

DESEMPENHO LUMINOSO E ENERGÉTICO DE LEDS
PARA REFORMAS DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO
DE AMBIENTES DE ESCRITÓRIO

Elisa de Oliveira Beck

Elisa de Oliveira Beck

**DESEMPENHO LUMINOSO E ENERGÉTICO DE LEDS PARA
REFORMAS DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO DE
AMBIENTES DE ESCRITÓRIO**

Linha de pesquisa: Construção Civil – Conforto Ambiental e Eficiência
Energética das Edificações

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Roberto Lamberts,
Ph.D

Coorientador: Prof. Fernando Oscar
Ruttkay Pereira, Ph.D

Florianópolis

2016

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

Beck, Elisa de Oliveira

Desempenho luminoso e energético de LEDs para reformas de sistemas de iluminação de ambientes de escritório / Elisa de Oliveira Beck ; orientador, Roberto Lamberts, coorientador, Fernando Oscar Rutt kay Pereira, 2016.

191 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2016.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. Retrofit. 3. LED. 4. Desempenho luminoso e energético. I. Lamberts, Roberto. II. Pereira, Fernando Oscar Rutt kay. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. IV. Título.

Elisa de Oliveira Beck

**DESEMPENHO LUMINOSO E ENERGÉTICO DE LEDS PARA
REFORMAS DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO DE
AMBIENTES DE ESCRITÓRIO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada perante banca examinadora de trabalho final, outorgando ao aluno o título de Mestre em Engenharia Civil, Área de concentração Construção Civil, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil – PPGEC, da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 30 de setembro de 2016



Prof. Glicério Trichês, Dr.
Coordenador do PPGEC

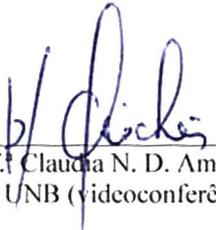


Prof. Roberto Lamberts, PhD.
Orientador

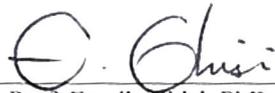


Fernando Oscar Ruttkay
Pereira, PhD. - Coorientador

Banca Examinadora:



Prof. Claudia N. D. Amorim, Dr.^a
UNB (videoconferência)



Prof. Enedir Ghisi, PhD.
UFSC



Prof. Martin Ordenes Mizgier, Dr.
UFSC

AGRADECIMENTOS

Agradeço à vida, por me trazer novamente à academia e me entregar aos caminhos da pesquisa.

Àqueles que me deram seu apoio incondicional durante as ausências, mesmo quando estive lado a lado. Aos meus pais, que deixaram sempre muito claro, que todo o conhecimento que eu buscasse seria eterno e nunca poderia ser-me retirado. À família toda, à minha irmã e a meu irmão, por terem sido meus exemplos de força, superação e escolha de se viver com alegria, apesar dos pesares.

Ao professor e orientador Roberto Lamberts, pela paciência e exemplo profissional, pelos desafios e incentivos dados em momentos precisos durante a construção da dissertação. Pelas excelentes aulas de eficiência energética na pós-graduação, que trouxeram luz sobre o desenvolvimento do tema.

Ao professor e coorientador Fernando O. R. Pereira, que fez despertar, com o brilhantismo em suas aulas no período da graduação, admiração e interesse sobre o tema da iluminação e da responsabilidade do profissional de arquitetura quanto ao domínio técnico das disciplinas de conforto ambiental. Agradeço por ter aceitado orientar-me após o exame de qualificação, proporcionando contribuições fundamentais neste trabalho.

Aos membros da banca, professora Claudia Naves David Amorim, professor Enedir Ghisi e professor Martin Ordenes Mizgier, por aceitarem avaliar este trabalho.

Ao CNPq, pelo apoio financeiro concedido durante o período regular da pós-graduação, que possibilitou dedicação exclusiva ao trabalho acadêmico e à Eletrobras, pelo apoio financeiro e oportunidade de trabalhar como pesquisadora.

Ao LabEEE, que oportunizou a convivência com colegas em diversos níveis de formação, tornando ainda mais rico o processo de pesquisa e as discussões sobre os diversos temas pesquisados, além de oferecer equipamentos e material bibliográfico.

À loja Santa Rita, que apoiou a realização do experimento de campo, disponibilizando espaço físico e equipamentos de iluminação. Ao Rolim, funcionário e excelente profissional, que acompanhou os experimentos de campo e auxiliou em diversas etapas com sua experiência profissional. À OSRAM, que através do Otto auxiliou com LEDs para substituição. Ao Rafael Sanches, que prestou auxílio nas simulações com o DIALux e esclarecimentos sobre as simulações com LEDs.

À Arq. Juliana Iwashita, por aceitar minha entrevista via Skype, discutir e auxiliar quanto às dúvidas nas medições de LEDs. Ao Wellington, por ter apresentado esse contato e incentivado as investigações nos experimentos de campo.

À querida Priscila, bolsista no LabCon, que me treinou para o uso do Photolux, e acompanhou as medições em campo, operando a câmera para obtenção das fotos que foram utilizadas nas análises de ofuscamentos.

À Veri e à Rapha, que sempre mostraram compromisso e competência, me ajudaram a crescer e me fizeram gostar ainda mais da pesquisa. Obrigada pelas orientações e pela amizade!

Aos amigos do LabEEE, por discutirem o tema até durante o cafezinho: Márcio, Vanessa, Mateus, Ana, Rogério e Deivis. Pela companhia no lab da Rê, Karran, Miguel, Michele, Clarissa, Andrea, Juliana, Aline, Bruna, Vanessa, Leonardo e Rupp, que teve tanta paciência com meus papéis invadindo sua mesa.

À turma do LabCon, a Natalia, o Rafa e especialmente a Maíra e o Alê, que foram meus colegas nas disciplinas e se tornaram grandes amigos.

Agradeço a todo esse universo que envolve a UFSC, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), pela qualidade e pela infraestrutura disponibilizadas e por ter me encantado, me desafiado e legado essa imensa vontade de continuar aprendendo.

RESUMO

As edificações têm gastos cada vez maiores com energia e o Brasil está entre os 10 maiores consumidores de energia elétrica, atrás da China e dos Estados Unidos. Edificações brasileiras consomem cerca de 48% da energia elétrica, estimando-se 24% para o uso final em iluminação no setor de serviços. Pesquisas sobre LEDs preveem mais de 50% de redução no consumo em iluminação e 20% de redução global nos gastos com energia elétrica. No entanto, o apelo à eficiência energética de sistemas de iluminação muitas vezes caminha em direção oposta à expectativa de conforto visual. Diante do exposto, o principal objetivo deste trabalho foi investigar o desempenho energético e luminoso de LEDs indicadas à substituição de sistemas convencionais em escritórios. Para isso, foram comparados sistemas de iluminação com fluorescentes T8 e com LEDs tubulares. Foi feita uma investigação experimental com medições em um escritório e utilização de programas de simulação e de cálculo – o DIALux Evo 6.1 e o Photolux 3.2. A substituição direta (1:1) das fluorescentes pelas LEDs teve uma redução de 26% (453 lx para 333 lx) nos níveis médios de iluminância no plano de trabalho medidos em campo. As medições da qualidade da luz e dos ofuscamentos UGR, resultaram em adequadas à NBR 8995-1. Entretanto, não foi possível estabelecer uma relação entre os valores de UGR medidos e simulados. Para a comparação dos dois sistemas por meio de simulação no DIALux, o modelo com LEDs foi ajustado com base nas medições. Com níveis de iluminância equivalentes (500 lx ao final dos ciclos de uso), o consumo de energia elétrica foi 36% menor com LEDs, após 40.000 h de uso. Mesmo com 4 conjuntos de luminárias a mais, as LEDs apresentaram menor densidade de potência instalada (7,82 W/m² para 12,22 W/m² das T8), classes “A” e “B” pelo RTQ-C. Avaliando o custo total, incluindo o consumo e os custos dos equipamentos, o sistema com LEDs inicialmente custa o dobro do sistema com fluorescentes. Contudo, antes da primeira troca das fluorescentes, após 7.000 h de uso (29 meses conforme o perfil de utilização), o sistema com LEDs passa a ser mais econômico. Finalizadas 40.000h (primeira troca das LEDs), chega-se a 26% de economia. A comparação dos VPLs dos sistemas, trazendo todos os desembolsos descontados pela taxa de correção monetária decorrente de inflação ao valor presente, confirmou a vantagem econômica do sistema com LEDs SUBT8. Foi evidente o potencial de economia com as LEDs, entretanto, a não compatibilidade dos ambientes luminosos resultantes da troca realizada em igual proporção possibilita frustrações, prejudicando futuros investimentos nessa tecnologia. É importante que as indicações

de troca incluam esclarecimentos sobre as proporções de lâmpadas de acordo com a relação de quantidade de lumens e dos rendimentos das luminárias e também, que sejam disponibilizados os métodos para as simulações e cálculos de projetos de substituições.

Palavras-chave: Retrofit. LED. Desempenho luminoso e energético.

ABSTRACT

Buildings have increasing energy costs and Brazil is among the 10 largest consumers of electricity, behind China and the United States. Brazilian buildings consume about 48% of the electricity and 24% of consumption of lighting end use in the service sector. LEDs research predicts more than 50% reduction in lighting consumption and 20% overall reduction in energy expenses. However, the call for energy efficiency lighting systems often goes into the opposite direction of the expected visual comfort. Given the above, the main objective of this study was to investigate the energy and luminous performance of LEDs indicated to the replacement of conventional systems in offices. Therefore, lighting systems were compared with T8 fluorescent tubes and LEDs. An experimental investigation was made with measurements in an office and the usage of simulation and calculation programs – DIALux Evo 6.1 and Photolux 3.2. Straight replacement (1:1) of the fluorescent for LEDs had a 26% reduction (453 lx to 333 lx) of the average levels of illuminance on the work plan measured in the field. Measurements of the quality of light and UGR glare indices resulted suitable to the NBR 8995-1 standards. However, it was not possible to establish a relationship between measured and simulated UGR values. To compare the two systems through simulation in DIALux, the model with LEDs was adjusted to the field measurements. With equivalent illuminance levels (500 lx at the end of their life cycle use), the power consumption was 36% lower with LEDs, after 40,000 hours of use. Even with 4 more sets of fixtures, the LEDs had lower installed power density (7.82 W/m² compared to 12.22 W/m² of T8), classes "A" and "B" of the RTQ-C. Assessing the total cost, including consumption and equipment costs, the LED lighting system initially cost twice the fluorescent system. However, before the first exchange of fluorescents, after 7,000 hours of use (29 months according to the usage profile), the LED system becomes more economical. At the end of 40,000h (first exchange of LEDs), it reaches the 26% savings.

The comparison of the NPVs of the systems, bringing all disbursements discounted by the monetary correction rate due to inflation to the present value, confirmed the economic advantage of the system with LEDs SUBT8. The cost savings potential with LEDs were evident, however, the non-compatibility of the luminous environments resulting from the exchange performed in equal proportion enables frustrations, hindering future investments in this technology. It is important that the number of lamps according to the ratio of lumens and the incomes of fixtures are

included in the exchanges information. Also, the methods for the simulations or calculations of replacement projects need to be available.

Keywords: Retrofit. LED. Luminous and energy performance.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Consumo de energia elétrica global.....	24
Figura 2. Consumo energético brasileiro	25
Figura 3. Potencial de conservação de energia por usos finais no Brasil	26
Figura 4. Evolução da pesquisa e do desenvolvimento para iluminação LED (SSL – Solid State Lighting) e tecnologias convencionais (fluorescentes tubulares)	28
Figura 5. Diagrama de Kruithof.....	38
Figura 6. Distribuição do fecho luminoso e dissipação de calor entre diferentes fontes de iluminação	59
Figura 7. Ângulo e fecho luminoso para LEDs tubulares e fluorescente. A área amarela indica a frente da lâmpada e, portanto, a direção da luz emitida. A área cinza indica a parte de trás da lâmpada, opaca....	59
Figura 8. LED tubular desmontada.....	60
Figura 9. Exemplo da estrutura do LED azul com conversão em fósforo para luz branca e outros métodos	61
Figura 10. História da iluminação artificial e evolução dos LEDs.....	61
Figura 11. Comparação de custo ao longo do tempo estimada para fluorescentes T8 e LEDs utilizadas em escritórios.....	63
Figura 12. Manutenção de lumens medidos e previstos para o mesmo equipamento LED sob três condições diferentes de temperatura. 64	
Figura 13. Características da depreciação de lumens para LEDs e fluorescentes (A) Níveis de iluminância atingidos em relação ao nível recomendado (B).....	65
Figura 14. Níveis de iluminância atingidos em relação ao nível recomendado (B).....	66
Figura 15. (A) Níveis de iluminação utilizando fatores de manutenção baseados em 50% do tempo de vida projetado (50% de 50.000 horas) e (B) Níveis de iluminação baseados em 100% do tempo de vida projetado (50.000 horas).	67
Figura 16. Influência do grau de incerteza +/- 2% sobre a projeção do fator L70, baseado em medições de 6.000 horas	68
Figura 17. Transição abrupta de claro-escuro provocada sobre as paredes....	70
Figura 18. Ilustração do sistema LED: características de distribuição.....	71
Figura 19. Distribuição da iluminação para LEDs Luxeon Rebel 60° e 10,5°	72
Figura 20. Comparação dos níveis de dimerização para o ângulo de 60° e contraste de 0,05 e 0,3: as regiões brancas têm nível máximo de dimerização, de acordo com os respectivos contrastes admitidos	73
Figura 21. Localização do ambiente escolhido	78
Figura 22. Posição da sala na planta baixa do edifício com visão interna do ambiente escolhido.....	79
Figura 23. Levantamento do ambiente de escritório	80
Figura 24. Indicação de substituição de fluorescente T8 por LED	82
Figura 25. Instalação dos conjuntos.....	83

Figura 26. Luxímetro T10	84
Figura 27. Espectrômetro UPRtek MK350S	84
Figura 28. Espectrômetro ALTA II utilizado para obter as refletâncias	85
Figura 29. Câmera Canon EOS 60D e equipamentos complementares	85
Figura 30. Procedimentos de medição com o luxímetro	87
Figura 31. Procedimentos de medição com o ALTA II – exemplo para uma placa de forro no local	89
Figura 32. Configurações para “Modo C” e demais parâmetros.....	91
Figura 33. Valores de exposição EV utilizados pelo Photolux para obter as iluminâncias da cena com a câmera Canon EOS	91
Figura 34. Procedimentos da etapa realizada em campo	92
Figura 35. Configurações para a escala de luminâncias	93
Figura 36. Interface de cálculos para iluminâncias e UGR no Photolux 3.2 ..	93
Figura 37. Análise do nível de iluminância para área de tarefa definida	94
Figura 38. Análise do nível de iluminância sem áreas de tarefa definidas	95
Figura 39. Avaliação da distribuição da luz.....	95
Figura 40. Planta baixa do ambiente com mobiliário e planta de forro	108
Figura 41. Malha de verificação do nível de iluminância considerando restrições pelo <i>layout</i>	109
Figura 42. Níveis de iluminância para fluorescentes tubulares T8	110
Figura 43. Níveis de iluminância para as LED SUBT8.....	111
Figura 44. Níveis mais baixos de iluminância no entorno imediato para fluorescentes tubulares T8	113
Figura 45. Comparação entre os níveis médios de iluminação do ambiente utilizado fluorescentes FL T8 e LED SUBT8	114
Figura 46. Áreas de tarefa e entorno imediato utilizado fluorescentes FL T8 e LED SUBT8	115
Figura 47. UGR nas estações de trabalho em uso para o sistema com fluorescentes T8.....	120
Figura 48. UGR nas estações de trabalho em uso para o sistema com LEDs SUBT8	121
Figura 49. Modelo com inserção das luminárias, mobiliário e materiais de acabamento	124
Figura 50. Malha de superfícies de cálculo elaborada a partir dos pontos de medição no local	127
Figura 51. Resultado da configuração das linhas isográficas e escala de níveis de iluminância.....	128
Figura 52. Planta com as curvas isolux geradas com sistema de iluminação utilizando fluorescentes T8.....	131
Figura 53. Perspectiva do ambiente com as curvas isolux geradas por sistema de iluminação com fluorescentes T8.....	132
Figura 54. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para a mesma malha de pontos do sistema de iluminação com fluorescentes T8.....	133

Figura 55. Comparação entre os níveis de iluminância médios \bar{E}_m , máximos e mínimos para a mesma malha de pontos medidos e simulados do sistema de iluminação com fluorescentes T8	133
Figura 56. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos nas áreas de tarefa do sistema de iluminação com fluorescentes T8	134
Figura 57. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos no entorno imediato do sistema de iluminação com fluorescentes T8	135
Figura 58. Planta com as curvas isolux geradas com sistema de iluminação utilizando LED SUBT8	136
Figura 59. Perspectiva do ambiente com as curvas isolux geradas por sistema de iluminação com LED SUBT8	136
Figura 60. Níveis de iluminância medidos e simulados para a mesma malha de pontos do sistema de iluminação com LEDs SUBT8	137
Figura 61. Comparação entre os níveis de iluminância médios \bar{E}_m , máximos e mínimos medidos e simulados para a mesma malha de pontos do sistema de iluminação com LEDs SUBT8	138
Figura 62. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos nas áreas de tarefa do sistema de iluminação com LEDs SUBT8	138
Figura 63. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos no entorno imediato do sistema de iluminação com LEDs SUBT8	139
Figura 64. Imagens com curvas isolux geradas com sistema de iluminação utilizando LED SUBT8 com rendimento da luminária igual a 100% 142	
Figura 65. Níveis de iluminância medidos e simulados para o sistema de iluminação com LEDs ajustado para rendimento da luminária igual a 100%	143
Figura 66. Comparação entre os níveis de iluminância médios, máximos e mínimos medidos e simulados para o sistema de iluminação com LEDs SUBT8 com rendimento da luminária igual a 100%	143
Figura 67. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos nas áreas de tarefa do sistema de iluminação com LEDs SUBT8 com rendimento da luminária igual a 100%	144
Figura 68. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos no entorno imediato do sistema de iluminação com LEDs SUBT8 com rendimento da luminária igual a 100%	145
Figura 69. Cálculo do UGR utilizando o DIALux Evo 6.1	146
Figura 70. Comparação dos valores para UGR medidos e simulados	147
Figura 71. Resultado da manutenção do fluxo luminoso para as fluorescentes T8 e para as LEDs SUBT8	151
Figura 72. Superfícies de cálculo para os sistemas com as fluorescentes T8 e as LED SUBT8	153

Figura 73. Resultado dos níveis de iluminância e densidade de potência instaladas nos sistemas de iluminação com fluorescentes T8 e LEDs SUBT8	154
Figura 74. Curvas isolux para fluorescentes e LEDs, no início e final dos seus ciclos	156
Figura 75. Relação do nível de iluminância e depreciação do fluxo luminoso das lâmpadas para cada sistema	157
Figura 76. Resultados de cálculo com o DIALux Evo 6.1 para fluorescentes T8 e LEDs SUBT8	159
Figura 77. Relação de consumo de energia e custo dos sistemas de iluminação com fluorescentes T8 e LEDs SUBT8 no período de 40.000h ..	161

LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Resumo dos critérios para projetos de iluminação - Seção 4 da NBR 8995-1 (ABNT, 2013).....	47
Quadro 2. Resumo dos Requisitos Técnicos Referentes a Eficiência Energética de acordo com o RTQ para Lâmpadas LED (2014).....	56
Quadro 3. Indicadores utilizados na comparação entre as medições e simulações.....	100
Quadro 4. Indicadores utilizados na comparação do desempenho luminoso, energético e dos custos dos sistemas.....	105
Quadro 5. Resultados de medição e comparação com a especificação do fabricante para IRC (<i>Ra</i>) e TCC.....	117
Quadro 6. Resultados de medição e comparação com a especificação do fabricante para os espectros luminosos.....	118
Quadro 7. Dados das luminárias.....	123
Quadro 8. Dados do perfil de utilização.....	125
Quadro 9. Dados da lâmpada fluorescente T8.....	129
Quadro 10. Dados da lâmpada LED SUBT8.....	130
Quadro 11. Parâmetros de inserção no DIALux Evo 6.1 para simulação dos sistemas de iluminação: resultado da relação dos fatores de manutenção e fluxo luminoso das lâmpadas.....	152
Quadro 12. Resultados das imagens HDR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 e com LEDs SUBT8.....	181

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Limite máximo aceitável de densidade de potência de iluminação (DPI _L) para o nível de eficiência pretendido, conforme Método da área do edifício (RTQ-C)	43
Tabela 2. Limite máximo aceitável de densidade de potência de iluminação (DPI _L) para o nível de eficiência pretendido – Método das atividades do edifício (RTQ-C).....	43
Tabela 3. Valores de densidade de potência instalada em W/m ² conforme a iluminância de projeto.....	46
Tabela 4. Resumo de ambientes, tarefas ou atividades presentes em edifícios de escritórios conforme NBR 8995-1 (ABNT, 2013)	52
Tabela 5. Ambientes presentes em edifícios de escritórios e respectivos níveis de iluminância conforme RTQ-C (2010) e NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013).....	53
Tabela 6. Definição da malha	86
Tabela 7. Refletâncias de referência para o papel Ripax	89
Tabela 8. Resumo dos materiais e acabamentos das superfícies utilizados .	122
Tabela 9. Resumo dos parâmetros de cálculo de consumo e custo iniciais dos sistemas de iluminação.....	160
Tabela 10. Valor Presente Líquido buscando comparação dos custos dos sistemas	163
Tabela 11. Consumo e custo do sistema de iluminação com fluorescentes T8.....	189
Tabela 12. Consumo e custo do sistema de iluminação com LEDs SUBT8	191

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	23
1.1	APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	23
1.2	OBJETIVOS	30
1.2.1	Objetivo geral.....	30
1.2.2	Objetivos específicos	30
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	31
2	REVISÃO DE LITERATURA	33
2.1	INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO.....	34
2.2	INDICADORES DE CONFORTO VISUAL DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO.....	36
2.3	PADRÕES REGULADORES PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO.....	39
2.3.1	Limites para os indicadores de eficiência energética dos sistemas de iluminação.....	39
2.3.2	Regulamento Técnico da Qualidade para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas.....	41
2.3.3	ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013	46
2.3.4	Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED.....	55
2.4	DIALUX PARA SIMULAÇÃO E CÁLCULOS DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL	57
2.5	SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO LED	58
2.5.1	Depreciação da quantidade de lumens e vida útil.....	64
2.5.2	Substituição de sistemas existentes por LEDs.....	69
2.5.3	Aplicação dos LEDs em ambientes de escritório	70
2.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA.....	74
3	MÉTODO	77
3.1	PESQUISA DE CAMPO	77
3.1.1	Escolha do ambiente	78
3.1.2	Levantamento das dimensões do ambiente	80
3.1.3	Escolha dos conjuntos de luminárias e lâmpadas	80
3.1.4	Instalações.....	82
3.1.5	Instrumentos de medição.....	83
3.1.5.1	Luxímetro	83
3.1.5.2	Espectrômetro UPRtek MK350S	84
3.1.5.3	Espectrômetro de refletância ALTA II.....	85
3.1.5.4	Câmera Canon EOS 60D.....	85
3.1.6	Procedimentos de medição.....	85
3.1.6.1	Preparação do ambiente para medição	86
3.1.6.2	Níveis de iluminância.....	86

3.1.6.3	Índice de Reprodução de Cor, Temperatura de Cor Correlata e Espectro.....	88
3.1.6.4	Refletâncias das superfícies	88
3.1.6.5	Luminâncias – Câmera Canon EOS 60D	90
3.2	ANÁLISE DE CONFORTO VISUAL.....	94
3.2.1	Quantidade de luz	94
3.2.1.1	Área de tarefa definida.....	94
3.2.1.2	Escritório de planta livre	94
3.2.2	Distribuição da luz	95
3.2.3	Ofuscamentos.....	96
3.2.3.1	Luminâncias	96
3.2.3.2	Índice de Ofuscamento Unificado - UGR	96
3.2.4	Qualidade da luz	97
3.3	PROGRAMA DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO.....	97
3.3.1	DIALux Evo 6.1	98
3.3.1.1	Modelo	98
3.3.1.2	Perfil de utilização dos sistemas.....	99
3.3.1.3	Superfícies de cálculo	99
3.3.1.4	Parâmetros de cálculo	99
3.3.2	Ajuste dos modelos com LEDs	100
3.4	ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E ECONÔMICO	101
3.4.1	Eficiência energética dos sistemas	101
3.4.1.1	Densidade de potência instalada	102
3.4.1.2	Fluxo luminoso da lâmpada	102
3.4.1.3	Eficácia luminosa da lâmpada.....	102
3.4.1.4	Eficácia luminosa do sistema	102
3.4.1.5	Eficiência da luminária (rendimento).....	102
3.4.2	Custo dos sistemas	103
3.4.2.1	Consumo	103
3.4.2.2	Consumo por área	103
3.4.2.3	Custo	103
3.4.2.4	Indicadores de eficiência, custos e de conforto visual	104
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	107
4.1	DIMENSÕES E MATERIAIS DE ACABAMENTO DO AMBIENTE.....	107
4.2	NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA E UNIFORMIDADE.....	108
4.2.1	Malha de pontos para verificação da iluminância.....	108
4.2.2	Níveis de iluminância com lâmpadas fluorescentes tubulares T8	109
4.2.3	Níveis de iluminância com lâmpadas LED SUBT8	111
4.2.4	Uniformidade do sistema com fluorescentes T8	112

4.2.5	Uniformidade do sistema com LEDs SUBT8	113
4.2.6	Comparação dos níveis de iluminância medidos.....	114
4.3	ÍNDICES DE REPRODUÇÃO DE COR E TEMPERATURAS DE COR CORRELATA.....	116
4.4	ESPECTROS	118
4.5	OFUSCAMENTOS	119
4.5.1	UGR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 ...	119
4.5.2	UGR para o sistema de iluminação com LEDs SUBT8	120
4.6	SIMULAÇÕES COM O PROGRAMA DIALUX EVO 6.1.....	121
4.6.1	Parâmetros fixos.....	122
4.6.1.1	Materiais de acabamento	122
4.6.1.2	Luminárias	123
4.6.1.3	Perfil de utilização e fator de manutenção.....	124
4.6.1.4	Superfícies de cálculo.....	126
4.6.1.5	Escala dos níveis de iluminância	127
4.6.2	Parâmetros variáveis	128
4.6.2.1	Fluorescente tubular T8.....	128
4.6.2.2	LED SUBT8.....	130
4.6.3	Análise da iluminância e uniformidade dos sistemas medidos e simulados	131
4.6.3.1	Fluorescentes T8	131
4.6.3.2	LEDs SUBT8	135
4.6.4	Ajuste do modelo para o sistema de iluminação com LEDs SUBT8	141
4.6.5	Análise de ofuscamentos medidos e calculados com o DIALux Evo 6.1	145
4.7	ANÁLISE DE DESEMPENHO LUMINOSO, ENERGÉTICO E ECONÔMICO DOS SISTEMAS.....	148
4.7.1	Parâmetros de cálculo	149
4.7.1.1	Materiais de acabamento	149
4.7.1.2	Lâmpadas, luminárias, fator de manutenção e perfil de utilização	149
4.7.1.3	Superfícies de cálculo e escala dos níveis de iluminância.....	152
4.7.2	Níveis de iluminância e depreciação do fluxo luminoso	154
4.7.3	Ofuscamentos.....	158
4.7.4	Parâmetros de consumo e custo dos sistemas de iluminação	160
4.7.5	Relação do consumo de energia e custo	160
5	CONCLUSÃO.....	165
5.1	MEDIÇÕES EM CAMPO	166
5.2	SIMULAÇÕES COM O DIALUX EVO 6.1	167
5.2.1	Desempenho energético e luminoso dos sistemas	167
5.2.2	Custos dos sistemas.....	169
5.3	CONSIDERAÇÕES GERAIS	169

5.4	LIMITAÇÕES	170
5.5	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	171
	REFERÊNCIAS	173
	APÊNDICE A – IMAGENS HDR.....	181
	APÊNDICE B – PARÂMETROS DE CÁLCULO DE CONSUMO E CUSTOS DO SISTEMA COM FLUORESCENTES T8	189
	APÊNDICE C – PARÂMETROS DE CÁLCULO DE CONSUMO E CUSTOS DO SISTEMA COM LEDS SUBT8.....	191

1 INTRODUÇÃO

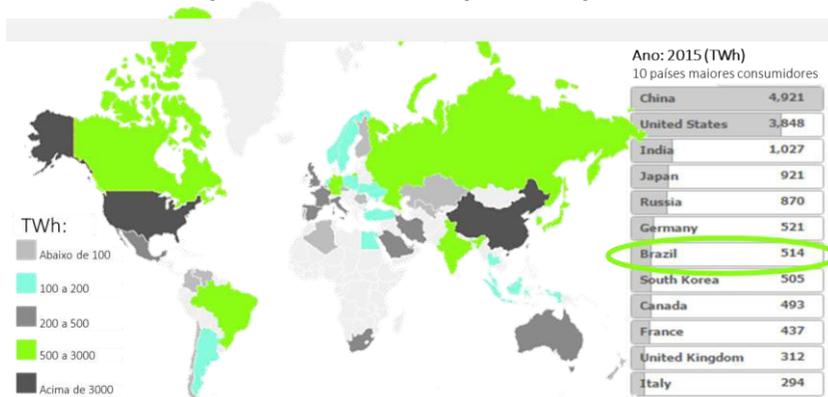
1.1 APRESENTAÇÃO DO PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

Em relatório das Nações Unidas intitulado *World Population Prospects, The 2012 Revision* (UNITED NATIONS, 2013), estima-se que a população mundial, hoje de 7 bilhões de pessoas, será 9,6 bilhões em 2050. O crescimento demográfico, somado à migração de áreas rurais para as áreas urbanas, fará com que a população que vive em cidades, hoje de 3,5 bilhões de pessoas, seja de 6,3 bilhões em 2050. No Brasil, até 1940, apenas um terço dos brasileiros vivia nas cidades, enquanto em 1980 todas as regiões brasileiras já possuíam a maioria dos habitantes vivendo em centros urbanos. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2011), do total de 67,5 milhões de domicílios existentes no país, mais de 85% pertencem a áreas urbanas. Esses domicílios reúnem 84,4% da população brasileira.

Diante da crescente aglomeração urbana, destacam-se o aumento do consumo de energia e o aumento dos gastos com a geração, a transmissão e o fornecimento para suprir essa demanda. Instituições internacionais e nacionais apontam a necessidade de tornar mais eficientes e sustentáveis as cidades que ainda tendem a continuar crescendo e atraindo a população. Em documento intitulado *Energy Statistics Manual* (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY et al. 2010) destaca-se que desde 1973 os setores de edificações comerciais, públicas e residenciais tiveram um aumento significativo no consumo de energia elétrica. Estima-se que no período dos últimos 30 anos a participação dos setores das edificações no consumo total de energia elétrica cresceu de 38% para 52%.

O Brasil está classificado entre os dez países que mais consomem energia elétrica no mundo, atrás da China e dos Estados Unidos (GLOBAL ENERGY STATISTICAL YEARBOOK 2016, 2015). Em 2013 o Brasil ocupava a 8ª posição; no entanto, em 2014 passou a ser o 7º colocado em consumo de energia elétrica, mantendo-se nessa posição em 2015. O consumo global de energia elétrica é ilustrado na Figura 1.

