.	3	14	92,1	0,28	57,2	495
30					Interc.	3	16	94,7	0,26	59,6	495
31		6		Paral.	2	24	47,6	0,33	13,5	330	
32				Interc.	2	23	40,6	0,33	17,4	330	
33		Braço inclinado	70	4	Paral.	3	18	43,2	0,31	29,5	255
34				Interc.	3	18	47,7	0,29	29,8	255	
35			6	Paral.	2	29	26,9	0,25	14,7	170	
36				Interc.	2	30	27,1	0,26	14,1	170	
37			100	4	Paral.	3	18	57,7	0,32	39,1	345
38					Interc.	3	18	61,8	0,28	37,2	345
39		6		Paral.	2	27	34,7	0,25	19,0	230	
40				Interc.	2	28	36,6	0,26	18,2	230	
41		Eixo central	70	4	Paral.	2	20	9,2	0,40	7,6	170
42					Interc.	2	20	9,2	0,46	7,4	170
43	5			Paral.	3	14	10,0	0,48	7,1	255	
44				Interc.	3	14	9,2	0,68	6,9	255	
45	150		4	Paral.	2	20	21,4	0,26	15,2	330	
46				Interc.	2	21	22,5	0,25	14,1	330	
47	5	Paral.	2	23	17,7	0,29	10,9	330			
48		Interc.	2	24	17,9	0,29	9,8	330			

* H é a altura de instalação da luminária. D é o distanciamento entre os postes.

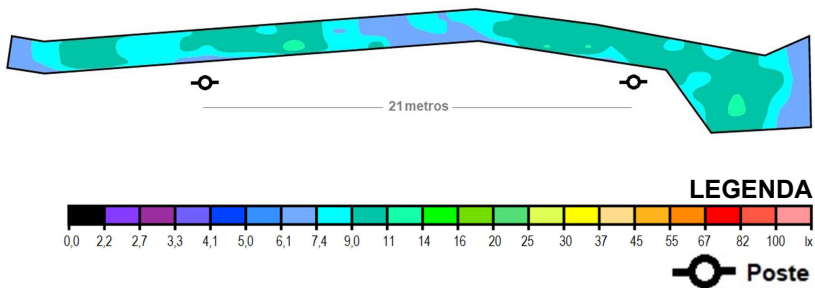
Tabela 18: Resultados das simulações computacionais (cont.)

Cenário	Lâmpada	Luminária	Potência (W)	H (m)	Disposição dos postes	Nº postes	D (m)	Iluminância horizont (lux)	Fator uniformidade	Iluminância vertical lux	Potência instala. (W)
49	LED	Braço reto	19	4	Paral.	2	19	13,7	0,27	9,2	38
50				Interc.	2	20	13,9	0,30	8,4	38	
51			6	Paral.	2	19	9,4	0,25	4,8	38	
52				Interc.	2	22	9,4	0,36	4,4	38	
53			27	4	Paral.	2	20	19,1	0,26	13,5	54
54					Interc.	2	21	19,6	0,29	6,6	54
55		6		Paral.	2	30	11,6	0,36	5,7	54	
56			Interc.	2	30	12,2	0,30	5,2	54		
57		Braço inclinado	20	4	Paral.	2	23	11,9	0,28	8,2	40
58					Interc.	2	23	12,4	0,26	7,7	40
59			6	Paral.	2	23	8,7	0,27	4,9	40	
60				Interc.	2	23	8,7	0,39	4,1	40	
61			27	4	Paral.	2	24	16,9	0,26	12,1	54
62					Interc.	2	21	15,9	0,25	10,1	54
63				6	Paral.	2	30	11,1	0,36	5,7	54
64					Interc.	2	30	11,1	0,31	7,1	54
65		Eixo central	27	4	Paral.	3	13	8,8	0,49	6,0	81
66					Interc.	3	15	9,1	0,74	7,2	81
67			5	Paral.	4	10	8,5	0,63	5,2	108	
68				Interc.	3	13	8,0	0,65	5,8	81	
69			36	4	Paral.	2	20	11,2	0,45	8,2	72
70	Interc.				2	22	11,2	0,35	7,5	72	
71	5	Paral.		2	21	8,9	0,68	6,1	72		
72		Interc.	2	22	9,3	0,55	5,9	72			

* H é a altura de instalação da luminária. D é o distanciamento entre os postes.

Os níveis de iluminamento e o fator de uniformidade proporcionados pelo cenário 71 vão ao encontro com o proposto por Narendran, Freyssinier e Zhu (2015). Como visto na seção de referencial teórico, melhores condições de uniformidade de iluminância propiciam maior percepção de segurança e maior capacidade de ver ao redor e à distância. Após estudo com pessoas em um estacionamento os autores indicam como parâmetros uma iluminância média de 9,0 lux (podendo variar de 4,5 lux a 13,5 lux). A Figura 67 contém a distribuição de iluminamento com curvas de cores falsas do cenário 71.

Figura 67: Distribuição de iluminamento horizontal do cenário 71 com LED



Na sequência, dois cenários de cada tipo de lâmpada são apresentados. Eles foram escolhidos por serem a pior e a melhor situação, **em termos de potência instalada**, de cada tipologia de lâmpada. Após avaliação da potência instalada foi verificada a distância alcançada entre os postes, quanto maior a distância entre os postes, melhor foi considerado o cenário. Se ainda houvesse cenários empatados, o critério de desempate foi o fator de uniformidade. As Figuras 68 a 70 apresentam imagens contendo os dados dos cenários escolhidos. A Figura 71 contém as distribuições de iluminamento horizontal dessas simulações.

Figura 68: Melhor e pior cenários simulados com a lâmpada a vapor de sódio



Figura 69: Melhor e pior cenários simulados com a lâmpada a vapor metálico



Figura 70: Melhor e pior cenários simulados com LED

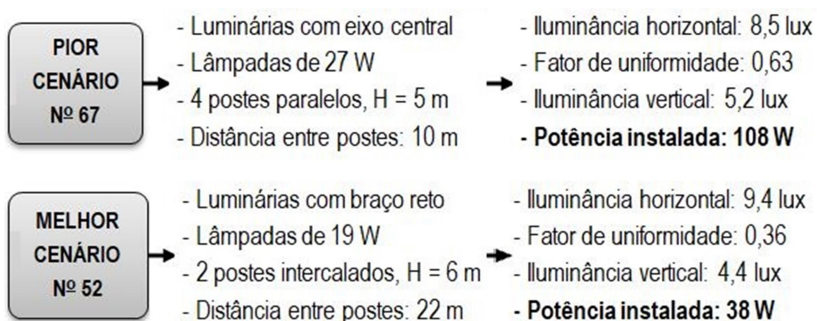
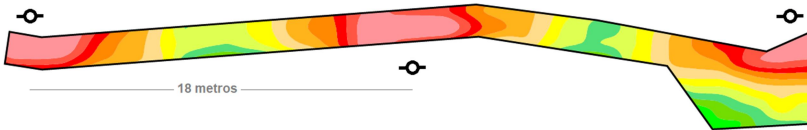
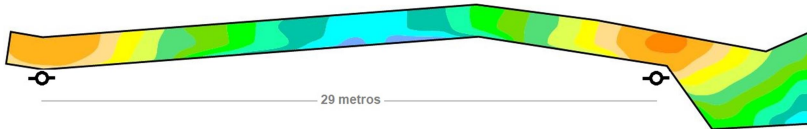


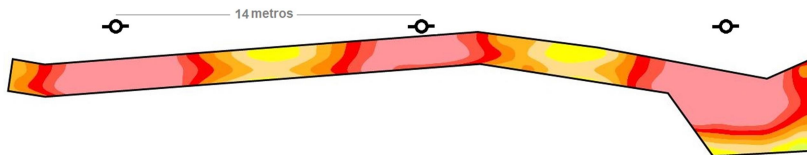
Figura 71: Distribuições de iluminação horizontal do pior e do melhor cenário simulado com cada tipo de lâmpada



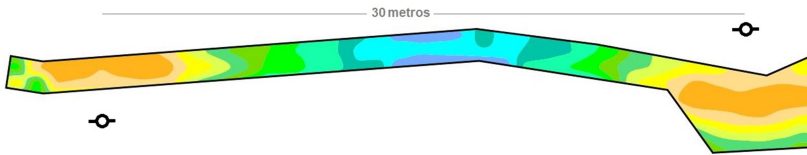
(a) cenário 6, pior situação com lâmpada a vapor de sódio



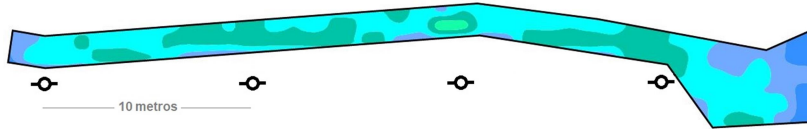
(b) cenário 3, melhor situação com lâmpada a vapor de sódio



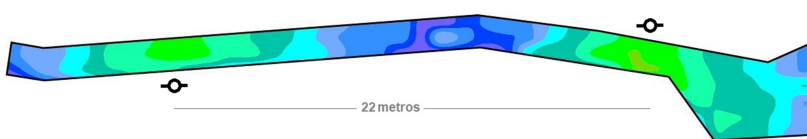
(c) cenário 29, pior situação com lâmpada a vapor metálico



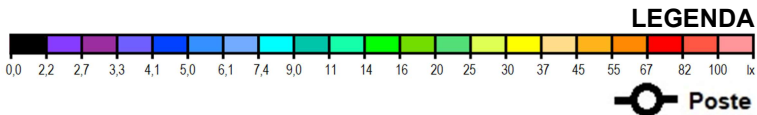
(d) cenário 36, melhor situação com lâmpada a vapor metálico



(e) cenário 67, pior situação com LED



(f) cenário 52, melhor situação com LED



A Figura 72 apresenta ilustrações geradas pelo programa e compara os diferentes posicionamentos de postes testados nos cenários, levando em consideração que a melhor situação é a menor potência instalada.

Figura 72: Ilustrações geradas pelo DIALux do pior e do melhor cenário simulado com cada tipo de lâmpada



(a) cenário 6, pior situação com lâmpada a vapor de sódio



(b) cenário 3, melhor situação com lâmpada a vapor de sódio



(c) cenário 29, pior situação com lâmpada a vapor metálico



(d) cenário 36, melhor situação com lâmpada a vapor metálico

Figura 72: Ilustrações geradas pelo DIALux do pior e do melhor cenário simulado com cada tipo de lâmpada (cont.)



(e) cenário 67, pior situação com LED



(f) cenário 52, melhor situação com LED

Como resultado das simulações, verificou-se que as melhores soluções foram proporcionadas pela utilização de postes de maior altura – 5 e 6 metros. Aumentar a altura dos postes propiciou uma melhor distribuição do iluminamento e possibilitou maiores distâncias entre os postes. Contudo, utilizar alturas superiores a 6 metros dificulta a manutenção dos sistemas. Uma vez que calçadas instaladas longe de ruas podem ter difícil acesso de veículos de serviço, deve-se considerar que o acesso às luminárias possa ser realizado através de escada ou andaime. Em relação ao posicionamento dos postes, se paralelos ou intercalados, não houve consenso. Alguns cenários foram melhores com os postes em paralelo e outros com os postes intercalados, a solução final vai depender do modo como o fluxo luminoso é distribuído pela luminária.

Quanto ao tipo de luminária, as simulações demonstraram que as luminárias com eixo central com fluxo luminoso refletido permitiram fatores mais altos de uniformidade quando comparados com as luminárias com braço. Na maioria dos cenários, o fator determinante foi a aproximação do nível mínimo de iluminamento da via, enquanto com os outros equipamentos o parâmetro determinante foi o fator de uniformidade mínimo de 0,25. Isto ocorre porque a luminária distribui o fluxo luminoso de maneira semelhante nos 360° a sua volta, em vez de concentrar em determinada direção. Assim, em situações onde se deseja

iluminar espaços laterais ao calçamento e jardins, como é o caso do local de estudo que possui mesas no entorno, utilizar este tipo de luminária torna-se bastante conveniente. Em locais onde não existe esta necessidade acaba sendo um desperdício de energia.

Ao simular os cenários utilizando as luminárias com braço inclinado, percebeu-se a necessidade de se afastar os postes da borda da via para que a maior intensidade do fluxo luminoso ficasse sobre o passeio. Desse modo, para vias estreitas como a em estudo a utilização deste tipo de equipamento não é indicada porque dificulta e encarece a execução das instalações elétricas. No caso de calçamentos mais largos, acima de 5 metros, esta montagem pode ser uma boa solução.

Por fim, como esperado as luminárias LED planar tiveram melhores resultados em termos de potência instalada. Enquanto as menores potências totais foram de 170 W com as lâmpadas de descarga, a melhor instalação LED ficou em 38 W, ou seja, 77% a menos de energia consumida. Além das LEDs necessitarem de menos energia para seu funcionamento, outro fator relevante é que em passeios de pedestres os níveis de iluminação necessários são mais baixos que os utilizados em estradas e rodovias. Além disso, a tecnologia LED permite a utilização de luminárias com baixos fluxos luminosos. No caso das luminárias simuladas, entre as lâmpadas de descarga o menor fluxo luminoso utilizado foi de 5200 lm com uma luminária com lâmpada a vapor metálico de 70 W. A LED de menor fluxo luminoso simulada emite 2656 lm. Utilizar luminárias com fluxos luminosos mais baixos é uma solução vantajosa em passeios de pedestres, pois aumenta a eficiência do sistema e reduz o consumo de eletricidade. Levando em conta os efeitos da visão mesópica, essa vantagem é ampliada, pois ao se utilizar as LEDs o nível de iluminação pode ser reduzido.

Maiores detalhes das simulações podem ser vistos no Apêndice F que apresenta a distribuição de iluminação horizontal, representada por curvas de iluminação com cores falsas geradas pelo programa DIALux evo, de todas as simulações com resultados válidos realizadas.

4.5.3 Análise de custos

Para embasar a análise econômica dos cenários simulados, os custos de material e mão de obra foram estimados com base em pesquisa de mercado, através de e-mails enviados a fabricantes e pesquisas em sites de internet, e na Tabela SINAPI. A Tabela 19 contém o custo unitário para a instalação de uma luminária de cada tipo ensaiada. Os valores das luminárias foram fornecidos pelas fabricantes Schröder (RAMOS, 2018) e Empalux (SILVA, 2017) e os custos de lâmpadas e conjunto de reatores pelas mesmas fabricantes e pela loja virtual Loja Elétrica Ltda. (2018) através de seu site. Para simplificar a avaliação, o custo dos postes foi obtido da Tabela SINAPI e considerado apenas um tipo: poste cônico contínuo em aço galvanizado, reto, flangeado e altura de 6 metros. Algumas simulações consideraram postes de alturas mais baixas, 4 e 5 metros, e com braço, mas o SINAPI não fornece valores para estes itens e não existe diferença significativa de valores entre esses e o poste de 6 metros considerado. O custo de mão de obra para instalação de postes e luminárias foi obtido da Tabela SINAPI e inclui serviços de servente, eletricista e auxiliar de eletricista. Por se tratar de análise econômica sintética, não foram considerados custos de fiação elétrica, relé-fotocélula, base de concreto, escavação e outros itens e serviços necessários para uma instalação real.

A Tabela 20 demonstra os valores estimados para a manutenção ao longo dos anos. Conforme discutido no capítulo 3, foi tomada como base uma vida útil de 20 anos, pois o período estimado para a durabilidade das luminárias LEDs é de 100.000 horas, pouco mais de 20 anos. Como a expectativa de duração dos LEDs é superior ao período estipulado não foi considerado nenhum custo de manutenção.

Por sua vez, a Tabela 21 apresenta o custo final estimado para a exploração de todos os sistemas simulados por 20 anos. Este custo foi o resultado da soma do custo inicial de instalação, do custo de energia consumida durante o período e do custo de manutenção dos sistemas. A numeração dos cenários é a mesma apresentada na Tabela 18.

Tabela 19: Custo de instalação inicial

Luminária	Lâmpada	Potência da lâmpada (W)	Luminária completa (R\$)	Poste galvanizado 6 m (R\$)	Mão de obra - poste + luminária (R\$)	Custo unitário total (R\$)
BRAÇO RETO	Vapor de sódio	70	3.000,00	703,80	160,99	3.864,79
		100	3.100,00	703,80	160,99	3.964,79
	Vapor metálico	70	3.100,00	703,80	160,99	3.964,79
		150	3.200,00	703,80	160,99	4.064,79
	LED	19	4.082,88	703,80	160,99	4.947,67
27		4.229,84	703,80	160,99	5.094,63	
BRAÇO INCLINADO	Vapor de sódio	70	200,00	703,80	160,99	1.064,79
		100	230,00	703,80	160,99	1.094,79
	Vapor metálico	70	300,00	703,80	160,99	1.164,79
		100	330,00	703,80	160,99	1.194,79
	LED	20	2.751,74	703,80	160,99	3.616,53
27		2.819,89	703,80	160,99	3.684,68	
EIXO CENTRAL	Vapor de sódio	100	524,64	703,80	160,99	1.389,43
		150	523,34	703,80	160,99	1.388,13
	Vapor metálico	70	612,58	703,80	160,99	1.477,37
		150	627,48	703,80	160,99	1.492,27
	LED	27	5.837,85	703,80	160,99	6.702,64
36		6.368,18	703,80	160,99	7.232,97	

Tabela 20: Custo de manutenção durante 20 anos

Lâmpada	Lâmpada - material + mão de obra (R\$)	Trocas	Reator - material + mão de obra (R\$)	Trocas	Custo total (R\$)
Vapor de sódio	57,98	5x	133,99	2x	557,88
Vapor metálico	103,56	10x	133,99	2x	1303,58
LED	-	-	-	-	-

Tabela 21: Custo para 20 anos de exploração

Cenário	Lâmpada	Luminária	Potência (W)	Nº postes	Instalação inicial (R\$)	Energia custo 20 anos (R\$)	Custo manutenção (R\$)	Custo final (R\$)	
1	VAPOR DE SÓDIO EM ALTA PRESSÃO	Braço reto	70	3	11.594,37	13.694,62	1.673,64	26.962,63	
2				3	11.594,37	13.694,62	1.673,64	26.962,63	
3				2	7.729,58	9.129,75	1.115,76	17.975,09	
4				2	7.729,58	9.129,75	1.115,76	17.975,09	
5				100	3	11.894,37	18.528,02	1.673,64	32.096,03
6					3	11.894,37	18.528,02	1.673,64	32.096,03
7		2	7.929,58		12.352,01	1.115,76	21.397,35		
8		2	7.929,58	12.352,01	1.115,76	21.397,35			
9		Braço inclinado	70	3	3.194,37	13.694,62	1.673,64	18.562,63	
10				2	2.129,58	9.129,75	1.115,76	12.375,09	
11				2	2.129,58	9.129,75	1.115,76	12.375,09	
12				2	2.129,58	9.129,75	1.115,76	12.375,09	
13				100	2	2.189,58	12.352,01	1.115,76	15.657,35
14					2	2.189,58	12.352,01	1.115,76	15.657,35
15		2	2.189,58		12.352,01	1.115,76	15.657,35		
16		2	2.189,58	12.352,01	1.115,76	15.657,35			
17		Eixo central	100	2	2.778,86	12.352,01	1.115,76	16.246,63	
18				2	2.778,86	12.352,01	1.115,76	16.246,63	
19				2	2.778,86	12.352,01	1.115,76	16.246,63	
20				2	2.778,86	12.352,01	1.115,76	16.246,63	
21			150	2	2.776,26	17.722,45	1.115,76	21.614,47	
22				2	2.776,26	17.722,45	1.115,76	21.614,47	
23				2	2.776,26	17.722,45	1.115,76	21.614,47	
24				2	2.776,26	17.722,45	1.115,76	21.614,47	

Tabela 21: Custo para 20 anos de exploração (cont.)