Figura 1. Consumo de energia elétrica global



Fonte: Adaptada de Global Energy Statistical Yearbook 2016 (2015)

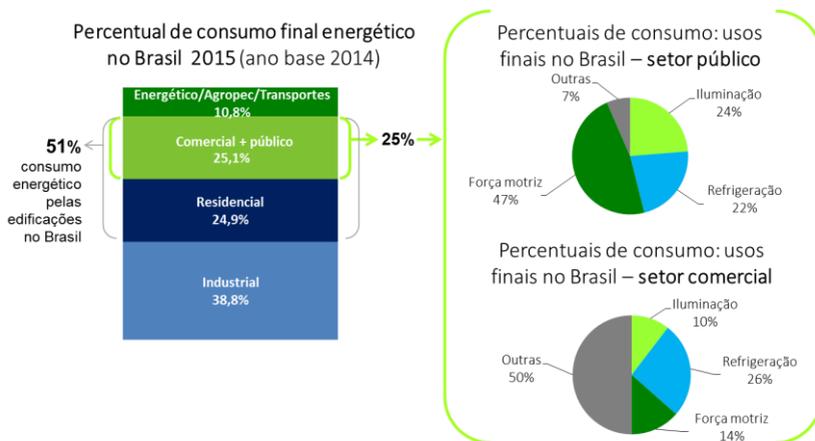
De acordo com Santamouris e Dascalaki (2002), edificações comerciais de escritórios estão entre os edifícios com o maior consumo de energia, entre 100-1000 kWh/m².ano, de acordo com a sua localização geográfica, função, equipamentos e operação, tipo de envoltória, uso de sistemas de condicionamento de ar, iluminação, etc.

Conforme os dados apresentados pelo Balanço Energético Nacional 2015 – Relatório Síntese – ano-base 2014 (BRASIL, 2015a), as edificações residenciais, comerciais e do setor público no Brasil são responsáveis por 51% do consumo de energia elétrica. A fonte principal de energia consumida no setor comercial e público é a eletricidade (90% da energia total consumida no setor).

A partir dessa fonte, os consumos mais relevantes nesse setor (comercial e público) são voltados à iluminação, à refrigeração e à força motriz. No setor público do país a iluminação equivale a 24% do consumo de energia elétrica e 10% no setor comercial (BRASIL, 2007). A Figura 2 mostra os percentuais energéticos brasileiros de consumo.

Nesse sentido, pesquisas sobre eficiência energética são fundamentais na busca da redução do consumo de energia e fazem parte, atualmente, do planejamento do setor energético na avaliação de estratégias de expansão e oferta para o atendimento da demanda de energia, tanto no Brasil quanto no exterior.

Figura 2. Consumo energético brasileiro

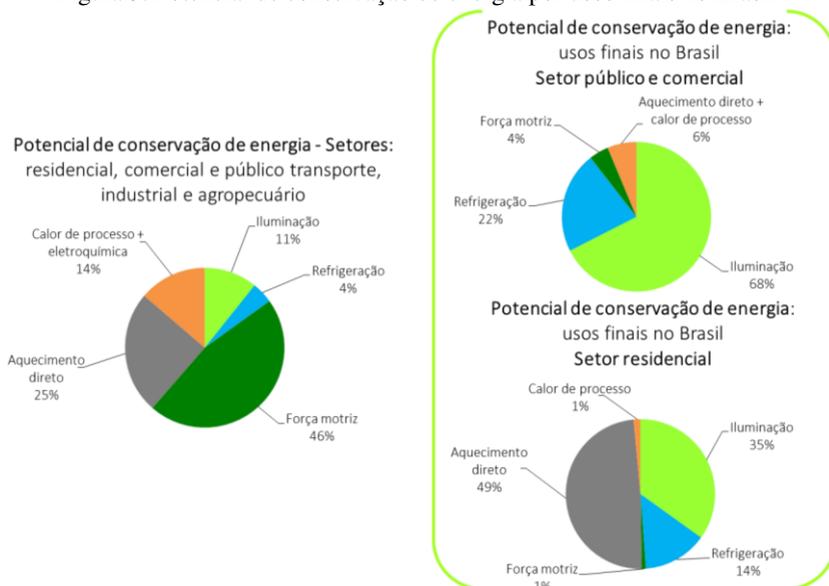


Fonte: Adaptada de (BRASIL, 2007, 2015)

O potencial de economia de energia a partir de medidas de eficiência energética faz parte de estudos do Ministério de Minas e Energia e é computado nos resultados finais das projeções de demanda de energia. Os ganhos com a eficiência energética são observados em relação à diferença entre a projeção do consumo final de energia mantendo os padrões tecnológicos e de uso da energia para o ano-base e a projeção desse consumo assumindo os ganhos com eficiência energética para cada setor de consumo e usos finais. Para o cálculo de potenciais de conservação de energia, utiliza-se a ferramenta disponível no Balanço de Energia Útil – BEU (BRASIL, 2015b), mais recente. A Figura 3 mostra o potencial de conservação de energia calculado com essa ferramenta com ano-base 2014.

Notoriamente, a força motriz se destaca no potencial de conservação energética, dentre todos os consumos. Entretanto, é possível identificar no setor público e comercial o potencial expressivo de conservação de energia para o uso final de iluminação, correspondente a 68% das projeções apresentadas pela Nota Técnica DEA 12/16 (BRASIL, 2016).

Figura 3. Potencial de conservação de energia por usos finais no Brasil



Fonte: Elaborado com base nos dados da Nota Técnica DEA 12/16 (BRASIL, 2016)

Diante desse quadro, políticas e regulamentos com o objetivo de reduzir o consumo de energia são importantes aliados para viabilizar estratégias que sejam econômica e socialmente compatíveis com os diversos cenários de desenvolvimento em cada país ou região. Um levantamento sobre a situação dessas políticas/regulamentos, em pesquisa apresentada pelo *World Energy Council* (2013) apresentou a avaliação de 85 países e economias representativas para as diferentes regiões do mundo que, juntos, somam 91% do consumo energético global.

De modo geral, para as novas edificações, busca-se implementar estratégias que resultem em edifícios com baixo consumo de energia. Segundo os dados apresentados pelo *World Energy Council*, países europeus, por exemplo, possuem como meta estabelecida para 2020 que novos edifícios deverão ter consumo de energia muito baixo ou próximo de zero: “*Nearly Zero Energy Building (nZEB)*” (WORLD ENERGY COUNCIL, 2013). Limites para consumos em edificações conforme o uso e sistemas de condicionamento de ar são predominantes e representam, em média, cerca de 60% das medidas implementadas para a redução de consumo de energia nas edificações em diversos países e continentes, por meio de rotulagens, etiquetas e certificações. O

percentual restante aplica-se a medidas reguladoras para consumo de energia de equipamentos e sistemas de iluminação. Além disso, a referida pesquisa aponta que a distribuição dessas medidas reguladoras conforme o uso final é bastante semelhante entre os países analisados, contando com um percentual aproximado de 10% a 25% do total destinado para regular o uso final em iluminação nas edificações.

Considerando-se a importância de conhecer o nível de eficiência energética do edifício, procura-se estabelecer critérios para manter padrões de qualidade. No Brasil, há regulamentos para a eficiência energética e normativas para a quantidade e a qualidade da iluminação. Nessa ordem, o Regulamento Técnico da Qualidade para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas – RTQ-C (BRASIL, 2010) – classifica as edificações quanto a sua eficiência energética, sendo o sistema de iluminação avaliado com os sistemas de condicionamento de ar e envoltória. Para medidas de quantidade e qualidade de iluminação dos ambientes, o Brasil adota a ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 (2013).

O RTQ-C avalia o sistema de iluminação por meio de pré-requisitos específicos e métodos de procedimento para a determinação da eficiência. Os pré-requisitos específicos utilizam critérios de controle do sistema de iluminação que consideram a divisão de circuitos, a contribuição da luz natural e o desligamento automático. Para o procedimento da avaliação, utiliza-se o método da área do edifício ou o método das atividades.

A NBR 8995-1 determina, entre outras medidas, como devem ser tratados os níveis de iluminância de acordo com a atividade desempenhada em cada ambiente. Além disso, estabelece as condições e o procedimento para se considerar a iluminação de tarefa nos projetos de iluminação.

Dubois e Blomsterberg (2011) assumem um potencial de economia de energia de 45% a 65% para os sistemas de iluminação artificial em edifícios de escritório, considerando estratégias como a iluminação de tarefa e o controle do sistema para iluminação conforme a necessidade. Esses itens são contemplados pela NBR 8995-1 e pelo RTQ-C, respectivamente.

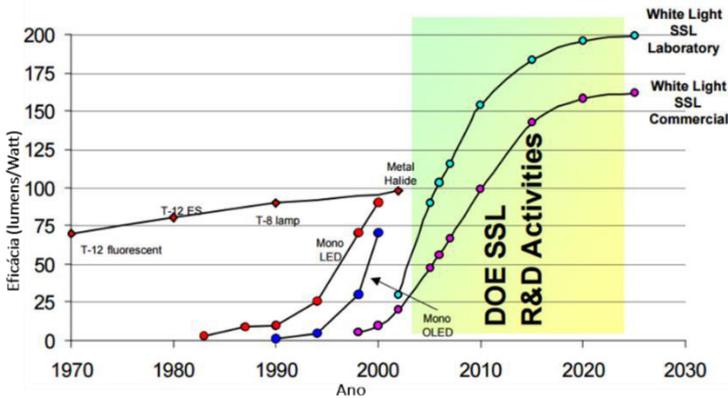
Um sistema de iluminação engloba diversos componentes que vão desde os equipamentos, como a tecnologia empregada, até as características do ambiente em que está inserido. A utilização de equipamentos mais eficientes é um dos fatores determinantes para se atingir um padrão de eficiência compatível com o desenvolvimento tecnológico, considerando também seu impacto no custo de instalação.

Portanto, uma avaliação completa deve considerar não apenas o custo inicial de instalação, mas também o custo durante a operação do edifício.

Equipamentos mais eficientes estão diretamente relacionados à redução das densidades de potência instaladas para iluminação artificial. Diante disso, LEDs vêm sendo o foco de pesquisas avançadas devido ao seu potencial como fontes de luz de grande eficiência luminosa.

Os primeiros LEDs de espectro visível e monocromático (vermelho) surgiram em 1962, de baixa intensidade luminosa e sem aplicação para iluminação. Seu desenvolvimento foi lento até a década de 1980, quando se obtiveram melhores performances com LEDs verdes, ainda bastante inferiores às tecnologias utilizadas para iluminação. De 1980 a 1990 o LED azul possibilitou gerar LEDs brancos por meio de conversão em fósforo. Uma eficácia crescente e acelerada vem sendo observada a partir de 2000, conforme mostra a Figura 4, relacionada à pesquisa e ao desenvolvimento e voltada à iluminação com LEDs (SSL – Solid State Lighting).

Figura 4. Evolução da pesquisa e do desenvolvimento para iluminação LED (SSL – Solid State Lighting) e tecnologias convencionais (fluorescentes tubulares)



Fonte: Adaptada de Brodrick (2005)

Comparando-se com as outras tecnologias, como as fluorescentes T8, percebe-se que o alto investimento sobre a pesquisa com LEDs propiciou um avanço notório, entre os anos 2000 e 2010, na eficácia luminosa, prevendo-se atingir, entre 2020 e 2030, 200 lm/W. A partir daí, torna-se mais estável a eficácia para LEDs, que permanece nos patamares de 160 lm/W para LEDs comercializados e 200 lm/W atingidos em laboratórios de pesquisa.

De acordo com De Almeida et al. (2014) a eficácia atingida de 200 lm/W significa uma redução estimada de mais de 50% no consumo de iluminação, com uma redução global de até 20% de energia elétrica. Além da maior eficiência das LEDs, os autores destacam vantagens como: menor emissão de calor; redução de consumo de energia pelo uso de condicionamento de ar; menores gastos com manutenção e possibilidade de projetos de iluminação inovadores.

Diante dessa perspectiva, vimos acompanhando um grande apelo por parte da indústria do setor de iluminação em promover a substituição em larga escala das fontes tradicionais pelos LEDs. Em reportagens encontradas no sítio Procel Info (DARLAN ALVARENGA, 2015), a Abilux anunciou dez medidas promovendo o uso de LEDs. Entre elas, a redução da carga tributária para LEDs, a abertura de linhas de financiamento para projetos de iluminação eficientes e a incorporação de LEDs no programa Minha Casa, Minha Vida, com capacidade de gerar até 10% de economia no consumo de energia.

Também no Procel Info (PORTAL HOSPITAIS BRASIL, 2016; PROCEL INFO, 2016), reportaram-se investimentos em substituições de lâmpadas fluorescentes por modelos LED. Como exemplos desse procedimento, têm-se o Centro Universitário da Fundação Educacional de Barretos (UNIFEB), com 10.455 fluorescentes substituídas por LEDs; o complexo hospitalar da Fundação Faculdade Regional de Medicina de São José do Rio Preto (Funfarme), com 16.042 substituições. Esses exemplos reforçam a adoção dessa prática.

Essa aplicação dos LEDs, realizada em larga escala sob forma de substituição de tecnologia, utiliza, muitas vezes, as mesmas condições de instalação e distribuição das luminárias tradicionais, como as fluorescentes tubulares. Ambientes de escritórios, principalmente, vêm sendo submetidos a esse tipo de reforma e há diversas pesquisas apontando os ganhos e as perdas obtidas tanto em eficiência e economia quanto em eficácia e qualidade advindas desse procedimento, como exemplificado por Ryckaert et al. (2012). Ao realizar a substituição de fluorescentes tubulares por LEDs tubulares mantendo as mesmas luminárias, os resultados apontaram problemas tanto na quantidade de iluminação quanto na qualidade da distribuição e da uniformidade, mostrando-se uma prática inadequada.

Como observado na pesquisa de Pessoa e Ghisi (2015), avaliando a eficiência luminosa dos produtos disponíveis no mercado brasileiro, LEDs tubulares atingiram entre 50 lm/W e 110 lm/W. Entretanto, cabe ressaltar que, além da análise sobre a eficiência dos equipamentos, é importante avaliar a eficácia da sua utilização nos ambientes e seu

comportamento em termos da qualidade de distribuição da iluminação no seu interior.

O apelo à eficiência energética de um sistema de iluminação, muitas vezes, caminha em direção oposta à expectativa de qualidade e conforto visual. A análise da eficiência de um sistema considerando indicadores de qualidade pode dar subsídios ao equilíbrio entre esses dois importantes condicionantes para os projetos de iluminação ou, ao menos, evitar distorções que levem a excessos em quantidade ou faltas em qualidade.

De acordo com o exposto, mostra-se importante investigar a eficiência energética dos sistemas de iluminação que visam à substituição de fluorescentes por LEDs, considerando-se parâmetros de conforto visual. Para isso, serão comparados, por meio de experimento realizado em campo e simulação, sistemas de iluminação para ambientes de escritório utilizando fluorescentes T8 e LEDs, indicados para a substituição daquela tecnologia.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar sistemas de iluminação LED voltados à substituição de fluorescentes tubulares quanto ao seu desempenho luminoso, energético e econômico, por meio de uma investigação experimental e teórica utilizando programas de cálculo e simulação.

1.2.2 Objetivos específicos

São objetivos específicos desta pesquisa:

- Verificar os parâmetros indicadores de eficiência e conforto visual que devem ser utilizados na comparação dos sistemas de iluminação avaliados;
- Avaliar a eficiência do método de simulação utilizado em relação ao método de investigação experimental no que tange ao desempenho luminoso dos sistemas;
- Analisar o desempenho energético e os custos por meio de simulação dos sistemas de iluminação, estabelecendo relações entre os indicadores de eficiência e considerando parâmetros de conforto visual.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O trabalho desenvolvido divide-se em cinco capítulos: introdução; revisão bibliográfica; método; resultados e discussões; e conclusão. Neste primeiro capítulo faz-se a apresentação do tema a ser desenvolvido, abordando a importância do assunto e sua contextualização em escala global e no Brasil. Também são definidos o objetivo geral e os objetivos específicos.

O capítulo de revisão bibliográfica inicia com a apresentação dos regulamentos e das normas brasileiras no contexto da iluminação artificial dos ambientes de escritório. Na sequência, são discutidos os indicadores de desempenho luminoso e energético para o sistema de iluminação, focando na iluminação artificial por meio dos LEDs. São referenciadas pesquisas que analisam parâmetros que influenciam o desempenho energético, considerando parâmetros de conforto visual do sistema de iluminação nos ambientes. Ao final deste capítulo, comenta-se sobre os métodos para a realização de pesquisas em iluminação artificial, considerando-se a simulação de iluminação artificial em ambientes de escritórios utilizando LEDs.

O terceiro capítulo apresenta os métodos. Consiste em uma etapa experimental e em outra teórica, utilizando programas de cálculo e simulação de iluminação. Apresentam-se os materiais e os dispositivos utilizados para a realização de todas as etapas da investigação, desde o levantamento de campo até os modelos utilizados para as simulações de iluminação e os procedimentos para a obtenção de dados para os resultados esperados.

O quarto capítulo mostra os resultados e as discussões. Elucida a aplicação do método, primeiramente, para os levantamentos de campo e programa os cálculos utilizados na simulação dos ambientes e do sistema de iluminação. Os dados obtidos por meio desse experimento permitem verificar a operação do programa de simulação de iluminação utilizado, bem como os resultados que podem ser extraídos para posterior comparação e análise.

O quinto capítulo apresenta as conclusões deste trabalho. Ficam esclarecidas, também, as limitações e as sugestões para trabalhos posteriores.

2 REVISÃO DE LITERATURA

O trabalho que se apresenta possui enfoque em sistemas de iluminação artificial em ambientes de escritório utilizando fluorescentes e LEDs. Desse modo, o fato de não incluir aspectos da iluminação natural no tema proposto não diminui sua importância dentro de um sistema global de iluminação dos ambientes internos. De fato, uma parcela significativa das fontes bibliográficas aborda a integração entre iluminação natural e iluminação artificial, discutindo sobre os impactos da disponibilidade da luz natural frente à saúde, à qualidade da iluminação, ao desempenho da edificação, ao grau de satisfação do usuário, ofuscamentos, controle, entre outras medidas e estratégias visando uma maior otimização do sistema de iluminação em busca de qualidade e eficiência energética.

A pesquisa realizada nesse trabalho, todavia, discute aspectos do sistema que não dependem da integração com a luz diurna ou de análises dinâmicas (ao longo do ano e de acordo com a localização geográfica ou orientação) – entre os itens relacionados à iluminação artificial de um ambiente. O consumo de energia é o primeiro item relacionado à fonte de iluminação, fomentando a busca pela eficiência energética do sistema.

A densidade de potência instalada (DPI) é um indicador para avaliação do consumo, sendo uma medida utilizada por regulamentos a fim de limitá-lo e evitar superdimensionamentos do sistema. As normas estabelecem padrões de iluminação quanto à quantidade e qualidade de distribuição no ambiente conforme a atividade. Os projetos de iluminação dependem da fotometria e da eficiência luminosa da fonte para atingir estas recomendações.

Diferentes fontes produzirão diferentes resultados qualitativos e quantitativos de iluminação. Estas características influenciam no projeto, considerando o tamanho, o formato, a atividade e a ocupação do ambiente. Portanto, a associação inadequada desses parâmetros pode acarretar em prejuízos tanto na qualidade quanto na eficiência energética do sistema como um todo, ou seja, no resultado de consumo. Nesse sentido, a aplicação de fontes LED em lugar de fluorescentes, considerando os padrões de regulamentação e normatização requer maiores estudos, contemplando suas características específicas e tendo em vista verificar o seu potencial sobre os resultados de economia e qualidade do ambiente luminoso.

2.1 INDICADORES DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

Em publicação sobre a eficiência energética do United States Department of Energy (2010), distingue-se “eficácia” de “eficiência”. O primeiro termo seria utilizado, geralmente, para relações em que as unidades diferem como, por exemplo, a quantidade de lumens produzida por uma fonte pela quantidade de energia em Watts (lm/W). “Eficiência” teria correspondência com relações adimensionais como, por exemplo, a eficiência da luminária, referente à relação da quantidade de lumens da lâmpada pela quantidade de lumens da luminária (mesmas unidades); também poderia ser relacionada a conceitos mais amplos, como o “uso eficiente de recursos”.

Segundo Boyce e Smet (2014) as medidas relacionadas ao desempenho energético e luminoso dos sistemas de iluminação possuem limitações. O trabalho realizado por esses pesquisadores buscou identificar e discutir as limitações existentes para as medidas utilizadas, ordenadamente, das mais amplamente adotadas, para as menos conhecidas. Entre as medidas de eficiência energética, ressaltam que algumas estão relacionadas apenas aos equipamentos, como lâmpada e luminária, enquanto outras, limitam a densidade de potência instalada, mas apenas uma foi destacada por quantificar o consumo energético.

A eficácia luminosa da lâmpada foi citada pelos autores em primeiro lugar, indicando a eficiência com que esta converte energia elétrica em luz, medida em lumens/Watt (lm/W). Quando existirem reatores, estes devem ser considerados nessa medida (como ocorre com as fluorescentes). Atualmente, os fabricantes informam a “potência nominal” (em Watt) já considerando o reator e, portanto, a eficácia da fonte também já os inclui no valor em lm/W disponibilizado. Boyce e Smet (2014) lembram que a definição de um valor mínimo para a eficácia luminosa pode garantir que apenas equipamentos eficientes sejam fabricados ou utilizados futuramente. Entretanto, verificando os produtos disponíveis no mercado, foi possível perceber que esses valores isoladamente não garantem sistemas eficientes. Como exemplo, é possível encontrar fontes com eficácia luminosa da lâmpada acima de 100 lm/W que possuam baixo fluxo luminoso das lâmpadas ou grandes perdas de fluxo luminoso das luminárias e, portanto, resultem em instalações de maior densidade de potência para conseguir disponibilizar quantidades mínimas de luz no ambiente.

A eficiência luminosa da luminária, (informada como rendimento por outros autores), também é chamada *light output ratio* – LOR. Essa

medida representa a relação entre o fluxo luminoso emitido pela luminária e o fluxo luminoso emitido pela lâmpada, ou seja, corresponde a um valor percentual. Esse valor complementa a verificação da eficiência do sistema completo (lâmpada e luminária), visto que apenas a eficácia da lâmpada pode não representar a quantidade de luz emitida pelo conjunto. Entre as limitações, os autores alertam que ao definir apenas um LOR mínimo para o ambiente, não se garante a qualidade do ambiente luminoso, podendo deixar em desvantagem a distribuição da iluminação, fator importante na concepção do sistema de iluminação.

A eficácia luminosa do sistema corresponde à medida do fluxo luminoso total da instalação, dividido pela potência instalada total, em lumens/Watt (lm/W). Conforme os autores, a definição de valor mínimo para essa medida elimina instalações ineficazes. Salientam que o uso de controle sobre o sistema possibilitaria a flexibilização dos valores mínimos exigidos.

A densidade de potência instalada (DPI), mede a relação entre a potência da instalação e a área, em Watts/metro quadrado (W/m^2). Valores máximos de DPI para os diferentes tipos de edifício reduzem a utilização de sistemas ineficientes, por outro lado, frisam que a sua utilização resulta em restrições que afetam os projetos luminotécnicos.

Considerando a densidade de potência instalada no plano de trabalho, verificam que, à medida que se deve aumentar o nível de iluminância, conseqüentemente há o aumento da densidade de potência instalada para o sistema. A densidade de potência instalada por 100 lux sobre o plano de trabalho ($W/m^2 \cdot 100lx$), definida em valores máximos permitidos para diferentes tipos de edifício, pode reduzir o número de sistemas de iluminação ineficientes, mas novamente, evidenciam que essa medida traz restrições aos projetos luminotécnicos.

A exemplo do uso combinado dos indicadores para a avaliação dos sistemas, o indicador numérico para consumo energético em iluminação (*Lighting energy numeric indicator – LENI*) medido em kWh/m².ano, geralmente acompanha outros indicadores como a eficácia luminosa do sistema (lm/W) e eficiência da luminária (*light output ratio – LOR, adimensional*). O consumo, adotado pela Norma Europeia EN 15193 – *Energy performance of buildings — Energy requirements for lighting* (2006-07), depende, além da potência instalada, do uso e ocupação do edifício, podendo ser calculado ou medido ao longo do período de um ano. Quando utilizados valores padronizados para o cálculo do *LENI*, este deve ser verificado por medição após a construção do edifício.

Portanto, segundo os autores, os indicadores apresentados não são excludentes, ou seja, as avaliações de eficiência energética utilizam-nos de maneira associada. Destacam, finalmente, que esses indicadores não tratam da qualidade do ambiente luminoso, que “permita que as pessoas vejam o que precisa ser visto” (BOYCE; SMET 2014), obtendo-se o conforto visual esperado.

2.2 INDICADORES DE CONFORTO VISUAL DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

Como mostram Carlucci et al. (2015) diversas pesquisas sobre os aspectos de conforto visual que caracterizam as relações entre as necessidades humanas e o ambiente luminoso foram avaliadas nas últimas décadas. Os autores apontam índices e medidas propostos na literatura e utilizados pelas normas para essas relações, como a quantidade de luz disponibilizada, a uniformidade da luz, a qualidade da luz em reprodução de cores e a probabilidade de ofuscamentos para os usuários. Nesse trabalho, listaram 34 índices que são amplamente utilizados em pesquisas científicas e nas normas de iluminação. Dos índices pesquisados, 50% (17/34) estavam relacionados aos ofuscamentos. Em segundo lugar, com 26% (9/34), voltados à quantidade de luz. A qualidade da luz teve 21% (7/34) e a uniformidade, 3% (1/34). Afirmam que mais índices podem surgir e que nenhum dos índices existentes pode, sozinho, caracterizar um ambiente luminoso com um único valor.

Quanto aos índices para avaliação da quantidade de luz, Carlucci et al. (2015) apontam a iluminância (E), medida em lux, definida pela razão entre o fluxo luminoso e a área (lm/m^2 ou lux), destacando que nas normas, aparecem como limites mínimos para iluminamento de áreas de trabalho, a exemplo da EN 12464-1, similar à NBR 8995-1, que limita valores de acordo com a atividade realizada no ambiente.

Quanto à distribuição da luz, os autores descrevem a uniformidade, dada pela razão entre a iluminância mínima e a iluminância média ($U = E_{\text{mínima}}/E_{\text{média}}$), apontando valores mínimos para essa relação de acordo com as atividades desenvolvidas nos ambientes. Para a quantidade e uniformidade da luz, são também atribuídos valores mínimos para as áreas onde são realizadas as tarefas diferentes das áreas de entorno imediato.

Os índices para avaliar ofuscamentos são apresentados em múltiplas abordagens, segundo os autores, que continuam sendo revistas ou complementadas. A norma brasileira utiliza o índice de ofuscamento unificado (UGR) para as avaliações de ofuscamentos, determinando uma

escala de 10 (imperceptível) a 34 (intolerável) conforme as atividades realizadas.

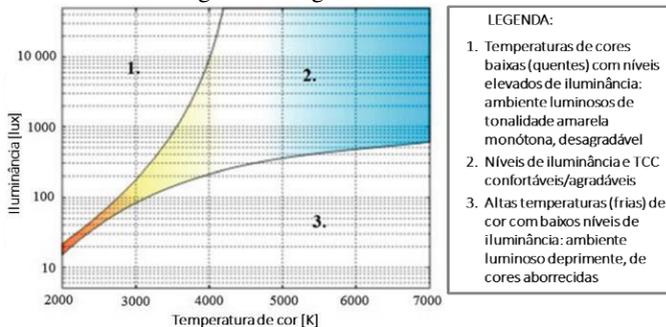
O estudo realizado por Hirning et al. (2014), que contou com 493 coletas de pesquisa realizadas em cinco edifícios na Austrália, identificou que os usuários foram mais sensíveis ao ofuscamento do que o esperado, com 49% dos usuários relatando algum tipo de desconforto durante a pesquisa. Utilizaram o UGP, baseado numa transformação linear do UGR para avaliar a probabilidade ou o percentual de pessoas insatisfeitas. Deve ser considerado que a pesquisa contemplava iluminação natural e artificial.

Sobre os índices para avaliação da qualidade da luz, pode-se destacar o índice de reprodução de cor (IRC ou Ra), utilizado para avaliar a capacidade de reprodução de cores das fontes de iluminação artificiais. Varia de 0 a 100, tendo como limites 80 a 89 considerados bons e acima de 90, excelentes. Valores de IRC são associados a valores de temperatura de cor correlata, relativa à aparência de cor da luz (TCC).

Sokanský et al. (2016) abordam em sua pesquisa a influência exercida pelas fontes luminosas sobre o ritmo circadiano humano. Assim, considera-se que altas temperaturas de cor correlatas resultam em ambientes luminosos de tons brancos a azuis, que despertam o corpo humano e não são adequadas a ambientes em que se deseja relaxar. A longo prazo, esse tipo de fonte de luz teria uma má influência na produção de algumas substâncias, como a melatonina, hormônio ligado ao relaxamento e ao sono. Por outro lado, fontes com altas temperatura de cor correlatas mostram-se adequadas a ambientes em que se exige concentração.

Além disso, a escolha da temperatura de cor correlata depende do nível de iluminância (quantidade de luz) a que está relacionada. Essa associação gera um ambiente luminoso que interfere na percepção visual do usuário, conforme se apresenta no diagrama de Kruithof, Figura 5.

Figura 5. Diagrama de Kruithof



Fonte: Sokanský et al. (2016)

Com base nessas premissas, esses pesquisadores buscaram avaliar se fontes LED teriam maior influência sobre os ritmos circadianos quando comparados a fontes convencionais. A fonte LED foi comparada às fontes tipo bulbo incandescente, halógena e fluorescente compacta, com características similares de fluxo luminoso, temperatura de cor correlata e índice de reprodução de cor. A investigação foi motivada pelo pico de intensidade luminosa na parte azul do espectro visível das fontes LED e sua possível ascendência sobre o ritmo circadiano. Como conclusão desse trabalho, baseado em medição e cálculo dos espectros luminosos, não foi observada diferença significativa entre as fontes LED e convencionais, para temperaturas de cor correlata entre 2.700 K e 2.800 K.

Na mesma direção, buscando identificar relações entre medidas de conforto visual e diferentes distribuições dos espectros luminosos (ou SPDs *Spectral Power Distributions*) vêm sendo realizadas pesquisas que incluem o usuário como referência.

Relações com os níveis de iluminância, temperatura de cor correlata e índices de reprodução de cor e a preferência do usuário foram discutidas por Islam et al. (2015), utilizando LEDs e fluorescentes. Esse estudo observou maior preferência dos usuários por ambientes com espectros luminosos de lâmpadas LED sobre as fluorescentes, a uma TCC de 4.000 K.

Um verificação semelhante foi realizada por Dangol et al. (2015), com maior preferência dos usuários, naturalidade dos objetos, da cor da pele e colorido para os LEDs em relação às fluorescentes, a 4.000 K.

O artigo de Fotios et al. (2015) analisou relações entre o efeito de diferentes espectros luminosos e a percepção de brilho no ambiente, trazendo 50 estudos que abordaram o tema. Os pesquisadores ressaltaram que muitos dos testes realizados sugerem que diferentes espectros tenham

efeito sobre o nível de iluminância necessário para equalizar a percepção de brilho no ambiente. Entretanto, evidenciaram a necessidade de continuidade de novos estudos nessa área, uma vez que não há consenso sobre a relação da quantidade de brilho nos ambientes com medidas de conforto visual.