Cenário	Lâmpada	Luminária	Potência (W)	Nº postes	Instalação inicial (R\$)	Energia custo 20 anos (R\$)	Custo manutenção (R\$)	Custo final (R\$)
25	VAPOR METÁLICO	Braço reto	70	3	11.894,37	13.694,62	3.910,74	29.499,73
26				3	11.894,37	13.694,62	3.910,74	29.499,73
27				2	7.929,58	9.129,75	2.607,16	19.666,49
28			2	7.929,58	9.129,75	2.607,16	19.666,49	
29			150	3	12.194,37	26.583,68	3.910,74	42.688,79
30				3	12.194,37	26.583,68	3.910,74	42.688,79
31		2		8.129,58	17.722,45	2.607,16	28.459,19	
32		2	8.129,58	17.722,45	2.607,16	28.459,19		
33		Braço inclinado	70	3	3.494,37	13.694,62	3.910,74	21.099,73
34				3	3.494,37	13.694,62	3.910,74	21.099,73
35				2	2.329,58	9.129,75	2.607,16	14.066,49
36			2	2.329,58	9.129,75	2.607,16	14.066,49	
37			100	3	3.584,37	18.528,02	3.910,74	26.023,13
38				3	3.584,37	18.528,02	3.910,74	26.023,13
39		2		2.389,58	12.352,01	2.607,16	17.348,75	
40		2	2.389,58	12.352,01	2.607,16	17.348,75		
41		Eixo central	70	2	2.954,74	9.129,75	2.607,16	14.691,65
42				2	2.954,74	9.129,75	2.607,16	14.691,65
43				3	4.432,11	13.694,62	3.910,74	22.037,47
44			3	4.432,11	13.694,62	3.910,74	22.037,47	
45			150	2	2.984,54	17.722,45	2.607,16	23.314,15
46				2	2.984,54	17.722,45	2.607,16	23.314,15
47		2		2.984,54	17.722,45	2.607,16	23.314,15	
48		2	2.984,54	17.722,45	2.607,16	23.314,15		

Tabela 21: Custo para 20 anos de exploração (cont.)

Cenário	Lâmpada	Luminária	Potência (W)	Nº postes	Instalação inicial (R\$)	Energia custo 20 anos (R\$)	Custo manutenção (R\$)	Custo final (R\$)
49	LED	Braço reto	19	2	9.895,34	2.040,77	-	11.936,11
50				2	9.895,34	2.040,77	-	11.936,11
51				2	9.895,34	2.040,77	-	11.936,11
52				2	9.895,34	2.040,77	-	11.936,11
53			27	2	10.189,26	2.900,04	-	13.089,30
54				2	10.189,26	2.900,04	-	13.089,30
55				2	10.189,26	2.900,04	-	13.089,30
56				2	10.189,26	2.900,04	-	13.089,30
57		Braço inclinado	20	2	7.233,06	2.148,18	-	9.381,24
58				2	7.233,06	2.148,18	-	9.381,24
59				2	7.233,06	2.148,18	-	9.381,24
60				2	7.233,06	2.148,18	-	9.381,24
61			27	2	7.369,36	2.900,04	-	10.269,40
62				2	7.369,36	2.900,04	-	10.269,40
63				2	7.369,36	2.900,04	-	10.269,40
64				2	7.369,36	2.900,04	-	10.269,40
65		Eixo central	27	3	20.107,92	4.350,06	-	24.457,98
66				3	20.107,92	4.350,06	-	24.457,98
67				4	26.810,56	5.800,08	-	32.610,64
68				3	20.107,92	4.350,06	-	24.457,98
69	36		2	14.465,94	3.866,72	-	18.332,66	
70			2	14.465,94	3.866,72	-	18.332,66	
71			2	14.465,94	3.866,72	-	18.332,66	
72			2	14.465,94	3.866,72	-	18.332,66	

Através da Tabela 21 infere-se que enquanto o maior custo envolvido na exploração de luminárias com lâmpadas de descarga é referente à energia consumida, na tecnologia LED o maior custo é o da instalação inicial dos sistemas de iluminação. O cenário 52 apontado como mais eficiente na seção anterior não confirmou ser o mais econômico. No seu lugar ficaram os cenários 57 a 60. Apesar de consumirem um pouco mais de energia para funcionarem, o menor custo das luminárias

compensou esta diferença. Nestes cenários a distância entre postes também foi maior que o proporcionado pelo cenário 52, 23 contra 22 metros, o que aumenta a vantagem destas instalações.

Destaca-se a variação entre os custos iniciais das instalações. As luminárias simuladas com lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão e vapor metálico com braço reto são tão caras quanto algumas das luminárias LED. Fato esse que não é comum entre estes sistemas, conhecidos justamente pelo baixo custo de investimento inicial. Esta análise também evidencia a relevância de sistemas com postes mais distantes entre si. Cenários com três ou quatro postes, ao invés de dois, mostraram-se menos econômicos. As exceções são os cenários 43 e 44. Quando comparados aos cenários 45 a 48, mesmo com três luminárias instaladas, o custo menor de energia ao longo do tempo compensou o custo inicial de instalação e manutenção ao longo da vida útil dos sistemas.

Em relação ao custo com manutenção, as luminárias com lâmpada a vapor metálico são as menos econômicas. Além de possuírem equipamentos mais caros, elas precisam de mais etapas de manutenção. Em seguida ficam as lâmpadas a vapor de sódio, com equipamentos mais baratos e menos trocas durante a vida útil. Esta situação confirma o que é observado na iluminação pública das cidades. A iluminação com fontes a vapor de sódio permanece sendo a mais adotada por órgãos municipais. Mesmo que o conforto visual e a eficiência luminosa proporcionada pelas fontes a vapor metálico seja melhor, como visto na seção de avaliações pessoais.

O custo zero de manutenção das luminárias LEDs planar divulgado pelas fabricantes está em análise. Uma vez que esta tecnologia não está há 20 anos no mercado, ainda não é possível confirmar na prática se realmente a manutenção será como prometido. Tähkämö, Räsänen e Halonen (2015) citam o exemplo de uma cidade finlandesa que estimou que 5% das luminárias LED instaladas necessitaram de substituição devido, principalmente, à falha de componentes eletrônicos das luminárias. Em consulta com a Schröder (RAMOS, 2018), a empresa informou que a vida útil das luminárias LEDs é estimada em 100.000 horas, como já citado. Contudo, outros componentes das luminárias, como as fontes, também deverão ter esta durabilidade. A garantia de fábrica dos produtos LED simulados

varia entre 3 e 5 anos. Quando questionada sobre como seria a manutenção em caso de falha dos sistemas, a fabricante informou que a empresa deve ser acionada para verificar o problema, mesmo após o término da garantia. E sugeriu a compra de luminárias sobressalentes para troca imediata enquanto se espera pela visita dos técnicos. Questionados sobre a possibilidade de compra de componentes das luminárias LEDs para eventuais trocas, a fabricante informou que não faz a venda (RAMOS, 2018). Este fato repete-se em outras fabricantes, haja vista cada tipo de luminária possuir componentes desenvolvidos especificamente para o equipamento. Outro problema que pode ser enfrentado é a saída de linha de produção da luminária adquirida ao longo do período de exploração.

Em outra análise, o objetivo foi avaliar a viabilidade econômica dos cenários propostos quando comparados à situação medida *in loco* com as lâmpadas a vapor metálico. Como visto em seção anterior, todas as instalações testadas apresentaram superdimensionamento do nível de iluminamento. A Tabela 22 apresenta a análise de viabilidade econômica dos cenários mais vantajosos de cada tipo de lâmpada testada. Para as luminárias LEDs ainda foram avaliados outros dois conjuntos de cenários. Conforme descrito no capítulo 3, o retorno financeiro foi considerado como a economia de energia e de manutenção de cada cenário quando comparado com a instalação medida *in loco* com as lâmpadas a vapor metálico. Tanto o retorno financeiro, quanto as despesas com manutenção (nos cenários com lâmpadas a vapor de sódio e vapor metálico) foram lançados no fluxo de caixa conforme o ano de ocorrência. A análise foi realizada com base em 20 anos de vida útil.

Os cenários avaliados foram os que apresentaram menor custo para 20 anos de exploração em cada tecnologia de lâmpada. Todos os cenários avaliados são compostos por dois postes e atendem aos requisitos mínimos de níveis médios de iluminamento e uniformidade. Nos cenários com lâmpadas de descarga, os níveis de iluminamento ficaram pouco acima de 20 lux. Mas não seria possível reduzir este nível, pois os cenários alcançaram o fator mínimo de uniformidade. Caso se afastasse mais os postes para reduzir o nível de iluminamento, o cenário não seria mais adequado no quesito uniformidade. Uma possível solução seria aumentar a altura dos postes. Contudo, nesta pesquisa não se deseja aplicar postes com altura superior a 6 m.

Tabela 22: Análise de viabilidade econômica dos cenários quando comparados à instalação existente com lâmpadas a vapor metálico

		LÂMPADAS				
		Vapor de sódio	Vapor metálico	LED		
		Cenários 11 e 12	Cenários 35 e 36	Cenários 49 a 52	Cenários 57 a 60	Cenários 61 a 64
FLUXO DE CAIXA	Investimento inicial (R\$)	2.129,58	2.329,58	9.895,34	7.233,06	7.369,36
	Gasto do cenário com energia (R\$)	456,49	456,49	102,04	107,41	145,00
	Economia com energia (R\$) ¹	284,53	284,53	638,98	633,61	596,02
	Gasto manutenção (R\$)	1.115,76	2.607,16	–	–	–
	Economia c/ Manutenção (R\$) ²	2.794,98	1.103,58	3.910,74	3.910,74	3.910,74
INDICADOR	VPL ³ (R\$)	2.852,43	1.827,17	- 486,65	2.114,03	1.546,60
	TIR ⁴ (%)	19,11%	14,95%	5,41%	9,28%	8,39%
	Payback simples (anos)	5,3	6,4	11,9	9,2	9,6
	Payback descontado (anos)	6,4	8,3	+ 20	13,3	14,8

¹ Economia de energia do cenário quando comparado com o custo com energia da instalação com lâmpadas a vapor metálico.

² Economia com manutenção do cenário quando comparado com o custo com manutenção da instalação com lâmpadas a vapor metálico.

³ VPL é o valor presente líquido.

⁴ TIR é a taxa interna de retorno.

Pela análise da Tabela 22 conclui-se que os cenários de maior viabilidade econômica são os de número 11 e 12, com lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão. Caso a universidade decidisse trocar as instalações existentes, eles proporcionariam um retorno do investimento em pouco mais de seis anos de

exploração, com uma taxa interna de retorno de 19,11%. Mesmo com um maior consumo de energia e custo de manutenção que os cenários com LEDs, o baixo custo de investimento inicial é vantajoso ao longo da vida útil do sistema. Por sua vez, o cenário 52, apontado como o mais eficiente energeticamente, mais uma vez não confirmou ser o mais vantajoso. Pelo contrário, entre os cenários analisados, ele foi o único apontado como inviável. Com um valor presente líquido negativo, o investimento inicial demoraria mais de 20 anos para gerar benefício financeiro, ou seja, mais tempo do que o estimado para sua vida útil. Os outros dois conjuntos de cenários LEDs apresentaram viabilidade. Entre eles, os cenários 57 a 60 são os melhores, como também apontado na Tabela 21. Tal fato se deve ao menor custo de instalação inicial entre os cenários testados com LEDs. Ainda assim, o período para retorno do investimento é bastante longo, mais de 13 anos.

Finalmente, para lugares onde não existe nenhum sistema de iluminação instalado, os dados apresentados na Tabela 21 confirmaram a economia esperada pelas luminárias LED. Desde que a manutenção reduzida das luminárias seja atestada pelo mercado. Mesmo com um elevado custo de instalação inicial, a economia gerada pelo baixo consumo de energia compensou o investimento em boa parte dos cenários propostos. No caso de locais onde já existe uma instalação de iluminação pública funcionando, uma análise de viabilidade financeira deve ser realizada. Espera-se que com o avanço da tecnologia e o aumento da concorrência, o custo inicial das LEDs seja reduzido. A própria empresa Schröder já comercializa luminárias LEDs com valores iniciais mais competitivos. Em licitação realizada pela UFSC em 2017 para reurbanização de uma área do campus Trindade, as luminárias, da Schröder, de eixo central modelo Kazu - 16 LEDs de 700 mA, fluxo nominal de 4500 lm e 38 W de potência foram orçadas em cerca de R\$ 1.700,00 (UFSC, 2018). Em comparação com a luminária de eixo central modelo Alura de 36 W simulada nesta pesquisa, o custo da luminária Kazu é cerca de 70% mais baixo. Considerando este investimento, o tempo de retorno é reduzido. Contudo, novas simulações seriam necessárias para verificar a distribuição luminosa gerada por estes equipamentos.

4.6 ANÁLISE COMPARATIVA

No decorrer desta pesquisa três tecnologias de lâmpadas aplicadas em iluminação pública – vapor de sódio em alta pressão, vapor metálico e LED - foram avaliadas de diferentes maneiras para que uma análise comparativa entre as fontes pudesse ser realizada. Duas delas analisaram as fontes em termos quantitativos através da instalação e medição *in loco* de suas características fotométricas e de simulações computacionais. Em termos qualitativos, as fontes foram avaliadas por usuários do local de estudo através da aplicação de questionários.

Por meio da avaliação do consumo de energia dos sistemas é possível fazer uma análise quantitativa da eficiência energética de cada tecnologia, levando em conta a área de estudo. Nas medições *in loco*, a lâmpada a vapor metálico apresentou o maior consumo das três fontes, com 1.182 kWh ao ano para os três postes instalados. Além de ser necessário o uso dos equipamentos auxiliares (reator/capacitor/ignitor) para seu funcionamento, as medições complementares também registraram um maior consumo elétrico que o especificado pelo fabricante da lâmpada. Em sequência ficaram a lâmpada a vapor de sódio com 1.134 kWh ao ano e a LED bulbo com 556 kWh, para o conjunto de três postes. Pelas medições de iluminação verificou-se que o percurso em estudo apesar não apresentar o fator de uniformidade mínimo exigido, estava com níveis de iluminação acima do mínimo necessário estabelecido pela norma brasileira.

Assim, nas simulações computacionais os níveis foram reduzidos e os cenários mais eficientes foram compostos por apenas duas luminárias. As lâmpadas a vapor metálico e a vapor de sódio apresentaram o mesmo resultado de consumo com 736 kWh ao ano nos cenários mais eficientes, compostos por duas lâmpadas de 70 W e distância aproximada entre os postes de 30 m. Com as luminárias LEDs os melhores resultados de consumo resultaram em 164 kWh ao ano, com duas luminárias de 19 W e postes distantes até 22 m entre si. Nas simulações os efeitos mesópicos foram considerados e os níveis de iluminação das lâmpadas a vapor metálico e LED puderam ser reduzidos até próximos do que é recomendado pela norma inglesa BS 5489-1 (BSI, 2013).

A análise de viabilidade econômica demonstrou que, quando comparados a uma situação existente, os cenários com lâmpadas a vapor de descarga ainda são mais vantajosos em termos de tempo de retorno do investimento do que os cenários com LEDs. Isso se deve, principalmente, ao alto custo de instalação inicial das luminárias LEDs planar. Na avaliação proposta, o tempo de retorno do investimento seria de 6,4 anos com as lâmpadas a vapor de sódio, de 8,3 anos com a vapor de metálico e de 13,3 anos na melhor opção com as LEDs. A mesma análise também alertou que o cenário apontado como mais eficiente energeticamente entre todos os simulados seria inviável economicamente para substituir a situação existente. E que outros cenários LEDs com custo de instalação inicial menor seriam uma melhor opção mesmo que o consumo deles fosse mais elevado.

Qualitativamente, a tecnologia que apresentou preferência sobre as demais, nos pontos levantados pela pesquisa, foi a LED. Após, veio a lâmpada a vapor metálico e por último a lâmpada a vapor de sódio em alta pressão. As questões eram relativas à aceitabilidade do espaço em estudo de um modo geral e para interação social, à orientação espacial e capacidade de deslocar-se pelo local e à segurança pessoal percebida na utilização do caminho. Durante a realização das entrevistas, os níveis de iluminação médios medidos foram de 45,9 lux com a lâmpada a vapor de sódio em alta pressão, 31,4 lux com a lâmpada a vapor metálico e 35,0 lux com a LED. Os índices de reprodução de cores medidos foram de aproximadamente 10, 65 e 85, respectivamente. Todavia, mesmo com o nível de iluminação mais alto entre as três fontes de luz avaliadas, a lâmpada a vapor de sódio foi a que recebeu menos pontos positivos.

Entre os pontos levantados, a sensação de segurança pessoal percebida merece destaque. Em resposta ao questionário, 65,5% dos entrevistados declararam que se sentiam seguros com a lâmpada a vapor de sódio instalada, 86,2% com a vapor metálico e 93,1% com a LED. A lâmpada LED proporcionou maior sensação de segurança, ainda que o nível de iluminação proporcionado pela LED fosse 31% menor que o da lâmpada a vapor de sódio. Em relação à capacidade de reconhecer alguém vindo em sua direção, questão que está relacionada diretamente com a sensação de segurança, 12,1% a

mais das pessoas declarou poder reconhecer alguém com as LEDs em comparação com as lâmpadas a vapor metálico, mesmo com níveis próximos de iluminamento médio vertical. Com a lâmpada a vapor de sódio os percentuais de concordância foram de 77,6%, com a lâmpada a vapor metálico, 86,2%, e com a LED 98,3% dos entrevistados concordaram.

Os dados apontaram, em termos qualitativos, que além do nível de iluminamento, a temperatura de cor e o índice de reprodução de cores também são importantes e influenciam diretamente nas percepções dos usuários. E que quanto maior foi a relação S/P da fonte de luz – LED, 2,29; vapor metálico, 1,43; vapor de sódio em alta pressão, 0,53 – maior foi a aceitabilidade e a capacidade visual declarada entre as pessoas entrevistadas, confirmando assim os efeitos da visão mesópica.

Em conclusão, a Tabela 23 elenca pontos fortes e fracos das tecnologias estudadas neste trabalho.

Tabela 23: Pontos fortes e fracos dos sistemas

Tipo de lâmpada	Pontos Fortes	Pontos Fracos
Vapor em sódio em alta pressão	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo de instalação inicial; - Custo com manutenção já conhecido; - Não necessita de equipe técnica especializada para a manutenção; - Base de encaixe E27 ou E40 que facilita a manutenção; - Tecnologia já dominada e estabelecida pelo mercado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de uso de equipamentos auxiliares (reator/ignitor/capacitor); - Alto consumo de energia do sistema; - Pior nível de aceitação pessoal entre as fontes; - Redução da percepção luminosa ao considerar a fotometria mesópica; - Luminárias em obsolescência.

Tabela 23: Pontos fortes e fracos dos sistemas (cont.)

Tipo de lâmpada	Pontos Fortes	Pontos Fracos
Vapor metálico	<ul style="list-style-type: none"> - Baixo custo de instalação inicial; - Custo de manutenção já conhecido; - Não necessita de equipe técnica especializada para a manutenção; - Melhor aceitação pessoal que a lâmpada a vapor de sódio; - Variadas opções de temperaturas de cor e IRC; - Aumento da percepção luminosa ao considerar a fotometria mesópica. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessidade de uso de equipamentos auxiliares (reator/ignitor/capacitor); - Alto consumo de energia do sistema; - Maior número de trocas de componentes durante a vida útil; - Elevado custo de manutenção; - Luminárias em obsolescência.
LED	<ul style="list-style-type: none"> - Melhor aceitação pessoal entre as tecnologias para uso do espaço; - Maior capacidade declarada para se deslocar; - Proporciona maior nível de sensação de segurança declarada; - Consumo energético reduzido; - Possibilidade de redução do nível de iluminamento ao incluir os efeitos da visão mesópica; - Versatilidade de instalações e distribuições de fluxo luminoso; - Tendência de evolução da tecnologia no mercado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Elevado custo de instalação inicial; - Durabilidade e custo de manutenção ainda incerto; - Não existe padrão de encaixe entres os componentes LEDs e o tipo de luminária; - Maior dependência de auxílio do próprio fabricante durante as manutenções.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas com a realização desta pesquisa. Além disso, são apresentadas as limitações do trabalho e as sugestões para estudos futuros.

5.1 CONCLUSÕES

Através das medições *in loco*, verificou-se que nem a situação pré-existente (sem lâmpadas), nem os sistemas de iluminação com as lâmpadas testadas (vapor de sódio em alta pressão, vapor metálico e LED) propiciaram atendimento satisfatório à normativa brasileira de iluminação. Em nenhum dos casos a distribuição de iluminamento foi suficientemente uniforme para cumprir o fator de uniformidade mínimo de 0,25, ficando com valores bem abaixo do necessário. Pela análise da iluminância horizontal realizada, apesar dos sistemas de iluminação terem proporcionado nível médio de iluminamento acima do necessário, verificou-se que a distribuição apresentou locais sombreados, principalmente próximo à região da escada. As medições também indicaram que o nível médio mínimo de iluminamento vertical foi cumprido.

Todavia, em caso de *retrofit*, as lâmpadas testadas apresentaram resultados satisfatórios e podem ser utilizadas desde que o nível de iluminamento médio mínimo e fator de uniformidade mínimo, exigidos pela norma brasileira, sejam atendidos. Mas como a solução adotada na área de estudo apresentou níveis de iluminamento médio superiores ao necessário e a solução em conjunto (altura e distância entre postes, tipo de luminária etc.) não é indicada. A lâmpada LED bulbo testada apresentou menor eficiência do que o esperado em função de sua maior dimensão em relação às lâmpadas de descarga. Para utilizá-la em caso de *retrofit* será necessário verificar se a luminária existente comportará sua dimensão e se haverá perda de fluxo luminoso, como ocorreu na área de estudo. Apesar disso, ela demonstrou ser uma opção prática e viável, pois possui a mesma base de lâmpadas existentes no campus. A maior vantagem é que a manutenção não precisa ser realizada por equipe técnica especializada em LED como nas luminárias LED planar simuladas.

A análise qualitativa realizada através das entrevistas confirmou que a alteração do tipo de iluminação influencia a maneira como os usuários sentem-se em relação a sua segurança pessoal e capacidade de locomover-se. Em todas as questões levantadas - aceitabilidade do espaço em estudo de um modo geral e para interação social, orientação espacial e capacidade de deslocar-se pelo local e segurança pessoal percebida na utilização do caminho – a tecnologia de lâmpadas que recebeu mais pontos positivos foi a LED, seguida da lâmpada a vapor metálico e por último a vapor de sódio a alta pressão. A análise também confirmou os efeitos da visão mesópica, pois as lâmpadas com relação S/P mais elevada tiveram maior aceitação e proporcionaram maior capacidade visual às pessoas entrevistadas.

Ao comparar o desempenho energético de diferentes sistemas de iluminação pública por meio de simulação computacional, constatou-se que, como esperado, as luminárias LED tiveram melhores resultados em termos de potência instalada. Nas simulações com lâmpadas de descarga, a menor potência total obtida foi 170 W. Na melhor simulação com LED, a menor potência total obtida foi 38 W, ou seja, 77% a menos de energia consumida. As simulações também demonstraram a vantagem em se utilizar postes de maior altura e fontes de luz com menor fluxo luminoso. Como em caminhos de pedestres os níveis médios mínimos de iluminamento são inferiores a estradas e rodovias, utilizar fluxos luminosos reduzidos e maior altura de postes permite que a distância entre os postes seja aumentada. Assim, o cenário pode ser finalizado por alcançar o nível de iluminamento mínimo requisitado, e um fator de uniformidade mais alto pode ser conseguido. Esta estratégia melhora a eficiência energética dos sistemas e reduz o consumo de energia, especialmente com as lâmpadas a vapor metálico e LED, que podem ter seu nível de iluminamento reduzido quando os efeitos da visão mesópica são considerados.

A análise de custos dos cenários simulados nesta pesquisa demonstrou que enquanto o maior custo envolvido na exploração de luminárias com lâmpadas de descarga é referente à energia consumida, na tecnologia LED o maior custo é o da instalação inicial dos sistemas. A análise revelou que o cenário apontado como mais eficiente (com 38 W de potência instalada) não confirmou ser o mais econômico. No seu lugar ficaram cenários

que, apesar de consumirem um pouco mais de energia para funcionarem (com 40 W e 54 W), apresentaram menor custo de instalação inicial das luminárias. A análise de viabilidade econômica dos cenários mostrou que, quando comparados à situação instalada no local com lâmpadas a vapor metálico, o cenário que traria um retorno de investimento mais rápido seria com lâmpadas a vapor de sódio. Revelou, ainda, que o cenário apontado como mais eficiente seria inviável economicamente devido ao alto custo de instalação inicial. Entre os cenários com LEDs, o menor tempo para retorno do investimento foi de pouco mais de 13 anos.

Os métodos para inclusão dos efeitos da visão mesópica mostraram-se simples de aplicar e apresentaram resultados relevantes. O método testado proposto por Uchida e Ohno (2016) apresentou resultados dentro do esperado pela normativa da CIE (2010b) para as lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão e próximos ao esperado para as fontes a vapor metálico e LED. Na situação com maior erro da lâmpada a vapor metálico, a luminância fotópica de 1,37 cd/m² apresentou uma diferença de +2,0% entre a luminância mesópica e a fotópica, enquanto o esperado era uma diferença entre +3% e +5%. Para a LED a uma luminância fotópica de 1,0 cd/m² a diferença foi de +9,4%, com esperado em 12%. Contudo, o método não mostrou muita aplicabilidade prática, uma vez que ele analisa níveis de luminância e a norma brasileira NBR 5101/2012 apresenta os requisitos de iluminação para áreas de pedestres em níveis de luminância. Por outro lado, o método proposto pela norma inglesa BS 5489-1:2013 mostrou-se claro e acessível para ser aplicado em novos projetos ou na verificação de áreas já iluminadas. Ele adota o mesmo princípio da norma brasileira trazendo níveis mínimos de iluminamento médio, mas já insere os efeitos da visão mesópica. Todavia, em ambos os métodos é necessário conhecer a relação S/P das fontes de luz. No caso de situações já instaladas, a fonte de luz poderia ser medida em uma esfera de integração, contudo este é um equipamento de custo elevado e de difícil acesso. No caso de projetos, seria necessário que essa relação viesse descrita pelo fabricante da fonte de luz. Como alternativa a esta dificuldade, Casagrande (2016) desenvolveu um método propondo uma equação geral que permite realizar o cálculo da relação S/P em função da temperatura de cor correlata e do índice de reprodução de cor da

fonte de luz a ser empregada, mas este método não chegou a ser testado nesta pesquisa.

Finalmente, pelas estratégias de análise utilizadas nesta pesquisa para avaliar comparativamente os sistemas de iluminação citados, entende-se que a iluminação de espaços públicos para pedestres baseada na tecnologia LED é a mais vantajosa entre as três fontes de luz estudadas. Embora o custo inicial seja elevado e ainda existam dúvidas de como será a durabilidade e manutenção dos equipamentos, a pesquisa comprovou a preferência dos usuários e a maior eficiência energética do sistema LED. O estudo dos efeitos mesópicos revelou-se fundamental para compreender as percepções pessoais aqui levantadas. Na prática, se futuros sistemas de iluminação forem dimensionados considerando níveis mínimos de iluminamento exigidos pela norma, esses poderiam ser reduzidos. Tal providência poderá contribuir para a melhora a eficiência energética dos sistemas e redução do consumo de energia. Espera-se que em um futuro próximo as normativas brasileiras para iluminação pública sejam revisadas e alinhadas com os avanços das tecnologias que já estão sendo empregadas em ruas e praças.

5.2 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Esta pesquisa apresenta as seguintes limitações:

- No decorrer das entrevistas não foi possível manter as mesmas condições de luminosidade no entorno do passeio devido ao uso das salas de aula. Para minimizar a influência dessa iluminação, as entrevistas foram agendadas em horários mais próximos ao término do período de aula. Assim, menos salas estavam com as luzes acesas. Mas diferenças de percepção do espaço podem ter ocorrido entre os entrevistados devido a essa iluminação extra;
- Os níveis de iluminamento proporcionado pelas lâmpadas instaladas foram diferentes entre si. Para uma avaliação de percepção pessoal mais precisa seria necessário que o caminho fosse iluminado com diferentes tipos de lâmpadas, mas com mesmo nível de iluminamento;

- Problemas de visão declarados pelos entrevistados, apesar de terem sido levantados, não foram avaliados em conjuntos com os resultados. Somente foi solicitado que durante as entrevistas o voluntário se portasse como anda comumente na rua à noite, se com ou sem óculos;
- Como as medições fotométricas das lâmpadas instaladas foram realizadas por laboratório externo à UFSC, somente uma amostra de cada tipo pode ser analisada;
- As simulações computacionais mostraram-se muito sensíveis às distribuições de iluminação proporcionadas pelas luminárias. Como somente luminárias de um único fabricante foram simuladas, cenários com luminárias de outros fabricantes podem apresentar resultados bastante diversos;
- A análise econômica não considerou custos de fiação elétrica, relé-fotocélula, base de concreto, escavação e outros itens e serviços necessários para uma instalação real;
- A análise comparativa realizada não avaliou questões ambientais como, por exemplo, matéria-prima das lâmpadas e descarte. Para uma análise destes itens seria necessário realizar uma Análise de Ciclo de Vida.

5.3 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para complementar os resultados alcançados nesta pesquisa, sugere-se que os seguintes estudos sejam realizados no futuro.

- Analisar os questionários já respondidos e avaliar se houve influência da iluminação circundante e/ou de problemas de visão nas respostas às perguntas;
- Aplicar o método proposto em outro caminho de pedestre onde possa haver maior controle do entorno e seja possível instalar luminárias que proporcionem o mesmo nível de iluminação com diferentes tipos de lâmpadas;
- Avaliar a percepção de usuários com faixa etária mais elevada que a considerada nesta pesquisa;

- Orçar equipamentos de diferentes fabricantes e simular cenários de custo inicial menor para que análises de viabilidade mais vantajosas possam ser avaliadas;
- Simular cenários em caminhos de pedestres mais longos;
- Realizar uma Análise de Ciclo de Vida dos equipamentos avaliados;
- Realizar uma Análise Multicritério com ponderações distintas para itens como avaliação do usuário, custos e impacto ambiental.

REFERÊNCIAS

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5101**: Iluminação Pública – Procedimento. 2 ed. Rio de Janeiro, 2012. 35 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13593**: Reator e ignitor para lâmpada a vapor de sódio a alta pressão – Especificação e ensaios. 2 ed. Rio de Janeiro, 2011. 39 p.

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14305**: Reator e ignitor para lâmpada a vapor metálico (halogenetos) – Requisitos e ensaios. 2 ed. Rio de Janeiro, 2015. 40 p.

ALFERDINCK, J., HOGERVORST, M., van EIJK, A., KUSMIERCZYK, J. **Mesopic vision and public lighting** – A literature review and a face recognition experiment. TNO-DV 2010 C435. Delft: TNO. 2010.

ARAJI, Mohamad T.; BOUBEKRI, Mohamed; CHALFOUN, Nader V.. An examination of visual comfort in transitional spaces. **Architectural Science Review**, Sydney, v. 50, n. 4, p.349-356, dez. 2007.

BLÖBAUM, Anke; HUNECKE, Marcel. Perceived Danger in Urban Public Space: The Impacts of Physical Features and Personal Factors. **Environment and Behavior**, [s.l.], v. 37, n. 4, p.465–486, 1 jul. 2005. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/0013916504269643>.

BOYCE, P.R.; EKLUND, N.H.; HAMILTON, B.J.; BRUNO, L.D.. Perceptions of safety at night in different lighting conditions. **Lighting Research & Technology**, 32, p.79–91, 2000.

BOYCE, P.R., REA, M. Security lighting: effects of illuminance and light source on the capabilities of guards and intruders. **Lighting Research & Technology**, 22, p.57–79, 1990.

BRAGA, Henrique A. C.. **Revisão de medições nas lâmpadas UFSC pelo NIMO-UFJF**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <fabricia.grando@ufsc.br>. em: 05 abr. 2018.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução Normativa nº 414, de 9 de setembro de 2010**. Estabelece as Condições Gerais de Fornecimento de Energia Elétrica de forma atualizada e consolidada.

BRASIL. Empresa de Pesquisa Energética. Ministério de Minas e Energia. **Boletim mensal**: dezembro 2007. Rio de Janeiro: Epe, 2007. 48 p. (Estatística e Análise do Mercado de Energia Elétrica). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/BoletimMensal/20080505_1.pdf>. Acesso em: 29 out. 2016.

BSI. BRITISH STANDARDS INSTITUTION. **BS 5489-1**: Code of practice for the design of road lighting. 7 ed. Londres: British Standards Institution, 2013. 82 p.

CASAGRANDE, Cristiano Gomes. **Desafios da iluminação pública no Brasil e nova técnica de projetos luminotécnicos fundamentada na fotometria mesópica**. 2016. 239 p. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2016.

CEF. CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. **SINAPI**: Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil. 2018. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/poder-publico/apoio-poder-publico/sinapi/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 24 jan. 2018.

CELESC. **Relatório de Sustentabilidade Celesc**: Santa Catarina, 2014. Florianópolis: Grupo Celesc, 2015. 222 p. Disponível em: <<http://www.celesc.com.br/portal/index.php/celesc-holding/relatorios-anuais>>. Acesso em: 03 fev. 2018.

CEP. COMITÊ DE ÉTICA EM PESQUISA. **Parecer Consubstanciado do CEP**: nº 2.376.985. Florianópolis: CEP/UFSC, 2017.

CIE. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **115. Lighting of roads for motor and pedestrian traffic.** 2 ed. Viena: CIE Central Bureau, 2010a. 45 p.

CIE. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **136. Guide to the lighting of urban areas.** Viena: CIE Central Bureau, 2000. 38 p.

CIE. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **171. Test cases to assess the accuracy of lighting computer programs.** Viena: CIE Central Bureau, 2006. 99 p.

CIE. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **191. Recommended system for mesopic photometry based on visual performance.** Viena: CIE Central Bureau, 2010b. 73 p.