2.3 PADRÕES REGULADORES PARA SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

Os regulamentos geralmente não abrangem todos os aspectos de sistema de iluminação. Para projetos mais eficientes e de qualidade há vários guias ou manuais de iluminação que complementam informações necessárias para seu desenvolvimento. De acordo com DiLaura et al. (2011) os fatores considerados pelos guias e regulamentos permanecem em contínuo processo de atualização. Em geral, regulamentos proporcionam limites aos padrões de eficiência energética, enquanto normas técnicas asseguram parâmetros mínimos ao conforto visual no desempenho das atividades.

2.3.1 Limites para os indicadores de eficiência energética dos sistemas de iluminação

Os limites determinados por regulamentos influenciam diretamente sobre a atuação dos projetistas. Como visto com Boyce e Smet (2014), há uma variedade de indicadores de performance para avaliar os sistemas de iluminação, que devem ser utilizados em conjunto.

Sobre o indicador *LENI*, Dubois e Blomsterberg (2011) abordam o potencial de redução do consumo de energia elétrica para iluminação em edifícios de escritórios no contexto norte-europeu, identificando o potencial de instalar sistemas de iluminação que atinjam um consumo de aproximadamente 10kWh/m².ano (50% a menos do que a média atual do norte-europeu, de 21kWh/m².ano).

Em comparação ao consumo médio apresentado pelos autores para o contexto norte-europeu (em 2011), o Brasil também mostra um potencial de redução de consumo de energia a partir do estabelecimento de limites para a densidade de potência do sistema de iluminação. Em pesquisa realizada por Roméro e Philippi (2000) as medições de consumo total e desagregado por uso final em edifícios de escritórios localizados em São Paulo permitem extrair alguns dados de acordo com a amostra. A amostra pesquisada apresentou um consumo médio de 64,19 kWh/m².ano, com uma densidade de potência instalada de 17,7 W/m².

Esses dados também confirmam um potencial de redução do consumo baseado na restrição de densidades de potência instalada para iluminação, quando comparados aos limites do RTQ-C (2010), que no nível “A”, mais alto, apresenta limite de $9,7 \text{ W/m}^2$. Mesmo no nível mais baixo “D”, a densidade de potência limite é de $14,1 \text{ W/m}^2$.

Diante do exposto, o estabelecimento de limites para a densidade de potência instalada (DPI) em sistemas de iluminação aparece como uma das principais medidas dos regulamentos voltadas à redução do consumo de energia.

Linhart e Scartezzini (2011) avaliam dois cenários de sistemas de iluminação com limites de densidade de potência, considerando parâmetros de conforto visual. Dois cenários com sistemas eficientes foram comparados a fim de estabelecer padrões ótimos entre eficiência energética, conforto e desempenho visual. Com a participação de vinte pessoas realizando tarefas em computadores e de leitura e escrita em papel concluiu-se que ambientes de escritórios podem ter densidades de potência inferiores a 5 W/m^2 sem que haja prejuízo em conforto visual.

Hanselaer et al. (2007) ressaltam que o indicador DPI não considera a iluminância média mantida sobre o plano de trabalho exigida pelas normas. Atesta que a DPI normalizada, expressa em $\text{W/m}^2 \cdot 100\text{lux}$ representa a potência instalada em relação a um plano de referência, podendo ser verificada para espaços diferentes com exigências de iluminâncias diferentes.

Ryckaert et al. (2010) apresentam uma alternativa para obter indicadores de eficiência energética em ambientes baseando-se em densidades de potência instalada por metro quadrado por 100 lux, considerando requisitos básicos de conforto visual. Definiram uma expressão analítica para obter resultados de DPIs normalizados ($\text{W/m}^2 \cdot 100\text{lux}$) melhor ajustados a diferentes áreas de trabalho, como por exemplo, situadas no plano vertical.

Os valores de DPI sobre o plano de trabalho por 100 lux ($\text{W/m}^2 \cdot 100\text{lux}$) não permitem, todavia, identificar sistemas superdimensionados, com potências muito elevadas para atender iluminâncias de projeto que estejam acima das recomendadas pelas normas técnicas (RAMOS; LAMBERTS, 2010). Além disso, caso os limites para DPIs regulamentados (W/m^2) forem estabelecidos a partir das medidas de iluminância requeridas pelas normas, os valores limites estabelecidos tendem a ser alinhados aos valores de DPI sobre o plano de trabalho por 100 lux ($\text{W/m}^2 \cdot 100\text{lux}$) de acordo com cada ambiente ou atividade.

A partir das considerações feitas sobre os indicadores de eficiência energética, percebe-se a importância dos limites estabelecidos pelos regulamentos e também dos critérios de conforto visual que são, por sua vez, estabelecidos pelas normas técnicas ou guias de iluminação. No contexto do Brasil, é o RTQ-C (Regulamento Técnico da Qualidade para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas) que classifica as edificações quanto a sua eficiência energética. A ABNT NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013) estabelece os critérios de iluminação de ambientes que devem ser seguidos, considerando aspectos de conforto visual.

2.3.2 Regulamento Técnico da Qualidade para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas

Como iniciativa do governo brasileiro, pelo Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL), o Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE), contempla programas de Avaliação da Conformidade sobre o desempenho energético de equipamentos, veículos e edificações. Para as edificações, a Etiqueta PBE Edifica é coordenada pelo Inmetro em parceria com a Eletrobras / PROCEL Edifica. O RTQ-C (Regulamento Técnico da Qualidade para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas) descreve a metodologia para a certificação dessas edificações no Brasil quanto a sua eficiência energética, classificando-as com uma Etiqueta que vai de “A”, mais eficiente a “E”, menos eficiente. A Etiqueta Nacional de Conservação de Energia, ou simplesmente ENCE é facultativa, entretanto, a partir da publicação da Instrução Normativa nº 2, de 4 de junho de 2014 tornou-se obrigatória para edificações públicas federais com área igual ou superior a 500 m². Projetos e construções de novas edificações devem ser contratados visando a ENCE classe “A”. O mesmo ocorre para os casos de reforma, quando alterados seus sistemas de iluminação, condicionamento de ar ou envoltória, salvo inviabilidade justificada, quando se deve, “nesse caso, atingir a maior classe de eficiência possível.” (BRASIL, 2014).

O RTQ-C avalia a edificação em três sistemas: Envoltória (30%); Iluminação (30%) e Condicionamento de Ar (40%). Para a avaliação de eficiência energética do sistema de iluminação artificial o RTQ-C (BRASIL, 2010) baseia-se no método da ASHRAE/IESNA 90.1 - *Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings* (ASHRAE, 2010), que por sua vez subdivide-se em dois métodos diferentes. Um método conforme a função do edifício e outro conforme a função de cada ambiente. O Método da Área do Edifício verifica a DPI -

densidade de potência instalada no edifício, em W/m^2 em relação à densidade de potência limite estabelecida para o mesmo edifício, de acordo com a sua atividade principal, atingindo uma determinada classe de eficiência para seu sistema de iluminação. O segundo método, denominado Método das Atividades do Edifício, tem a eficiência energética do sistema de iluminação calculada pela soma das potências instaladas em cada ambiente do edifício.

Os limites de densidade de potência estabelecidos determinam os níveis de eficiência energética do sistema de iluminação avaliado conforme os citados métodos. Esses limites, no entanto, não garantem o conforto visual. De acordo com Leite (2013), “O foco do PBE Edifica é a redução do consumo de energia elétrica”. As características visuais do ambiente luminoso ficam sob o regulamento de normas de projeto que determinam parâmetros como por exemplo, a iluminância necessária de acordo com a atividade em cada ambiente. Os métodos de avaliação podem levar os projetistas a optar por resultados de acordo com os níveis correspondentes à classe de eficiência pretendida, despojando-se de funções como conforto e saúde (RAMOS; LAMBERTS, 2010). Portanto, um projetista luminotécnico tem a responsabilidade de atender às normas adotadas pela ABNT a fim de realizar projetos de acordo com os níveis de iluminamento exigidos para cada atividade, mas também é importante que os métodos de avaliação do RTQ-C estejam em consonância com a realidade dos equipamentos disponíveis e as necessidades específicas para cada função desempenhada em uma edificação.

O RTQ-C (2010) teve seus limites de densidade de potência estabelecidos para cada nível de eficiência de “A” a “D” de acordo com estudo realizado que levou em conta o tipo de ambiente e atividade e as características dos equipamentos encontrados no mercado (RAMOS; LAMBERTS, 2010). Esse estudo, no entanto, baseou-se na NBR5413 (ABNT, 1992), norma vigente na época para os níveis de iluminamento por ambiente. A ABNT NBR ISO/CIE 8995-1 (ABNT, 2013) substituiu a NBR5413 (ABNT, 1992) e, portanto, os valores de DPI_L (densidade de potência instalada limite) do RTQ-C passam por revisão encaminhada para consulta pública em 2014.

A Tabela 1 contém os valores máximos de densidades de potência limites conforme as classes de eficiência para edifícios de escritórios, segundo o Método da área do edifício do RTQ-C (2010). Em seguida, a Tabela 2 traz os respectivos valores de acordo com o Método das atividades do edifício conforme o RTQ-C (2010).

Tabela 1. Limite máximo aceitável de densidade de potência de iluminação (DPI_L) para o nível de eficiência pretendido, conforme Método da área do edifício (RTQ-C)

Função do Edifício	DPI _L	DPI _L	DPI _L	DPI _L
	Nível A	Nível B	Nível C	Nível D
	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
Escritório	9,7	11,2	12,6	14,1

Fonte: Adaptado do RTQ-C (BRASIL, 2010)

Seguem selecionadas atividades desempenhadas em ambientes de edifícios de escritórios, considerando desde áreas gerais da edificação até áreas atribuídas às unidades autônomas, ou seja, às salas da edificação.

Tabela 2. Limite máximo aceitável de densidade de potência de iluminação (DPI_L) para o nível de eficiência pretendido – Método das atividades do edifício (RTQ-C)

Ambientes/Atividades	Limite do Ambiente		DPI _L	DPI _L	DPI _L	DPI _L
	K	RCR	Nível A	Nível B	Nível C	Nível D
			[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
continua						
Átrio - por metro de altura						
até 12,20 m de altura	-		0,30 ^[1]	0,36	0,42	0,48
acima de 12,20 m de altura	-		0,20	0,24	0,28	0,32
Auditórios e Anfiteatros						
Auditório	0,8	6	8,5	10,2	11,9	13,6
Banco/Escritório - Área de atividades bancárias	0,8	6	14,90	17,88	20,86	23,84
Banheiros	0,6	8	5,00	6,00	7,00	8,00
Biblioteca						
Área de arquivamento	1,2	4	7,80	9,36	10,92	12,48
Área de leitura	1,2	4	10,00	12,00	14,00	16,00
Área de estantes	1,2	4	18,40	22,08	25,76	29,44
Casa de Máquinas	0,8	6	6,00	7,20	8,40	9,60

¹ Por metro de altura. (BRASIL, 2010).

Tabela 2. Limite máximo aceitável de densidade de potência de iluminação (DPI_L) para o nível de eficiência pretendido – Método das atividades do edifício (RTQ-C)

Ambientes/Atividades	Limite do Ambiente		DPI _L	DPI _L	DPI _L	conclusão
	K	RCR	Nível A	Nível B	Nível C	Nível D
			[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]	[W/m ²]
Circulação	<2,4m largura		7,10	8,52	9,94	11,36
Depósitos	0,8	6	5,00	6,00	7,00	8,00
Escadas	0,6	10	7,40	8,88	10,36	11,84
Escritório	0,6	8	11,90	14,28	16,66	19,04
Escritório – Planta livre	1,2	4	10,50	12,60	14,70	16,80
Sala de Aula, Treinamento	1,2	4	10,20	12,24	14,28	16,32
Sala de espera, convivência	1,2	4	6,00	7,20	8,40	9,60
Sala de Reuniões, Conferência, Multiuso	0,8	6	11,90	14,28	16,66	19,04

Fonte: Adaptado do RTQ-C (BRASIL, 2010)

Baseados na NBR5413 (ABNT, 1992), os valores apresentados não possuem, atualmente, correspondência clara com a NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013), tanto para nomenclatura dos ambientes/atividades, quanto para seus respectivos valores de iluminância. Faz-se necessária uma análise mais aprofundada para o método de avaliação do sistema de iluminação do RTQ-C que considere as especificidades da NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013).

Leite (2013) faz uma análise a respeito da aplicação do método do RTQ-C (2010), cuja amostra selecionada para a pesquisa constituiu-se de edifícios comerciais, de serviços e públicos, já etiquetados ou em processo de etiquetagem. Predominavam nos edifícios sistemas de iluminação artificial com instalações de equipamentos considerados eficientes, como fluorescentes, fluorescentes compactas e LEDs. Apesar disso, constatou-se classificações baixas de acordo com o RTQ-C a partir da combinação desses sistemas, principalmente em ambientes de menor dimensão, em espaços de múltipla função ou com ênfase em efeitos estéticos. O Método das Atividades, no estudo realizado, teve resultados de classificações mais baixas em comparação ao Método das Áreas.

Algumas constatações foram destacadas por Brendolan (2012), concernentes à aplicação do método do RTQ-C (2010) para avaliação de sistemas de iluminação de projetos resolvidos dentro das práticas atuais. Sobre as áreas de múltiplas funções, Brendolan (2012) “sugeriu que a área destes ambientes fosse multiplicada pelo número de funções exercidas, para efeito de avaliação.”. Os projetos selecionados eram todos premiados pela Abilux (Associação Brasileira da Indústria de Iluminação) considerados, portanto, referências de qualidade pelas práticas de mercado. A má classificação energética resultante da aplicação do RTQ-C sugere, conforme a autora, que projetos de “efeitos visuais diversos”, “com iluminação indireta” e com efeitos que “personalizam” esses projetos potencializam maiores consumos de energia. Isso teria relação direta com uma falta de conhecimento ou de compromisso com a racionalização energética dentro das práticas projetuais da atualidade.

Práticas projetuais que não consideram a eficiência energética desde as primeiras etapas no partido de projeto corroboram com os resultados encontrados. Além disso, a avaliação também tem como limitação a utilização de projetos com diferentes tipos de exigências. A falta de uma mesma base de informações utilizadas para cada partido de projeto, não permite identificar todos os níveis de iluminância utilizados sob qual normatização, ou todos os dados como acionamentos e divisão de circuitos necessários para a avaliação do RTQ-C.

Um outro fator considerado pelo RTQ-C (2010) relaciona o tamanho do ambiente com a densidade de potência instalada. Atualmente o regulamento considera dois valores para esta relação, determinada pelo K (índice do ambiente) ou do RCR (*Room Cavity Ratio*). Conforme a atividade e a relação encontrada para o índice do ambiente, menores do que “K”, ou maiores do que o “RCR” (Tabela 2), é facultado o acréscimo de um percentual de 20% ao valor de densidade de potência limite determinada para o ambiente. O cálculo do índice de ambiente (K) pode ser visualizado na Equação 1 e do RCR na Equação 2.

$$K = \frac{A_t + A_{pt}}{A_p} \quad (1)$$

Onde:

K : índice de ambiente (adimensional);

A_t : Área do teto (m²);

A_{pt} : Área do plano de trabalho (m²);

A_p : Área de área de parede entre o plano iluminante e o plano de trabalho (m²).

$$RCR = \frac{2,5 \times Hp \times P}{A} \quad (2)$$

Onde:

RCR: Room Cavity Ratio (adimensional);

Hp: Altura de parede, considerar altura entre o plano iluminante e o plano de trabalho (m);

P: Perímetro do ambiente (m);

A: Área de piso do ambiente (m²).

Diferente do RTQ-C, o atual código da Califórnia, intitulado “2013 Building Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings” (CALIFORNIA ENERGY COMMISSION, 2012a) considera quatro tipos de relações de RCR para ajuste dos valores de densidade de potência limites. Esses valores são relativos ao nível de iluminância requerido no plano de trabalho e podem ser visualizados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de densidade de potência instalada em W/m² conforme a iluminância de projeto

Nível de iluminância [lux]	RCR ≤ 2,0	2 ≤ RCR ≤ 3,5	3,5 ≤ RCR ≤ 7,0	RCR > 7,0
50	2,2	3,3	4,4	6,7
100	4,4	6,7	8,9	13,3
200	6,7	8,9	14,4	21,1
300	8,9	11,1	15,6	22,2
400	10,0	12,2	16,7	24,4
500	11,1	13,3	17,8	26,7
600	13,3	15,6	22,2	32,2
700	15,6	18,9	25,6	36,7
800	17,8	21,1	28,9	42,2
900	20,0	24,4	33,3	47,8
1000	21,1	26,7	36,7	53,3

Fonte: California Energy Commission (2012b). Os valores em W/ft² foram convertidos para W/m²

2.3.3 ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013

Em abril de 2013 a NBR 5413 (ABNT, 1992) foi revogada, adotando-se a NBR/ISO CIE 8995-1:2013 – Iluminação de ambientes de trabalho. Parte 1: Interior (ABNT, 2013). A NBR/ISO CIE 8995-1:2013

(ABNT, 2013) apresenta uma revisão em termos quantitativos, que determina a iluminância média que deve ser mantida. Em, “Valor abaixo do qual não convém que a iluminância média da superfície especificada seja reduzida” e também aspectos qualitativos. Portanto, além de ter os níveis de iluminância estipulados conforme a tarefa ou atividade a ser desempenhada, para cada uma destas foram estipulados valores máximos para ofuscamento, valores mínimos para o índice de reprodução de cores e foram feitas recomendações, relacionadas ao tratamento da luz natural (como brises e sombreamento de janelas), relacionadas à idade e quanto à manutenção. (PESSOA; GHISI; LAMBERTS, 2013).

Os principais critérios da normativa encontram-se resumidos e comentados no Quadro 1.

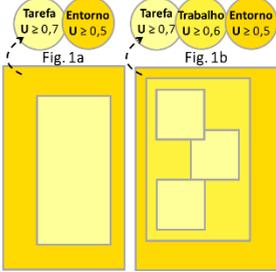
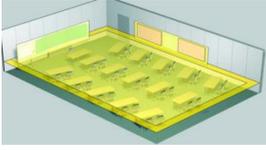
Quadro 1. Resumo dos critérios para projetos de iluminação - Seção 4 da NBR 8995-1 (ABNT, 2013)

continua

Crítérios do projeto de iluminação	Recomendações		Observações
Distribuição da luminância	Faixas de refletâncias úteis: <ul style="list-style-type: none"> • Teto: 0,6-0,9 • Paredes: 0,3-0,8 • Planos de trabalho: 0,2-0,6 • Piso: 0,1-0,5 		As luminâncias de todas as superfícies são determinadas pelas refletâncias e iluminâncias de cada uma delas.
Iluminâncias recomendadas Em [lux]	<ul style="list-style-type: none"> • Iluminância média mantida sobre a área de tarefa - Em [lux] - no plano de referência (horizontal, vertical ou inclinado) conforme a atividade. (Ver Tabela 4). • A iluminância mantida não pode ser inferior a 200 lux para ambientes de trabalho contínuo. 		A Seção 5 da norma disponibiliza os valores correspondentes a cada atividade.
Iluminâncias no entorno imediato	Iluminância da tarefa [lux]	Iluminância do entorno imediato [lux]	Deve-se verificar a relação de adaptação em relação à distribuição da iluminância e as definições para áreas de tarefa (individuais), áreas de trabalho e entorno imediato.
	≥ 750	500	
	500	300	
	300	200	
	≤ 200	Igual à da tarefa	
	Área de tarefa individual (mesa) Área ocupada pelo usuário (rosa) Área de trabalho (amarela)		

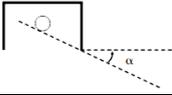
Quadro 1. Resumo dos critérios para projetos de iluminação - Seção 4 da NBR 8995-1 (ABNT, 2013)

continuação

Critérios do projeto de iluminação	Recomendações	Observações
Iluminâncias no entorno imediato	<p>Definições - Área de tarefa (individual), área de trabalho e entorno imediato</p> <p>A área de trabalho é definida com 0,5m além do plano de tarefa individual - Fig. 1a (quando se conhece a posição), sendo $U \geq 0,7$ e entorno com $U \geq 0,5$.</p> <p>Para tarefas possíveis em vários locais deve-se considerar um plano único, acrescentar os 0,5m para então definir a área de trabalho e o entorno - Fig. 1b.</p>	 <p>Fig. 1a: Área de tarefa (individual) com $U \geq 0,7$ e entorno com $U \geq 0,5$.</p> <p>Fig. 1b: Área de trabalho com $U \geq 0,6$ e entorno com $U \geq 0,5$.</p>
	<p>A área de trabalho pode ser considerada para a sala inteira, ou considerar uma faixa marginal no perímetro de 0,5m quando não se conhece a área de trabalho</p>	<p>Área de trabalho com local conhecido</p> 
		<p>Área de trabalho sem local conhecido / local flexível</p> 
Uniformidade da iluminância	<p>Razão entre o valor mínimo e o valor médio de iluminância:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Uniformidade na área de tarefa $\geq 0,7$ • Uniformidade no entorno imediato $\geq 0,5$ 	<p>Uniformidades planejadas de $U \geq 0,6$ mostram por experiência que se atende à uma uniformidade de $U \geq 0,7$ nas áreas de tarefas individuais.</p>

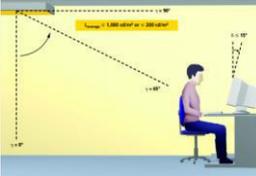
Quadro 1. Resumo dos critérios para projetos de iluminação - Seção 4 da NBR 8995-1 (ABNT, 2013)

continuação

Critérios do projeto de iluminação	Recomendações	Observações	
Proteção contra o ofuscamento provocado por luminâncias excessivas	<ul style="list-style-type: none"> • Proteção visual das janelas (brises, persianas, entre outros) • Proteção visual das fontes de luz artificial com ângulos mínimos de corte: 	O ângulo de corte é indicado apenas quando a luminária aparece no campo de visão do observador, sendo aberta por baixo ou com difusor transparente.	
	Luminância da fonte [kcd/m ²]		Ângulo de corte mínimo α 
	1 a 20		10°
	20 a 50		15°
	50 a 500		20°
≥ 500	30°		
Ofuscamento desconfortável UGR_L	Determinado conforme a tarefa realizada, pelo método tabular do Índice de Ofuscamento Unificado originário da CIE 117 – 1995, para classificação de ofuscamento corrigido padronizado (UGR), baseado na fórmula: $UGR = 8 \cdot \log \left(\frac{0,25}{Lb} \right) \cdot \Sigma \frac{L^2 \cdot \omega}{p}$ <ul style="list-style-type: none"> • Pode-se utilizar o método tabular ou a fórmula para diferentes posições do observador. • O método limita-se a luminárias diretas e diretas/indiretas de componente indireto ≤ 65%. • Não se aplica o método para fontes de luz com ângulo sólido < 0,0003sr ou ângulo sólido > 1sr 	Deve ser documentado em projeto. Quando houver mais de um tipo de luminárias, com diferentes fotometrias ou lâmpadas, deve-se encontrar o maior valor UGR que será “considerado um valor típico para a instalação inteira e deve estar de acordo com o UGR limite” (UGR _L). A publicação LiTG 20 recomenda não desconsiderar as luminárias abaixo de 0,0003sr e abolir o limite inferior do ângulo sólido.	

Quadro 1. Resumo dos critérios para projetos de iluminação - Seção 4 da NBR 8995-1 (ABNT, 2013)

continuação

Critérios do projeto de iluminação	Recomendações	Observações	
Reflexão veladora e ofuscamento refletido / VDTs (<i>Visual display terminals</i> ou monitores de vídeo)	Reflexões especulares em tarefas visuais. Limites da luminância para luminárias que podem refletir sobre tela inclinada até 15°	Recomenda-se que as luminâncias especificadas não excedam ângulos de elevação $\geq 65^\circ$ 	
	Luminância das luminárias ($L_{\text{médio}} \leq 1.000$ cd/m ²)		Tela LCD positiva (fundo claro) antirreflexo
	Luminância das luminárias ($L_{\text{médio}} \leq 200$ cd/m ²)		Tela / monitores negativos (fundo escuro)
Aparência de cor Tcp	Aparência de cor, ou temperatura de cor correlata (T_{cp}):		Escolha sob aspectos estéticos e psicológicos.
	Aparência da cor	Temperatura de cor correlata	
	Quente	Abaixo de 3.300 K	
	Intermediária	3.300 K a 5.300K	
Fria	Acima de 5.300K		
Reprodução de cor	Índice geral de reprodução de cor R_a , com o valor máximo de 100. Os valores são dispostos na Seção 5 da norma (ver Tabela 4).		Não se recomenda valores de R_a inferiores a 80 para ambientes de longa permanência.
Luz natural	Proteções contra ofuscamento e iluminação suplementar para garantia da iluminância e balanceamento da luminância através de acionamento automático e/ou dimerização, para integração entre luz artificial e luz natural		

Quadro 1. Resumo dos critérios para projetos de iluminação (Seção 4 da NBR 8995-1 (ABNT, 2013)

Critérios do projeto de iluminação	Recomendações	Observações
Manutenção	<p>Fator de manutenção (MF) é um múltiplo de fatores, determinado por:</p> $MF = FMFL \times FSL \times FML \times FMSS$ <p>Recomenda-se que $MF \geq 0,7$</p> <p>FMFL = depreciação do fluxo luminoso da lâmpada</p> <p>FSL = falha por envelhecimento da lâmpada</p> <p>FML = redução do fluxo luminoso por sujeira nas luminárias</p> <p>FMSS = redução da refletância por sujeira nas superfícies do ambiente</p>	<p>Para garantia da iluminância mantida \bar{E}_m. Fornecido pelo fabricante ou CIE 97. (Ver seção 0)</p>
Cintilação e efeito estroboscópico	Evitar.	<p>Pode causar distração e efeitos fisiológicos como dor de cabeça. Ocorre pela utilização de fonte elétrica em corrente contínua, utilização de lâmpadas de alta frequência (30kHz) ou distribuição da alimentação da iluminação por mais de uma fase.</p>

Fonte: Elaborado com base na NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013) e imagens do German Electrical And Electronical Manufacturers' Association (2005)

Na Seção 4, a NBR 8995-1 apresenta critérios de conforto visual relacionados à distribuição da luminância, indicando as faixas de refletâncias úteis para as superfícies do ambiente (piso, teto e paredes), sem que seja mencionada, entretanto, a necessidade de sua comprovação.

A distribuição é avaliada também de acordo com as iluminâncias recomendadas no entorno imediato relativas à iluminância do plano de trabalho a fim de evitar mudanças excessivas que causem esforço visual e garantir um balanço adequado de iluminâncias.

Na Seção 5 a norma estabelece os requisitos de iluminação de acordo com os ambientes, tarefas ou atividades. Dentre os requisitos encontram-se valores estipulados para Iluminância mantida (\bar{E}_m , em lux);

Índice limite de ofuscamento desconfortável (UGR_L), que relacionam a posição-padrão do observador e a relação entre espaçamento e altura.

A Tabela 4 resume ambientes ou tarefas da NBR 8995-1 conforme atividades desenvolvidas em edifícios de escritórios. Além dos ambientes das salas de escritório, sejam estas em modelo planta livre ou individuais, constam, baseados no item 1. Áreas gerais da edificação, alguns dos ambientes classificados pela norma como banheiros, circulações horizontais e verticais, saguão de entrada, e salas de descanso.

Tabela 4. Resumo de ambientes, tarefas ou atividades presentes em edifícios de escritórios conforme NBR 8995-1 (ABNT, 2013)

Tipo de ambiente, tarefa ou atividade	\bar{E}_m [lux]	UGR_L	R_a	Observações
1. Áreas gerais da edificação				
Saguão de entrada	100	22	60	
Sala de espera	200	22	80	
Áreas de circulação e corredores	100	28	40	Nas entradas e saídas, estabelecer uma zona de transição, a fim de evitar mudanças bruscas.
Escadas, escadas rolantes e esteiras rolantes / rampas de carregamento	150	25	40	
Salas de descanso	100	22	80	
Vestiários, banheiros, toaletes	200	25	80	
2. Escritórios				
Arquivamento, cópia, circulação etc.	300	19	80	
Escrever, teclar, ler, processar dados	500	19	80	Para trabalho com VDT, ver 4.10.
Desenho técnico	750	16	80	
Estações de projeto assistido por computador	500	19	80	Para trabalho com VDT, ver 4.10.
Salas de reunião e conferência	500	19	80	Recomenda-se que a iluminação seja controlável.
Recepção	300	22	80	
Arquivos	200	25	80	

Fonte: Adaptada NBR 8995-1 (2013)

Tendo em vista a nova classificação dos ambientes e os respectivos níveis de iluminância determinados pela norma adotada, dispõe-se a Tabela 5, na qual são listados ambientes comuns a edificações de escritórios conforme o RTQ-C (BRASIL, 2010) relacionados com os tipos de ambiente, tarefa ou atividade da NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013) de mesma finalidade. Os níveis de iluminância correspondentes à base utilizada para o método de aplicação do RTQ-C (RAMOS; LAMBERTS, 2010) foram dispostos ao lado comparativamente.

Tabela 5. Ambientes presentes em edifícios de escritórios e respectivos níveis de iluminância conforme RTQ-C (2010) e NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013)

continua

Ambientes RTQ-C	ISO 8995 (ABNT, 2013)	Iluminância base utilizada para o método do RTQ-C (RAMOS; LAMBERTS, 2010)	
	Ambientes	Em [lux]	E [lux]
Átrio - por metro de altura	1. Áreas gerais da edificação		
até 12,20 m de altura		100	100
acima de 12,20 m de altura	Saguão de entrada		
Salas de espera, convivência	Sala de espera	200	150
Circulação	Áreas de circulação e corredores	100	100
Escadas	Escadas, escadas rolantes e esteiras rolantes	150	100
Vestiário	Vestiários, banheiros, toaletes	200	150
Banheiros			100
	22. Escritórios		
Escritório	Escrever, teclar, ler, processar dados	500	500

Tabela 5. Ambientes presentes em edifícios de escritórios e respectivos níveis de iluminância conforme RTQ-C (2010) e NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013)

Ambientes RTQ-C	ISO 8995 (ABNT, 2013)	conclusão Iluminância base utilizada para o método do RTQ-C (RAMOS; LAMBERTS, 2010)
Escritório – Planta livre	Estações de projeto assistido por computador	500
	Sala de reunião e conferência	500
	Arquivamento, cópia, circulação etc.	300
	Desenho técnico	750
	Recepção	300
	Arquivos	200

Fonte: Adaptado de (RAMOS; LAMBERTS, 2010) e (ABNT, 2013)

Os ambientes do RTQ-C dispostos na primeira coluna da Tabela 5 não coincidem exatamente com a nomenclatura dos ambientes, tarefas ou atividades da NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013). Além dos supracitados, outros ambientes não menos importantes no segmento das edificações comerciais, de serviços e públicas não apresentam correspondência exata, ou ela é inexistente, como por exemplo, “Ginásio/Academia”, no RTQ-C (BRASIL, 2010). A definição para “quadra de esportes” do RTQ-C não teria um correspondente direto, ou seja, não teria um valor de referência para os níveis de iluminação recomendados na NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013). Da mesma forma, “Farmácia” e “Fisioterapia”, que são serviços bastante comuns não mostram, em primeira análise um correspondente direto na NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013). Do total de 74 ambientes do RTQ-C, 32,43% (24 ambientes) não parecem ter correspondentes diretos com ambientes da NBR ISO/CIE 8995 (2013) identificados. Novos estudos considerando as características de conforto visual, a redução do consumo de energia e as tecnologias disponíveis atualmente para os equipamentos de iluminação são fundamentais para o desenvolvimento de limites de

DPIs coerentes com todos estes aspectos, dentro das premissas da norma vigente.