CIE. COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **206. The effect of spectral power distribution on lighting for urban and pedestrian areas.** Viena: CIE Central Bureau, 2014. 30 p.

DIAL GMBH. **DIALux evo - new calculation method.** 2017. Disponível em: <https://www.dial.de/fileadmin/documents/dialux/DIALux_downloads/DIALux_evo-_New_calculation_method.pdf>. Acesso em: 29 maio 2017.

DOE. DEPARTMENT OF ENERGY (U.S.). Energy efficiency and renewable energy: building technologies office. **Energy Savings Forecast of Solid-State Lighting in General Illumination Applications.** 2014a. Disponível em: <<http://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/05/f22/energysavingsforecast14.pdf>>. Acesso em: 13 jul. 2016.

DOE. DEPARTMENT OF ENERGY (U.S.). Energy efficiency and renewable energy: building technologies office. **CALiPERSnapshot: Outdoor Area Lighting.** 2014b. Disponível em: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/snapshot2014_outdoor-area.pdf>. Acesso em: 12 jul. 2016.

DOE. DEPARTMENT OF ENERGY (U.S.). Energy efficiency and renewable energy: building technologies office.

CALIPERSnapshot: Outdoor Area Lighting. 2016. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/ssl/downloads/snapshot-outdoor-area-lighting>>. Acesso em: 08 dez. 2016.

ELETROBRAS (BRASIL). Ministério de Minas e Energia.

Resultados PROCEL 2017: Ano base 2016. Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2017. 64 p. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br>>. Acesso em: 03 fev. 2018.

ELOHOLMA, M., KETOMAKI, J., ORREVETELAINEN, P., HALONEN, L. **Pedestrian visibility in road lighting conditions.** Illuminat 2003: 2nd International Lighting Conference. Cluj Napoca, Romênia. p.17-1 to 17-6, 2003.

ELY, Vera Helena Moro Bins; DISCHINGER, Marta; MATTOS, Melissa Laus; BRANDÃO, Milena de Mesquita. Orientar-se em campi universitários no Brasil: condição essencial para a inclusão. **Ponto de Vista**, Florianópolis, n. 10, p.39-64, 2008. Disponível em: <<https://periodicos.ufsc.br/index.php/pontodevista/issue/view/1680>>. Acesso em: 14 abr. 2016.

EPRI. ELECTRIC POWER RESEARCH INSTITUTE. **Advanced Lighting Guidelines.** Califórnia: Eley Associates, 2001. 514 p.

FOTIOS, S.; CHEAL, C.. Obstacle detection: A pilot study investigating the effects of lamp type, illuminance and age.

Lighting Research And Technology, [s.l.], v. 41, n. 4, p.321-342, 2 set. 2009. SAGE Publications.
<http://dx.doi.org/10.1177/1477153509102343>.

GE. GENERAL ELECTRIC COMPANY. **Luminárias Outdoor.** 2018. Disponível em: <<http://solutions.currentbyge.com/LightingWeb/br/products/outdoor-lighting/index.jsp>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

GOLDEN SOFTWARE. **Surfer**: Explore the depths of your data. Disponível em: <<http://www.goldensoftware.com/products/surfer>>. Acesso em: 10 abr. 2018.

HAANS, Antal; KORT, Yvonne A. W. de. Light distribution in dynamic street lighting: Two experimental studies on its effects on perceived safety, prospect, concealment, and escape. **Journal of Environmental Psychology**, [s.l.], v. 32, n. 4, p.342-352, dez. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvp.2012.05.006>.

IES. ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **IES DG-10-11 Design Guide for Choosing Light Sources for General Lighting**. Nova Iorque: Illuminating Engineering Society, 2011.

IES. ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **IES RP-20-14 Revised: Lighting for Parking Facilities**. Nova Iorque: Illuminating Engineering Society, 21 nov. 2016.

IES. ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY. **IES RP-33-14: Lighting for Exterior Environments**. Nova Iorque: Illuminating Engineering Society, 30 jul. 2014.

JIANG, Yi; LI, Shuo; GUAN, Bowen; ZHAO, Guangyuan. Cost effectiveness of new roadway lighting systems. **Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)**, [s.l.], v. 2, n. 3, p.158-166, jun. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtte.2015.03.004>.

KNIGHT, C., van KEMENADE, J. Wahrnehmung und Wertschätzung der Endkunden in Bezug auf die öffentliche Beleuchtung (Effect of outdoor lighting on perception and appreciation of end-users). **Licht** 2006, 10-13, Setembro 2006, Berne, Suíça.

KOSTIC, A.; KREMIC, MM; DJOKIC, LS; KOSTIC, MB. Light-emitting diodes in street and roadway lighting - a case study involving mesopic effects. **Lighting Research and Technology**, [s.l.], v. 45, n. 2, p.217-229, 22 mar. 2012. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1477153512440771>.

KOSTIC, M.; DJOKIC, L..A modified CIE mesopic table and the effectiveness of white light sources. **Lighting Research and Technology**, [s.l.], v. 44, n. 4, p.416-426, 24 nov. 2011. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1477153511426743>.

LOJA ELÉTRICA LTDA. **Lâmpadas**. Disponível em: <<http://www.lojaeletrica.com.br/>>. Acesso em: 30 jan. 2018.
LYNCH, Kevin. **A imagem da cidade**. Lisboa: Edições 70, 1999.

MANGKUTO, Rizki A.. Validation of DIALux 4.12 and DIALux evo 4.1 against the Analytical Test Cases of CIE 171: 2006. **Leukos**, [S.I.], v. 12, n. 3, p.139-150, 26 ago. 2015. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1080/15502724.2015.1061438>.

MASCARÓ, Lucia (Org.). **A iluminação de espaços urbanos**. Porto Alegre: Masquatro, 2006. 197 p.

NARDELLI, Andrei; DEUSCHLE, Eduardo; AZEVEDO, Leticia Dalpaz; PESSOA, João Lorenço Novaes; GHISI, Enedir. Assessment of Light Emitting Diodes technology for general lighting: A critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, [s.l.], nov. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.002>.

NARENDRAN, N.; FREYSSINIER, J.; ZHU, Y.. Energy and user acceptability benefits of improved illuminance uniformity in parking lot illumination. **Lighting Research and Technology**, [s.l.], v. 48, n. 7, p.789-809, 4 jun. 2015. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1477153515587959>.

OSRAM. **Lâmpadas de descarga de alta pressão**: Tecnologias inteligentes para faíscas brilhantes. 2016a. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/>. Acesso em: 20 jun. 2016.

OSRAM. **LED Lamps**: PARATHOM PRO LED spot 111. 2016b. Disponível em: <http://www.osram.co.uk/osram_uk/products/lamps/led-lamps/professional-led-reflector-lamps/parathom-pro-ledspot-111/index.jsp>. Acesso em: 14 jul. 2016.

PEREIRA, Dênis de Castro. Núcleo de Iluminação Moderna. **Radiometria e Fotometria Experimental Utilizando as Esferas Integradoras LMS 200 e LMS 400**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2015. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/nimo/files/2008/10/Relatório-Esferas-Integradoras.pdf>>. Acesso em: 01 dez. 2017.

PEREIRA, Fernando Oscar Ruttkay; SOUZA, Marcos Barros de. **Apostila de Conforto Ambiental: Iluminação**. Florianópolis: UFSC, 2005. 81 p.

PHILIPS LIGHTING HOLDING B.V.. **Road and Urban Luminaires**. 2018. Disponível em: <http://www.lighting.philips.com.br/prof/luminarias-outdoor/road-and-urban-lighting/road-and-urban-luminaires#pfpath=0-OCOUTD_GR-NROAD_CA>. Acesso em: 10 abr. 2018.

RAMOS, José Augusto Stevanelli. **RE: Orçamento estimativo UFSC**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <fabricia.grando@ufsc.br>. em: 25 jan. 2018.

RAYNHAM, P., SAKSVIKRØNNING, T. White Light and Facial Recognition. **The Lighting Journal**, v. 68, n. 1, p.29-33, 2003.

REA, MS (Ed.). **IESNA Lighting Handbook: Reference and Application**. Nova Iorque: Illuminating Engineering Society of North America, 2000.

REA, MS. In the Dark About the Lumen. **IAEEL Newsletter 2/95**. Lighting Research Center Rensselaer Polytechnic Institute, 1995.

REA, MS; BULLOUGH, JD; AKASHI, Y.. Several views of metal halide and high-pressure sodium lighting for outdoor applications. **Lighting Research and Technology**, [s.l.], v. 41, n. 4, p.297-320, 2 set. 2009. SAGE Publications.
<http://dx.doi.org/10.1177/1477153509102342>.

REA, MS; BULLOUGH, JD; BRONS, J.. Spectral considerations for outdoor lighting: Designing for perceived scene brightness. **Lighting Research and Technology**, [s.l.], v. 47, n. 8, p.909-919, 23 out. 2014. SAGE Publications.
<http://dx.doi.org/10.1177/1477153514556126>.

REA, MS; BULLOUGH, JD; FREYSSINIER, JP; BIERMAN, A. A proposed unified system of photometry. **Lighting Research and Technology**, [s.l.], v. 36, n. 2, p.85-111, 1 maio 2004. Cambridge University Press (CUP).
<http://dx.doi.org/10.1191/1365782804li114oa>.

RELUX. **Relux, the Standard in Light-planning**. Disponível em: <<https://relux.com/en/>>. Acesso em: 22 dez. 2017.

RESENDE, Lucas Henrique Gomes. **Re: Material recebido da Universidade Federal Santa Catarina**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <fabricia.grando@ufsc.br>. em: 26 out. 2017.

RODRIGUES, Claudio R. B. S.; ALMEIDA, Pedro S.; SOARES Guilherme M.; JORGE, João M.; PINTO, Danilo P.; BRAGA, Henrique A. C.. An experimental comparison between different technologies arising for public lighting: LED luminaires replacing high pressure sodium lamps. **2011 IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, [s.l.], p.141-146, jun. 2011. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
<http://dx.doi.org/10.1109/isie.2011.5984147>.

SCHEFFER, Juliana. **Custo UFSC com energia**. [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <fabricia.grando@ufsc.br>. em: 26 jan. 2018.

SCHREUDER, Duco. **Outdoor Lighting: Physics, Vision and Perception**. [s.l.]: Springer, 2008. 430 p.

SHPAK, M; KARHA, P; PORROVECCHIO, G; SJOBERG, A; SMID, M; IKONEN, E. A two channel photopic-scotopic luminance meter as a basis for mesopic photometry: Proceedings of the CIE. Hangzhou, China, p.433-434, set. 2012.

SILVA, Vanessa Aparecida da. **RES: CONTATO EMPALUX.** [mensagem pessoal] Mensagem recebida por: <fabricia.grando@ufsc.br>. em: 19 jul. 2017.

SINDUSCON (Florianópolis). **CUB/m² - Residencial médio.** 2018. Disponível em: <<http://sinduscon-fpolis.org.br/index.asp?dep=56>>. Acesso em: 21 fev. 2018.

TÄHKÄMÖ, Leena; RÄSÄNEN, Rami-samuli; HALONEN, Liisa. Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, [s.l.], v. 21, n. 2, p.137-145, 26 nov. 2015. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11367-015-1000-x>.

UCHIDA, T; AYAMA, M; AKASHI, Y; HARA, N; KITANO, T; KODAIRA, Y; SAKAI, K. Adaptation luminance simulation for CIE mesopic photometry system implementation. **Lighting Research and Technology**, [s.l.], v. 48, n. 1, p.14-25, 12 jan. 2016. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1477153515626210>.

UCHIDA, T.; OHNO, Y. Simplified field measurement methods for the CIE mesopic photometry system. **Lighting Research And Technology**, [s.l.], p.1-14, 11 abr. 2016. SAGE Publications. <http://dx.doi.org/10.1177/1477153516643571>.

UFSC. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Ministério da Educação. **Universidade Federal de Santa Catarina.** 2017. Disponível em: <<http://ufsc.br/>>. Acesso em: 25 abr. 2017.

UFSC. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Ministério da Educação. **Licitações 2017: RDC Eletrônico 006/2017.** 2018. Disponível em: <<http://notes.ufsc.br/aplic/licitapl.nsf/vwLicitacaoAnoAnterior?OpenView&Start=1&Count=30&Expand=4#4>>. Acesso em: 31 jan. 2018.

VASCONCELLOS, Luiz Eduardo Menandro de; LIMBERGER, Marcos Alexandre Couto (Org.). **Iluminação Eficiente: Iniciativas da Eletrobrás Procel e Parceiros.** Rio de Janeiro: Eletrobrás/Procel, 2013. 266 p.

YAO, Qi; SUN, Yaojie; LIN, Yandan. Research on Facial Recognition and Color Identification under CMH and HPS Lamps for Road Lighting. **Leukos**, [s.l.], v. 6, n. 2, p.169-178, out. 2009. UK Limited. <http://dx.doi.org/10.1582/leukos.2009.06.02006>.

APÊNDICES

APÊNDICE A – MEDIÇÕES COMPLEMENTARES: CONSUMO DAS LÂMPADAS

A medição para cálculo de consumo das lâmpadas utilizadas na área de estudo foi realizada pelo laboratório do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) da UFJF. Utilizaram-se os equipamentos do local, os quais estão descritos no capítulo 3. A Tabela A.1 apresenta dados fornecidos pelos fabricantes. Os ensaios foram executados pelo mestrando em engenharia elétrica Lucas H. G. Resende, sob os cuidados do Professor Henrique A. C. Braga.

Tabela A.1 – Características das lâmpadas especificadas pelo fabricante

Lâmpada	Marca	Potência (W)	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência luminosa (lm/W)	Temperatura de cor (K)
Vapor de sódio	Osram	70	6020	86	2000
Vapor metálico	Artek	70	5600	80	4200
LED bulbo	Philips	45	5000	111	6500

A medição de potência das lâmpadas de descarga foi realizada em conjunto com seus equipamentos auxiliares (reator, ignitor e capacitor). Os equipamentos auxiliares medidos são específicos para lâmpadas a vapor de sódio de 70 W e vapor metálico de 70 W, com perda de 15 W indicada pelo fabricante. A lâmpada LED bulbo não necessita de equipamentos auxiliares. A Tabela A.2 apresenta os resultados das medições.

Para calcular o consumo anual de cada tecnologia, utilizou-se a potência de entrada das lâmpadas/conjuntos medidos e multiplicou-se pela quantidade de horas em que as lâmpadas ficam ligadas durante o período noturno. A Agência Nacional de Energia Elétrica estabelece que para fins de faturamento da energia elétrica destinada à iluminação pública o tempo a ser considerado para consumo diário deve ser de 11 horas e 52 minutos (BRASIL, 2010). A Tabela A.3 apresenta os valores calculados.

Tabela A.2 – Medição das características das lâmpadas

Lâmpada	Fator de potência	Potência de entrada (W)
Vapor de sódio	0,958	87,3
Vapor metálico	0,951	91,0
LED bulbo	0,954	42,8

Fonte: Braga, 2018

Tabela A.3 – Consumo anual do conjunto

Lâmpada	Potência (W)	Período (h)	Consumo anual (kWh)
Vapor de sódio	87,3	4331	378,1
Vapor metálico	91,0	4331	394,1
LED bulbo	42,8	4331	185,4

APÊNDICE B – TERMO DE CONSENTIMENTO LIVRE E ESCLARECIDO

Caro(a) participante(a)

Você está sendo convidado(a) a participar de um projeto de pesquisa que estuda a percepção das pessoas sob diferentes condições de iluminação externa. O título da pesquisa é **Avaliação comparativa de sistemas de iluminação pública em caminho de pedestres considerando efeitos mesópicos**, que está sendo conduzida por mim, Fabrícia de Oliveira Grando, aluna do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), sob a orientação do Prof. Eneid Ghisi, PhD. O objetivo do estudo é avaliar comparativamente sistemas de iluminação pública instalados em passeios públicos para pedestres, em termos qualitativos e quantitativos.

Ao concordar em participar da pesquisa, você terá que dirigir-se ao local de estudo, a praça existente entre o Centro Socioeconômico (CSE) e o Centro de Ciências Jurídicas (CCJ), em período noturno, e acompanhado pela pesquisadora responder um questionário sobre sua percepção pessoal do local. Será necessário que você vá ao local de três a quatro vezes para que seja possível comparar sua percepção sob diferentes condições de iluminação. Os riscos ao participar desta pesquisa são baixos, sendo os mesmos a que está submetida uma pessoa que caminha pelo campus Trindade à noite. Caso você sinta algum desconforto durante a realização das atividades propostas, você terá a liberdade de desistir. Os benefícios de sua participação nesta pesquisa são de ordem educacional e científica. Você estará auxiliando no entendimento das necessidades pessoais quando se utilizam passeios públicos à noite e no processo de modernização da iluminação externa do campus. Seus dados serão confidenciais. Eles não serão divulgados, de forma a possibilitar a sua identificação. Não haverá qualquer tipo de remuneração pela sua participação nesta pesquisa, assim como não será gerado qualquer tipo de gasto para você. Em caso de eventuais danos ou despesas, comprovadamente decorrentes de sua participação nesta pesquisa, haverá ressarcimento.

Concordando em participar desta pesquisa, preencha e assine ao final deste documento. Em caso de dúvidas, o contato

com os pesquisadores pode ser feito através dos e-mails XXX e XXX, dos telefones XXX e XXX ou no Departamento de Engenharia Civil localizado na Rua João Pio Duarte Silva - Campus Universitário - Trevo do Córrego Grande, Florianópolis. Assinando o consentimento informado, você estará autorizando a pesquisadora a utilizar seus dados na pesquisa. **Muito obrigada!**

Fabírcia de Oliveira Grando
(pesquisadora)

Consentimento Informado – Autorização

Eu, _____
(**nome completo**), concordo em participar da pesquisa *Avaliação comparativa de sistemas de iluminação pública em caminho de pedestre considerando efeitos mesópicos*, regida pela Resolução CNS/MS nº 510/2016, e autorizo a pesquisadora a utilizar os dados coletados para a realização do estudo proposto. Declaro ainda que recebi uma via do Termo de Consentimento Livre e Esclarecido.

Florianópolis, _____ de _____ de 2017.

(Assinatura)

O Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos – CEPESH-UFSC – é um órgão colegiado vinculado à Universidade Federal de Santa Catarina criado para defender os interesses dos participantes da pesquisa em sua integridade e dignidade e para contribuir no desenvolvimento da pesquisa dentro de padrões éticos. Se você tiver alguma consideração ou dúvida sobre a ética desta pesquisa, entre em contato: CEPESH-UFSC – Prédio Reitoria II, 4º andar, sala 401, Rua Desembargador Vitor Lima, nº 222, Trindade, Florianópolis. Telefone para contato: 3721-6094. E-mail: cep.propesq@contato.ufsc.br.

APÊNDICE C – QUESTIONÁRIO

LOCAL DE APLICAÇÃO:

[] CSE → ESTACIONAMENTO [] ESTACIONAMENTO → CSE

1) Posso ver todo o caminho a ser percorrido:

-5	-3	-1	1	3	5
Discordo fortemente	Pouco discordo	Discordo moderadam.	Ligeiramente de acordo	Concordo moderadam.	Concordo plenamente

2) No geral, a iluminação neste percurso é BOA:

-5	-3	-1	1	3	5
Discordo fortemente	Pouco discordo	Discordo moderadam.	Ligeiramente de acordo	Concordo moderadam.	Concordo plenamente

3) Posso ver se há riscos de tropeço ou obstáculos no meu caminho:

-5	-3	-1	1	3	5
Discordo fortemente	Pouco discordo	Discordo moderadam.	Ligeiramente de acordo	Concordo moderadam.	Concordo plenamente

4) Posso ver BEM meu entorno e reconhecer uma pessoa a uma distância entre 3 e 10 metros:

-5	-3	-1	1	3	5
Discordo fortemente	Pouco discordo	Discordo moderadam.	Ligeiramente de acordo	Concordo moderadam.	Concordo plenamente

5) Esta iluminação me permite utilizar as mesas do jardim para ler:

-5	-3	-1	1	3	5
Discordo fortemente	Pouco discordo	Discordo moderadam.	Ligeiramente de acordo	Concordo moderadam.	Concordo plenamente

6) Esta iluminação é confortável para sentar com meus amigos e conversar:

-5	-3	-1	1	3	5
Discordo fortemente	Pouco discordo	Discordo moderadam.	Ligeiramente de acordo	Concordo moderadam.	Concordo plenamente

7) Classifique o brilho (ofuscamento) das luminárias neste ambiente:

1	2	3	4	5
Insuportável	Perturbador	Apenas aceitável	Satisfatório	Imperceptível

8) No geral, este ambiente parece:

-5	-3	-1	1	3	5
Muito escuro	Moderadam. escuro	Levemente escuro	Levemente claro	Moderadam. claro	Muito claro

9) O quão seguro você se sentiria andando sozinho(a) aqui à noite:

-5	-3	-1	1	3	5
Muito inseguro	Moderadam. inseguro	Levemente inseguro	Levemente seguro	Moderadam. seguro	Muito seguro

APÊNDICE D – ESTIMATIVO DA POPULAÇÃO NOTURNA

O levantamento estimativo da população noturna do Campus Trindade da UFSC foi desenvolvido considerando o usuário que frequenta a universidade após as 18h30min, horário em que começam as aulas, de segunda a sexta-feira. Após verificar a quantidade de turmas ministradas à noite durante uma semana e a quantidade de alunos matriculados em cada turma, o valor de alunos por dia foi calculado utilizando a média aritmética. Essa pesquisa foi realizada utilizando contatos telefônicos, consultas em páginas da internet da UFSC e mensagens por correio eletrônico.

A Tabela D.1 apresenta os dados coletados. Nela são apresentados tanto os dados encontrados para todo o campus Trindade quanto para a área de abrangência de estudo, na qual estão localizados principalmente o CSE, o CCJ e a Secretaria de Segurança Institucional. Para fins de cálculos e por causa das incertezas existentes no levantamento, os números encontrados serão aproximados para 2300 e 7500 pessoas para a população da região do CSE/CCJ e para a população total do campus Trindade, respectivamente.

Incertezas:

As incertezas quanto à população total levantada provêm do fato de que alguns usuários não são possíveis de estimar: usuários do restaurante universitário, uma vez que podem ser alunos de cursos noturnos já computados ou de cursos diurnos; alunos que utilizam serviços como a biblioteca universitária; visitantes ao Centro de Eventos em dias esporádicos; participantes de palestras, feiras, congressos e aulas especiais; eventuais festas de estudantes; população dos bairros vizinhos à universidade que atravessam o campus para reduzir percursos. Também foi desconsiderada a população do Hospital Universitário, pois mesmo pertencente ao espaço físico do campus, o hospital encontra-se em área reservada e seus usuários costumam dirigir-se ao hospital pelas ruas limites à UFSC, sem precisar entrar no campus.

Por sua vez, o número de alunos de pós-graduação que permanecem em laboratório foi estimado conforme depoimento da secretaria de cada programa. E o número de técnicos que trabalham em secretarias de cursos de graduação foi estimado

como um servidor para cada curso que seja na modalidade noturno. Estes montantes, mesmo que incertos, foram incluídos na pesquisa.

Tabela D.1 – Levantamento da população noturna diária do Campus Trindade da UFSC do primeiro semestre de 2017

Categoria	Quant. CSE/ CCJ	Freq (%)	Quant. UFSC	Freq (%)	Fonte da informação
Estudantes de graduação	2100	94,8	6100	82,1	Superintendência de Governança Eletrônica e Tecnologia da Informação e Comunicação (SETIC), através de contato com o Dep. de Administração Escolar (DAE).
Estudantes de pós-graduação	35	1,6	310	4,2	Contato por telefone e/ou e-mail com cada programa de pós-graduação. Em caso de insucesso, verificação no site do programa.
Estudantes de cursos de línguas do Extracurricular	-	-	486	6,5	Contato por telefone e e-mail com o Dep. de Língua e Literatura Estrangeira (DLLE). Verificação no site.
Servidores - Professores	57	2,6	278	3,7	DAE, DLLE, programas de pós-graduação.
Servidores - Técnicos	13	0,6	50	0,7	DAE, DLLE, programas de pós-graduação, Biblioteca Universitária (BU), Secretaria de Segurança Institucional (SSI).
Funcionários terceirizados	9	0,4	207	2,8	Departamento de Projetos, Contratos e Convênios (DPC/PROAD) e Restaurante Universitário.
Total	2.214	100	7.431	100	

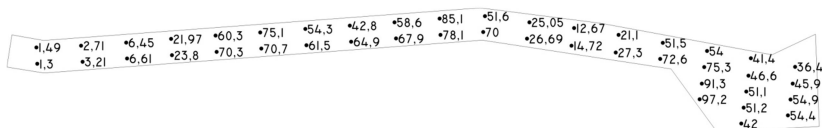
APÊNDICE E – VALIDAÇÃO DIALUX EVO

Para validar o programa utilizado nas simulações computacionais, foram simuladas situações reais encontradas durante as medições. As situações reais simuladas foram as proporcionadas pelas lâmpadas a vapor de sódio em alta pressão e a vapor metálico. A lâmpada LED bulbo não foi simulada, pois, como já discutido, ela teve sua distribuição luminosa prejudicada pela dimensão da lâmpada em relação à luminária e não seria possível simular essa situação. As características das fontes luminosas foram inseridas no programa conforme encontradas nas medições complementares.

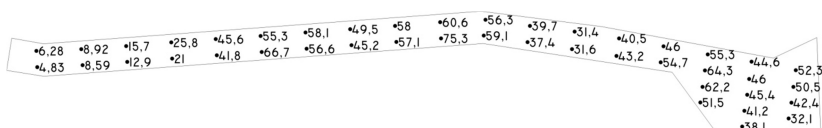
Como a empresa que produziu as luminárias instaladas no local não possui parceria com a DIAL nem fornece as distribuições fotométricas de seus produtos foram utilizadas luminárias semelhantes às instaladas. A luminária Citea da empresa Schröder foi a escolhida. Foram mantidos o posicionamento dos postes e a altura de instalação das luminárias.

Para reduzir o erro da comparação entre os métodos, uma malha de pontos igual à utilizada nas medições *in loco* foi inserida no programa. A iluminância horizontal média e o fator de uniformidade da iluminância foram calculados de acordo com a NBR 5101/2012 (ABNT, 2012). As Figuras E.1 e E.2 apresentam imagens com os dados medidos e os simulados dispostos conforme a malha de medição *in loco*.

Figura E.1 – Comparação entre os valores medidos e simulados com a lâmpada a vapor de sódio utilizando a malha de pontos

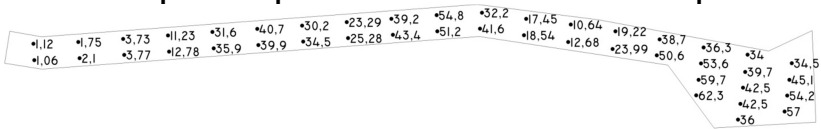


(a) medição *in loco* com lâmpada a vapor de sódio

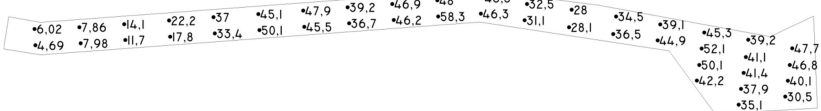


(b) simulação no DIALux com lâmpada a vapor de sódio

Figura E.2 – Comparação entre os valores medidos e simulados com a lâmpada a vapor metálico utilizando a malha de pontos



(a) medição in loco com lâmpada a vapor metálico



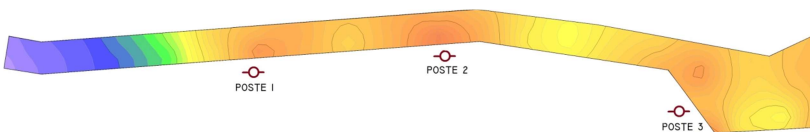
(b) simulação no DIALux com lâmpada a vapor metálico

As Figuras E.3 e E.4 comparam os dados medidos *in loco* com os dados simulados pelo DIALux através de curvas de iluminamento horizontal com cores falsas para as duas lâmpadas. As imagens foram geradas no programa Surfer utilizando os pontos da malha de medição. Pelas imagens é possível perceber que a distribuição do fluxo luminoso simulado é melhor quando comparado ao medido no local. Mas, de maneira semelhante, há uma diminuição acentuada do nível de iluminamento perto da escadaria (lado esquerdo das imagens). Também apresenta os maiores níveis logo abaixo das luminárias e próximo ao acesso ao hall do CSE (lado direito das imagens).

Figura E.3 – Comparação entre os valores medidos e simulados com a lâmpada a vapor de sódio utilizando curvas de iluminâncias com cores falsas



(a) medição in loco com lâmpada a vapor de sódio



(b) simulação no DIALux com lâmpada a vapor de sódio

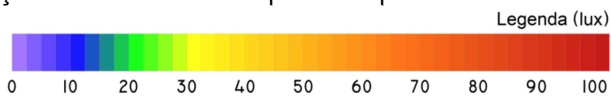
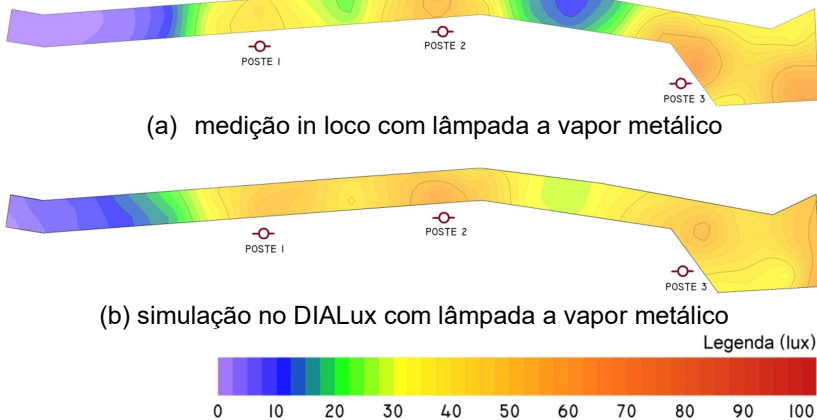


Figura E.4 – Comparação entre os valores medidos e simulados com a lâmpada a vapor metálico utilizando curvas de iluminâncias com cores falsas



Em geral, os dados gerados pelo programa ficaram próximos ao medidos no local. Com a lâmpada a vapor de sódio a diferença entre o nível médio de iluminamento medido e o simulado foi de -6,7%, com a lâmpada a vapor metálico foi de +14,3%. Chama à atenção a variação encontrada na distribuição da luz pelas luminárias, uma vez que as luminárias simuladas distribuíram melhor o fluxo luminoso gerado pelas fontes, o fator de uniformidade simulado foi melhor que o medido no local. Este fato gerou uma diferença bastante acentuada em ambas as lâmpadas. Uma simulação mais precisa somente seria possível com a inserção no programa da mesma luminária instalada. A Tabela E.1 compara os níveis medidos com os simulados.

Tabela E.1 – Comparação de dados medidos com simulados

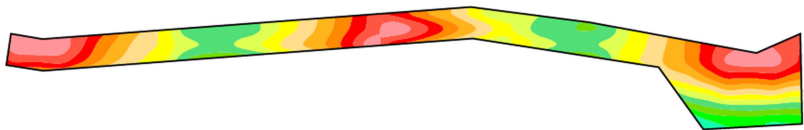
Parâmetros medidos	Lâmpada a vapor de sódio			Lâmpada a vapor metálico		
	Valor medido	Valor simulado	Diferença (%)	Valor medido	Valor simulado	Diferença (%)
Iluminância horizontal média (lux)	45,9	42,8	-6,7	31,4	35,9	+14,3
Fator de uniformidade da iluminância	0,03	0,11	+266	0,03	0,13	+333
Valor mínimo (lux)	1,3	4,8	+269	1,06	4,7	+342
Valor máximo (lux)	97,2	75,3	-22,5	62,3	58,3	-6,4

Isto posto, considerando a simulação realizada com as fontes de luz instaladas e a validação executada por Mangkuto (2015), acredita-se que o programa DIALux *evo* atendeu aos requisitos desta pesquisa e foi utilizado para simular os cenários propostos.

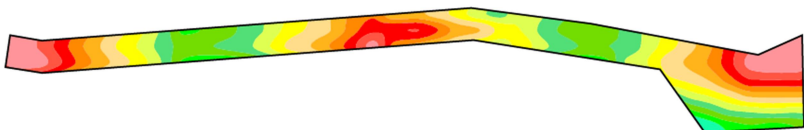
APÊNDICE F – SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS

As Figuras F.1 a F.3 apresentam a distribuição de iluminação horizontal, representada pela imagem com cores falsas gerada pelo programa DIALux evo, de todas as simulações realizadas.

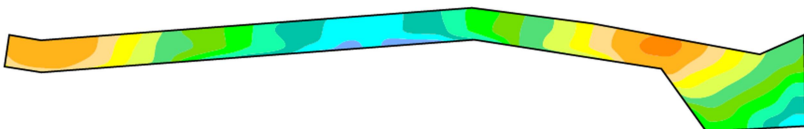
Figura F.1 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 1 a 24 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor de sódio



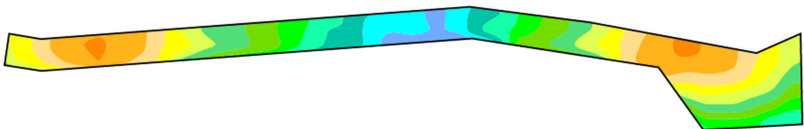
- (a) Cenário 1 – 70 W, braço reto, $h = 4$ m, postes paralelos – iluminância horizontal média: 49,4 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (b) Cenário 2 – 70 W, braço reto, $h = 4$ m, postes intercalados – iluminância horizontal média: 45,8 lx, fator de uniformidade: 0,25.



- (c) Cenário 3 – 70 W, braço reto, $h = 6$ m, postes paralelos – iluminância horizontal média: 25,1 lx, fator de uniformidade: 0,28.



- (d) Cenário 4 – 70 W, braço reto, $h = 6$ m, postes intercalados – iluminância horizontal média: 27,2 lx, fator de uniformidade: 0,25.

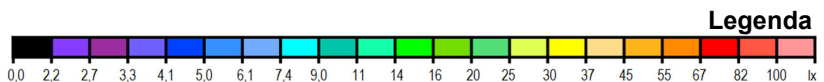
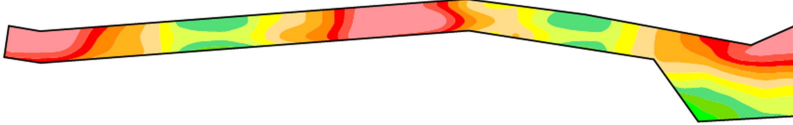
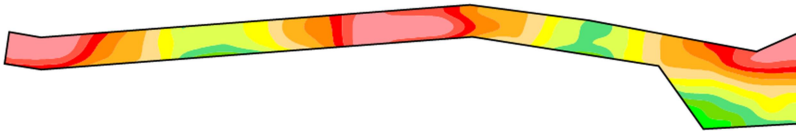


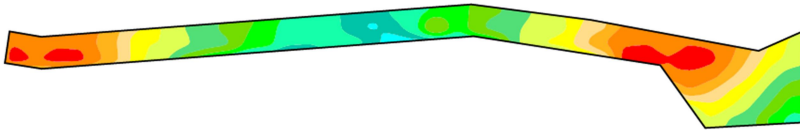
Figura F.1 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 1 a 24 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor de sódio (cont.)



- (e) Cenário 5 – 100 W, braço reto, h= 4 m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 57,1 lx, fator de uniformidade: 0,27.



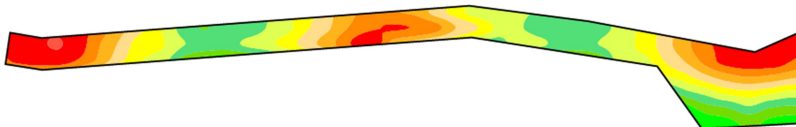
- (f) Cenário 6 – 100 W, braço reto, h= 4 m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 57,3 lx, fator de uniformidade: 0,27.