A adoção de normas para estipular padrões mínimos de qualidade e eficiência energética para as edificações resulta em impactos de grande complexidade na construção civil, sejam estes econômicos ou sociais. Devido a isso, é importante que as orientações, sejam estas de caráter informativo ou normativo tenham coerência com os aspectos culturais e viabilidades de recursos do local em que se aplicará. Faz-se mister uma reavaliação do RTQ-C que considere, portanto, os novos conceitos introduzidos a partir da vigência da NBR/ISO CIE 8995-1:2013 (ABNT, 2013), com novos níveis de iluminância correspondentes às atividades desempenhadas em cada ambiente.

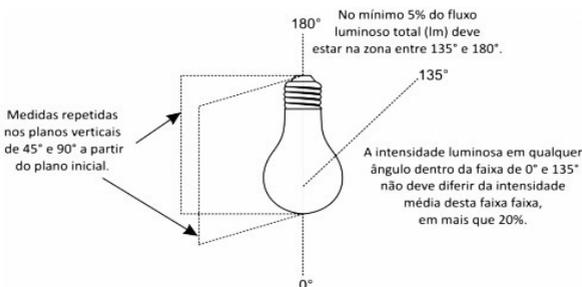
2.3.4 Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED

Com o objetivo principal de assegurar “requisitos mínimos de eficiência, segurança e compatibilidade eletromagnética”, foi aprovada a Portaria nº 389, de 25 de agosto de 2014 – Regulamento Técnico da Qualidade para Lâmpadas LED com Dispositivo de Controle Integrado à Base (BRASIL, 2014), previstas para uso doméstico e similar, desde que contenham determinadas características de potência e tensão nominal, entre outros. LEDs que emitem luz colorida intencionalmente, por artifícios de lentes, invólucros e outros dispositivos, bem como OLEDs não constam neste regulamento.

Nos Requisitos Técnicos Referentes a Eficiência Energética são esclarecidas as “condições de ensaio para as características elétricas e fotométricas, manutenção do fluxo luminoso e a vida” dos LEDs. Como as informações são dirigidas à disponibilização de informações técnicas fornecidas pelos fabricantes, realizadas por meio de ensaios, bem como as condições desses ensaios, deve-se observar se os produtos comercializados estão de acordo com estas especificações. Algumas dessas características são relevantes para aplicação de LEDs em sistemas de iluminação em concordância com a NBR ISO/CIE 8995 (2013) quanto aos valores de UGR_L e R_a , por exemplo. No Quadro 2 apresenta-se um resumo de recomendações que podem restringir aplicações de LEDs para os ambientes conforme a Tabela 4.

Quadro 2. Resumo dos Requisitos Técnicos Referentes a Eficiência Energética de acordo com o RTQ para Lâmpadas LED (2014)

continua

Características	Observações para lâmpadas LED																				
Distribuição de Intensidade Lumínica	Direcionais – pelo menos 80% do fluxo luminoso dentro de um ângulo sólido π esferorradiano (cone com ângulo = 120°) – tolerância de 25%																				
	Omnidirecionais (não direcionais) e Semi-direcionais Distribuição uniforme da intensidade luminosa na zona entre o ângulo de 0° e 135°, simetricamente ao eixo vertical – tolerância de 20%. Não menos de 5% do fluxo total deve estar entre 135° e 180°. A distribuição deve ser simétrica verticalmente nos planos de 0°, 45° e 90°. <div style="text-align: center;">  </div>																				
Temperatura de cor correlata	Será algum dos valores: 27 30 35 40 45 50 55 57 60 65 00 00 00 00 00 00 00 00 00 00																				
IRC	O índice de reprodução de cor geral (R_a) mínimo para os LEDs com dispositivo de controle integrado é de 80. R_a é a média dos índices R1 a R8. R9 deve ser maior do que 0.																				
Manutenção do fluxo (lúmen)	Limites para 6.000 h (declaração obrigatória) <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th rowspan="2">Tipo de lâmpada</th> <th colspan="2">Mínimo fluxo luminoso comparado ao inicial</th> <th rowspan="2">Máxima Vida nominal declarada (L70) (manutenção do fluxo luminoso em 70%)</th> </tr> <tr> <th>Após 3.000h</th> <th>Após 6.000h</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Decorativa</td> <td>93,1%</td> <td>86,7%</td> <td>15.000h</td> </tr> <tr> <td>Omnidirecional</td> <td rowspan="3">95,8%</td> <td rowspan="3">91,8%</td> <td rowspan="3">25.000h</td> </tr> <tr> <td>Direcional</td> </tr> <tr> <td>Semi-direcional</td> </tr> <tr> <td>LED tubular</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	Tipo de lâmpada	Mínimo fluxo luminoso comparado ao inicial		Máxima Vida nominal declarada (L70) (manutenção do fluxo luminoso em 70%)	Após 3.000h	Após 6.000h	Decorativa	93,1%	86,7%	15.000h	Omnidirecional	95,8%	91,8%	25.000h	Direcional	Semi-direcional	LED tubular			
	Tipo de lâmpada		Mínimo fluxo luminoso comparado ao inicial			Máxima Vida nominal declarada (L70) (manutenção do fluxo luminoso em 70%)															
		Após 3.000h	Após 6.000h																		
	Decorativa	93,1%	86,7%	15.000h																	
	Omnidirecional	95,8%	91,8%	25.000h																	
Direcional																					
Semi-direcional																					
LED tubular																					

Quadro 2. Resumo dos Requisitos Técnicos Referentes a Eficiência Energética de acordo com o RTQ para Lâmpadas LED (2014)

Características		Observações para lâmpadas LED		conclusão	
Eficiência e fluxo luminoso para equivalência	Tipo de lâmpada		Potência da lâmpada	Eficiência mínima	
	Omnidirecional Semi-direcional		< 15	55	
			≥ 15	60	
	Direcional		< 20	45	
			≥ 20	50	
	Decorativa		$5 \leq W \leq 25$	45	
			≥ 25		
	Lâmpada LED tubular	Comprimento da lâmpada	Tipo de Base	Eficiência mínima inicial (lm/W)	
550-1.150				G5	100
600-2.400				G13	85

Fonte: Elaborado com base no RTQ para Lâmpadas LED (2014)

Os dados resumidos podem significar restrições ao uso ou à especificação de equipamentos que não consideram os limites recomendados. São informações que devem ser ponderadas ao avaliar-se ou propor-se sistemas de iluminação artificial com LEDs. Apesar disso, deve-se levar em conta que ao estipular padrões para “lâmpadas LED com dispositivo de controle integrado à base”, “previstas para uso doméstico e similar”, considerou-se equipamentos disponíveis no mercado para determinar os parâmetros e limites a serem seguidos.

A constante renovação sofrida no setor e crescente incentivo às pesquisas sobre LEDs vem trazendo progressos em larga escala, o que poderá afetar algumas definições sobre limites de qualidade e eficiência e conseqüentemente dos parâmetros apresentados.

2.4 DIALUX PARA SIMULAÇÃO E CÁLCULOS DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

O DIALux é indicado na plataforma de softwares utilizados como ferramentas de simulações energéticas em edificações (*Building Energy Software Tools Directory*) do Departamento de Energia dos Estados Unidos, apresentando-se em estado de constante atualização e tem disponibilização gratuita. É amplamente utilizado para simulação e cálculos de iluminação, apresentando mais de 100 fabricantes de

luminárias e lâmpadas, que disponibilizam seus arquivos fotométricos e *plug-ins* para instalação no programa.

O programa utiliza a DIN EN 12464-1 (2005), idêntica à NBR 8995-1 (2013), baseando-se na norma para gerar resultados de cálculo de níveis de iluminância, uniformidade, além de fornecer relatórios com a densidade de potência instalada, calcular a quantidade de conjuntos necessários para atingir o nível de iluminância exigido no plano de trabalho, entre outros parâmetros.

Utiliza o POV Ray (*Persistence of Vision Raytracer*) para renderizações fotorrealísticas dos modelos simulados.

Quanto à integração com outros programas, é possível importar ou exportar arquivos CAD de extensões DXF, DWG, SAT, entre outros e, principalmente, uma variedade de arquivos base de informações sobre fontes de iluminação, compostas por lâmpadas e luminárias. Esses arquivos de fotometria normatizados, utilizados pela maioria dos fabricantes podem ser trazidos para o DIALux sob formatos de IES, Eulumdat, CIBSE TM14 ou LTLi.

2.5 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO LED

De acordo com *The Lighting Handbook 10th Edition* (DILAURA et al., 2011), Solid-State Lighting (SSL) compõe-se de: semicondutores “light-emitting-diodes” (LEDs); “organic light-emitting diodes (OLEDs)” e “polymer light-emitting diodes” (PLEDs).

Thejokalyani e Dhoble (2014), citam OLEDs como a “luz do futuro”, ressaltando suas vantagens quanto ao seu potencial como solução de iluminação energeticamente eficiente, com grande flexibilidade para variação de aparência de cor e liberdade para na concepção de projetos de iluminação. Suas características como painel extremamente delgado que chegam a 1 mm possibilitam sua aplicação direta nos tetos em vez da utilização de luminárias suspensas.

Atualmente, LEDs são as fontes de maior eficiência luminosa, colocando-as como o foco das pesquisas realizadas pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos. Possuem características peculiares em relação às demais fontes disponíveis. Isto resulta em discussões sobre os padrões de medidas utilizadas para avaliação dos sistemas de iluminação LED entre as demais fontes, visto que os parâmetros que influenciam no desempenho dos sistemas muitas vezes têm comportamentos diferentes, tornando a comparação e a avaliação discutível e mais complexa. A Figura 6 ilustra diferenças para o mecanismo de dissipação de calor e

distribuição do fecho luminoso nas LEDs quando comparada a outras fontes.

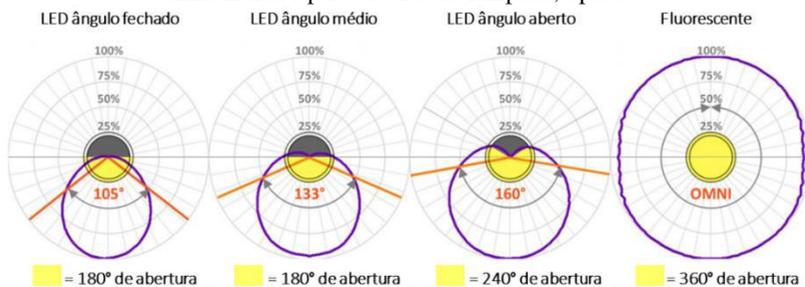
Figura 6. Distribuição do fecho luminoso e dissipação de calor entre diferentes fontes de iluminação



Fonte: Adaptada de Huppert (2013) e Lumilândia (2013)

A distribuição do fecho luminoso das LEDs fomenta discussões relacionadas ao rendimento das luminárias que utilizam LEDs. A Figura 7 compara, em corte transversal, diferentes ângulos do fecho luminoso de lâmpadas LED tubulares e uma fluorescente. Com isso, estima-se que o rendimento de luminárias que recebam LEDs voltadas à substituição possa ser maior do que com as fluorescentes, uma vez que as LEDs tubulares, em sua maioria, direcionam o fluxo luminoso em ângulo de abertura de até 180° (UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY, 2014), evitando perdas por reflexões no interior das luminárias.

Figura 7. Ângulo e fecho luminoso para LEDs tubulares e fluorescente. A área amarela indica a frente da lâmpada e, portanto, a direção da luz emitida. A área cinza indica a parte de trás da lâmpada, opaca.



Fonte: Adaptada de United States Department of Energy (2014)

As LEDs tubulares possuem a aparência exterior semelhante às fluorescentes, entretanto, a composição interna é diferente, formada por pequenas luminárias. As luminárias onde as LEDs são aplicadas, substituindo as fluorescentes, servem de suporte, mas o seu fecho luminoso não depende, necessariamente, daquelas para ser direcionado ao plano de trabalho, como ocorre com as fluorescentes. A Figura 8 mostra, esquematicamente, uma LED tubular da OSRAM desmontada, evidenciando essa constituição interna.

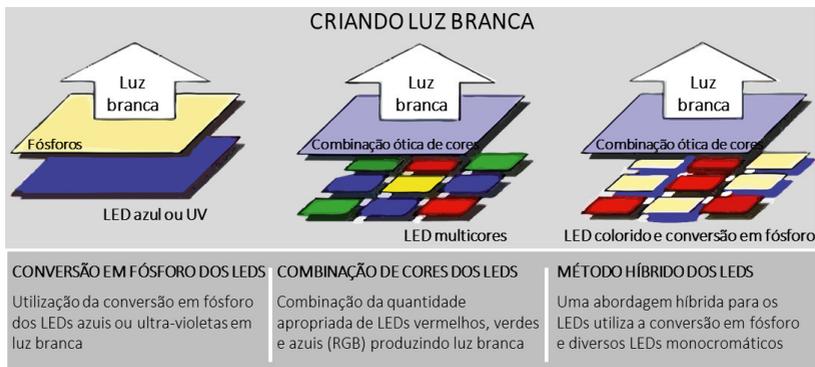
Figura 8. LED tubular desmontada



Fonte: Adaptada de OSRAM (2015)

Crawford (2009) descreve LEDs como sendo inteiramente diferentes das fontes tradicionais, exigindo pesquisa e desenvolvimento também diferenciados para extrair luz de forma eficiente a partir da sua estrutura. O foco de sua pesquisa apontava os LEDs azuis com conversão em fósforo para reemissão de luz branca. Esse e outros métodos de gerar luz branca com LEDs são apresentados nos esquemas da Figura 9.

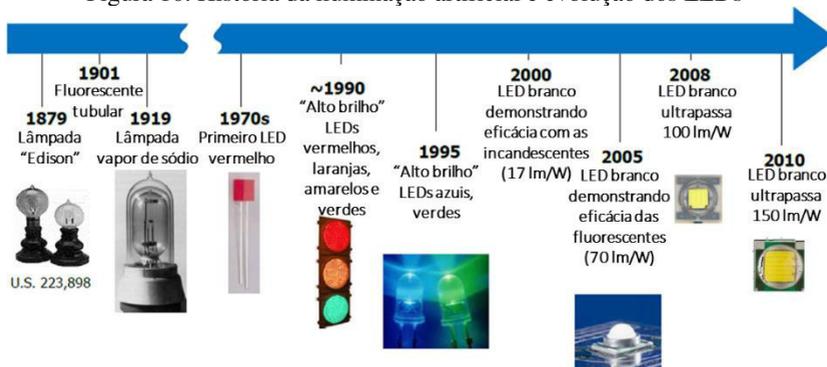
Figura 9. Exemplo da estrutura do LED azul com conversão em fósforo para luz branca e outros métodos



Fonte: Adaptada de Office of Energy Efficiency & Renewable Energy (2013)

Conforme De Almeida et al. (2014), LEDs (*Solid Stat Lighting – SSL*) estão entre as tecnologias de iluminação de maior eficiência e menor impacto ambiental, tendo atingido, recentemente, uma eficácia luminosa de 276 lm/W. Ressaltam ainda, que o tempo de vida útil dos LEDs supera em muitas horas a durabilidade das lâmpadas de descarga. A Figura 10 ilustra a evolução dos LEDs desde o surgimento até altos níveis de desempenho dos LEDs brancos, com 150 lm/W em 2010.

Figura 10. História da iluminação artificial e evolução dos LEDs



Fonte: Adaptada de De Almeida et al. (2014)

Os autores apresentam características de superioridade dos LEDs quando comparados às demais fontes de iluminação. Sobre o impacto do uso de LEDs em um cenário projetado para 2020, destacam que os LEDs

poderiam atingir uma eficácia de 200 lm/W, estimando-se uma redução mundial de mais de 50% do consumo da energia elétrica em iluminação, o que significa cerca de 20% do consumo total de energia elétrica no mundo.

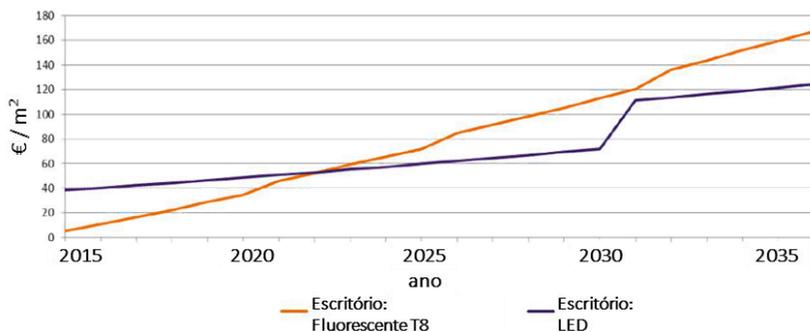
Apesar do destaque para os aspectos positivos, De Almeida et al. (2014) apontam entraves para a consolidação e difusão dos LEDs, como: custos iniciais elevados; eficácia parcial (os LEDs ainda não atingiram seu máximo potencial de aproveitamento); incertezas nos testes (apresentam alta variabilidade entre as especificações dos fabricantes e produtos no mercado); acesso de produtos de baixa qualidade ao mercado (provocando falta de confiabilidade), entre outros fatores relacionados à falta de esclarecimentos e informações sobre as características dos produtos disponíveis.

Jan de Boer, integrante do *Solar Heating & Cooling Programme*, pela *International Energy Agency – IEA SHC Task 50*, afirma que comparadas às instalações convencionais, as novas soluções permitem um aumento significativo da eficiência (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2016). Completa dizendo que facilmente superam em duas ou três vezes os sistemas tradicionais, com tempos de retorno do investimento considerados atrativos. Entretanto, ressalta que as substituições de iluminação ainda são atrasadas comparado ao que é tecnicamente possível e economicamente viável.

Quanto à adesão de LEDs no mercado, foram superadas as expectativas iniciais em escala global, que acontecem de modo acelerado. Esse programa de pesquisa se insere num período de transição da tecnologia com fluorescentes para LEDs. Visto que não apenas houve aumento para o dobro das eficiências, mas também houve redução dos custos para menos da metade, a modelagem econômica teve que ser revista.

Diante desse panorama, a Figura 11 mostra uma fase de convergência para os custos dos sistemas com fluorescentes T8 e LEDs acumulados ao longo do tempo, voltados à iluminação de escritórios.

Figura 11. Comparação de custo ao longo do tempo estimada para fluorescentes T8 e LEDs utilizadas em escritórios



Fonte: Adaptada de International Energy Agency (2015)

Considerando que há um aumento da adesão por produtos LED no mercado e que, por outro lado, pesquisas mostram que as substituições de fluorescentes por LEDs se mostram aquém do potencial de eficiência tecnicamente possível de se atingir com novos modelos desse sistema, é importante verificar quais são as características dos produtos aos quais o consumidor tem acesso.

No Brasil, Pessoa e Ghisi (2015) buscaram verificar a eficácia luminosa dos produtos LED no mercado brasileiro pesquisando em catálogos disponíveis via internet. Sobre os LEDs voltados à substituição das fluorescentes tubulares, foram encontrados produtos com eficácia luminosa mínima de 30 lm/W e máxima de 113,7 lm/W. Esse trabalho conclui que as eficácias luminosas das LEDs tubulares são próximas das fluorescentes, no entanto, a substituição necessita ser verificada para cada situação, visto que nem sempre as lâmpadas LED são mais eficientes do que as fluorescentes, ou têm fluxo luminoso compatível. Quanto ao índice de reprodução de cor e à temperatura de cor correlata, os produtos LED pesquisados apresentaram boa qualidade, igualando-se às fluorescentes ou ultrapassando-as. Esse estudo também ressalta que a eficiência teórica do LED difere da eficiência na prática, em uma luminária ou uma lâmpada disponibilizada ao consumidor, visto que são diversos os fatores que podem prejudicar sua eficácia luminosa.

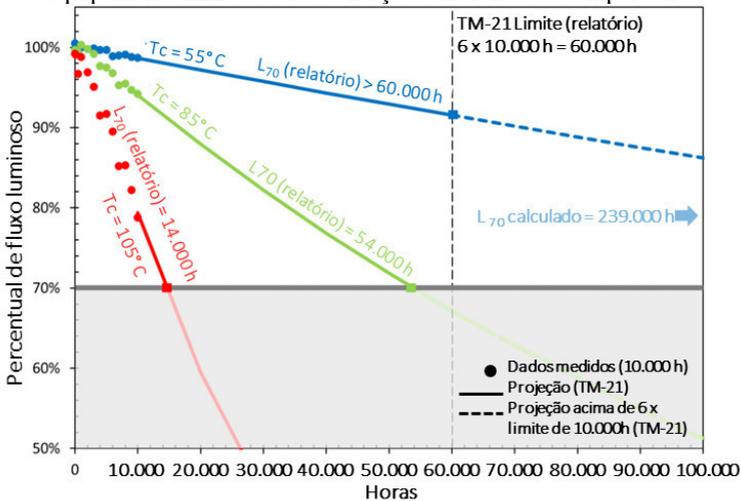
Quando se compara a durabilidade dos LEDs em relação às demais fontes, os desafios são a manutenção da emissão de lumens mediante temperaturas mais elevadas devido a produção de calor no seu sistema integrado, bem como a sua vida útil e tratamento do fator de depreciação.

2.5.1 Depreciação da quantidade de lumens e vida útil

Um dos parâmetros considerados na avaliação do sistema de iluminação refere-se ao desgaste do equipamento ao longo do tempo, e a quantidade de lumens gerada pela fonte de luz. Comuns a todos os tipos de fontes de iluminação, desgastes ao longo de tempo são inevitáveis. Mesmo os LEDs de alta qualidade perdem a eficiência conforme expostos a temperaturas mais elevadas (POPPE, 2014). De acordo com Uddin et al. (2011), A eficiência luminosa de diversas fontes LED decresce aproximadamente 0,2-1% por grau Celsius elevado na temperatura.

Royer (2014) mostra o mesmo equipamento LED submetido a teste sob diferentes condições de temperatura e a consequente depreciação dos lumens ao longo do tempo (visualizado na Figura 12). Notoriamente, a manutenção de lumens é influenciada pelas temperaturas resultantes da corrente elétrica no equipamento, temperatura do ambiente e performance de temperatura da lâmpada ou luminária.

Figura 12. Manutenção de lumens medidos e previstos para o mesmo equipamento LED sob três condições diferentes de temperatura.



Fonte: Adaptada de Royer (2014) e United States Department of Energy (2013)

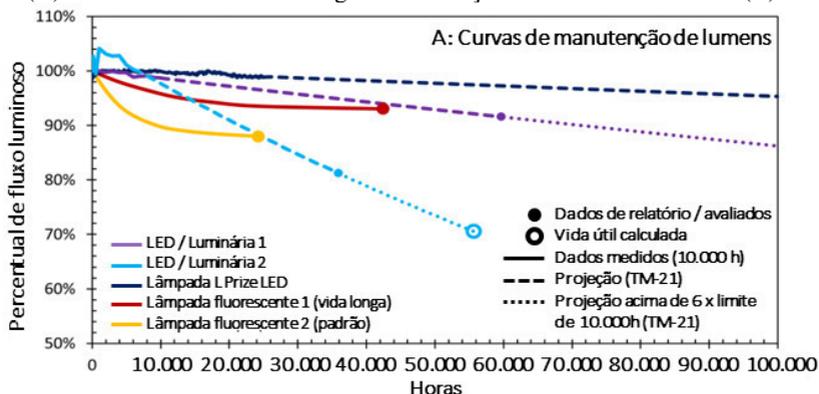
O autor aponta que devido aos LEDs normalmente apresentarem tempo de vida em dezenas de milhares de horas, não é realístico medir a quantidade de lumens produzidos com base na sua expectativa de vida, sendo que é raro encontrar dados de medições sobre esse longo tempo de

vida para LEDs ou luminárias LED. De acordo com Royer (2014), ainda, a norma TM-21-11 (IES, 2011) que estabelece como método extrapolar em até seis vezes o número de horas medidas para determinar a vida útil não representa a performance do tempo real de vida da fonte.

Enfim, Royer (2014) discute os métodos recomendados para o cálculo de L70, que corresponde ao “Período de tempo durante o qual uma lâmpada LED fornece 70% ou mais do fluxo luminoso inicial, sob condições normais de ensaio.” (BRASIL, 2014). Enquanto lâmpadas fluorescentes de alta performance têm especificações de fator de manutenção 0,92 e 0,95, os LEDs têm afixados valores de 0,70 (manutenção do fluxo L70). O LED “L Prize” (DOE L Prize®-winning LED A lamp), citado no artigo, com 25.000 horas de testes realizados atinge ótimos índices de manutenção de lumens.

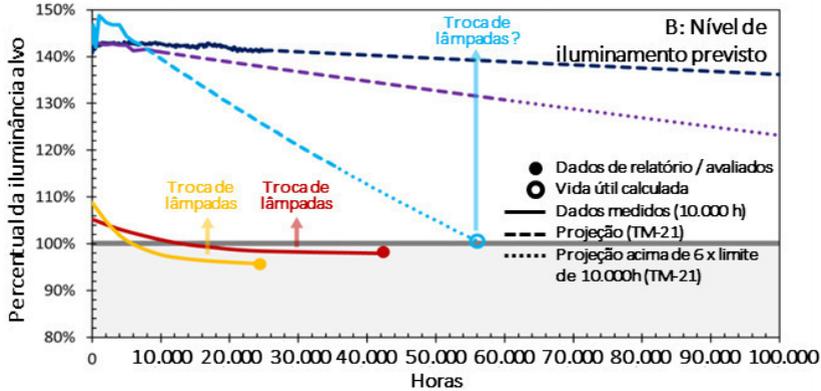
A Figura 13 mostra as características da depreciação de lumens para LEDs e fluorescentes (A); a Figura 14 mostra os níveis de iluminância alcançados pelas fontes (B) em relação aos níveis recomendados (linha cinza). Como a “L Prize” tem elevada manutenção de lumens ao longo do tempo, após 10.000 horas de uso ela continua apresentando valores muito superiores ao nível recomendado (projeção em azul marinho).

Figura 13. Características da depreciação de lumens para LEDs e fluorescentes (A) Níveis de iluminância atingidos em relação ao nível recomendado (B)



Fonte: Adaptada de Royer (2014)

Figura 14. Níveis de iluminância atingidos em relação ao nível recomendado (B)

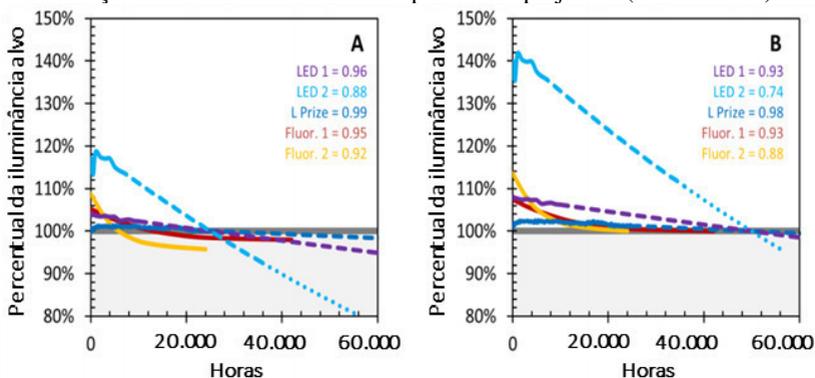


Fonte: Adaptada de Royer (2014)

Os resultados apresentados mostram que manter um fator de L70 para todos os tipos de LED tende a ser incoerente com o potencial de eficiência energética que se espera do sistema. Como sistemas de iluminação com lâmpadas fluorescentes costuma apresentar falha no equipamento, ou seja, a própria lâmpada “queima” antes que a quantidade de lumens atinja níveis indesejáveis, os projetos tendem a ser menos conservadores na limitação do cálculo do fluxo a ser mantido. Já com os LEDs, o equipamento entra em colapso muito tempo depois, quando a queda da emissão de lumens já pode ter atingido níveis abaixo dos esperados. Isto pode indicar que, mesmo depois de atingir os limites de emissão de lumens, os LEDs com fator L70 possam continuar, indefinidamente sem substituição, visto que não se apresenta nenhuma falha evidente para a troca do produto. Isso não afasta, portanto, uma manutenção responsável sobre o sistema.

Considerando o impacto sobre os níveis de iluminância de projeto, o fator de manutenção L70 para o sistema LED representa instalações para iluminância de projeto com até 140% do valor exigido. Assim sendo, o autor propõe duas alternativas ao L70, apresentadas na Figura 15.

Figura 15. (A) Níveis de iluminação utilizando fatores de manutenção baseados em 50% do tempo de vida projetado (50% de 50.000 horas) e (B) Níveis de iluminação baseados em 100% do tempo de vida projetado (50.000 horas).



Fonte: Adaptada de Royer (2014) e United States Department of Energy (2013)

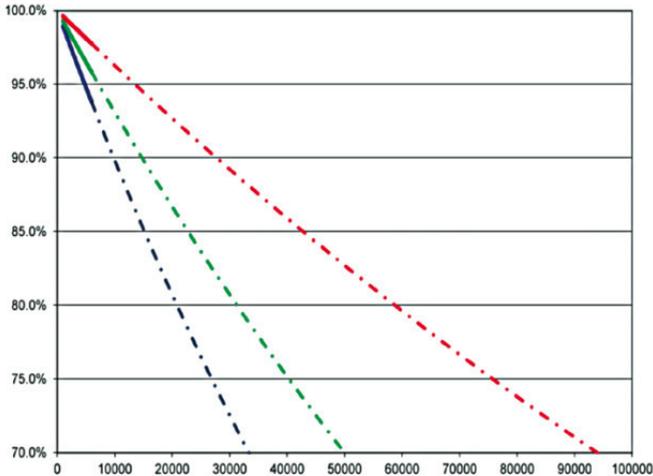
Como alternativa ao L70, propõe-se, no caso A, de 40% a 50% da projeção do tempo de vida útil para cada fonte, renovando-se as lâmpadas. No caso B, o fator de manutenção foi baseado em 100% do tempo de vida, com o mesmo ajuste de tempo para as outras fontes de iluminação, resultando num método em que se distingue mais facilmente os tipos de fontes de energia e a depreciação dos lumens. Para cada fonte, um fator é tomado como base para garantia dos níveis de iluminação ao longo do tempo. Para o LED “L Prize”, por exemplo, o fator de 0,98, para as 50.000 horas de vida útil, significa uma economia de energia de 40% quando comparada ao mesmo sistema, com níveis de iluminação utilizando-se o L70 (comportamento equivalente ao “LED 2”, em azul claro).

Além da falta de dados medidos em tempo real de vida dos LEDs, ressalta-se também o grau de incerteza para as medições. Dados de medição da General Electric Company (2011) mostram que o grau de incerteza para avaliação do tempo de vida dos LEDs nos testes *in situ* podem chegar a 1-3%, combinando todas as incertezas dos instrumentos de medição e controle durante a realização dos testes. Testes de medição de temperatura *in situ* (*In situ Temperature Measurement Test – ISTMT*) correspondem a “verificação da temperatura do LED em ambientes que simulam aplicações no mundo real (*in situ*)” (BRASIL, 2014, p. 23).