- (g) Cenário 7 – 100 W, braço reto, h= 6 m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 34,2 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (h) Cenário 8 – 100 W, braço reto, h= 6 m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 34,4 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (i) Cenário 9 – 70 W, braço inclinado, h= 4 m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 40,9 lx, fator de uniformidade: 0,34.

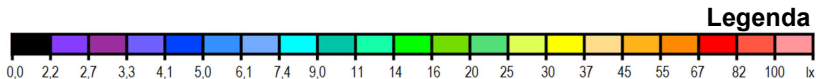
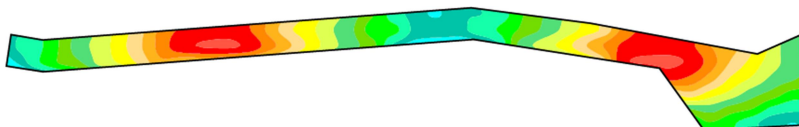


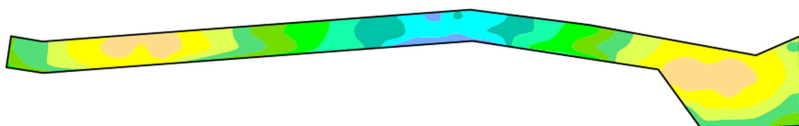
Figura F.1 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 1 a 24 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor de sódio (cont.)



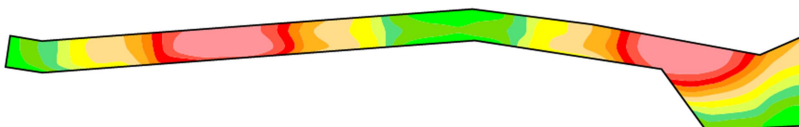
- (j) Cenário 10 – 70 W, braço inclinado, $h = 4$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 35,2 lx, fator de uniformidade: 0,27.



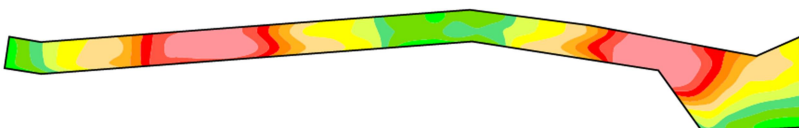
- (k) Cenário 11 – 70 W, braço inclinado, $h = 6$ m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 23,4 lx, fator de uniformidade: 0,28.



- (l) Cenário 12 – 70 W, braço inclinado, $h = 6$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 24,1 lx, fator de uniformidade: 0,29.



- (m) Cenário 13 – 100 W, braço inclinado, $h = 4$ m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 53,6 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (n) Cenário 14 – 100 W, braço inclinado, $h = 4$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 54,4 lx, fator de uniformidade: 0,25.

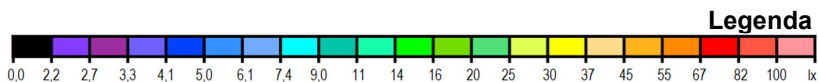
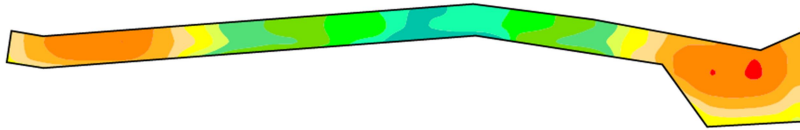


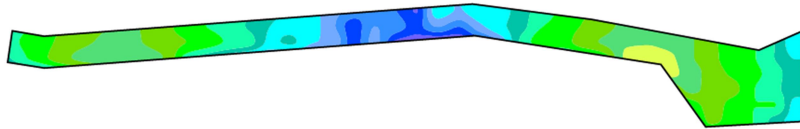
Figura F.1 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 1 a 24 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor de sódio (cont.)



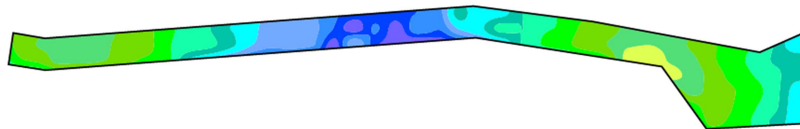
- (o) Cenário 15 – 100 W, braço inclinado, $h = 6$ m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 35,1 lx, fator de uniformidade: 0,27.



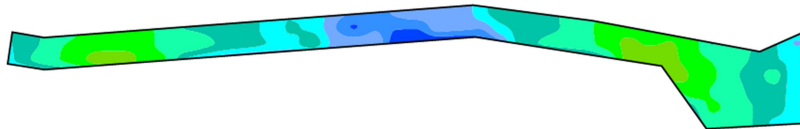
- (p) Cenário 16 – 100 W, braço inclinado, $h = 6$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 37,0 lx, fator de uniformidade: 0,28.



- (q) Cenário 17 – 100 W, eixo central, $h = 4$ m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 14,1 lx, fator de uniformidade: 0,28.



- (r) Cenário 18 – 100 W, eixo central, $h = 4$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 13,6 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (s) Cenário 19 – 100 W, eixo central, $h = 5$ m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 11,1 lx, fator de uniformidade: 0,44.

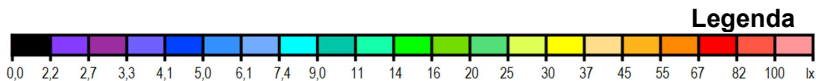
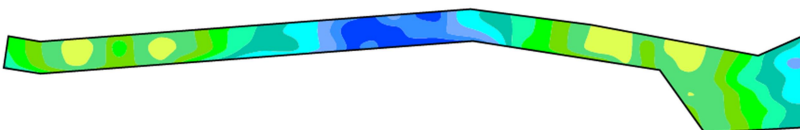


Figura F.1 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 1 a 24 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor de sódio (cont.)



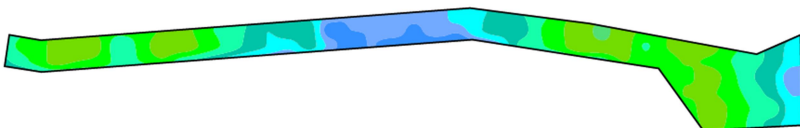
- (t) Cenário 20 – 100 W, eixo central, $h = 5$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 11,3 lx, fator de uniformidade: 0,45.



- (u) Cenário 21 – 150 W, eixo central, $h = 4$ m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 15,5 lx, fator de uniformidade: 0,27.



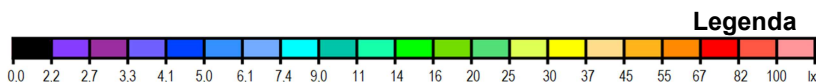
- (v) Cenário 22 – 150 W, eixo central, $h = 4$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 14,6 lx, fator de uniformidade: 0,27.



- (w) Cenário 23 – 150 W, eixo central, $h = 5$ m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 12,6 lx, fator de uniformidade: 0,41.

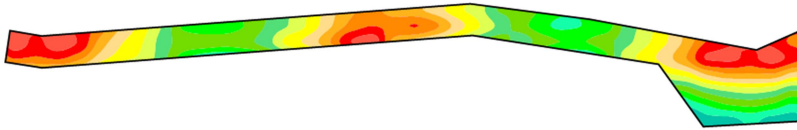


- (x) Cenário 24 – 150 W, eixo central, $h = 5$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 12,2 lx, fator de uniformidade: 0,47.

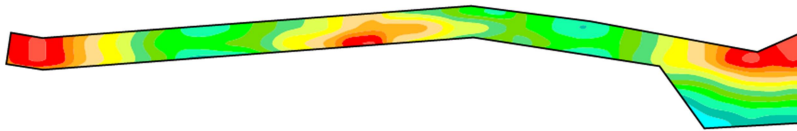


A seguir, através da Figura F.2 são apresentadas as distribuições luminosas das simulações computacionais das luminárias com lâmpadas a vapor metálico.

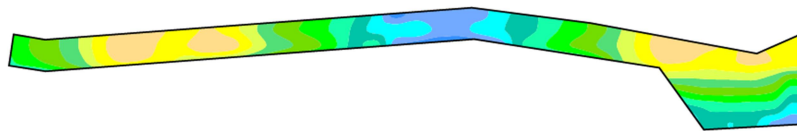
Figura F.2 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 25 a 48 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor metálico



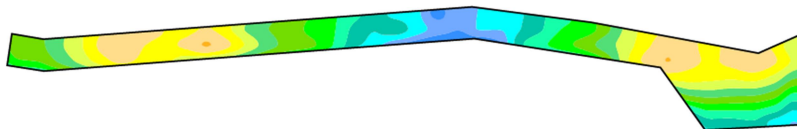
- (a) Cenário 25 – 70 W, braço reto, $h=4$ m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 38,3 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (b) Cenário 26 – 70 W, braço reto, $h=4$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 31,9 lx, fator de uniformidade: 0,25.



- (c) Cenário 27 – 70 W, braço reto, $h=6$ m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 21,3 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (d) Cenário 28 – 70 W, braço reto, $h=6$ m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 22,3 lx, fator de uniformidade: 0,25.

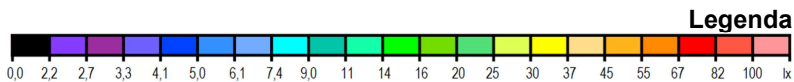
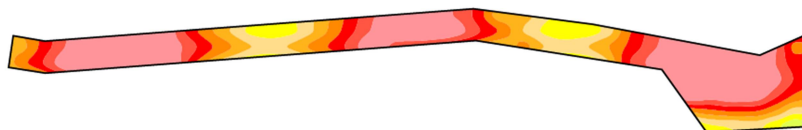
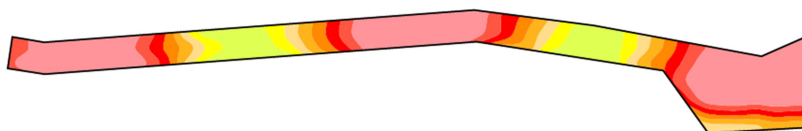


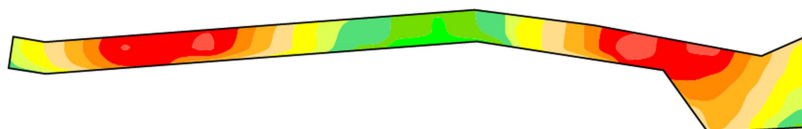
Figura F.2 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 25 a 48 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor metálico (cont.)



- (e) Cenário 29 – 150 W, braço reto, h= 4 m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 92,1 lx, fator de uniformidade: 0,28.



- (f) Cenário 30 – 150 W, braço reto, h= 4 m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 94,7 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (g) Cenário 31 – 150 W, braço reto, h= 6 m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 47,6 lx, fator de uniformidade: 0,33.



- (h) Cenário 32 – 150 W, braço reto, h= 6 m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 40,6 lx, fator de uniformidade: 0,33.



- (i) Cenário 33 – 70 W, braço inclinado, h= 4 m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 43,2 lx, fator de uniformidade: 0,31.

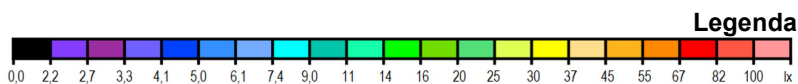
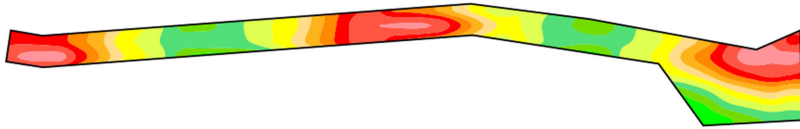
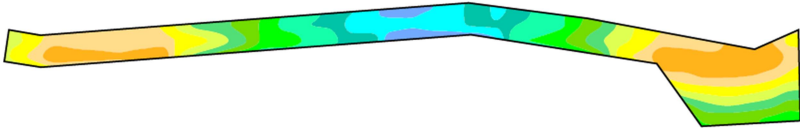


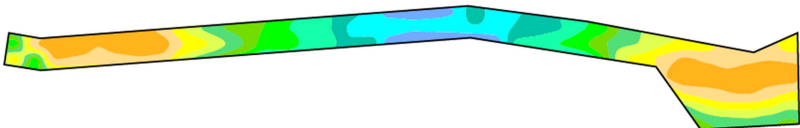
Figura F.2 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 25 a 48 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor metálico (cont.)



- (j) Cenário 34 – 70 W, braço inclinado, h= 4 m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 47,7 lx, fator de uniformidade: 0,29.



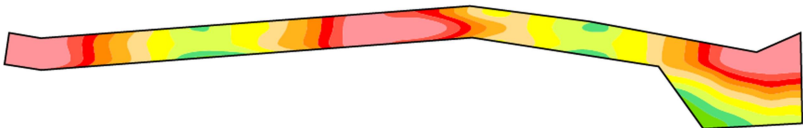
- (k) Cenário 35 – 70 W, braço inclinado, h= 6 m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 26,9 lx, fator de uniformidade: 0,25.



- (l) Cenário 36 – 70 W, braço inclinado, h= 6 m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 27,1 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (m) Cenário 37 – 100 W, braço inclinado, h= 4 m, postes paralelos –
iluminância horizontal média: 57,7 lx, fator de uniformidade: 0,32.



- (n) Cenário 38 – 100 W, braço inclinado, h= 4 m, postes intercalados –
iluminância horizontal média: 61,8 lx, fator de uniformidade: 0,28.

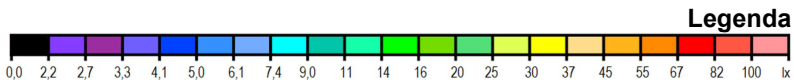
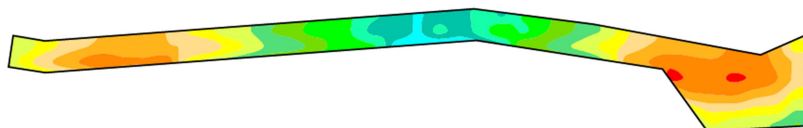
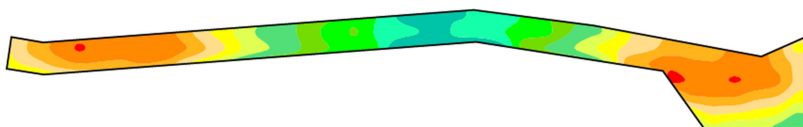


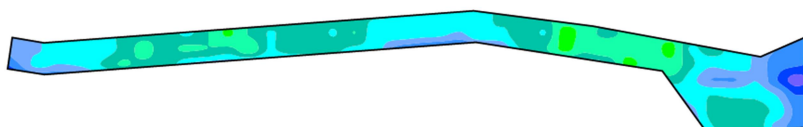
Figura F.2 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 25 a 48 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor metálico (cont.)



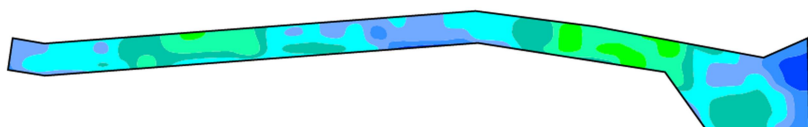
- (o) Cenário 39 – 100 W, braço inclinado, $h=6$ m, postes paralelos – luminância horizontal média: 34,7 lx, fator de uniformidade: 0,25.



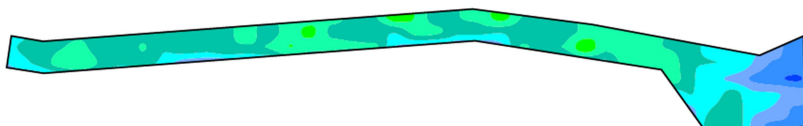
- (p) Cenário 40 – 100 W, braço inclinado, $h=6$ m, postes intercalados – luminância horizontal média: 36,6 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (q) Cenário 41 – 70 W, eixo central, $h=4$ m, postes paralelos – luminância horizontal média: 9,18 lx, fator de uniformidade: 0,40.



- (r) Cenário 42 – 70 W, eixo central, $h=4$ m, postes intercalados – luminância horizontal média: 9,18 lx, fator de uniformidade: 0,46.



- (s) Cenário 43 – 70 W, eixo central, $h=5$ m, postes paralelos – luminância horizontal média: 10,0 lx, fator de uniformidade: 0,48.

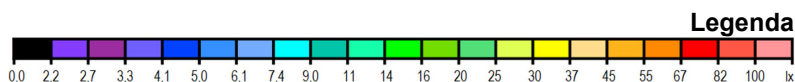
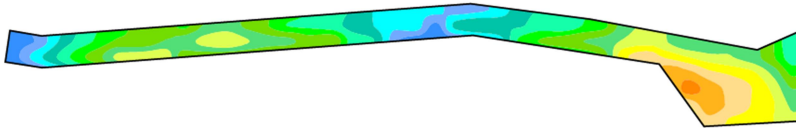


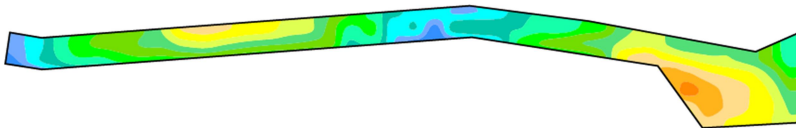
Figura F.2 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 25 a 48 simulados no DIALux com lâmpadas a vapor metálico (cont.)



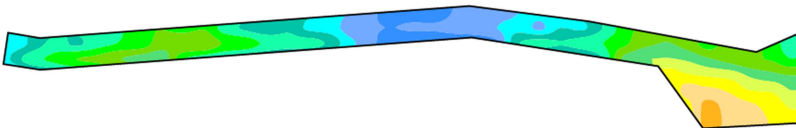
- (t) Cenário 44 – 70 W, eixo central, h= 5 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 9,21 lx, fator de uniformidade: 0,68.