A Figura 16 ilustra a influência das incertezas para projeções de L70, com +/- 2% de grau de incerteza. As medições reais de 6.000 horas são curvas em linha cheia, partindo de zero hora, com 100% do fluxo luminoso, até as 6.000 horas. A projeção ao longo do tempo de vida (linha

traço-ponto), atinge para cada variação, tempos aproximados a 35.000 horas; 50.000 horas e 95.000 horas, tornando evidente a repercussão da variabilidade sobre os resultados para as projeções L70.

Figura 16. Influência do grau de incerteza +/- 2% sobre a projeção do fator L70, baseado em medições de 6.000 horas



Fonte: Adaptada de General Electric Company (2011)

Em geral, os LEDs desenvolvidos em centros avançados de pesquisa levam certo tempo para ingressar no mercado. Nesse sentido, comparações entre lâmpadas LED e demais fontes disponíveis atualmente têm resultados diferentes daqueles apresentados por Royer (2014), pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos, ou pelo Laboratório do Pacífico (*Pacific Northwest National Laboratory*).

Aman et al. (2013) comparam lâmpadas incandescentes (as menos eficientes) com lâmpadas fluorescentes compactas (LFCs) e LEDs. Os LEDs mais eficientes atingiram 93,4 lm/W e LFCs 76,25 lm/W. As lâmpadas fluorescentes T5 chegaram a 127,78 lm/W, apontadas como sendo as mais eficientes. Para os testes realizados com medições utilizou-se lâmpadas incandescentes 60 e 100W, CFL 18 e 26W, fluorescentes 36W (T8) e LED 12W e 30W. Nenhum dos seis exemplares de LEDs testados atingiram os valores de eficácia (lm/W) especificados pelos fabricantes.

2.5.2 Substituição de sistemas existentes por LEDs

Em observação à crescente evolução da performance e sua disponibilização no mercado, os LEDs tornam-se um produto cada vez mais atrativo. Os fabricantes divulgam economias de até 50% quando LEDs substituem as lâmpadas convencionais.

Ryckaert et al. (2012) partem do pressuposto que a substituição direta das lâmpadas resulta em efeitos questionáveis, sendo que a qualidade dos LEDs disponibilizados é inferior ou controversa e imprecisa. Buscando avaliar as consequências da substituição de lâmpadas fluorescentes por LEDs tubulares, os pesquisadores efetuam este procedimento de maneira bastante objetiva a partir da substituição de fluorescentes T8 36W por LEDs tubulares (azuis com conversão em fósforo).

Para o experimento selecionou-se LEDs tubulares, os quais tiveram aferidos os parâmetros óticos e elétricos por meio de medições em campo. Como características iniciais, considerou-se a eficiência luminosa de 45-90lm/W iguais para as T8 36W e LEDs. A quantidade de lumens aferida, no entanto, foi significativamente inferior para os tubos LEDs. As T8 36W tiveram fluxo luminoso 44-57% maiores em relação aos tubos LEDs, variando de 1774-3350 lm para as T8 em relação a 754-1497 lm para LEDs. Além disso, os fluxos luminosos medidos foram significativamente inferiores aos valores especificados pelos fabricantes.

Foram avaliados parâmetros de conforto visual com a participação de quarenta e quatro observadores, verificando-se redução do conforto visual. Ressalta-se que não ficou claro se o resultado seria o mesmo caso fosse obtida uma maior uniformidade de iluminação para as paredes, visto que as paredes estão em destaque para nosso campo visual, tendo grande impacto quanto à avaliação da uniformidade. A Figura 17 mostra o efeito de grande contraste sobre as paredes.

Figura 17. Transição abrupta de claro-escuro provocada sobre as paredes



Fonte: Ryckaert et al. (2012)

Enquanto as T8 emitem luz em todas as direções, as substituições LEDs não aproveitaram o design das luminárias e refletores da mesma forma que as T8. Apesar disso, as luminárias ofereceram menos perdas para os LEDs, de 77% para 85% de aumento da eficiência. Embora a economia obtida tenha atingido 70% com a substituição, a queda de 50% da iluminância média torna inaceitável o nível de iluminamento, exigindo dobrar-se a quantidade de LEDs tubulares e inviabilizando-se os ganhos econômicos. O estudo realizado deixa claro que a substituição direta das fluorescentes T8 36W por LEDs, mantendo-se as luminárias originais não é válida dentro das condições testadas.

2.5.3 Aplicação dos LEDs em ambientes de escritório

Os ambientes de escritório geralmente têm sua área inteira considerada como plano de trabalho, visto que não se pode precisar o local exato para a realização das atividades. Dentre as estratégias para se obter maior eficiência energética nos sistemas de iluminação em escritórios, as alternativas de controle individual mostram um grande potencial, quando se considera limites diferenciados de iluminância conforme a presença do usuário. Dubois e Blomsterberg (2011) mencionam reduções de até 65% do consumo por meio de controles que promovam a integração do sistema de iluminação com a luz natural e a distribuição dos níveis de iluminância baseada na ocupação do usuário.

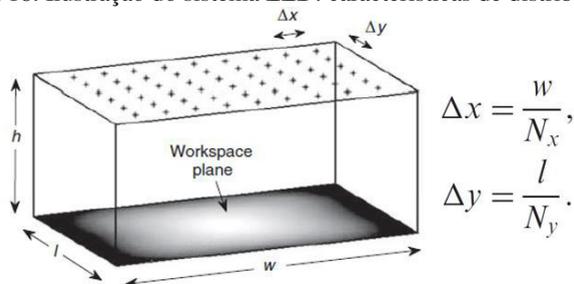
Nesse sentido, os LEDs destacam-se pela flexibilidade de dimerização, possibilitando boa integração com a iluminação natural e considerando áreas de tarefa bem delimitadas, conforme a presença do usuário (PANDHARIPANDE; CAICEDO, 2011).

Na mesma direção, Caicedo et al. (2011) estudam em pesquisa similar a economia de energia proveniente do controle com dimerização de sistemas LEDs, aplicados de maneira não-convencional, numa distribuição de 260 pontos de iluminação LED para um ambiente de 15,00 m².

A flexibilidade de projeto e de ajuste do sistema foi desenvolvida propriamente para os LEDs. A sua distribuição no plano de trabalho possibilita níveis de iluminância para as áreas ocupadas diferentes dos níveis mínimos para as áreas não ocupadas (de acordo com a variação permitida pela norma). Isto garante um quadro de otimização da eficiência energética do sistema, mantendo-se a uniformidade desejada.

A variação dos ângulos de abertura dos LEDs e da uniformidade gerou indicadores de eficiência energética, permitindo comparações entre os sistemas. O modelo proposto é ilustrado pela Figura 18 e os espaçamentos entre os pontos LED foram definidos de acordo com os níveis de iluminação para tarefas de escritório e o fecho de luz (com fluxo luminoso proveniente de ângulos fechados) característico dos LEDs para uma iluminação uniforme.

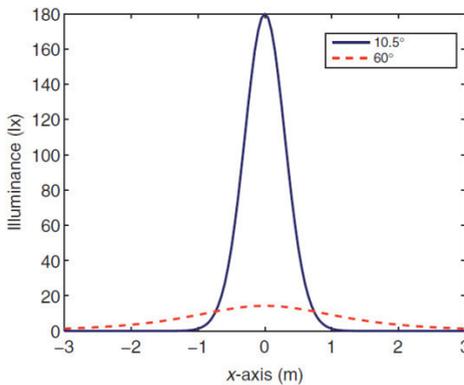
Figura 18. Ilustração do sistema LED: características de distribuição



Fonte: Caicedo et al. (2011)

Para formulação matemática, definiu-se como sendo de 0 a 1 o nível de dimerização (sendo que 1 corresponde ao nível máximo de dimerização e 0 corresponde ao sistema de dimerização desligado). Conforme visualizado na Figura 19, os ângulos considerados para as simulações de 10,5° e 60°, definiram a separação máxima entre os LEDs com resultado de 260 pontos distribuindo uma iluminação uniforme.

Figura 19. Distribuição da iluminação para LEDs Luxeon Rebel 60° e 10,5°



Fonte: Caicedo et al. (2011)

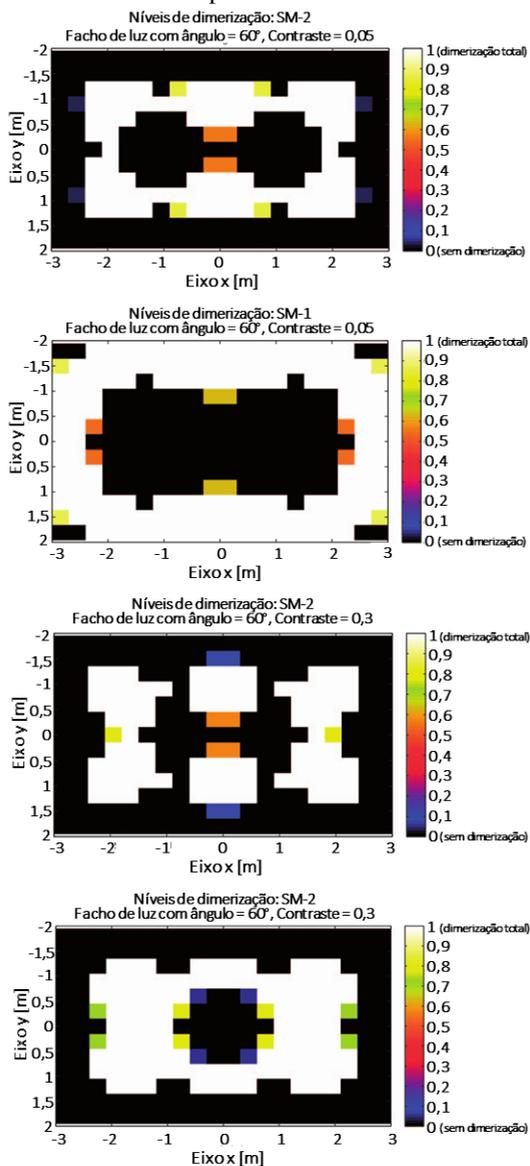
Para a avaliação dos percentuais de economia admitiu-se dois cenários: um inicial, com os níveis máximos de 500 lux distribuídos uniformemente por toda a área do ambiente. No segundo cenário, os níveis foram dimerizados conforme a ocupação, admitindo níveis de 300 lux para as áreas desocupadas.

Os percentuais de redução no consumo atingidos para o sistema dimerizado chegaram a aproximadamente 33% para ângulos de 10,5° e 38% para ângulos de 60°, considerando-se o usuário situado no centro geométrico do ambiente e um contraste máximo de apenas 0,05. Em posições afastadas do centro esse potencial é reduzido uma vez que mais LEDs precisam ser acionados próximo ao ocupante, que estando próximo aos cantos, terá pouca contribuição para a iluminação geral do ambiente.

Em situações de máximo contraste admitido por norma, igual a 0,3, os valores de consumo de energia já partem de valores mais baixos, sendo assim, a redução de consumo de energia para um contraste de 0,3 foi de 28% para ângulo de 10,5° e 15% para 60°.

A partir da Figura 20 percebe-se os níveis de dimerização entre os diferentes contrastes estudados para ângulos de 60°. As áreas brancas têm dimerização máxima e as áreas pretas possuem o *dimer* desligado.

Figura 20. Comparação dos níveis de dimerização para o ângulo de 60° e contraste de 0,05 e 0,3: as regiões brancas têm nível máximo de dimerização, de acordo com os respectivos contrastes admitidos



Fonte: Adaptada de Caicedo et al. (2011)

Tendo atingido os objetivos iniciais a que se propôs a referida pesquisa, pode-se destacar a abordagem apropriada cedida ao estudo de sistemas de iluminação LED voltada à eficiência energética para o sistema de iluminação neste caso específico.

A dimerização e o controle propostos, associados a uma distribuição própria para os LEDs conferem ao teto o papel de luminária semelhante a um painel luminoso, com a possibilidade de ser acionado de acordo com a tarefa e a ocupação do ambiente.

2.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura permitiu ampliar a compreensão de diversas variáveis que influenciam na eficiência energética do sistema de iluminação, considerando também, critérios de conforto visual. As pesquisas possibilitaram identificar limitações para aplicação e substituição de tecnologias fluorescentes por LEDs. Estudos devem incluir aspectos físicos, elétricos e óticos para produzir sistemas otimizados de iluminação, levando em consideração não apenas a economia de energia, ou seja, a eficiência energética em si, mas também a qualidade do sistema para uma iluminação satisfatória.

Conclui-se que as LEDs, quando aplicadas segundo as mesmas técnicas utilizadas para as tecnologias tradicionais podem apresentar limitações como da quantidade e distribuição de luz, mas possuem grande potencial se aplicadas de maneira harmônica com suas características específicas, dado o exemplo do último artigo relacionado.

Verificou-se, também, que existe uma desigualdade entre os parâmetros informados pelos fabricantes para as diferentes lâmpadas. Nesse caso, as substituições, em geral, resultaram em menor consumo de energia com LEDs, mas com quedas significativas do nível de iluminação nos ambientes. Quando analisados separadamente, tanto os indicadores de eficiência, quanto os parâmetros fotométricos, mostram-se insuficientes para uma avaliação mais completa. A comparação das tecnologias inclui a verificação da eficácia da lâmpada e seu fluxo luminoso (quantidade de lumens), do rendimento da luminária, entre outros indicadores, considerando-se uma quantidade e uma distribuição minimamente equivalentes entre os parâmetros de conforto visual.

Nesse sentido, uma análise desses fatores de modo isolado, não permitiria uma avaliação do desempenho energético e luminoso, como pretendido. O método aplicado visou obter resultados para indicadores de eficiência e conforto visual que, analisados em conjunto, permitissem

atingir os objetivos específicos, e finalmente, o objetivo principal a que se propôs esse trabalho.

Outra questão que merece ser destacada, é que, ao considerar padrões das normas ou regulamentos para garantir limites de eficiência e qualidade dos sistemas de iluminação, não se garante, necessariamente, um ambiente luminoso qualificado quanto às expectativas de conforto visual dos usuários. Os parâmetros evitam que distorções ocorram, evitam sistemas ruins. Entretanto, não existe uma medida única que concentre todas as respostas para definir um bom ambiente. Por isso, os parâmetros utilizados nas análises deste trabalho não pretendem atingir como resposta, o que seria um sistema ideal de iluminação. Pretende-se obter dados que, minimamente, contenham características de eficiência e qualidade que permitam compará-los.

3 MÉTODO

A pesquisa desenvolvida nesse trabalho teve uma abordagem predominantemente quantitativa, de natureza aplicada e de objetivo exploratório. Quanto aos procedimentos, foram planejadas duas etapas principais de método experimental. A primeira, incluiu medições realizadas em campo. Após, foi desenvolvida uma etapa teórica, com o auxílio de programas de simulação e cálculo, visando o tratamento e análise dos dados obtidos em campo e continuidade das análises de desempenho energético e econômico.

3.1 PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo teve uma etapa de escolha do ambiente, com visitas de reconhecimento a locais com atividade de escritório, capazes de receber o experimento; após, foi realizada a caracterização do ambiente escolhido.

Para desenvolvimento das etapas posteriores, foi realizada uma pesquisa de produtos utilizados em escritórios, encontrados no mercado brasileiro, incluindo lâmpadas fluorescentes e LEDs projetadas para substituição dessas fluorescentes.

O experimento de campo, constituído por variáveis dependentes e independentes, teve os procedimentos de medição realizados sob determinadas condições controladas, a fim de avaliar os resultados de dois tipos de sistemas de iluminação: com fluorescentes T8 e com LEDs tubulares. Com o mesmo tipo de luminária, condições ambientais e procedimentos de medição configurando variáveis dependentes, as lâmpadas constituíram as variáveis independentes.

Para análise e escolha do ambiente e pedido de autorização para realização do trabalho de pesquisa, foram feitas duas visitas a campo, com duração de 1h cada. Para as instalações das luminárias e lâmpadas, foram utilizados dois períodos de sábados pela manhã, com dois técnicos eletricitas e duração de 3h cada. O levantamento das dimensões do ambiente, preparação para medições e fotografias em campo, teve cinco noites de trabalho, com duração de 2h30 cada, entre 18h30 e 21h.

Todo o processo envolvendo o trabalho de campo iniciou em junho de 2015 e finalizou em setembro de 2015, tendo, em todas as ocasiões, o acompanhamento de um funcionário responsável pelo estabelecimento.

3.1.1 Escolha do ambiente

O ambiente foi escolhido visando contemplar um escritório típico com utilização de computadores. Os seguintes critérios foram seguidos para a seleção do ambiente:

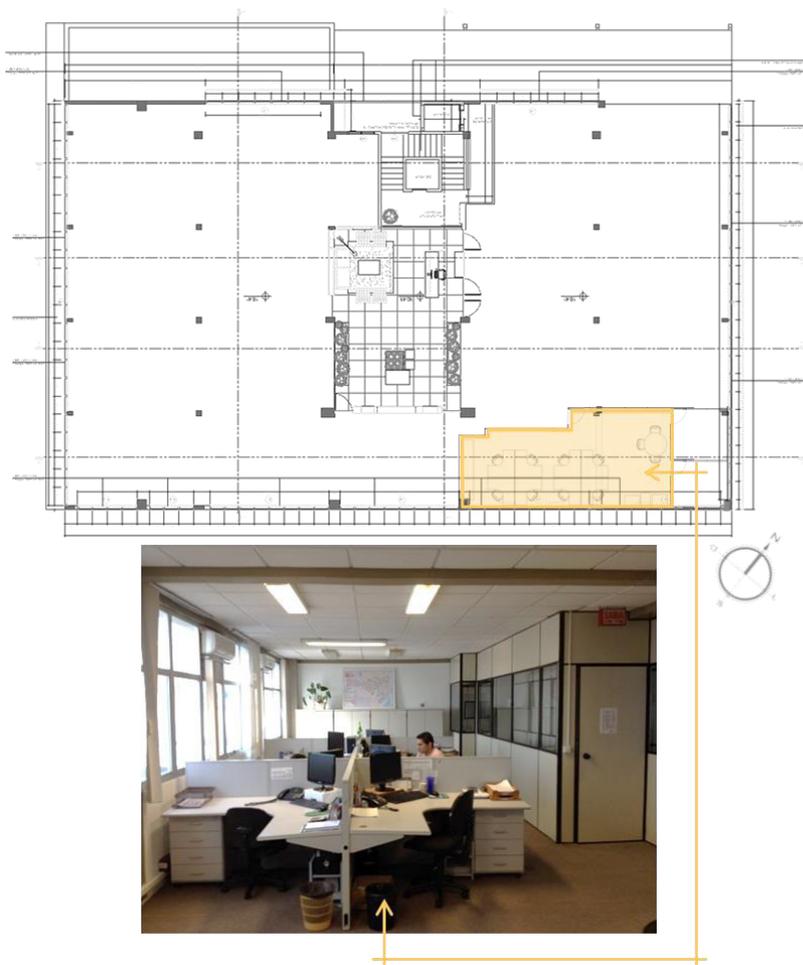
- Mínimo de quatro estações de trabalho com computadores;
- Mínimo de quatro conjuntos de luminárias e lâmpadas;
- Área mínima de 30,00 m²;
- Proporções mínimas de 2,60m de pé-direito;
- Desimpedimento para realização de medições no período da noite, para evitar interferência da iluminação natural.

Com pelo menos sete estações de trabalho em funcionamento, sete conjuntos de luminárias e pouco mais de 49,00 m², a sala de escritório foi escolhida no edifício Sede da Loja Santa Rita, no bairro Estreito, em Florianópolis. A Figura 21 localiza o ambiente e a Figura 22 mostra a planta e imagem interna.

Figura 21. Localização do ambiente escolhido



Figura 22. Posição da sala na planta baixa do edifício com visão interna do ambiente escolhido



As características físicas e funcionais do ambiente, mais a autorização e apoio na cessão de equipamentos de iluminação por parte do estabelecimento, que atua com vendas e projetos de engenharia na área, influenciaram na escolha do local e possibilitaram a realização desse trabalho de pesquisa.

3.1.2 Levantamento das dimensões do ambiente

Na segunda visita ao local, em 4 de julho de 2015, escolhido o ambiente, este foi fotografado, teve todas as dimensões e acabamentos levantados com trena laser e trena métrica, assim como os elementos de forro, persianas, mobiliário e posicionamento das luminárias (Figura 23). Desse modo, o escritório foi representado em planta baixa com *layout* e planta de forro para dar prosseguimento às demais etapas metodológicas.

Figura 23. Levantamento do ambiente de escritório



3.1.3 Escolha dos conjuntos de luminárias e lâmpadas

A escolha das luminárias pressupõe selecionar, entre os equipamentos disponíveis no mercado e cedidos pelo estabelecimento, um exemplar considerando os seguintes critérios:

- Suporte para duas lâmpadas tubulares T8 com reator eletrônico;
- Rendimento (LOR) superior a 70%;
- Aletas metálicas de alta reflexão;
- Dados fotométricos fornecidos pelo fabricante;
- *Plug-in* disponível para utilização em programas de simulação de projetos de iluminação, como o DIALux Evo;

- Utilização prevista para ambientes de escritórios;
- Aplicação do tipo sobrepor (acompanhando o sistema existente no local, evitando corte do forro);
- Disponibilidade no mercado brasileiro.

Seguindo esses critérios, foi determinada uma luminária com disponibilidade de pronta-entrega, de embutir, porém com a possibilidade de aplicação do tipo sobreposta, de fotometria idêntica ao modelo de sobrepor, viabilizando o experimento.

De acordo com consulta feita ao especialista em sistemas de iluminação do estabelecimento, reformas e manutenções executadas em edifícios de escritório em Florianópolis e mesmo fora do Estado de Santa Catarina, substituem, em sua maioria, instalações com lâmpadas fluorescentes T8 e em menor escala, T10. As lâmpadas fluorescentes T8 com reatores eletrônicos escolhidas foram identificadas, pela empresa, como estando entre as mais vendidas desse modelo, constituindo, portanto, grande parte dos sistemas de iluminação existentes.

Devido à dificuldade em encontrar dados equivalentes para lâmpadas fluorescentes T8 e lâmpadas LED, uma vez que a fotometria e os indicadores de eficiência e qualidade apresentados pelos diferentes fabricantes são dispostos de maneiras distintas, optou-se por seguir as indicações de substituição fornecidas pelo fabricante, desde que fossem disponibilizados seus dados fotométricos. Os seguintes critérios foram observados para a escolha das lâmpadas:

- Compatibilidade entre as bases de instalação;
- Eficácia da lâmpada fluorescente, com mais de 80 lm/W;
- Eficácia da lâmpada LED, com mais de 100 lm/W;
- Indicação de substituição de fluorescente T8 por LED apresentada pelo fabricante;
- Dados fotométricos fornecidos pelo fabricante;
- *Plug-in* disponível para utilização em programas de simulação de projetos de iluminação, como o DIALux Evo;
- Utilização prevista para ambientes de escritórios;
- Fabricante com tradição no mercado de iluminação;
- Disponibilidade no mercado brasileiro.

Os dados de escolha para substituição de fluorescentes por LEDs indicados por catálogo são ilustrados pela Figura 24.

Figura 24. Indicação de substituição de fluorescente T8 por LED

SubstiTUBE® Super Value Driver Interno														
Clave	Descripción	Clave Sustituta	Reemplazo	Potencia [W]	Tensión de línea [V-]	Flujo Luminoso [lm]	Longitud Máx. [cm]	Atenuable	Ángulo	IRC	CCT [K]	Vida Promedio [h]	Estatus	Piezas por Caja
87850	LEDSub10T8L60F/830UNV/OSRAM	---	17W (F17T8)	10	120-277	900	60	NO	140°	>82	3.000	40.000	MIS	25
87851	LEDSub10T8L60F/841UNV/OSRAM	---	17W (F17T8)	10	120-277	900	60	NO	140°	>82	4.100	40.000	MIS	25
87852	LEDSub10T8L60F/850UNV/OSRAM	---	17W (F17T8)	10	120-277	900	60	NO	140°	>82	5.000	40.000	MIS	25
87882	LEDSub10T8L60F/865UNV/OSRAM	---	17W (F17T8)	10	120-277	900	60	NO	140°	>82	6.500	40.000	MIS	25
87853	LEDSub16T8L120F/830UNV/OSRAM	---	32W (F32T8)	16	120-277	1.650	120	NO	140°	>82	3.000	40.000	MIS	25
87854	LEDSub16T8L120F/841UNV/OSRAM	---	32W (F32T8)	16	120-277	1.650	120	NO	140°	>82	4.100	40.000	MIS	25
87855	LEDSub16T8L120F/850UNV/OSRAM	---	32W (F32T8)	16	120-277	1.650	120	NO	140°	>82	5.000	40.000	MIS	25
87883	LEDSub16T8L120F/865UNV/OSRAM	---	32W (F32T8)	18	120-279	1.650	120	NO	140°	>82	5.000	40.000	MIS	25

● PRODUCTO NUEVO

● 87854 LEDSub16T8L120F/841UNV/OSRAM --- 32W (F32T8) → 16 120-277 → 1 650

Descrição do modelo indicado para realizar a substituição

Modelo a ser substituído (fluorescente T8 32W)

Potência do modelo indicado para realizar a substituição [W]

Fluxo luminoso do modelo indicado para realizar a substituição [lm]

Modelo indicado para realizar a substituição (catálogo do fabricante):

Substitute LED 16W	
LEDSub16T8/120F/841/UNIV	
Potência nominal	16W
Eficiência luminosa da lâmpada	103lm/W
Fluxo luminoso da lâmpada	1650lm
LOR	74%
MF	0,8

Modelo a ser substituído:

Fluorescente tubular T8 32W	
Lumilux T8/840	
Potência nominal	38 W
Eficiência luminosa da lâmpada	87 lm/W
Fluxo luminoso da lâmpada	3300 lm
LOR	74 %
MF	0,8

Fonte: Adaptada de catálogo da internet e respectivas embalagens das lâmpadas OSRAM (2015)

3.1.4 Instalações

As instalações dos sistemas de iluminação contaram com dois técnicos eletricitas e foram realizadas em duas etapas, em dois períodos da manhã de sábado, das 9h às 12h. Na primeira etapa, dia 01/08/2015, foi realizada a instalação das luminárias novas e das lâmpadas fluorescentes T8 com respectivos reatores eletrônicos. Na segunda etapa de instalação, dia 12/09/2015, foram retiradas as fluorescentes T8 e reatores e foram instaladas as lâmpadas LED. A Figura 25 mostra as instalações feitas nos dois momentos.

Figura 25. Instalação dos conjuntos

01/08/2015 - Instalação das Luminárias, lâmpadas T8 e reatores

12/09/2015 - Instalação das lâmpadas LED



3.1.5 Instrumentos de medição

Os instrumentos utilizados para medições de iluminância (luxímetro), Índice de Reprodução de Cor, Temperatura de Cor, espectro (espectrômetro) e a câmera Canon EOS 60D, utilizada para obter as fotos da produção de imagens HDR, no mapeamento das luminâncias, foram cedidos pelo Laboratório de Conforto Ambiental – LabCon – do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC. O ALTA II, utilizado para determinar as refletâncias das superfícies do ambiente, mobiliário e objetos, foi emprestado pelo Laboratório de Eficiência Energética – LabEEE – do Departamento de Engenharia Civil da UFSC.

3.1.5.1 Luxímetro

Foi utilizado o “*Illuminance Meter*” T-10, luxímetro do fabricante Konika Minolta Sensing, INC, Número de Série 53931085 (Figura 26) para as medições dos níveis de iluminância no plano de trabalho.

Figura 26. Luxímetro T10



3.1.5.2 Espectrômetro UPRtek MK350S

A Figura 27 mostra o Espectrômetro UPRtek MK350S do fabricante United Power Research Technology Corporation, utilizado para verificar os espectros luminosos, índices de reprodução de cor e temperaturas de cor correlatas das lâmpadas.

Figura 27. Espectrômetro UPRtek MK350S



3.1.5.3 Espectrômetro de refletância ALTA II

Utilizou-se o espectrômetro ALTA II (Figura 28), do fabricante *Vernier Software & Technology*, para obter as refletâncias das superfícies existentes no ambiente de escritório.

Figura 28. Espectrômetro ALTA II utilizado para obter as refletâncias



3.1.5.4 Câmera Canon EOS 60D

As fotografias utilizadas para gerar as imagens HDR foram obtidas por meio da câmera Canon EOS 60D (Figura 29). Além da câmera, foram necessários: tripé para a câmera, lente olho de peixe e computador com programa Photolux 3.2 e Smart Shooter instalados.

Figura 29. Câmera Canon EOS 60D e equipamentos complementares



3.1.6 Procedimentos de medição

Entre os procedimentos de medição, foram consideradas as recomendações da NBR 8995-1, para os níveis de iluminância e ofuscamentos (luminância das fontes e Índice de Ofuscamento Unificado – UGR). O manuseio dos instrumentos de medição seguiu os manuais

disponibilizados pelos respectivos fabricantes, procurando manter as mesmas condições do ambiente, como a posição do mobiliário, portas, janelas, persianas e também os mesmos cuidados com a interferência sobre os equipamentos durante a realização dos procedimentos.

3.1.6.1 Preparação do ambiente para medição

Antes de cada medição, foram feitos os seguintes procedimentos:

- Aguardou-se o início da noite, para evitar qualquer interferência de luz diurna;
- Fecharam-se todas as persianas da sala;
- Fecharam-se as portas da sala (total de três portas);
- Fecharam-se as persianas e apagaram-se as luzes dos ambientes contíguos à sala;
- Aguardou-se o fim do expediente para não haver interferência desse trabalho de pesquisa sobre o funcionamento da empresa e do inverso, ou seja, dos funcionários sobre o experimento.

3.1.6.2 Níveis de iluminância

A medição dos níveis de iluminância foi realizada, primeiramente para o sistema utilizando fluorescentes T8, dia 04/08/2015, das 19h às 21h, após a preparação do ambiente. A medição com as LEDs SUB T8 foi realizada dia 16/09/2015.

A malha de pontos de medição de iluminância foi definida com as recomendações da NBR 8995-1, que aponta, no Anexo B (informativo), que o plano de referência para medições seja composto por pequenos retângulos, aproximadamente quadrados. Os critérios são apresentados na Tabela 6, em que o tamanho da malha se dá pela Equação 3.

Tabela 6. Definição da malha

Ambiente	Maior dimensão da zona ou sala [d]	Tamanho da malha [p]
Área da tarefa	Aproximadamente 1,0 m	0,2 m
Salas médias	Aproximadamente 10,0 m	1,0 m

Fonte: Adaptada da NBR 8995-1 (2013)

$$p = 0,2 \times 5^{\log_{10} d} \quad (3)$$

Onde:

p é o tamanho da malha, expresso em metros (m);

d é a maior dimensão da superfície de referência, expressa em metros (m);

n é o número de pontos de cálculo considerando a malha p , onde o número de pontos (n) corresponde ao número inteiro mais próximo da relação de d para p .

A definição da malha de pontos permitiu a marcação dos locais para a realização das medições e análise dos níveis de iluminância e cálculo da uniformidade com base nesses pontos levantados. Alguns critérios foram seguidos durante a realização das aferições com o luxímetro:

- Antes do início das medições, o luxímetro era ligado, com a tampa protetora sobre a fotocélula, verificando-se o valor igual a zero;
- A altura dos pontos de medição seguiu a altura do plano de trabalho para o local, equivalente a 0,70 m.
- A marcação dos pontos foi feita utilizando fita adesiva sobre o piso, que permaneceu afixada até que fosse findado o experimento;
- Foi utilizada a extensão para a fotocélula do luxímetro, para evitar a interferência por reflexão ou sombreamento sobre a leitura dos resultados;
- Os presentes no ambiente tiveram que sentar sobre o piso, abaixo do nível de medição para evitar a interferência sobre os resultados.

A Figura 30 ilustra o procedimento de medição com luxímetro realizado para os dois sistemas de iluminação avaliados.

Figura 30. Procedimentos de medição com o luxímetro



3.1.6.3 Índice de Reprodução de Cor, Temperatura de Cor Correlata e Espectro

As verificações com o espectrômetro UPRtek foram realizadas apontando-se o aparelho diretamente à lâmpada medida. Os dados foram registrados no aparelho em arquivos de imagens formato .jpeg e planilhas, em formato .xls, para Índice de Reprodução de Cor (IRC, ou R_a), Temperatura de Cor Correlata (TCC) e espectro luminoso.

As aferições das fluorescentes T8, foram realizadas em 04/08/2015. Após a substituição, as medições das LEDs foram realizadas em 16/09/2015.

3.1.6.4 Refletâncias das superfícies

Os dados das refletâncias foram coletados com o espectrômetro ALTA II, em 04/08/2015, 12/09/2015 e 16/09/2015, para as seguintes superfícies:

- Forro;
- Divisórias;
- Pilares e vigas (pintura acrílica fosca cor concreto);
- Paredes em alvenaria (pintura acrílica fosca branca);
- Persianas;
- Geladeira;
- Mobiliário cinza claro;
- Cadeiras, computadores e teclados na cor preta;
- Mobiliário de madeira;
- Quadro decorativo.

Como base para os procedimentos, foi utilizado o manual do fabricante (VERNIER SOFTWARE & TECHNOLOGY, 2015), considerando os valores de referência de Dornelles (2008). Durante a realização das medições, o equipamento foi posicionado de modo a não permitir interferência da iluminação do ambiente sobre o resultado, ou perda da energia refletida. Para isso, as laterais do equipamento foram protegidas, utilizando-se um recorte de tecido de veludo preto com uma abertura central, adaptada ao tamanho do equipamento.

A Figura 31 exemplifica a realização das verificações da refletância para uma placa de forro removida para a medição e depois recolocada.

Figura 31. Procedimentos de medição com o ALTA II – exemplo para uma placa de forro no local



Para a realização das medições, foi obtido, inicialmente, a voltagem de fundo da amostra, que corresponde ao valor do ALTA II iniciado sobre uma amostra de referência conhecida. Depois, foram aferidas as voltagens, para os comprimentos de onda entre 470 e 700 nm.

A amostra de referência conhecida utilizada foi do papel branco Ripax. As suas refletâncias de referência, previamente obtidas por meio de espectrômetro de maior precisão, têm como valores conhecidos, os apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Refletâncias de referência para o papel Ripax

Cor Volts (mV) – Comprimento de onda nm	Refletância ρ de referência (%)
Blue - 470	87,8
Cyan - 525	84,2
Green - 560	80,7
Yellow - 585	79,8
Orange – 600	79,7
Red – 645	87,7
Deep Red – 700	95,1

Fonte: Adaptada de Dornelles (2008)

Depois de realizar as medições da amostra conhecida, nesse caso, do papel Ripax, foram verificadas, para cada superfície do ambiente, as radiações (quantidade de energia refletida) para os comprimentos de onda da luz visível, com três medições para cada. Das três medições, foi feita a média aritmética e adotado o valor correspondente.

Para cada comprimento de onda do espectro visível, foram calculadas as refletâncias, de acordo com a Equação 4, para cada superfície.

$$\rho_{\lambda,superfície} = \left(\frac{V_{\lambda,superfície} - V_{f,superfície}}{V_{\lambda,ref} - V_{f,ref}} \right) \rho_{\lambda ref} \quad (4)$$

Onde:

$\rho_{\lambda,superfície}$ é a refletância da superfície para um determinado comprimento de onda λ (%);

$V_{\lambda,superfície}$ é a voltagem da superfície medida no comprimento de onda λ (mV);

$V_{f,superfície}$ é a voltagem de fundo da superfície (mV);

$V_{\lambda,ref}$ é a voltagem da amostra de referência medida no comprimento de onda λ (mV);

$V_{f,ref}$ é a voltagem de fundo da amostra de referência (mV),

$\rho_{\lambda,ref}$ é a refletância da amostra de referência já conhecida no comprimento de onda λ (%).

A refletância final para cada superfície medida, foi determinada pela média aritmética das refletâncias $\rho_{\lambda,superfície}$ para as sete cores.

3.1.6.5 Luminâncias – Câmera Canon EOS 60D

As imagens HDR são amplamente utilizadas para o estudo e quantificação de luminâncias. A partir da imagem HDR, cada pixel pode ser convertido num mapeamento de tons, correspondentes a valores de luminâncias, em cd/m². A obtenção das fotos para gerar as imagens HDR foram realizadas em 06/08/2015 para as fluorescentes T8 e em 16/09/2015 para as LEDs.

Dois etapas foram necessárias para a obtenção de imagens HDR. A primeira, em campo, na tomada das fotos. A segunda, utilizando o programa Photolux e as fotos realizadas em campo, necessária para gerar imagens HDR e sua análise com cálculos do programa.

Após a preparação do ambiente, na primeira etapa, os seguintes procedimentos foram tomados:

- Escolheu-se três direções (três cenas) para cada estação de trabalho (sete estações), sendo, primeiro, uma frontal ao computador, a segunda, 45° à direita e a terceira, 45° à esquerda – total de 21 cenas para obtenção de imagens;

- A câmera foi posicionada no local do usuário e de modo que o centro do obturador da câmera ficasse na altura do observador sentado (1,20 m do piso), utilizando-se o tripé; A câmera foi ajustada para o “Modo C”, com as configurações apresentadas na Figura 32;

Figura 32. Configurações para “Modo C” e demais parâmetros

Parameter	Settings
Image Quality	■ M
Picture Style	Neutral
White balance	☼
White balance correction	0,0 / ± 0
Colour space	sRGB
Bracketing	0
ISO	400

Fonte: Adaptada do manual do Photolux 3.1 (SOFT ENERGY CONSULTANTS, 2009)

- O programa *Smart Shooter* foi utilizado para efetuar as capturas com a câmera de modo remoto, evitando tocá-la durante a realização das fotos;
- No momento das capturas, o ambiente foi mantido estável, sem qualquer movimentação de pessoas;
- Sete valores de exposição (EV), correspondentes à relação entre o valor de abertura e o tempo de exposição foram selecionados, gerando sete fotos para cada cena (Figura 33);

Figura 33. Valores de exposição EV utilizados pelo Photolux para obter as iluminâncias da cena com a câmera Canon EOS

F/t	4	2	1	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30	1/60	1/125	1/250	1/500	1/1000	1/2000	1/4000	1/8000
5,6	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	8,9	9,9	10,9	11,9	12,9	13,9	14,9	15,9	16,9	17,9
10	3,6	4,6	5,6	6,6	7,6	8,6	9,6	10,5	11,5	12,5	13,6	14,6	15,6	16,6	18,6	19,6
14	4,6	5,6	6,6	7,6	8,6	9,6	10,6	11,5	12,5	13,5	14,6	15,6	16,6	17,6	19,6	20,6
18	5,3	6,3	7,3	8,3	9,3	10,3	11,3	12,2	13,2	14,2	15,3	16,3	17,3	18,3	20,3	21,3
22	6,9	7,9	8,9	9,9	10,9	11,9	12,8	13,8	14,8	15,9	16,9	17,9	18,9	19,9	20,9	21,9

						
EV: 3	EV: 7	EV: 9,9	EV: 12,9	EV: 15,9	EV: 18,9	EV: 21,9
Abertura: f/5,6	Abertura: f/5,6	Abertura: f/5,6	Abertura: f/5,6	Abertura: f/22	Abertura: f/22	Abertura: f/22
Tempo de exp.: 4s	Tempo de exp.: 1/4s	Tempo de exp.: 1/30s	Tempo de exp.: 1/250s	Tempo de exp.: 1/125 s	Tempo de exp.: 1/1000s	Tempo de exp.: 1/8000s

Fonte: Adaptada do manual do Photolux 3.1 (SOFT ENERGY CONSULTANTS, 2009)

- As imagens foram salvas no computador, conectado à câmera.

Os procedimentos realizados em campo, descritos nessa primeira etapa, são ilustrados na Figura 34.

Figura 34. Procedimentos da etapa realizada em campo

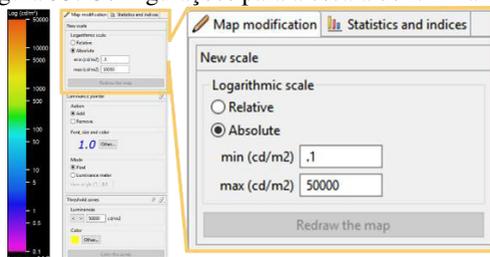


Observa-se que os valores de UGR são calculados, pelo Photolux, conforme a EN 12464-1, que equivale à NBR 8995-1.

Para a segunda etapa, utilizando o Photolux 3.2 e as imagens, os procedimentos foram:

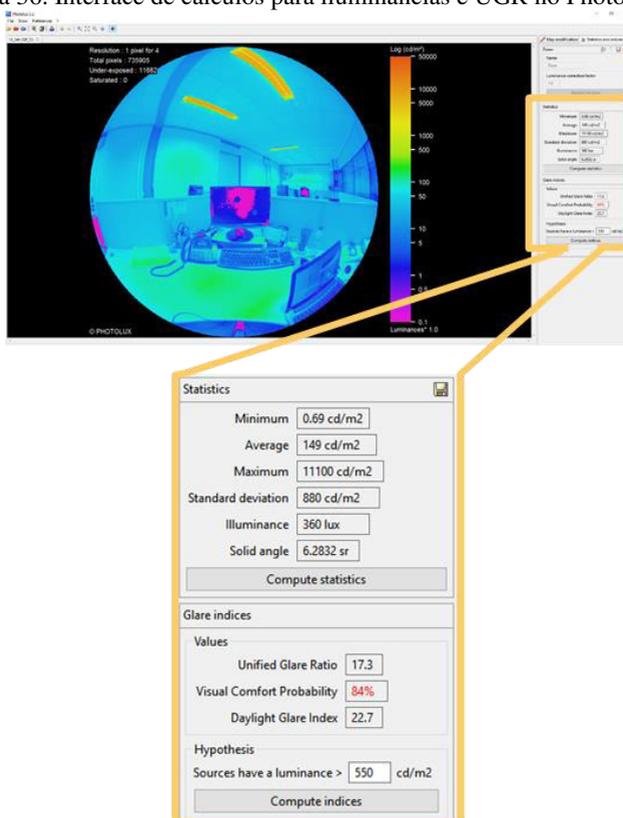
- Abertura das sete fotos para cada cena, em “*Open images*”;
- Obtenção da imagem HDR, em “*Compute de map*”;
- Ajuste de escala de tons para os valores de luminância em “*Absolute*”, para o mínimo de $0,1 \text{ cd/m}^2$ e máximo de 50.000 cd/m^2 (verificados que os valores máximos e mínimos não ultrapassavam esses limites) e após, “*Redraw de map*”, obtendo, novamente, a imagem HDR com a escala padrão (Figura 35);

Figura 35. Configurações para a escala de luminâncias



- Em cada HDR, para os valores de luminância, mínimo (cd/m^2), máximo (cd/m^2), foram obtidos em “*Compute Statistics*” e os Índices de Ofuscamento Unificado (UGR), foram obtidos em “*Compute indices*” (Figura 36).

Figura 36. Interface de cálculos para iluminâncias e UGR no Photolux 3.2



3.2 ANÁLISE DE CONFORTO VISUAL

Os indicadores utilizados para análise de conforto visual fazem parte de padrões exigidos pela NBR 8995-1, destacando-se como importantes fatores a serem considerados em avaliações de sistemas de iluminação. A quantidade e distribuição da luz, ofuscamentos e qualidade da luz fizeram parte da comparação entre os sistemas de iluminação avaliados.

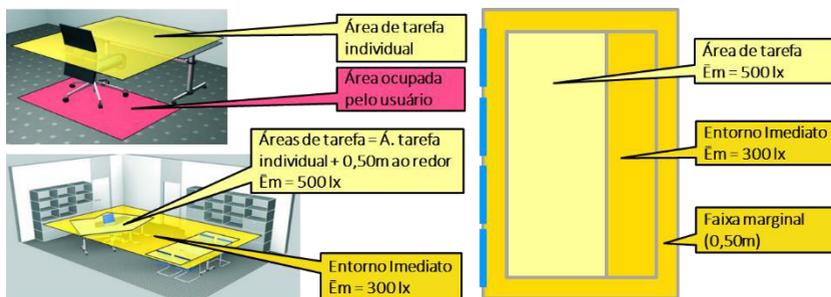
3.2.1 Quantidade de luz

Os níveis de iluminância foram utilizados para avaliação da quantidade de luz, medidos em lux, resultantes da razão entre o fluxo luminoso da fonte incidente sobre a área das superfícies.

3.2.1.1 Área de tarefa definida

Para as áreas de tarefa conhecidas, ou seja, considerando o *layout*, analisou-se os níveis de iluminância em relação a 500 lux. O entorno imediato foi analisado para iluminância média de 300 lux, considerando-se ainda, a faixa marginal de 0,5 m, desprezada na avaliação. A Figura 37 ilustra o método de análise para áreas de tarefa definidas em ambientes de escritório, baseado na NBR 8995-1.

Figura 37. Análise do nível de iluminância para área de tarefa definida

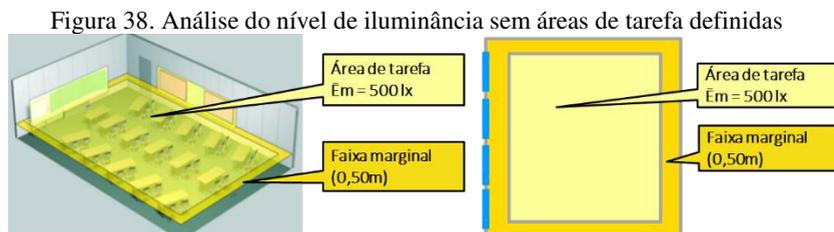


Fonte: Adaptada de NBR 8995-1 (ABNT, 2013)

3.2.1.2 Escritório de planta livre

Visando comparar os sistemas avaliados quanto ao desempenho energético, foi atribuído um único nível de iluminância $\bar{E}_m = 500 \text{ lux}$ no

plano de trabalho, com faixa marginal de 0,50 m, conforme ilustrado na Figura 38. Esse método para cálculo é utilizado para escritórios de plantas livres, mesmo para espaços pequenos, com sua área inteira em planta baixa considerada como plano de trabalho.



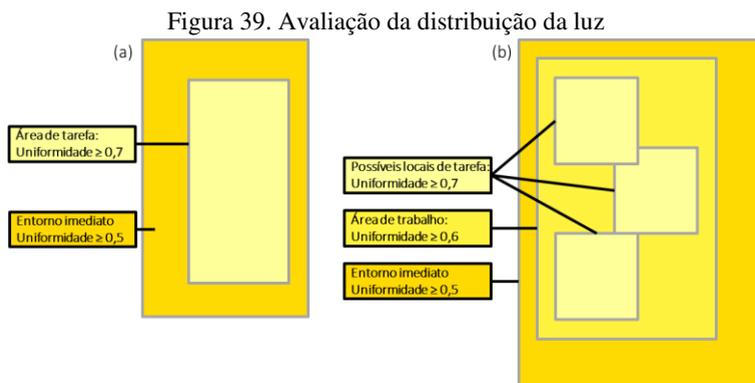
Fonte: Adaptada de NBR 8995-1 (ABNT, 2013)

3.2.2 Distribuição da luz

Para a distribuição da luz foi considerada a uniformidade, correspondente à razão entre o valor mínimo e o valor médio de iluminância encontrados no ambiente, ou seja, $E_{\text{mínima}}/E_{\text{média}}$.

Para análise da uniformidade do ambiente tendo definidas as áreas de tarefa, foram adotadas as recomendações de uniformidade mínima de 0,7 na área de tarefa e de 0,5 para uniformidade do entorno imediato, conforme a NBR 8995-1 (Figura 39a).

Para o planejamento do ambiente de escritório sem conhecimento das áreas de trabalho, utilizou-se uniformidade de 0,6. Segundo a norma, a experiência mostra que esse valor é suficiente para atingir uniformidade de 0,7 onde houver locais de tarefa (Figura 39b).



Fonte: Adaptada de NBR 8995-1 (ABNT, 2013)

3.2.3 Ofuscamentos

Os ofuscamentos estão associados às medidas de desconforto causadas pelo excesso de brilho ou de contraste no ângulo de visão das pessoas. Podem velar parte da cena, ou mesmo inabilitar a visão. Além disso, estudos envolvendo maior complexidade buscam obter medidas, ou índices, sobre a probabilidade de ocorrer ofuscamentos capazes de gerar desconforto visual. O Índice de Ofuscamento Unificado (UGR - *Unified Glare Rating*) é um desses índices, utilizado pela NBR 8995-1, que prevê limites UGR_L de acordo com as atividades realizadas em ambientes internos.

3.2.3.1 Luminâncias

A luminância, definida pela razão entre a intensidade luminosa e a área aparente A_p , projetada num ângulo de 90° em relação ao olho do observador. É responsável pela sensação de claridade, ou brilho, produzida por uma superfície (emissora ou refletora).

Conforme o mapa de luminâncias, foram observados os limites de ângulo de corte previstos na NBR 8995-1 para as luminárias.

3.2.3.2 Índice de Ofuscamento Unificado - UGR

O ofuscamento desconfortável, de acordo com a NBR 8995-1, baseia-se na fórmula do Índice de Ofuscamento Unificado da CIE, apresentada na Equação 5, que considera a posição-padrão do observador, não podendo ultrapassar o valor de UGR limite igual a 19 em escritórios (valores apresentados na Tabela 4).

$$UGR = 8 \cdot \log \left(\frac{0,25}{L_b} \cdot \sum \frac{L^2 \cdot \omega}{p^2} \right) \quad (5)$$

Onde:

L_b é a iluminância de fundo (cd/m^2);

L é a luminância de parte luminosa de cada luminária na direção do olho do observador (cd/m^2);

ω é o ângulo sólido da parte luminosa de cada luminária junto ao olho do observador (esferorradiano),

p é o índice de posição Guth de cada luminária, individualmente relacionado ao seu deslocamento a partir da linha de visão.

O UGR foi obtido por meio de dois programas de cálculo, o Photolux e o DIALux Evo 6.1, a uma altura de 1,20 m, que corresponde à altura do observador sentado.

Na primeira etapa de cálculos de UGR, foram utilizadas as imagens HDR, obtidas com fotografias em campo, com a Canon EOS 60D e calculados no Phtolux para três direções distintas em cada estação de trabalho: de frente para o computador, 45° à direita e 45° à esquerda.

Na segunda e terceira etapas, os valores de UGR foram calculados pelo programa DIALux Evo.

A segunda etapa consistiu em comparar os valores das medições em campo com os valores calculados pelo DIALux. Nessa etapa, foram reproduzidos, em modelos de sistemas de iluminação, os dois ambientes luminosos que foram medidos e avaliados na primeira etapa, utilizando fluorescentes T8 e LEDs SUBT8, mantendo-se as mesmas direções e altura para a avaliação. Esta etapa permitiu uma comparação entre os valores obtidos com medições e com o DIALux.

A terceira etapa, também utilizou valores calculados pelo DIALux, entretanto, procurou avaliar os dois sistemas de iluminação desde que os ambientes luminosos gerados pelas fluorescentes e LEDs tivessem o mesmo nível de iluminância no plano de trabalho. Nesse caso, também foi mantida a altura de 1,20 m, entretanto, foi utilizada a malha de pontos de cálculo padrão do programa, com direções padrão, de 15° em 15°, de 0° a 360°.

3.2.4 Qualidade da luz

Para o Índice de Reprodução de Cores (CRI ou Ra); Temperatura de Cor Correlata (CCT) e espectros, foram utilizados os dados fornecidos pelos fabricantes por catálogo e *plug-in* disponibilizado para instalação no DIALux.

3.3 PROGRAMA DE SIMULAÇÃO E ANÁLISE DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO

Foram dois os fatores que contribuíram para a realização de simulação computacional a fim de comparar os resultados obtidos em campo. Como observado nas pesquisas de produtos disponíveis no mercado brasileiro, fluorescentes T8 e LEDs substitutivos não continham as mesmas referências para os dados fotométricos. Mesmo para as trocas indicadas pelos fabricantes, não foi possível constatar equivalência direta,

principalmente, considerando-se a eficácia luminosa da lâmpada, e quantidade total de lumens (fluxo luminoso) da lâmpada.

Outra questão importante se deve à eficácia luminosa resultante do conjunto, composto pelas lâmpadas e luminárias. As luminárias, em geral, têm curvas medidas em laboratório para fluorescentes, mas não são disponibilizados os mesmos dados para as LEDs que podem substituí-las. Nesse sentido, as comparações das medições realizadas em campo com as simulações tornam-se importantes para uma avaliação de eficiência energética e custo dos sistemas, considerando parâmetros de conforto visual.

3.3.1 DIALux Evo 6.1

O DIALux foi o programa escolhido para elaboração dos modelos dos ambientes e dos sistemas de iluminação artificial. O programa, recomendado para realização de simulações de sistemas de iluminação artificial, permitiu com que a modelagem do ambiente fosse inteiramente realizada por meio de sua interface.

O programa utiliza a DIN EN 12464-1 (2005), idêntica à NBR 8995-1 (2013), baseando-se na norma para gerar resultados de cálculo aos parâmetros exigidos. Esse foi um forte indicador para sua utilização, tendo em vista realizar as análises dos sistemas de iluminação dos ambientes de acordo com a norma vigente.

Após os levantamentos, os desenhos em arquivos CAD de extensão DWG, foram importados no DIALux e utilizados como referência para elaboração do modelo e da malha utilizada nas medições em campo. A possibilidade de inserção dos arquivos fotométricos para a luminária e as lâmpadas fluorescentes e LEDs escolhidas, disponibilizados por *plug-in* dos fabricantes permitiu a comparação entre os sistemas.

3.3.1.1 Modelo

A escolha dos ambientes de escritório considerou as tarefas ou atividades presentes na NBR 8995-1. Para esta pesquisa foi utilizado um ambiente de escritório incluindo funções de: “escrever, ler e teclar” e “trabalhar com monitores de vídeo” (*VDT - Visual display terminals*).

O ambiente foi modelado dentro da interface do programa, utilizando as plantas de extensão DWG como referência, visando reproduzir o máximo de detalhes encontrados em campo.

Os seguintes parâmetros foram comuns aos sistemas de iluminação avaliados:

- Dimensões físicas da sala, com paredes, piso, teto, aberturas;
- Distribuição do mobiliário e acabamentos, como persianas e computadores;
- Refletâncias das superfícies;
- Altura de montagem das luminárias (*H_p*),
- Tipo e distribuição das luminárias.

3.3.1.2 Perfil de utilização dos sistemas

O perfil de utilização dos sistemas, configurado para o DIALux, teve como base os fatores de manutenção calculados conforme o ciclo de vida da lâmpada, o ciclo de manutenção das luminárias e do ambiente conforme verificação das limpezas realizadas no local. Para os dados do tempo de utilização, foram calculadas as horas de lâmpadas acesas de acordo com o horário de expediente para o escritório.

3.3.1.3 Superfícies de cálculo

As superfícies de cálculo foram criadas, no programa, em correspondência à malha de pontos utilizada para as medições, ou seja, uma superfície de cálculo para cada ponto medido em campo. Para a área total, equivalente ao plano de uso, de mesma altura das mesas, a 0,70 m do nível do piso, foi criada uma superfície de cálculo que expõe as curvas isolux na sala. As curvas isolux foram configuradas com a mesma escala de cores, de acordo com o nível de iluminância (em lux).

Essas superfícies de cálculo criadas puderam ter os Parâmetros de cálculo selecionados e ajustados, conforme a altura e direção, quando fosse necessário.

3.3.1.4 Parâmetros de cálculo

Para obter resultados a partir das simulações, determinados parâmetros de cálculo foram selecionados. No cálculo de cada valor de iluminância, foi selecionado, para a superfície de cálculo análoga, o parâmetro de cálculo “Potência luminosa vertical (adaptativo)”. O posicionamento das superfícies de cálculo dos níveis de iluminância foram ajustadas para 0,70 m, a mesma altura das mesas no local.

Nos cálculos de Índice de Ofuscamento Unificado, UGR, o parâmetro “*Unified Glare Rating (UGR)*” foi selecionado. Foram localizados e direcionados de acordo com as fotos realizadas no experimento de campo, para a comparação entre os resultados obtidos em campo e resultados simulados, a uma altura de 1,20 m de altura em relação ao piso.

Nos cálculos de UGR realizados nas simulações de iluminação para análise do desempenho energético, foi utilizada a malha de cálculo padrão do programa, que confere valores de 15° em 15°, de 0° a 360°.

Os parâmetros de cálculo especificados, mais as características do modelo e configuração do perfil de utilização permitiram obter, após a simulação, valores utilizados na comparação entre os sistemas por medição e por simulação. Os principais indicadores utilizados na comparação são resumidos no Quadro 3.

Quadro 3. Indicadores utilizados na comparação entre as medições e simulações

Níveis de iluminância mantida no plano de trabalho $\bar{E}_m(\text{média}), E(\text{máxima}), E(\text{mínima})$
Uniformidade ($E_{\text{mínim}}/E_{\text{média}}$)
Índice de Ofuscamento Unificado UGR
Fluxo luminoso ϕ [lm]

Para isso, o modelo de simulação com LEDs, comparado com a medição, foi ajustado quanto ao rendimento das luminárias, estimando-se que haja menor perda causadas por reflexão, como ocorre com as fluorescentes. As LEDs têm ângulos de abertura menores e como consequência, o fecho luminoso é voltado ao plano de trabalho. Essa diferença entre as fluorescentes, que possuem fecho luminoso omnidirecional, motivou a adequação dos valores a um rendimento superior para as luminárias com LEDs, que não é disponibilizado pelo fabricante, ou calculado pelo programa.

Essa adequação foi possível ante a realização de medições em campo, que forneceu base para esse ajuste.

3.3.2 Ajuste dos modelos com LEDs

A partir do ângulo de abertura das LEDs utilizadas, de 100° x 150°, contabilizou-se o rendimento de 100% (total) para as luminárias. Partindo do percentual de perda de 26% especificado para a luminária (LOR de 74%), ajustou-se, percentualmente, o valor indicado para o fluxo luminoso de cada lâmpada LED.

O valor inicial de lumens para cada lâmpada LED foi majorado proporcionalmente para que, após a perda fixada pela luminária, resultasse ao cálculo de rendimento da luminária $LOR = 100\%$.

A comparação entre os valores medidos e simulados permitiu a continuidade do trabalho na análise do desempenho energético e econômico, baseada no ajuste do modelo com LEDs e na equiparação dos níveis de iluminância para os dois sistemas.

3.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO ENERGÉTICO E ECONÔMICO

Os modelos utilizados para avaliar o desempenho energético e econômico foram fundamentados nos resultados das medições realizadas em campo.

As análises de desempenho energético e econômico tiveram como base os níveis de iluminância recomendados pela NBR 8995-1. Os modelos tiveram os níveis de iluminância equalizados no plano de trabalho em 500 lux, ao final do ciclo de uso para cada sistema, desprezando-se uma zona marginal de 0,50 m no perímetro do ambiente.

3.4.1 Eficiência energética dos sistemas

Foram utilizados os seguintes indicadores principais relacionados à eficiência energética, para análise das simulações dos ambientes: densidade de potência instalada, fluxo luminoso da lâmpada, eficácia luminosa da lâmpada, eficácia luminosa do sistema e eficiência da luminária.

A tabulação e análise dos dados baseou-se nos indicadores resultantes de onze simulações, sendo sete realizadas para o sistema com fluorescentes T8 e quatro para o sistema com LEDs SUBT8. As simulações para cada sistema foram baseadas nos dados de ciclo de uso das lâmpadas, informados pelo fabricante.

Conforme a depreciação do fluxo luminoso, mediante o tempo de utilização em horas de lâmpadas acesas, essas tiveram o fluxo luminoso ajustado nos modelos, percentualmente, ao valor correspondente informado pelo fabricante.

Em geral, a comparação precisou incluir mais de um indicador na análise de eficiência. Os referidos fatores isolados poderiam induzir a uma falsa impressão de eficiência quando assim expostos. Por esse motivo, buscou-se relacionar tanto os indicadores de eficiência, quanto os parâmetros de conforto visual dos sistemas. Nesse sentido, os indicadores de eficiência foram relacionados aos parâmetros de conforto visual

considerados, relativos à quantidade de luz (níveis de iluminância $\bar{E}_{m(média)}$, $E_{m(máxima)}$, $E_{m(mínima)}$), distribuição da luz (Uniformidade $E_{m(mínima)}/E_{m(média)}$) e ofuscamentos (UGR), recomendados pela NBR 8995-1.

3.4.1.1 Densidade de potência instalada

A densidade de potência instalada (DPI), que consiste na potência nominal total instalada dividida pela área do ambiente, medida em Watts/metro quadrado (W/m^2) foi analisada com base no RTQ-C, obtendo-se a classificação dos sistemas. A densidade de potência instalada foi obtida após as simulações no DIALux para cada sistema.

3.4.1.2 Fluxo luminoso da lâmpada

O fluxo luminoso da lâmpada de cada sistema, em lumens (lm) foi utilizado para simulação no DIALux. A configuração dos fluxos luminosos para cada lâmpada baseou-se nos fluxos luminosos apresentados nos catálogos do fabricante, conforme o seu ciclo de uso. As lâmpadas utilizadas na simulação foram obtidas por meio de *plug-in* do fabricante. O programa permite o ajuste do fluxo luminoso da lâmpada, o que possibilitou executar as simulações de acordo com a depreciação do fluxo luminoso informada.

3.4.1.3 Eficácia luminosa da lâmpada

A eficácia da lâmpada, correspondente ao quanto de lumens é emitido para cada Watt de potência, ou seja, em lumens/Watt foi obtida após a simulação no DIALux, conforme o fluxo luminoso ajustado.

3.4.1.4 Eficácia luminosa do sistema

A eficácia luminosa do sistema, correspondente à medida do fluxo luminoso inicial de toda a instalação, incluindo lâmpadas e reatores em relação à potência total instalada, medida em lumens/Watt, foi obtida após a simulação no DIALux, conforme o fluxo luminoso ajustado.

3.4.1.5 Eficiência da luminária (rendimento)

A eficiência da luminária (LOR), de valor fixo, foi obtida por meio de *plug-in* disponibilizado pelo fabricante para simulação no DIALux.