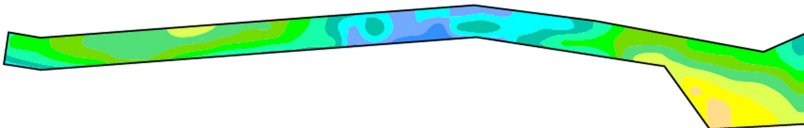
- (u) Cenário 45 – 150 W, eixo central, h= 4 m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 21,4 lx, fator de uniformidade: 0,26.



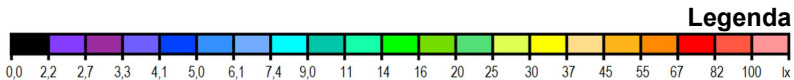
- (v) Cenário 46 – 150 W, eixo central, h= 4 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 22,5 lx, fator de uniformidade: 0,25.



- (w) Cenário 47 – 150 W, eixo central, h= 5 m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 17,7 lx, fator de uniformidade: 0,29.

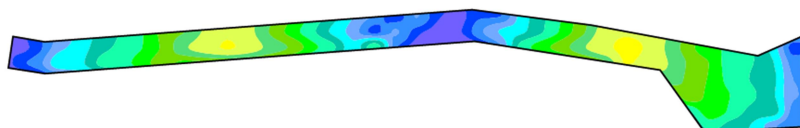


- (x) Cenário 48 – 150 W, eixo central, h= 5 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 17,9 lx, fator de uniformidade: 0,29.

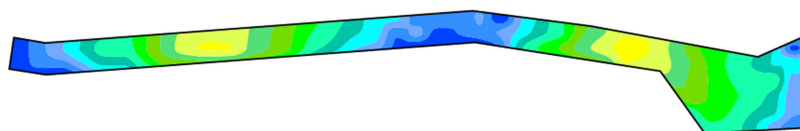


Através da Figura F.3 são apresentadas as distribuições luminosas das simulações computacionais das luminárias com lâmpadas LED.

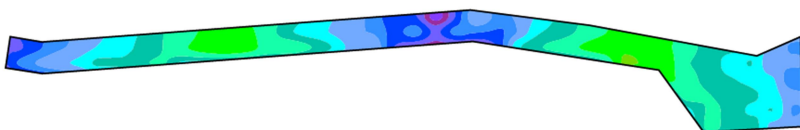
Figura F.3 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 49 a 72 simulados no DIALux com lâmpadas LED



- (a) Cenário 49 – 19 W, braço reto, h= 4 m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 13,7 lx, fator de uniformidade: 0,27.



- (b) Cenário 50 – 19 W, braço reto, h= 4 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 13,9 lx, fator de uniformidade: 0,30.



- (c) Cenário 51 – 19 W, braço reto, h= 6 m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 9,37 lx, fator de uniformidade: 0,25.



- (d) Cenário 52 – 19 W, braço reto, h= 6 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 9,38 lx, fator de uniformidade: 0,36.

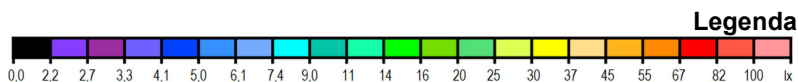
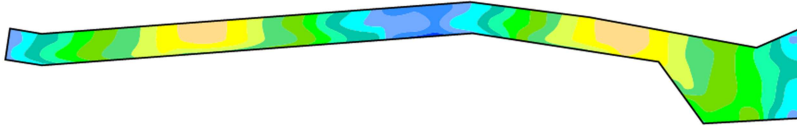
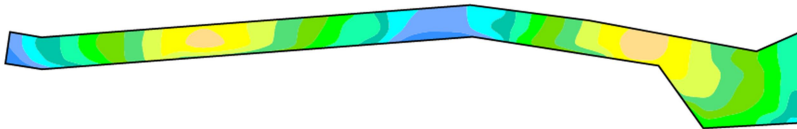


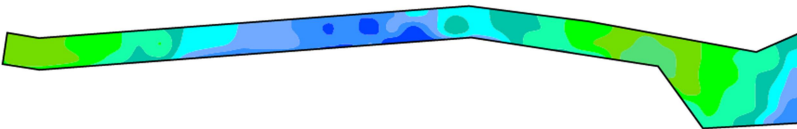
Figura F.3 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 49 a 72 simulados no DIALux com lâmpadas LED (cont.)



- (e) Cenário 53 – 27 W, braço reto, h= 4 m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 19,1 lx, fator de uniformidade: 0,26.



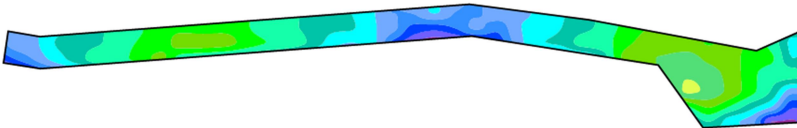
- (f) Cenário 54 – 27 W, braço reto, h= 4 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 19,6 lx, fator de uniformidade: 0,29.



- (g) Cenário 55 – 27 W, braço reto, h= 6 m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 11,6 lx, fator de uniformidade: 0,36.



- (h) Cenário 56 – 27 W, braço reto, h= 6 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 12,2 lx, fator de uniformidade: 0,30.



- (i) Cenário 57 – 20 W, braço inclinado, h= 4 m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 11,9 lx, fator de uniformidade: 0,28.

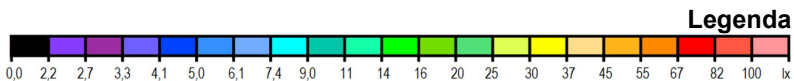
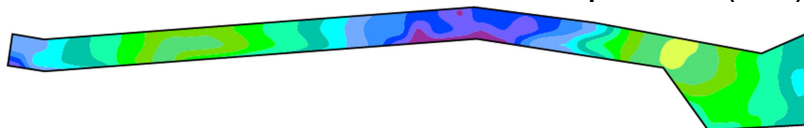
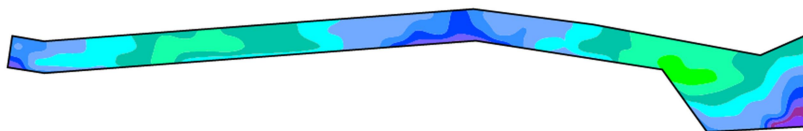


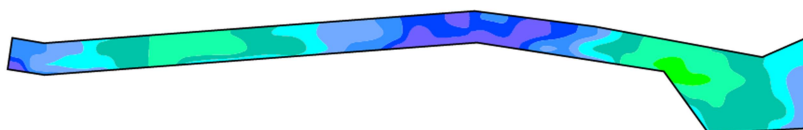
Figura F.3 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 49 a 72 simulados no DIALux com lâmpadas LED (cont.)



- (j) Cenário 58 – 20 W, braço inclinado, $h = 4$ m, postes intercalados – luminância horizontal média: 12,4 lx, fator de uniformidade: 0,26.



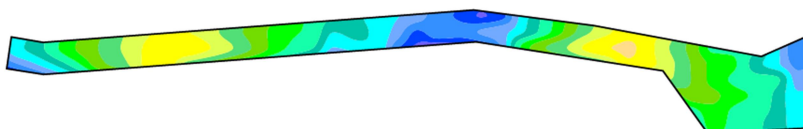
- (k) Cenário 59 – 20 W, braço inclinado, $h = 6$ m, postes paralelos – luminância horizontal média: 8,63 lx, fator de uniformidade: 0,27.



- (l) Cenário 60 – 20 W, braço inclinado, $h = 6$ m, postes intercalados – luminância horizontal média: 8,68 lx, fator de uniformidade: 0,39.



- (m) Cenário 61 – 27 W, braço inclinado, $h = 4$ m, postes paralelos – luminância horizontal média: 16,8 lx, fator de uniformidade: 0,26.



- (n) Cenário 62 – 27 W, braço inclinado, $h = 4$ m, postes intercalados – luminância horizontal média: 15,9 lx, fator de uniformidade: 0,25.

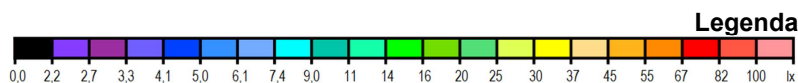
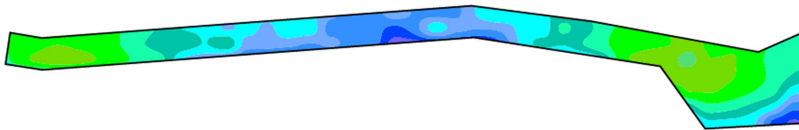
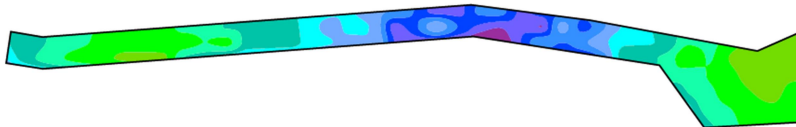


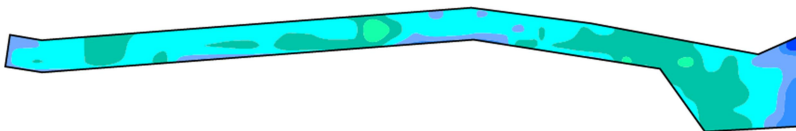
Figura F.3 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 49 a 72 simulados no DIALux com lâmpadas LED (cont.)



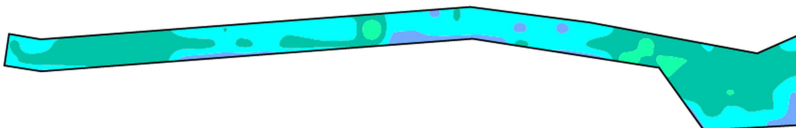
- (o) Cenário 63 – 27 W, braço inclinado, $h=6$ m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 11,1 lx, fator de uniformidade: 0,36.



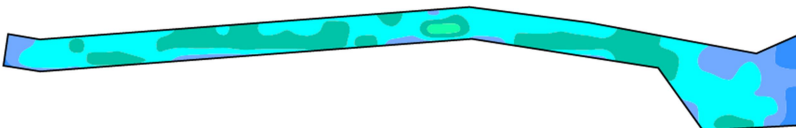
- (p) Cenário 64 – 27 W, braço inclinado, $h=6$ m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 11,1 lx, fator de uniformidade: 0,30.



- (q) Cenário 65 – 27 W, eixo central, $h=4$ m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 8,72 lx, fator de uniformidade: 0,49.



- (r) Cenário 66 – 27 W, eixo central, $h=4$ m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 9,13 lx, fator de uniformidade: 0,74.



- (s) Cenário 67 – 27 W, eixo central, $h=5$ m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 8,53 lx, fator de uniformidade: 0,63.

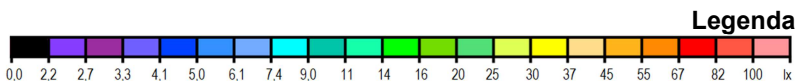
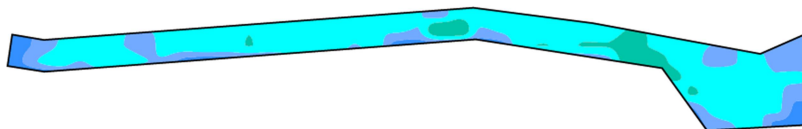
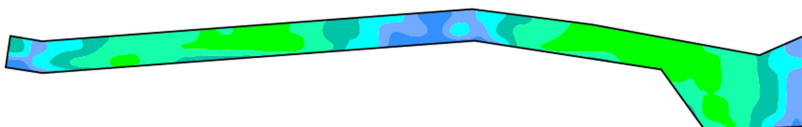


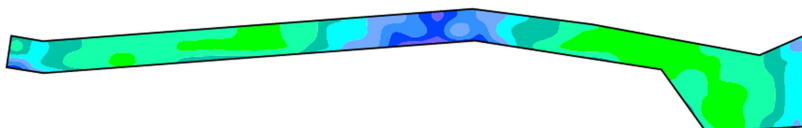
Figura F.3 – Distribuição de iluminação horizontal (em lux) dos cenários 49 a 72 simulados no DIALux com lâmpadas LED (cont.)



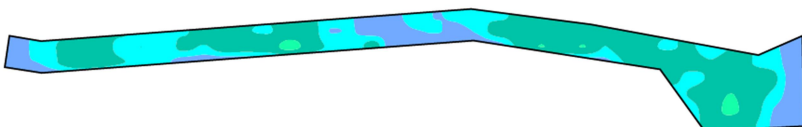
- (t) Cenário 68 – 27 W, eixo central, h= 5 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 8,01 lx, fator de uniformidade: 0,65.



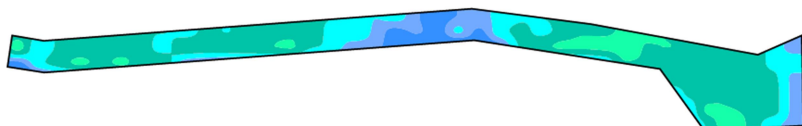
- (u) Cenário 69 – 36 W, eixo central, h= 4 m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 11,2 lx, fator de uniformidade: 0,45.



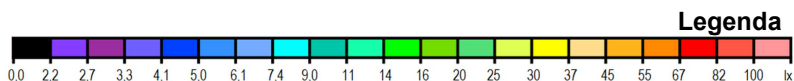
- (v) Cenário 70 – 36 W, eixo central, h= 4 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 11,2 lx, fator de uniformidade: 0,35.



- (w) Cenário 71 – 36 W, eixo central, h= 5 m, postes paralelos –
luminância horizontal média: 8,94 lx, fator de uniformidade: 0,68.



- (x) Cenário 72 – 36 W, eixo central, h= 5 m, postes intercalados –
luminância horizontal média: 9,28 lx, fator de uniformidade: 0,55.



ANEXOS

ANEXO A – SISTEMA MESÓPICO CIE 191:2010

A relação S/P (*Scotopic / Photopic*) é a razão entre os fluxos luminosos da fonte de luz avaliados de acordo com a função CIE de eficiência luminosa espectral escotópica $V'(\lambda)$ e de eficiência luminosa espectral fotópica $V(\lambda)$, respectivamente. A Equação 15 é apresentada pela CIE para cálculo da relação S/P.

$$\text{Relação S/P} = \frac{K'_m \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) V'(\lambda) d\lambda}{K_m \int_0^{\infty} S_{\lambda}(\lambda) V(\lambda) d\lambda} \quad (15)$$

Onde:

$K'_m \approx 1700 \text{ lm/W}$, é o valor máximo da eficácia luminosa espectral para visão escotópica, $K'(\lambda)$;

$K_m \approx 683 \text{ lm/W}$, é o valor máximo da eficácia luminosa espectral para visão fotópica, $K(\lambda)$;

$S_{\lambda}(\lambda)$ é a distribuição espectral da fonte de luz;

$V'(\lambda)$ é o fluxo luminoso da fonte de luz avaliada de acordo com a função CIE de eficiência luminosa espectral escotópica;

$V(\lambda)$ é o fluxo luminoso da fonte de luz avaliada de acordo com a função CIE de eficiência luminosa espectral fotópica;

λ é o comprimento de onda.

Tabela A.1 - Valores do coeficiente de adaptação *m*.

		Luminância Fotópica (cd/m ²)						
		0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	4,5
Sódio de baixa pressão~	0,25		0,1542	0,3830	0,5644	0,7538	0,9225	0,9841
	0,35		0,1804	0,3920	0,5688	0,7558	0,9230	0,9842
	0,45	0,0000	0,1992	0,4000	0,5730	0,7576	0,9235	0,9843
Sódio em alta pressão ~	0,55	0,0190	0,2140	0,4073	0,5770	0,7594	0,9240	0,9844
	0,65	0,0459	0,2265	0,4139	0,5808	0,7612	0,9245	0,9845
	0,75	0,0655	0,2373	0,4201	0,5844	0,7629	0,9249	0,9846
	0,85	0,0812	0,2468	0,4258	0,5878	0,7646	0,9254	0,9846
	0,95	0,0943	0,2553	0,4311	0,5911	0,7662	0,9258	0,9847
	1,05	0,1057	0,2631	0,4361	0,5942	0,7678	0,9263	0,9848
	1,15	0,1157	0,2702	0,4408	0,5972	0,7693	0,9267	0,9849
Vapor metálico branco quente ~	1,25	0,1247	0,2767	0,4452	0,6001	0,7708	0,9272	0,9850
	1,35	0,1329	0,2828	0,4494	0,6029	0,7723	0,9276	0,9851
	1,45	0,1404	0,2885	0,4534	0,6056	0,7737	0,9280	0,9852
	1,55	0,1473	0,2939	0,4573	0,6082	0,7751	0,9284	0,9853
	1,65	0,1538	0,2990	0,4609	0,6107	0,7764	0,9289	0,9853
	1,75	0,1598	0,3038	0,4645	0,6131	0,7778	0,9293	0,9854
	1,85	0,1654	0,3083	0,4678	0,6155	0,7791	0,9297	0,9855
	1,95	0,1708	0,3126	0,4711	0,6178	0,7803	0,9301	0,9856
	2,05	0,1758	0,3168	0,4742	0,6200	0,7816	0,9304	0,9857
	2,15	0,1806	0,3207	0,4772	0,6221	0,7828	0,9308	0,9857
Vapor metálico luz do dia ~	2,25	0,1852	0,3245	0,4801	0,6242	0,7840	0,9312	0,9858
	2,35	0,1895	0,3282	0,4830	0,6263	0,7852	0,9316	0,9859
	2,45	0,1937	0,3317	0,4857	0,6283	0,7863	0,9319	0,9860
	2,55	0,1977	0,3351	0,4883	0,6302	0,7875	0,9323	0,9860
	2,65	0,2015	0,3383	0,4909	0,6321	0,7886	0,9327	0,9861
	2,75	0,2052	0,3415	0,4934	0,6339	0,7896	0,9330	0,9862

Fonte: CIE, 2010b, p. 72

Tabela A.2 - Valores de L_{mes} do sistema mesópico recomendado em função da luminosidade fotópica e da relação S/P da fonte de luz.