3.4.2 Custo dos sistemas

Os custos avaliados incluíram o consumo, os custos dos conjuntos de luminárias, lâmpadas e reatores e as trocas das lâmpadas e reatores ao final dos ciclos de uso para cada sistema.

3.4.2.1 Consumo

O consumo (kWh) para cada sistema foi obtido por meio de simulação no DIALux, após a definição dos parâmetros de cálculo e perfil de utilização. Como parâmetro para o valor do kWh, foi considerado valor da tarifa de energia elétrica, proporcional à média do valor do kWh cobrado em uma fatura do estabelecimento (mês de julho de 2016).

3.4.2.2 Consumo por área

O consumo por área (kWh/m²) para cada sistema foi obtido por meio de simulação no DIALux, simultaneamente ao valor apresentado para o consumo, ambos apresentados em relatório do programa.

3.4.2.3 Custo

Os custos avaliados consideraram os resultados de consumo energético para cada sistema e os custos dos conjuntos de luminárias, lâmpadas e reatores, estes últimos, para as fluorescentes. Foram incluídos, ao final de cada ciclo, os custos das trocas de lâmpadas e reatores, ou apenas lâmpadas, para as LEDs. Os valores dos equipamentos foram baseados nas notas fiscais apresentadas pelo estabelecimento onde foi realizado o experimento de campo (Santa Rita Materiais Elétricos, 2015).

Para obter uma análise econômica entre os sistemas, os fluxos de desembolsos durante seus ciclos de vida (conforme a utilização) foram descontados e trazidos ao valor presente. Portanto, todos os montantes anuais foram descontados com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA de 2016 igual a 6,29% (IBGE, 2017), taxa referência na correção monetária decorrente de inflação. O Valor Presente Líquido (VPL) de modo geral, é empregado na comparação de alternativas de investimentos. No entanto, sua fórmula também tem aplicação neste trabalho, uma vez que traz todo o fluxo de desembolsos para uma mesma base de referência, que seria o valor do dinheiro no tempo presente ($t=0$). A fórmula utilizada para obter os valores descontados é apresentada na Equação 6.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} \quad (6)$$

Onde:

FC é o fluxo de caixa no período;

t é o período no tempo em que o dinheiro será investido;

n é o número de períodos;

i é taxa referência na correção monetária decorrente de inflação.

O cálculo do reajuste anual da tarifa de energia é realizado de maneira complexa e não depende apenas da correção de índice de inflação, IGP-M ou IPCA (BRASIL, 2016). Desse modo, para considerar uma correção do custo da energia ao longo do tempo, optou-se pela correção apresentada pela concessionária da região referente ao reajuste médio para 2015, igual a 3,61% (CELESC, 2015).

3.4.2.4 Indicadores de eficiência, custos e de conforto visual

O Quadro 4 resume os dados utilizados nas análises de desempenho luminoso, energético e econômico. Esses dados foram fornecidos pelo fabricante, por meio de catálogo ou *plug-in*; foram obtidos por meio de simulação ou calculados após a simulação.

Quadro 4. Indicadores utilizados na comparação do desempenho luminoso, energético e dos custos dos sistemas

Indicadores		Unidade	Método de obtenção dos indicadores	Referências para utilização dos indicadores	
1	Densidade de potência instalada	W/m ²	Obtido após simulação no DIALux	Boyce e Smet (2015); RTQ-C (2010)	
2	Fluxo luminoso da lâmpada	lm	Fornecido pelo <i>plug-in</i> do fabricante, foi ajustado e utilizado para simulação no DIALux	Boyce e Smet (2015)	
3	Eficácia luminosa da lâmpada	lm/W	Fornecido pelo <i>plug-in</i> do fabricante utilizado para simulação no DIALux		
4	Eficácia luminosa do sistema	lm/W	Obtido após simulação no DIALux		
5	Eficiência da luminária (rendimento)	%	Fornecido pelo <i>plug-in</i> do fabricante utilizado para simulação no DIALux		
6	Níveis de iluminância mantida no plano de trabalho	\bar{E}_m (média)	lux		ABNT NBR ISO CIE 8995 (2013)
		E (máxima)	lux		
		E (mínima)	lux		
7	Uniformidade $E_{(mínima)}/\bar{E}_m$ (média)	-	Obtidos após simulação no DIALux		
8	Ofuscamento desconfortável (UGR)	-	Obtidos após simulação no DIALux		
9	Índice de Reprodução de cor – IRC ou Ra	-	Fornecido pelo <i>plug-in</i> do fabricante utilizado para simulação no DIALux		
10	Consumo	kWh/ano	Obtido após simulação no DIALux	-	
11	Consumo por área	kWh/m ² .ano	Calculado após simulação no DIALux	Boyce e Smet (2015)	
12	Custo	R\$/ano	Obtido após simulação no DIALux	-	

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados da comparação entre os sistemas de iluminação artificial de um ambiente de escritório utilizando lâmpadas fluorescentes T8 (potência nominal de 38W) e LEDs SUBT8 (potência nominal de 16W) indicados para a substituição de lâmpadas em reformas desse tipo de sistema.

A primeira parte mostra dados comparativos relacionados aos indicadores de conforto visual. Quanto à quantidade e distribuição da luz, são analisados os níveis de iluminância e uniformidade ($U = E_{\text{mínima}}/E_{\text{média}}$), a partir das medições realizadas no ambiente. Posteriormente, foram analisados os graus de ofuscamento utilizando imagens HDR obtidas com a Câmera Canon EOS 60D e o programa Photolux. Quanto à qualidade da luz, foram verificados os Índices de Reprodução de Cor (IRC) e Espectros das FL T8 e LEDs.

Numa outra etapa, os resultados das medições foram comparados com os resultados de iluminância e ofuscamento obtidos nas simulações no DIALux Evo 6.1.

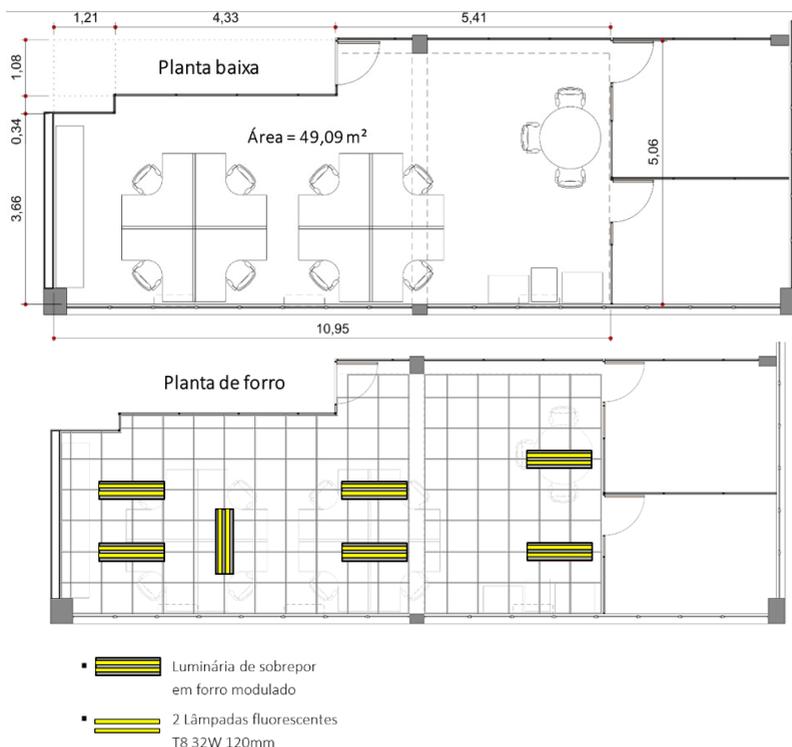
Por fim, após a análise dos resultados da comparação entre os dados medidos e simulados, foi feita uma análise do desempenho energético considerando indicadores de consumo, manutenção do fluxo luminoso e custos dos equipamentos para instalação dos sistemas de iluminação projetados com lâmpadas fluorescentes T8 e LEDs SUBT8.

4.1 DIMENSÕES E MATERIAIS DE ACABAMENTO DO AMBIENTE

O ambiente teve todas as dimensões e acabamentos levantados com trena laser e trena métrica, assim como os elementos de forro, persianas, mobiliário e posicionamento das luminárias. O ambiente, representado na Figura 40, permitiu o registro das medições realizadas no ambiente, com:

- Área = 49,09 m²;
- Pé-direito = 2,68 m;
- Topo da janela = 2,55 m;
- Peitoril das janelas = 96 cm;
- Peitoril das divisórias = 1,07 m;
- Altura do plano de trabalho = 0,70 m.

Figura 40. Planta baixa do ambiente com mobiliário e planta de forro



4.2 NÍVEIS DE ILUMINÂNCIA E UNIFORMIDADE

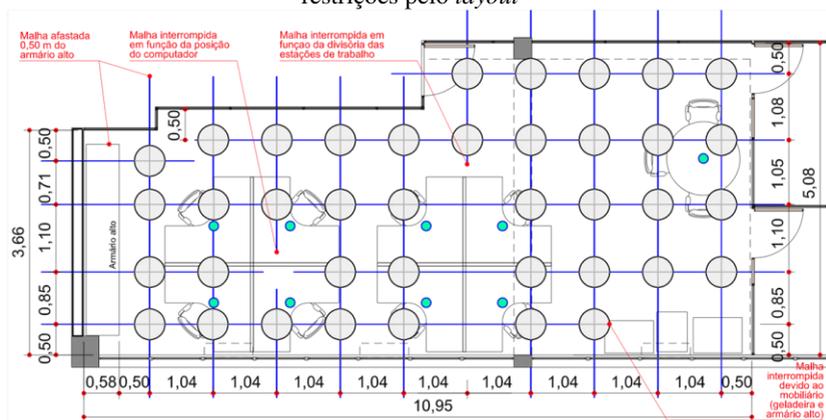
As medições dos níveis de iluminância para o sistema com fluorescentes T8 e com LEDs tiveram a mesma malha de pontos de verificação.

4.2.1 Malha de pontos para verificação da iluminância

A malha de cálculo e verificação de pontos, baseada na NBR 8995-1, considerou uma zona marginal de 0,5 m próximo às paredes. Houve também a necessidade de suprimir alguns pontos previstos no plano inicial devido à disposição do mobiliário no ambiente, como armários altos e divisórias ou computadores das estações de trabalho. A malha resultante (Figura 41) previu 39 pontos de verificação com módulos de

aproximadamente 1 m^2 e mais 9 pontos que foram localizados no centro de cada área de tarefa.

Figura 41. Malha de verificação do nível de iluminância considerando restrições pelo *layout*



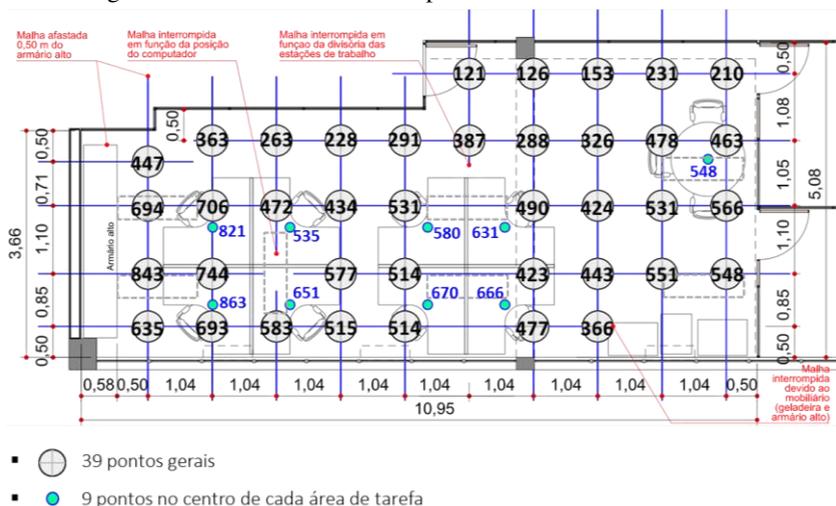
- ⊕ 39 pontos gerais
- ● 9 pontos no centro de cada área de tarefa

4.2.2 Níveis de iluminância com lâmpadas fluorescentes tubulares T8

Os níveis de iluminância medidos no sistema com fluorescentes T8 foram espacializados em planta baixa conforme a Figura 42. Como resultado, obteve-se uma iluminância média mantida no plano de trabalho igual a 453 lux. A variação de 9% abaixo da recomendação normativa, definida como 500 lux para ambiente com atividade de escritório, está dentro do limite de tolerância admitido, de 10% para medidas de iluminância, de acordo com a NBR 8995-1.

Entre todos os pontos medidos, o nível máximo foi de 843 lux e o nível mínimo foi de 121 lux, entretanto, considerando a malha geral de 39 pontos, menos de 8% dos valores medidos estavam abaixo de 200lux e apenas 20% abaixo de 300 lux. Com poucos valores abaixo de 300lux, o nível médio é, portanto, adequado à norma brasileira para esse tipo de atividade.

Figura 42. Níveis de iluminância para fluorescentes tubulares T8



A norma permite fazer a verificação dos níveis de iluminância com limites diferenciados para as áreas de tarefa e do entorno imediato. Portanto, considerando os pontos de medição realizados nas áreas de tarefa, os resultados mostram uma iluminância média de 590 lux, 18% acima no valor mínimo de 500 lux, ou seja, o resultado é adequado à NBR 8995-1.

No entorno imediato, não foram incluídos os pontos na área da mesa e o espaço ocupado pelo usuário. Para o entorno imediato o nível médio encontrado foi de 304 lux, estando de acordo com o limite normativo de 300 lux.

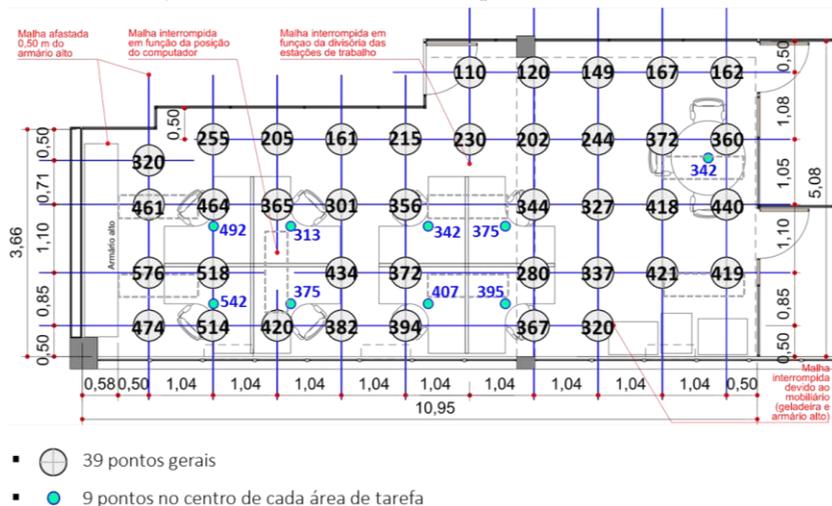
Admitindo-se o ciclo de vida indicado pelo fabricante, ou seja, ao final de 16.000h, o fluxo luminoso seria 90% do fluxo luminoso inicial. Mantendo-se a limpeza do ambiente e das luminárias, os níveis de iluminância encontrados nas áreas de tarefa e do entorno imediato ainda seriam satisfatórios, admitindo-se que chegariam a 90% dos valores medidos no local, equivalente a 531 lux nas áreas de tarefa e 273 lux no entorno imediato (dentro do limite de tolerância para medições de iluminância de 10% para 300 lux).

Os resultados das medições dos níveis de iluminância mais altos nas áreas de tarefa mostram que houve preocupação em disponibilizar maior quantidade de luz para essas áreas, colaborando para o resultado de nível de iluminância satisfatório para a atividade de escritório.

4.2.3 Níveis de iluminância com lâmpadas LED SUBT8

O resultado dos níveis de iluminância medidos após a substituição das fluorescentes T8 pelas indicadas LED tubulares SUBT8 estão dispostos em planta baixa na Figura 43. A iluminância média mantida no plano de trabalho foi de 333 lux. Este valor encontra-se 33% abaixo da recomendação de 500 lux. O resultado para a verificação da iluminância é, portanto, inadequado a esse tipo de uso ou atividade.

Figura 43. Níveis de iluminância para as LED SUBT8



Entre todos os pontos medidos, o nível máximo foi de 576 lux e o nível mínimo foi de 110 lux. Da malha geral, 15% das medidas de iluminância foram abaixo de 200 lux, e 33% abaixo de 300 lux. O sistema com LEDs teve menos de 8% dos valores medidos na malha geral acima de 500 lux, enquanto que, para as medições com as fluorescentes, 41% dos níveis estavam acima desse valor.

Nas áreas de tarefa, o nível médio de iluminância foi 404 lux, 19% abaixo do valor estabelecido, considerado também, inadequado. O nível máximo medido na área de tarefa foi de 576 lux e o nível mínimo foi de 280 lux. O entorno imediato teve um nível médio de 238 lux, 21% abaixo dos 300 lux. O nível máximo medido no entorno imediato foi de 372 lux e o nível mínimo foi de 110 lux.

Admitindo-se o ciclo de vida indicado pelo fabricante, ou seja, ao final de 40.000h, o fluxo luminoso seria 70% do fluxo luminoso inicial.

Mantendo-se a limpeza do ambiente e das luminárias, os níveis de iluminância nas áreas de tarefa e no entorno imediato seriam mais baixos do que os valores medidos no local, equivalentes a aproximadamente 273 lux para as áreas de tarefa e 162 lux para o entorno imediato, resultados que seriam 57% e 54% abaixo da recomendação.

De maneira coerente às medições realizadas com as fluorescentes T8, também foram encontrados níveis de iluminância mais altos nas áreas de tarefa. Entretanto, a queda no nível médio de iluminamento mostrou ser inadequado o planejamento de uma substituição 1:1, ou seja, mantendo-se a mesma quantidade e distribuição dos conjuntos de luminárias e lâmpadas.

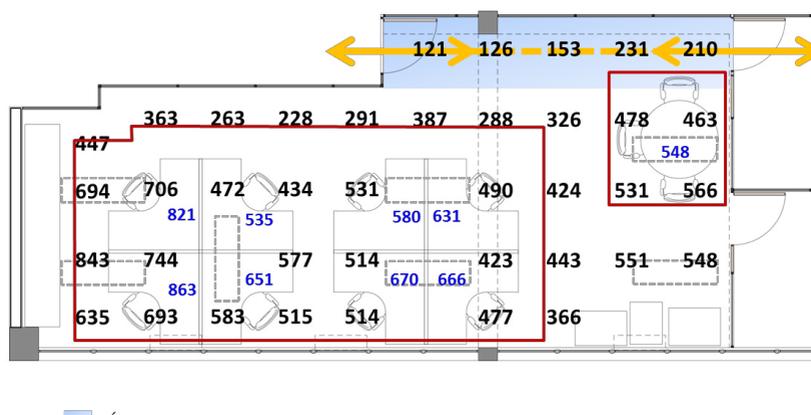
Essa diminuição da iluminância deve-se à menor entrega de quantidade total de lumens a partir das luminárias, visto que as LEDs possuem fluxo luminoso bem mais baixo do que as fluorescentes T8. Mesmo que o rendimento estimado para as luminárias com LEDs seja maior, o resultado da substituição de 1:1 não foi considerado equivalente, nem adequado à NBR 8995-1 para todas as avaliações, considerando-se as áreas de tarefa e o entorno imediato.

4.2.4 Uniformidade do sistema com fluorescentes T8

A uniformidade da iluminância, correspondente à relação entre a iluminância mínima e a iluminância média ($U = E_{\text{mínima}}/E_{\text{média}}$) foi de 0,27, para os níveis medidos seguindo a malha total de pontos. Seguindo a NBR 8995-1, conhecendo o *layout* e as atividades realizadas no ambiente, é indicado analisar as áreas de tarefa e áreas de entorno imediato com referências de uniformidade que não podem ser inferiores a 0,7 e 0,5, respectivamente. Com isso, o valor encontrado para uniformidade nas áreas de tarefa foi de 0,72, considerado adequado à recomendação normativa. Quanto ao entorno imediato, obteve-se uniformidade de 0,4, resultando em 20% abaixo do valor recomendado.

A uniformidade no entorno não foi atingida, o que pode ser resultado da geometria da sala, que não é um retângulo perfeito, destacando que a área de circulação da sala, próxima aos acessos, foi a que teve níveis mais baixos de iluminância, interferindo sobre o resultado da uniformidade, como visualizado na Figura 44.

Figura 44. Níveis mais baixos de iluminância no entorno imediato para fluorescentes tubulares T8



- ■ Área com níveis mais baixos de iluminância no entorno imediato
- ↔ Circulação
- □ Áreas de tarefa

Uma instalação de iluminação diferenciada para essa área, que apresentou níveis mais baixos de iluminância, poderia ajustar a uniformidade exigida pela norma. No entanto, os questionamentos sobre as medições de conforto visual não são consenso, como se pôde observar na literatura estudada. Novos estudos vêm sendo formulados, com novas medidas propostas para avaliação dos ambientes luminosos. Citando Iacomussi et al. (2015), a dificuldade em se medir conforto visual é seguida da máxima “*conforto é o não desconforto*”. Nesse sentido, outros estudos incluindo o usuário, por exemplo, permitiriam discutir o resultado considerado insuficiente pela norma quanto à uniformidade, ou ainda, inserir outros padrões de qualidade para o ambiente luminoso.

4.2.5 Uniformidade do sistema com LEDs SUBT8

A uniformidade da iluminância verificada a partir das medições com o sistema com LEDs, foi 0,33, para a malha total de pontos. O valor encontrado para a uniformidade nas áreas de tarefa foi de 0,69, considerado adequado. Para o entorno imediato a uniformidade foi de 0,48, valor também adequado, sendo 5% abaixo do valor recomendado e estando dentro dos limites de tolerância.

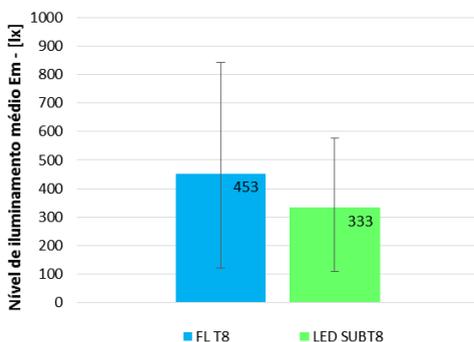
Comparando-se as uniformidades encontradas para os sistemas, percebe-se que houve redução em 24% do nível médio de iluminamento

para o entorno imediato com LEDs (313 lux com as fluorescentes e 238 lux com LEDs). O nível mínimo, por sua vez, reduziu 9% (121 lux e 110 lux). Isso gerou uma aproximação da relação entre os níveis mínimo e médio para o sistema com LEDs, e consequentemente, maior uniformidade para o entorno imediato quando comparado às fluorescentes.

4.2.6 Comparação dos níveis de iluminância medidos

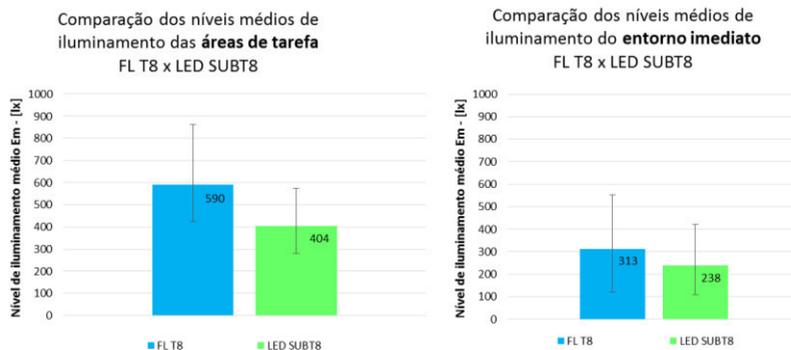
A comparação dos níveis de iluminância medidos para os dois sistemas de iluminação é ilustrada pela Figura 45. A substituição das fluorescentes T8 pelas LEDs SUBT8 apresentou um decréscimo de 26%, ou 120 lux, para os níveis de iluminação medidos no plano de uso do ambiente.

Figura 45. Comparação entre os níveis médios de iluminação do ambiente utilizado fluorescentes FL T8 e LED SUBT8



A análise das áreas de tarefa e entorno imediato, adequada à situação com *layout* definido, pode ser observada na Figura 46.

Figura 46. Áreas de tarefa e entorno imediato utilizado fluorescentes FL T8 e LED SUBT8



Considerando os níveis médios de iluminância das áreas de tarefa, houve redução de 31%, ou 186 lux, no plano de uso para o sistema utilizando LEDs. No entorno imediato, os níveis de iluminância médios reduziram 24%, ou 75 lux.

Destaca-se que foi feita apenas a troca das lâmpadas, mantendo as mesmas luminárias, em número e distribuição. Considerou-se a compatibilidade e a indicação do catálogo do fabricante de realizar a substituição direta por lâmpadas LED, no entanto, níveis compatíveis de iluminância não foram atingidos.

Os resultados apresentados para os níveis de iluminância mostram que o teste de substituição das fluorescentes T8 por LEDs SUBT8 apresentou níveis insatisfatórios perante a verificação segundo a NBR 8995-1.

Os valores de iluminância mais elevados para ambos os sistemas foram obtidos nas medições das áreas de tarefa, indicando que houve preocupação em proporcionar maior quantidade de luz nas áreas onde são realizadas as atividades. Conhecendo-se o *layout* e, portanto, as áreas de tarefa, é correta a avaliação dos níveis de iluminância para o ambiente considerando parâmetros de 500 lux para áreas de tarefa e níveis mais baixos de iluminância de pelo menos 300 lux para as áreas adjacentes, definidas como entorno imediato. O mesmo procede para a análise da uniformidade, considerando 0,7 para áreas de tarefa e 0,5 para o entorno imediato.

Considerados esses parâmetros, o primeiro sistema, com fluorescentes T8, mostrou-se adequado em relação à quantidade de luz entregue no plano de trabalho, ou seja, teve iluminâncias médias mantidas (\bar{E}_m) adequadas à NBR 8995-1. O segundo sistema avaliado, com LEDs

SUBT8 não resultou em níveis médios adequados para nenhuma das áreas avaliadas (área de tarefa e entorno imediato), estando abaixo dos níveis recomendados.

A análise das uniformidades foi considerada adequada para os dois sistemas nas áreas de tarefa, e inadequada para o sistema com as fluorescentes tubulares T8 no entorno imediato. Outras medidas utilizadas para análise de conforto visual foram utilizadas na verificação e comparação dos dois sistemas de iluminação, incluindo Índice de Reprodução de Cor (IRC ou Ra e em inglês, CRI – *Color Rendering Index*); Temperatura de Cor Correlata (TCC, em inglês, CCT – *Correlated Color Temperature*) e ofuscamentos desconfortáveis, com relações de medidas de luminâncias a partir do Índice de Ofuscamento Unificado (UGR, em inglês, *Unified Glare Rating*).

4.3 ÍNDICES DE REPRODUÇÃO DE COR E TEMPERATURAS DE COR CORRELATA

As medições realizadas com o espectrômetro UPRtek MK350S permitiram verificar os dados fornecidos pelos fabricantes, para o Índice de Reprodução de Cor (IRC) e Temperatura de Cor Correlata (TCC), das lâmpadas fluorescentes T8 e LEDs SUBT8.

Como resultado das medições, todas as lâmpadas fluorescentes T8 verificadas apresentaram Índice de Reprodução de Cor compatível à especificação do fabricante, maior ou igual a 80, estando, portanto, adequadas à NBR 8995-1.

Para as LEDs SUBT8 foram encontradas duas referências em catálogo para o IRC: maior do que 80 e maior do que 82. O valor de maior frequência encontrado na medição do IRC das LEDs SUBT8 foi de 80. Não foram verificados valores inferiores a esse, confirmando com as medições, assim como as fluorescentes, a sua adequação à norma brasileira.

O Quadro 5 apresenta o resumo dos resultados de IRC e TCC para as fluorescentes T8 e LEDs SUBT8, especificados e medidos com o espectrômetro UPRtek.

Quadro 5. Resultados de medição e comparação com a especificação do fabricante para IRC (R_a) e TCC

Lâmpada fluorescente T8			Lâmpada LED SUBT8		
	IRC (R_a)	TCC [K]		IRC (R_a)	TCC [K]
Especificação do fabricante	≥ 80	4.000	Especificação do fabricante	> 80	4.100
Medição com o espectrômetro UPRRtek	81	3.942	Medição com o espectrômetro UPRRtek	80	4.124

CCT	3942K	CRI	81	CCT	4124K	CRI	80
		R9	5			R9	-4
CRI	81			CRI	80		
LUX	1821			LUX	1980		
λ_p	545nm			λ_p	593nm		
λ_d	578nm			λ_d	578nm		

Fluorescentes e LEDs apresentaram valores baixos para o R9, com destaque para os LEDs, com valores inferiores a 0 (zero), entre -0,1 e -4,7. Na literatura, o valor R9 é associado a uma baixa reprodução da cor vermelha. Para o caso avaliado, as fluorescentes, foram superiores às LEDs quanto ao R9. No entanto, outras LEDs tubulares podem ser encontradas, no mercado brasileiro, com R9 superior a 20, demonstrando que esse parâmetro não é superior para as fluorescentes de modo geral, mas sim, para os produtos testados nesse trabalho.

As Temperaturas de Cor Correlatas não são apresentadas pela NBR 8995-1 dentro de limites ou relações com outras medidas de conforto visual. A norma comenta de modo superficial, a dependência das TCCs quanto a questões psicológicas, estéticas, à iluminância, às cores do ambiente e mobiliário e até mesmo ao clima. Como visto na literatura, as TCCs são associadas a níveis de iluminância, dentro de limites como a curva de Kruthof, na qual a combinação 4.000 K e 500 lux mostra-se adequada para as fluorescentes e LEDs. Além disso, referências de pesquisas com o usuário em ambientes de escritório, apresentaram, para LEDs e fluorescentes, preferências por TCCs de 4.000 K combinados a níveis de iluminância de 500 lux. Nesse sentido, os resultados para as

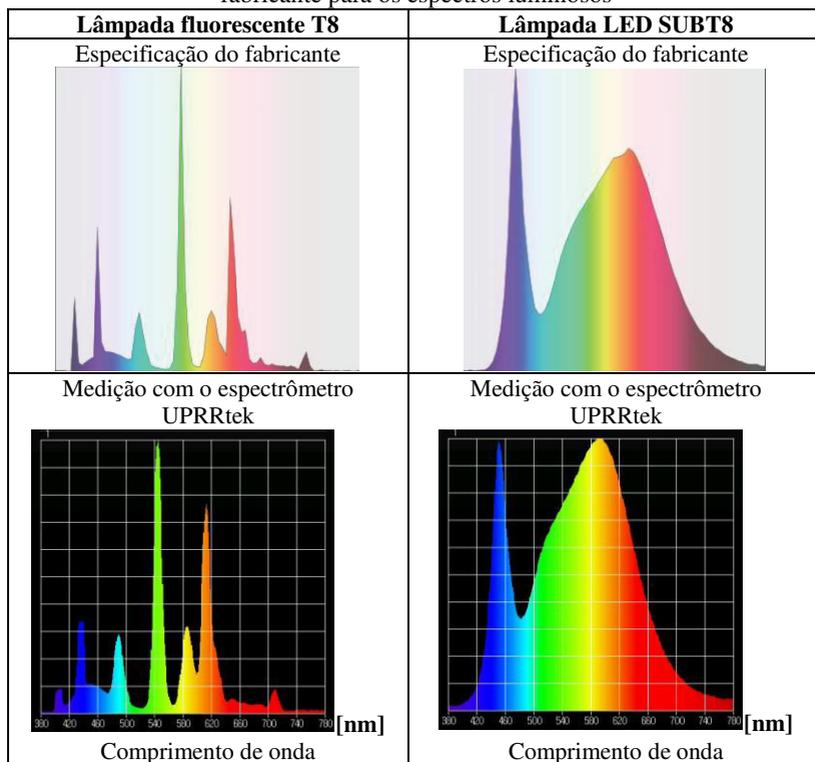
TCCs medidas foram adequados às especificações dos fabricantes e referências da literatura.