		Luminância Fotópica (cd/m ²)							
		S/P	0,01	0,03	0,1	0,3	1	3	4,5
Sódio de baixa pressão ~	0,25		0,0025	0,0145	0,0705	0,2467	0,9130	2,9265	4,4782
	0,35		0,0035	0,0174	0,0750	0,2545	0,9253	2,9367	4,4812
Sódio em alta pressão ~	0,45		0,0045	0,0198	0,0793	0,2620	0,9373	2,9468	4,4842
	0,55		0,0057	0,0220	0,0834	0,2693	0,9492	2,9568	4,4872
	0,65		0,0069	0,0239	0,0873	0,2764	0,9608	2,9666	4,4901
	0,75		0,0079	0,0258	0,0911	0,2833	0,9722	2,9763	4,4929
	0,85		0,0088	0,0275	0,0947	0,2901	0,9835	2,9859	4,4958
	0,95		0,0096	0,0292	0,0983	0,2967	0,9945	2,9953	4,4986
	1,05		0,0104	0,0308	0,1017	0,3032	1,0054	3,0046	4,5014
	1,15		0,0111	0,0323	0,1051	0,3096	1,0161	3,0139	4,5041
Vapor metálico branco quente ~	1,25		0,0118	0,0338	0,1083	0,3158	1,0267	3,0230	4,5068
	1,35		0,0125	0,0353	0,1115	0,3220	1,0371	3,0319	4,5095
	1,45		0,0132	0,0367	0,1147	0,3280	1,0473	3,0408	4,5122
	1,55		0,0138	0,0381	0,1178	0,3339	1,0575	3,0496	4,5148
	1,65		0,0145	0,0395	0,1208	0,3398	1,0674	3,0582	4,5174
	1,75		0,0151	0,0408	0,1238	0,3455	1,0773	3,0668	4,5200
	1,85		0,0157	0,0421	0,1267	0,3512	1,0870	3,0753	4,5225
	1,95		0,0163	0,0434	0,1295	0,3568	1,0966	3,0836	4,5250
	2,05		0,0169	0,0446	0,1324	0,3623	1,1060	3,0919	4,5275
	2,15		0,0174	0,0459	0,1352	0,3677	1,1154	3,1001	4,5299
Vapor metálico luz do dia ~	2,25		0,0180	0,0471	0,1379	0,3731	1,1246	3,1082	4,5323
	2,35		0,0185	0,0483	0,1406	0,3784	1,1338	3,1162	4,5347
	2,45		0,0191	0,0495	0,1433	0,3836	1,1428	3,1241	4,5371
	2,55		0,0196	0,0506	0,1459	0,3888	1,1517	3,1319	4,5395
	2,65		0,0201	0,0518	0,1485	0,3939	1,1605	3,1396	4,5418
	2,75		0,0207	0,0529	0,1511	0,3989	1,1693	3,1473	4,5441

Fonte: CIE, 2010b, p. 73

ANEXO B – ADAPTAÇÃO DA TABELA MESÓPICA CIE 191:2010

Tabela B.1- Valores de L_{mes} em função da luminância fotópica e relação S/P da lâmpada (tabela ampliada derivada da tabela mesópica CIE)

S/P	Luminância Fotópica (cd / m ²)												
	0,10	0,30	0,40	0,50	0,60	0,75	0,80	0,90	1,00	1,20	1,50	2,00	3,00
0,25	0,0705	0,2467	0,3387	0,4322	0,5268	0,6704	0,7186	0,8155	0,9130	1,1093	1,4067	1,9083	2,9265
0,35	0,0750	0,2545	0,3475	0,4419	0,5372	0,6817	0,7301	0,8275	0,9253	1,1221	1,4198	1,9211	2,9367
0,45	0,0793	0,2620	0,3561	0,4514	0,5475	0,6928	0,7415	0,8392	0,9373	1,1346	1,4327	1,9337	2,9468
0,55	0,0834	0,2693	0,3645	0,4606	0,5574	0,7036	0,7525	0,8507	0,9492	1,1470	1,4454	1,9462	2,9568
0,65	0,0873	0,2764	0,3727	0,4697	0,5672	0,7142	0,7634	0,8620	0,9608	1,1591	1,4578	1,9584	2,9666
0,75	0,0911	0,2833	0,3807	0,4786	0,5768	0,7247	0,7741	0,8731	0,9722	1,1710	1,4701	1,9705	2,9763
0,85	0,0947	0,2901	0,3885	0,4873	0,5862	0,7349	0,7846	0,8840	0,9835	1,1827	1,4822	1,9824	2,9859
0,95	0,0983	0,2967	0,3962	0,4958	0,5954	0,7450	0,7949	0,8947	0,9945	1,1943	1,4941	1,9942	2,9953
1,05	0,1017	0,3032	0,4037	0,5042	0,6045	0,7549	0,8051	0,9053	1,0054	1,2057	1,5058	2,0058	3,0046
1,15	0,1051	0,3096	0,4111	0,5124	0,6134	0,7647	0,8150	0,9156	1,0161	1,2169	1,5174	2,0172	3,0139
1,25	0,1083	0,3158	0,4184	0,5205	0,6222	0,7743	0,8249	0,9259	1,0267	1,2279	1,5288	2,0285	3,0230
1,35	0,1115	0,3220	0,4255	0,5284	0,6308	0,7837	0,8345	0,9359	1,0371	1,2388	1,5401	2,0396	3,0319
1,45	0,1147	0,3280	0,4325	0,5362	0,6393	0,7930	0,8441	0,9459	1,0473	1,2495	1,5512	2,0506	3,0408
1,55	0,1178	0,3339	0,4394	0,5439	0,6477	0,8022	0,8535	0,9556	1,0575	1,2601	1,5621	2,0614	3,0496
1,65	0,1208	0,3398	0,4462	0,5515	0,6559	0,8112	0,8627	0,9653	1,0674	1,2706	1,5729	2,0721	3,0582
1,75	0,1238	0,3455	0,4529	0,5590	0,6641	0,8202	0,8719	0,9748	1,0773	1,2809	1,5836	2,0827	3,0668
1,85	0,1267	0,3512	0,4595	0,5664	0,6721	0,8290	0,8809	0,9842	1,0870	1,2910	1,5941	2,0932	3,0753
1,95	0,1295	0,3568	0,4661	0,5737	0,6800	0,8376	0,8898	0,9935	1,0966	1,3011	1,6045	2,1035	3,0836
2,05	0,1324	0,3623	0,4725	0,5808	0,6878	0,8462	0,8986	1,0027	1,1060	1,3110	1,6148	2,1137	3,0919
2,15	0,1352	0,3677	0,4788	0,5879	0,6955	0,8547	0,9072	1,0117	1,1154	1,3208	1,6250	2,1238	3,1001
2,25	0,1379	0,3731	0,4851	0,5949	0,7031	0,8630	0,9158	1,0206	1,1246	1,3305	1,6350	2,1337	3,1082
2,35	0,1406	0,3784	0,4913	0,6018	0,7107	0,8713	0,9243	1,0295	1,1338	1,3401	1,6450	2,1436	3,1162
2,45	0,1433	0,3836	0,4974	0,6087	0,7181	0,8795	0,9326	1,0382	1,1428	1,3496	1,6548	2,1533	3,1241
2,55	0,1459	0,3888	0,5034	0,6154	0,7254	0,8875	0,9409	1,0468	1,1517	1,3589	1,6645	2,1630	3,1319
2,65	0,1485	0,3939	0,5094	0,6221	0,7327	0,8955	0,9491	1,0554	1,1605	1,3682	1,6741	2,1725	3,1396
2,75	0,1511	0,3989	0,5153	0,6287	0,7399	0,9034	0,9572	1,0638	1,1693	1,3774	1,6836	2,1819	3,1473

Fonte: Kostic, Djokic; 2011, p. 419

Tabela B.2 - Tabela de Luminância Fotópica Corrigida- Valores das luminâncias fotópicas corrigidas em função da luminância fotópica relevante e da relação S/P da lâmpada, determinado considerando que as recomendações existentes e os critérios de projeto se baseiam no uso de uma lâmpada de vapor de sódio em alta pressão com uma relação S/P de 0,65.

		Luminância Fotópica (cd/m ²)									
S/P	0,30	0,40	0,50	0,60	0,75	0,80	0,90	1,00	1,20	1,50	2,00
0,25	0,33	0,44	0,54	0,64	0,80	0,85	0,95	1,05	1,25	1,56	2,05
0,35	0,32	0,43	0,53	0,63	0,79	0,84	0,94	1,04	1,24	1,54	2,04
0,45	0,32	0,42	0,52	0,62	0,77	0,82	0,92	1,02	1,23	1,53	2,03
0,55	0,31	0,41	0,51	0,61	0,76	0,81	0,91	1,01	1,21	1,52	2,02
0,65	0,30	0,40	0,50	0,60	0,75	0,80	0,90	1,00	1,20	1,50	2,00
0,75	0,29	0,39	0,49	0,59	0,74	0,79	0,89	0,99	1,19	1,49	1,99
0,85	0,29	0,39	0,48	0,58	0,73	0,78	0,88	0,98	1,18	1,48	1,98
0,95	0,28	0,38	0,48	0,57	0,72	0,77	0,87	0,97	1,17	1,47	1,97
1,05	0,27	0,37	0,47	0,57	0,71	0,76	0,86	0,96	1,16	1,46	1,96
1,15	0,27	0,36	0,46	0,56	0,70	0,75	0,85	0,94	1,14	1,44	1,95
1,25	0,26	0,36	0,45	0,55	0,69	0,74	0,84	0,93	1,13	1,43	1,94
1,35	0,26	0,35	0,45	0,54	0,68	0,73	0,83	0,92	1,12	1,42	1,92
1,45	0,25	0,34	0,44	0,53	0,68	0,72	0,82	0,91	1,11	1,41	1,91
1,55	0,25	0,34	0,43	0,52	0,67	0,71	0,81	0,91	1,10	1,40	1,90
1,65	0,24	0,33	0,42	0,52	0,66	0,71	0,80	0,90	1,09	1,39	1,89
1,75	0,24	0,33	0,42	0,51	0,65	0,70	0,79	0,89	1,08	1,38	1,88
1,85	0,23	0,32	0,41	0,50	0,64	0,69	0,78	0,88	1,07	1,37	1,87
1,95	0,23	0,32	0,41	0,50	0,63	0,68	0,77	0,87	1,06	1,36	1,86
2,05	0,23	0,31	0,40	0,49	0,63	0,67	0,77	0,86	1,05	1,35	1,85
2,15	0,22	0,31	0,39	0,48	0,62	0,66	0,76	0,85	1,04	1,34	1,84
2,25	0,22	0,30	0,39	0,48	0,61	0,66	0,75	0,84	1,04	1,33	1,83
2,35	0,21	0,30	0,38	0,47	0,61	0,65	0,74	0,83	1,03	1,32	1,82
2,45	0,21	0,29	0,38	0,46	0,60	0,64	0,73	0,83	1,02	1,31	1,81
2,55	0,21	0,29	0,37	0,46	0,59	0,64	0,73	0,82	1,01	1,30	1,80
2,65	0,20	0,28	0,37	0,45	0,58	0,63	0,72	0,81	1,00	1,29	1,79
2,75	0,20	0,28	0,36	0,45	0,58	0,62	0,71	0,80	0,99	1,28	1,78

Fonte: Kostic, Djokic; 2011, p. 420

**ANEXO C – REDUÇÃO ESCALONADA EM ILUMINÂNCIA ADOTADA NO
REINO UNIDO – CIE 206:2014**

**Tabela C.1 - Iluminâncias fotópicas na série S, supondo que a
lâmpada de referência para iluminâncias recomendadas é a
lâmpada de sódio em alta pressão**

Classe S	Ilumi- nação fotópica (lux) para $R_a < 60$	Iluminância fotópica (lux) para $R_a \geq 60$ de acordo com a relação S/P da lâmpada										
		Relação S/P										
		0,6	0,8	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	2,2	2,4	2,6
S1	15,0	15,0	14,7	14,4	14,1	13,8	13,5	13,3	13,0	12,8	12,5	12,3
S2	10,0	10,0	9,8	9,5	9,2	9,0	8,7	8,5	8,3	8,1	7,9	7,7
S3	7,5	7,5	7,3	7,1	6,8	6,6	6,4	6,2	6,0	5,9	5,7	5,6
S4	5,0	5,0	4,8	4,6	4,4	4,3	4,1	4,0	3,8	3,7	3,6	3,5
S5	3,0	3,0	2,9	2,7	2,6	2,5	2,3	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9
S6	2,0	2,0	1,9	1,8	1,7	1,6	1,5	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2

NOTA: Para lâmpadas com $R_a \geq 60$, a iluminância fotópica pode ser reduzida com uma relação S/P mais elevada. Estes valores proporcionam iluminância mesópica igual de acordo com o sistema recomendado pela CIE para fotometria mesópica (CIE, 2010b) assumindo um coeficiente médio de luminância de $q_{av} = 0,07 \text{ sr}^{-1}$ (correspondente a uma refletância média de 0,22 quando se assume reflexão difusa) e que a lâmpada de referência para iluminâncias recomendadas é a vapor de sódio em alta pressão.

Fonte: BS 5489-1, 2013, apud CIE, 2014, p. 25 (adaptada)

ANEXO D – MEDIÇÕES COMPLEMENTARES: DADOS ESPECTRAIS E FOTOMÉTRICOS

As medições dos dados espectrais e fotométricos das fontes foram realizadas na Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF). O trabalho foi executado no laboratório do Núcleo de Iluminação Moderna (NIMO) pelo mestrando em engenharia elétrica Lucas H. G. Resende, sob os cuidados do Professor Henrique A. C. Braga. Os equipamentos utilizados para as medições estão descritos no capítulo 3.

A Tabela D.1 foi enviada por Resende (2017) contendo o resumo dos dados medidos. Contudo, devido à diferença significativa encontrada entre os dados fotométricos medidos e os especificados pelos fabricantes, o laboratório NIMO realizou novas medições dos equipamentos enviados. A Tabela D.2 apresenta a segunda medição. Maiores detalhes das medições podem ser vistas em Pereira (2015).

**Tabela D.1 – Dados espectrais e fotométricos das fontes –
Medição 1**

Característica	Lâmpada de sódio em alta pressão	Lâmpada de vapor metálico	Lâmpada LED
Fluxo fotópico (lm)	5056	4285	5511
Fluxo escotópico (lm')	2691	6145	12650
TCC (K)	1919	3575	6427
IRC	10,07	63,45	84,69
S/P	0,532238924	1,434072345	2,295409182

Fonte: Resende, 2017

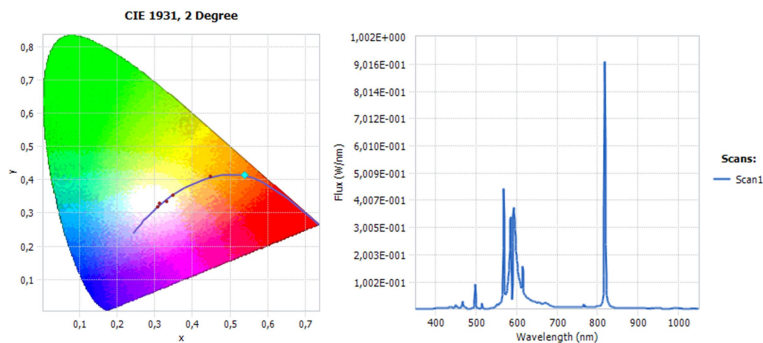
**Tabela D.2 – Dados espectrais e fotométricos das fontes –
Medição 2**

Característica	Lâmpada de sódio em alta pressão	Lâmpada de vapor metálico	Lâmpada LED
Fluxo fotópico (lm)	5102	4315	5325
Fluxo escotópico (lm')	2714	6180	12190
TCC (K)	1918	3572	6392
IRC	9,82	62,89	84,83
S/P	0,531948256	1,43221321	2,289201878

Fonte: Braga, 2018

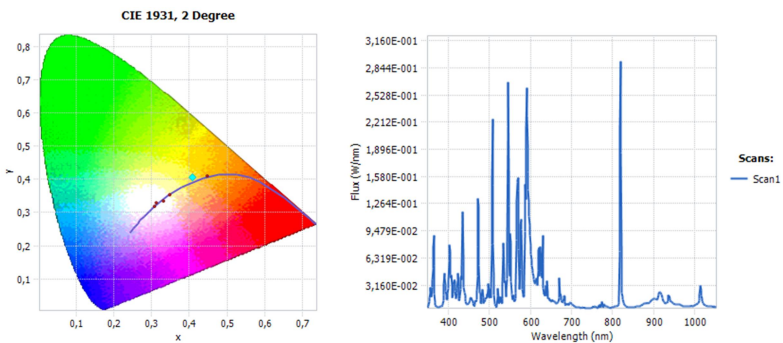
As Figuras D.1 a D.3 apresentam o diagrama de cromaticidade e o gráfico da curva espectral de cada lâmpada ensaiada.

**Figura D.1– Diagrama de cromaticidade e Curva espectral –
Lâmpada vapor de sódio**



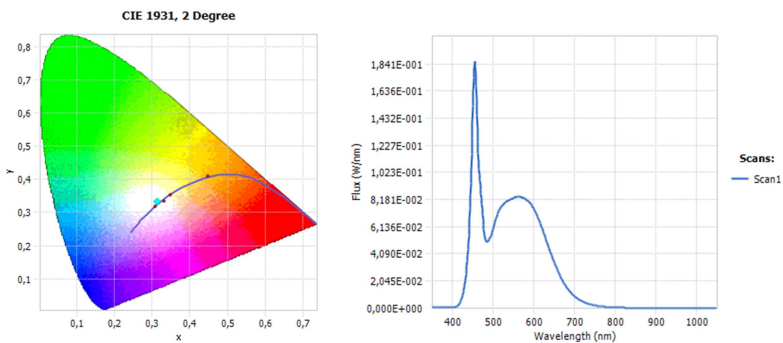
Fonte: Resende, 2017

**Figura D.2 – Diagrama de cromaticidade e Curva espectral –
Lâmpada a vapor metálico**



Fonte: Resende, 2017

**Figura D.3 – Diagrama de cromaticidade e Curva espectral –
Lâmpada LED**



Fonte: Resende, 2017