4.4 ESPECTROS

Os espectros das lâmpadas utilizadas para os dois sistemas de iluminação foram verificados com o espectrômetro UPRRtek.

Tanto para as LEDs quanto para as fluorescentes, os picos no espectro luminoso para os comprimentos de onda apresentados pelo gráfico do fabricante foram confirmados. O pico máximo medido para as fluorescentes foi de 545 nm e para as LEDs, de 593 nm. O Quadro 6 apresenta o resultado das medições para as fluorescentes T8 e os LED SUBT8.

Quadro 6. Resultados de medição e comparação com a especificação do fabricante para os espectros luminosos



A NBR 8995-1 não traz parâmetros de avaliação para espectros luminosos. Apesar disso, assim como ocorre com o IRC e a TCC, pesquisas com o usuário vêm sendo realizadas buscando identificar relações entre medidas de conforto visual e diferentes distribuições dos espectros luminosos (ou SPDs *Spectral Power Distributions*). Nas pesquisas relacionadas aos espectros luminosos e preferência do usuário, foi maior a preferência por ambientes com espectros luminosos de lâmpadas LED sobre as fluorescentes, a uma TCC de 4.000 K.

Nessa mesma direção, estudos mostram que os espectros podem ter influência sobre a percepção de brilho do ambiente, influenciando na redução do nível de iluminância necessário para realização das atividades e o conforto visual.

Fica evidente que os espectros dos LEDs têm uma distribuição mais equilibrada para os diferentes comprimentos de onda, entretanto, existe a necessidade de ampliação de novos estudos nessa área, uma vez que não há consenso sobre a relação da quantidade de brilho nos ambientes e os espectros para definição de medidas ou limites visando obter-se conforto visual.

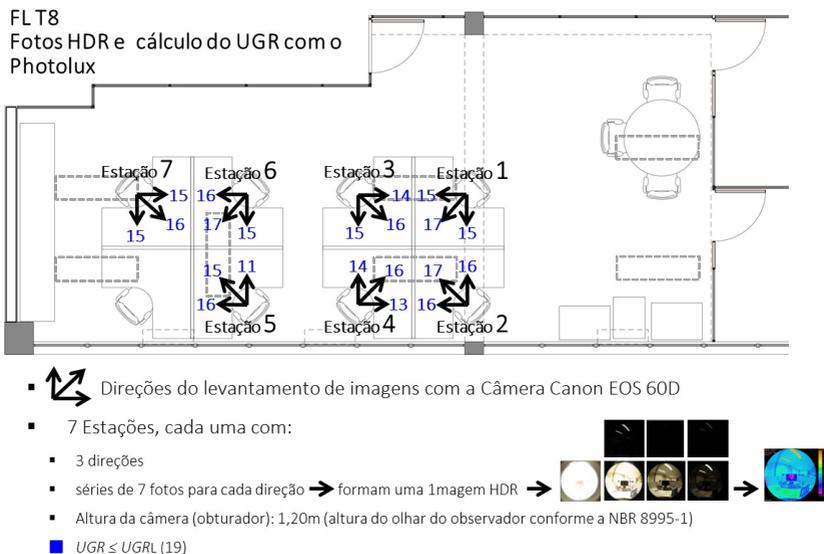
4.5 OFUSCAMENTOS

Para a análise de ofuscamentos no ambiente com os sistemas de iluminação utilizando as fluorescentes T8 e os LEDs SUBT8, foram utilizadas as imagens HDR, obtidas com a Câmera Canon EOS 60D nas medições em campo e o programa Photolux. Os resultados com a utilização do Photolux possibilitaram a verificação de medidas de luminância e avaliação por meio do Índice de Ofuscamento Unificado (ou UGR – *Unified Glare Rating*). O APÊNDICE A apresenta as imagens HDR utilizadas para o cálculo por meio do Photolux.

4.5.1 UGR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8

Os resultados para os valores UGR obtidos com imagens HDR no sistema com as fluorescentes, localizando as áreas de tarefa em uso com computadores, são apresentados na Figura 47.

Figura 47. UGR nas estações de trabalho em uso para o sistema com fluorescentes T8

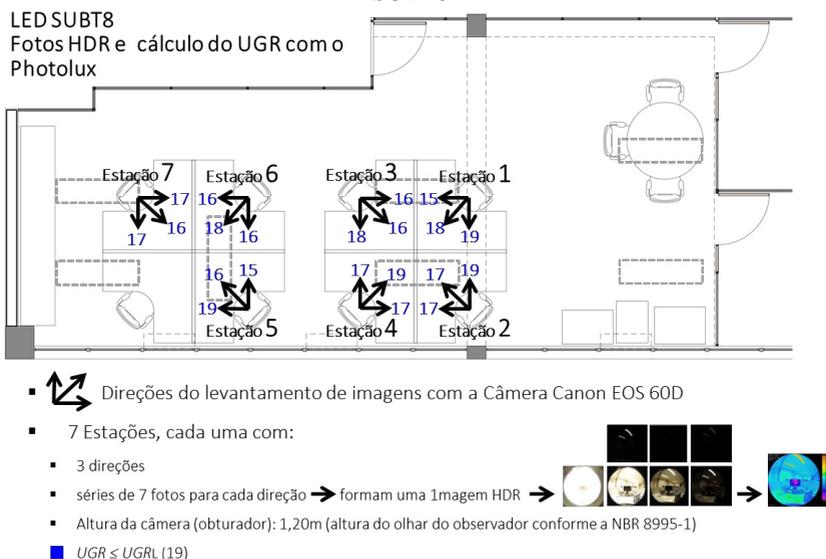


O valor máximo para UGR foi de 17, encontrado nas estações 1, 2 e 6, todos com o observador direcionado ao seu computador. Portanto, todos os valores para UGR no sistema com as fluorescentes T8 foram adequados ao limite especificado pela NBR 8995-1, $UGR_L = 19$, estando abaixo desse valor.

4.5.2 UGR para o sistema de iluminação com LEDs SUBT8

Os resultados encontrados para os valores UGR, obtidos com imagens HDR, no sistema com LEDs, podem ser vistos na Figura 48, em que estão localizadas as estações de trabalho.

Figura 48. UGR nas estações de trabalho em uso para o sistema com LEDs SUBT8



O valor máximo encontrado para UGR foi de 19, nas estações 1, 2, 4 e 5, em diferentes direções. Os resultados para o UGR no sistema com as LEDs, portanto, foram adequados ao limite especificado pela NBR 8995-1, $UGR_L = 19$.

4.6 SIMULAÇÕES COM O PROGRAMA DIALUX EVO 6.1

Os sistemas de iluminação utilizando fluorescentes T8 e LEDs SUBT8 não são totalmente equivalentes em seus parâmetros de desempenho energético e fotométrico. Mesmo as informações que são fornecidas, pelo mesmo fabricante, não têm o conteúdo disponibilizado da mesma maneira. Portanto, para uma análise de desempenho energético e econômico utilizando o programa DIALux Evo 6.1, fez-se necessário verificar os dados obtidos com as medições realizadas em campo e os dados calculados pelo programa.

O ambiente em suas dimensões detalhadas foi modelado no programa DIALux Evo 6.1. Foram inseridos parâmetros fixos para o ambiente interno, com a quantidade, a distribuição e tipo de luminárias instaladas conforme a situação real no ambiente, fatores de manutenção e utilização, configurando-se assim as variáveis dependentes. Apenas as lâmpadas foram consideradas variáveis independentes, alterando-se os

arquivos das lâmpadas fornecidos pelo fabricante: Fluorescente T8 e LED SUBT8, por meio de *plug-in* disponível no site do fabricante (OSRAM, 2015).

4.6.1 Parâmetros fixos

4.6.1.1 Materiais de acabamento

Para os acabamentos das superfícies internas do ambiente, piso, paredes de alvenaria com pintura, divisórias, forro e mobiliário, foram utilizadas as refletâncias calculadas com os dados coletados em campo com o ALTA II. A Tabela 8 identifica os resultados dessas refletâncias medidas, que foram inseridas como parâmetros no programa DIALux Evo 6.1. Ao todo foram treze tipos de materiais ou acabamentos caracterizados para configurar o modelo da sala. As configurações para as persianas foram de 67% e 78% devido às diferenças de cor encontradas nas medições feitas em campo.

Tabela 8. Resumo dos materiais e acabamentos das superfícies utilizados

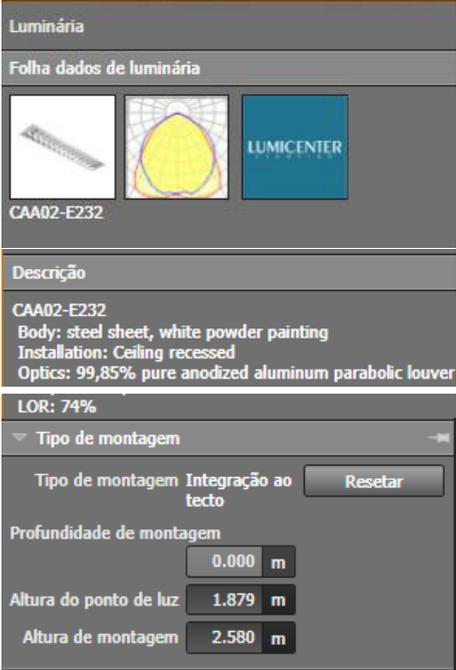
Materiais definidos	Refletância [%]	Espelhamento [%]	
1. Forro	65	0	
2. Divisórias	47	0	
3. Pilares e vigas (pintura acrílica fosca cor concreto)	24	0	
4. Paredes em alvenaria (pintura acrílica fosca branca)	82	0	
5. Piso	18	0	
6. e 7. Persianas	67 e 78	0	
8. Vidros das aberturas (arquivo padrão do DIALux)	Refletância [%]	Transmissividade [%]	Índice de Refração
	10	90	1.500
9. Geladeira	82	20	
10. Mobiliário cinza claro	61	0	
12. Cadeiras, computadores e teclados na cor preta	1	0	
11. Mobiliário de madeira	17	0	
13. Quadro	36	0	

4.6.1.2 Luminárias

As luminárias utilizadas para os dois sistemas de iluminação foram as mesmas. Foram, portanto, parte dos parâmetros fixos utilizados para as comparações entre os sistemas de iluminação. O posicionamento das luminárias foi determinado exatamente conforme medido no local.

O Programa DIALux Evo 6.1 permite a instalação de *plug-ins* dos catálogos dos fabricantes que fornecem os dados das luminárias. Os dados para as luminárias, correspondentes às utilizadas no experimento de campo, são apresentados no Quadro 7.

Quadro 7. Dados das luminárias

CAA02-E232 LUMICENTER			
Tipo de instalação	De embutir		
Corpo	Chapa de aço fosfatizada		
Refletor e aletas	Parabólico em alumínio anodizado com 99,85% de pureza		
Eficiência da luminária, ou rendimento (LOR)	74%		
Altura de montagem	2,58 m		
Altura do ponto de luz (distância entre o plano iluminado e o plano iluminante)	1,879 m		
Observação: A instalação da luminária foi feita como sobreposta, ou seja, não foi embutida, resultando na altura de montagem idêntica à altura de montagem do mesmo modelo de luminária feita para instalação do tipo sobreposta.			

O modelo resultante da disposição do mobiliário, da aplicação dos materiais e acabamentos (com as refletâncias obtidas), e a distribuição das luminárias, pode ser visualizado na Figura 49.

Figura 49. Modelo com inserção das luminárias, mobiliário e materiais de acabamento



4.6.1.3 Perfil de utilização e fator de manutenção

Os fatores de manutenção (MF) adotados foram baseados em um ciclo de 16.000h de funcionamento da lâmpada, considerando MF igual a 0,81 para os cálculos do sistema de iluminação com as fluorescentes T8 e MF igual a 0,86 para os LEDs SUBT8. Considerou-se o ambiente muito limpo (duas limpezas diárias), com ciclo de manutenção (limpeza) das luminárias de um ano. Os tempos de utilização foram de um total de 2.880 horas por ano, correspondentes ao horário de funcionamento do escritório.

No programa DIALux Evo 6.1, as configurações foram feitas no perfil de utilização, com separação entre horas do dia e da noite. O resultado foi de 2.640 horas por ano (dia) e 240 horas por ano (noite). O ciclo de 16.000h foi adotado como referência para estabelecer o período de vida útil e de manutenção do fluxo luminoso das lâmpadas para os dois

sistemas, de acordo com dados disponibilizados pelo fabricante. Portanto, os valores de depreciação do fluxo luminoso da lâmpada e de falha por envelhecimento da lâmpada foram estabelecidos a partir desse ciclo. Isso corresponde a 5 anos e meio de duração entre as trocas de lâmpadas, visto que o perfil de utilização equivale a 2.880 horas por ano com lâmpadas acesas.

Os resultados dos parâmetros de inserção para definição do perfil de utilização e fator de manutenção para o cálculo e simulação são apresentados no Quadro 8.

Quadro 8. Dados do perfil de utilização

continua

Perfil de utilização	
Modelo selecionado	Escritórios
Aplicação	Postos de trabalho CAD
Tarefa visual (\bar{E}_m)	500 lux
Entorno imediato da área de trabalho (\bar{E}_m)	300 lux
Área de fundo (\bar{E}_m)	100 lux
Uniformidade $E_{mín}/E_m$	0,60
Limitação do ofuscamento (UGR _L)	19
Tempos de utilização	2880 horas por ano
Dia	2640 horas por ano ~7,23 horas por dia
Noite	240 horas por ano ~0,65 horas por dia
<p>Observação: os tempos de utilização são inseridos no programa relativos a horas por dia no período de 1 ano (365 dias). Portanto, os valores utilizados correspondem a um período de funcionamento das 8h às 19h, 5 dias por semana e das 8h às 13h nos sábados. Esse horário inclui meia hora após o fechamento de atendimento ao público para organização e encerramento das atividades.</p> <p>O programa requer inserção dos dados de horas diurnas e horas noturnas em separado.</p> <p>Inserção de horas diurnas: $(10h \times 5 \text{ dias}) + (5h \times 1 \text{ dia: sábado}) = 55h \times 4 \text{ semanas} = 220h \times (12 \text{ meses}) = 2640h \text{ por ano, ou, } 7,23h \text{ por dia.}$</p> <p>Inserção de horas noturnas: $(1h \times 5 \text{ dias}) = 5h \times 4 \text{ semanas} = 20h \times (12 \text{ meses}) = 240h \text{ por ano, ou, } 0,65h \text{ por dia}$</p>	

Quadro 8. Dados do perfil de utilização

conclusão

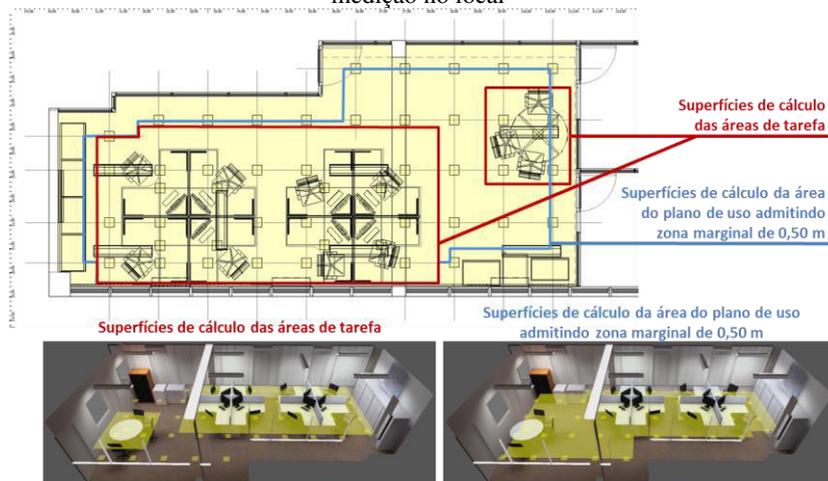
Perfil de utilização			
Intervalo de manutenção		1 ano	
Condições ambientais		Muito limpo (são realizadas 2 limpezas por dia de funcionamento)	
Intervalo de troca para lâmpadas		5,5 anos (16.000 h)	
Efetuando-se troca individual de lâmpadas falhadas			
Índice de Reprodução de Cores (Ra)		80	
Altura do plano de uso		0,70 m	
Fator de redução (área de tarefa visual desprezando zona marginal de 0,50 m)		0,93	
Fator de manutenção (MF) para FL T8		Fator de manutenção (MF) para LED SUBT8	
FL T8 – 16.000h	MF = 0,81	LED SUBT8 – 16.000h	MF = 0,88
Observação: cálculo do fator de manutenção a partir de dados fornecidos pelo fabricante MF = FMFL x FSL x FML x FMSS FMFL = depreciação do fluxo luminoso 0,9; FSL = falha por envelhecimento da lâmpada FML = redução do fluxo luminoso por sujeira luminárias = 1,0 FMSS = redução da refletância por sujeira superfícies do ambiente = 1,0		Observação: cálculo do fator de manutenção a partir de dados fornecidos pelo fabricante FMFL = 0,7 para 40.000h FMFL = depreciação do fluxo luminoso da lâmpada 0,88 (considerado para 16.000h); FSL = falha por envelhecimento da lâmpada fator é fornecido apenas como falha da lâmpada 40.000h); FML = redução do fluxo luminoso por sujeira luminárias = 1,0 FMSS = redução da refletância por sujeira do ambiente = 1,0	

4.6.1.4 Superfícies de cálculo

Os níveis de iluminância foram calculados pelo programa DIALux Evo 6.1 a partir das superfícies de cálculo definidas, dos parâmetros de cálculo escolhidos para avaliação dessas superfícies e seu posicionamento.

As superfícies de cálculo planejadas para a avaliação dos níveis de iluminância resultaram em um total de 54 objetos de cálculo, incluindo: um plano de uso com zona marginal de 0,50 m; duas áreas de tarefa (incluindo as áreas das mesas onde são realizadas as atividades, mais o local ocupado pelo usuário); 39 áreas de 20 cm por 20 cm correspondentes aos locais da malha utilizada para as medições de campo e nove áreas de 20 cm por 20 cm referentes aos centros das áreas de tarefa medidos no local. A Figura 50 mostra o resultado da elaboração das superfícies de cálculo.

Figura 50. Malha de superfícies de cálculo elaborada a partir dos pontos de medição no local



Os parâmetros de cálculo utilizados na avaliação dos níveis de iluminância basearam-se na grade de cálculo padrão do programa. Foi selecionado o parâmetro de cálculo “Potência luminosa vertical (adaptativo)” para o cálculo de cada valor de iluminância. As configurações dos parâmetros de cálculo para o posicionamento das superfícies de cálculo dos níveis de iluminância foram ajustadas para 0,70 m, conforme o mobiliário existente no local.

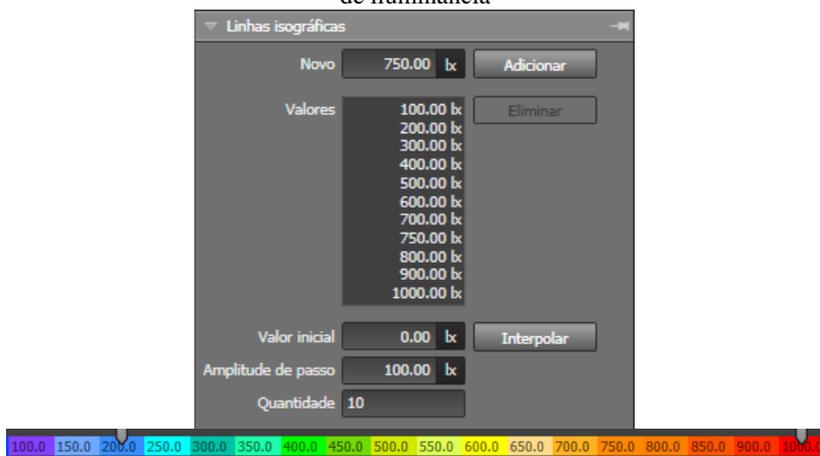
Os pontos de cálculo do índice de ofuscamento unificado, UGR, foram localizados e direcionados de acordo com as fotos realizadas no experimento de campo, ou seja, sete estações de trabalho, com três direções para cada. Para o total de 21 cálculos de UGR, em cada sistema de iluminação, foram selecionados os parâmetros de cálculo “*Unified Glare Rating (UGR)*”. As configurações dos parâmetros de cálculo admitiram a altura de 1,20 m, prevista pela posição de altura do olhar do observador sentado.

4.6.1.5 Escala dos níveis de iluminância

A escala dos níveis de iluminância foi configurada de modo a promover a mesma leitura da graduação da quantidade de luz disponível nas superfícies do ambiente, principalmente no plano de uso, ou seja, na altura de 0,70 m acima do nível do piso. O resultado da interpolação de valores de 100 em 100 lux, de 0 a 1000 lux e acréscimo de um novo valor

de 750 lux, com o ajuste da escala de cores pode ser visualizado na Figura 51.

Figura 51. Resultado da configuração das linhas isográficas e escala de níveis de iluminância



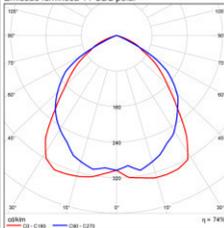
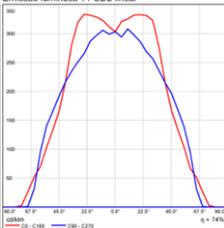
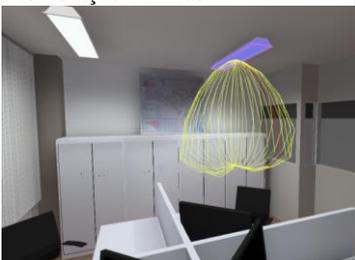
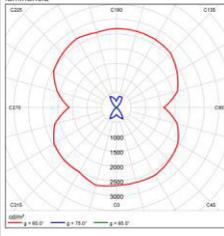
4.6.2 Parâmetros variáveis

Os tipos de lâmpadas utilizados para os dois sistemas de iluminação fizeram parte dos parâmetros variáveis para a análise dos níveis de iluminância medidos e simulados. Ambos foram obtidos com *plug-in* disponível pelo fabricante e compatível com a aplicação no DIALux Evo 6.1.

4.6.2.1 Fluorescente tubular T8

Os resultados da inserção dos dados das lâmpadas fluorescentes T8 utilizados para simulação fornecidos pelo *plug-in* do fabricante estão no Quadro 9.

Quadro 9. Dados da lâmpada fluorescente T8

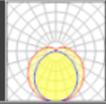
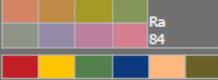
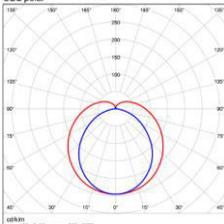
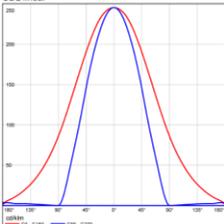
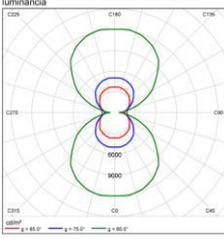
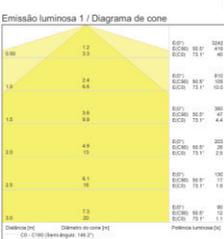
Luminária definida: CAA02-E232 LUMICENTER (Quadro 7)	
Lâmpada Fluorescente tubular 26 mm (base G13)	OSRAM L38 W/840 - LUMILUX T8
Diâmetro	26 mm
Comprimento	1047 mm
Potência nominal	38W
Eficiência luminosa	87 lm/W
Índice de reprodução de cor (R_a)	≥ 80
Fluxo luminoso	3.300 lm
Tonalidade da luz	840
Temperatura de cor	4.000 K
Tempo de operação	16.000h
Curva polar	Diagrama cartesiano
Emissão luminosa 1 / CDL polar	Emissão luminosa 1 / CDL linear
	
Diagrama de densid. de luminância	Distribuição luminosa
Emissão luminosa 1 / Diagrama de densidade de luminância	
	

Obedecendo as especificações fornecidas pelo *plug-in* das lâmpadas fluorescentes, utilizadas em conjunto com o *plug-in* das luminárias, obteve-se os resultados fotométricos esperados, compatíveis com as especificações técnicas fornecidas pelos fabricantes.

4.6.2.2 LED SUBT8

Os resultados dos dados das lâmpadas LED SUBT8 utilizados para simulação fornecidos pelo *plug-in* do fabricante estão no Quadro 10.

Quadro 10. Dados da lâmpada LED SUBT8

Luminária definida: CAA02-E232 LUMICENTER (Quadro 7)			
Lâmpada LED SUB 16T8 (base G13)	OSRAM <i>SubstiTUBE Super Value Driver</i> interno	Fabricante	OSRAM
Diâmetro	26 mm	Nome	ST8V-HF 16 W/840 1200 mm
Comprimento	1213 mm	Corrente luminosa	1650 lm
Potência nominal	16W	Potência	16.0 W
Eficiência luminosa	103 lm/W	Temperatura de cor	3991 K
Índice de reprodução de cor (R_a)	≥ 80	Soquete	G13
Fluxo luminoso	1.650 lm	Figura	
Tonalidade da luz	841	CDL	
Temperatura de cor	4.000 K	Espectro	 Corrigir
Tempo de operação	16.000h	Reprodução de cores	 Ra 84
Curva polar	Diagrama cartesiano		
			
Diag. de densid. ilum.	Diagrama de cone	Distribuição luminosa	
			

Observa-se que as LEDs possuem como dado, o diagrama de cone, uma vez que a distribuição do seu fecho luminoso é definida, em $100^\circ \times$

150°, como ilustrado. Apesar de se adaptarem perfeitamente à luminária projetada para as fluorescentes, internamente as LEDs tubulares diferem, compondo-se por pequenas luminárias que direcionam ao plano de trabalho o seu fecho luminoso. Como resultado, a curva polar apresentada é bastante distinta, para a mesma luminária.

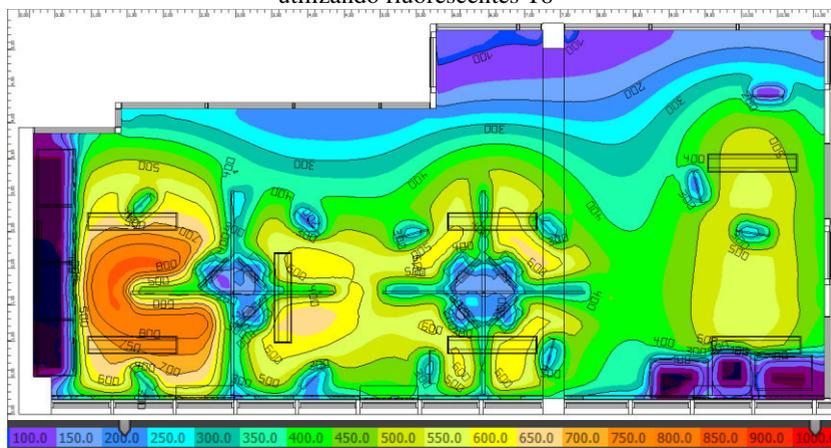
4.6.3 Análise da iluminância e uniformidade dos sistemas medidos e simulados

4.6.3.1 Fluorescentes T8

Os níveis de iluminamento encontrados com a simulação no DIALux com as fluorescentes T8 foram espacializados em planta baixa nas curvas isolux da Figura 52. As curvas isolux foram geradas para o plano de uso do ambiente como um todo, permitindo o entendimento da distribuição e quantidade de luz no plano de trabalho. Percebe-se que a quantidade de luz é maior nas áreas onde são realizadas as tarefas.

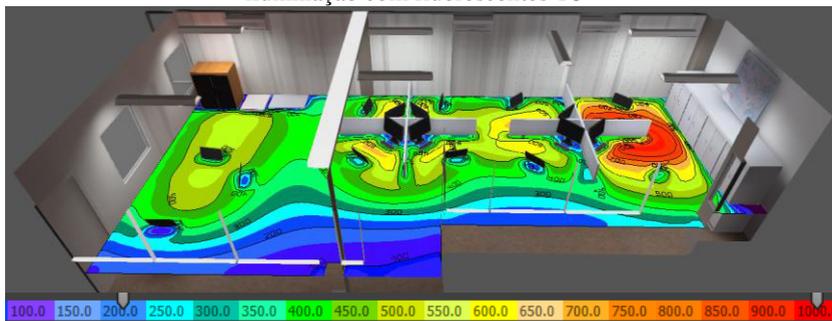
É importante destacar que as curvas isolux apresentadas configuram uma superfície de cálculo geral para o plano de uso. Para a análise dos níveis de iluminância, os valores foram obtidos por meio da elaboração de superfícies de cálculo coincidentes à malha de pontos de medição em campo e admitindo-se a zona marginal de 0,50 m, conforme elucidado na Figura 50.

Figura 52. Planta com as curvas isolux geradas com sistema de iluminação utilizando fluorescentes T8



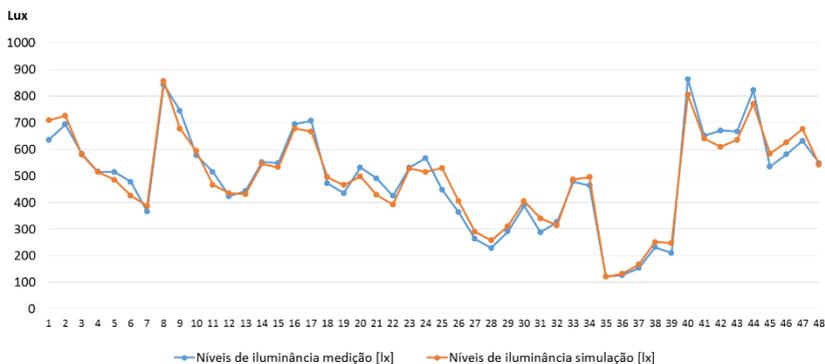
Utilizando o modelo com o mobiliário disposto do mesmo modo como encontrado no ambiente, percebe-se a interferência que esse exerce sobre os resultados dos níveis de iluminância, gerando reflexões e sombreamentos. Especialmente as divisórias entre as estações de trabalho dificultam uma distribuição mais uniforme da iluminação. A uniformidade encontrada a partir das simulações com o sistema das fluorescentes T8, ($U = E_{\text{mínima}}/E_{\text{média}}$) foi de 0,26, para os níveis verificados na malha total de pontos. A variação da uniformidade encontrada para o experimento de medição e o modelo simulado foi de apenas 4% (0,27 para 0,26), respectivamente. A Figura 53 ilustra em perspectiva tridimensional a relação entre o *layout* e o resultado das curvas isolux.

Figura 53. Perspectiva do ambiente com as curvas isolux geradas por sistema de iluminação com fluorescentes T8



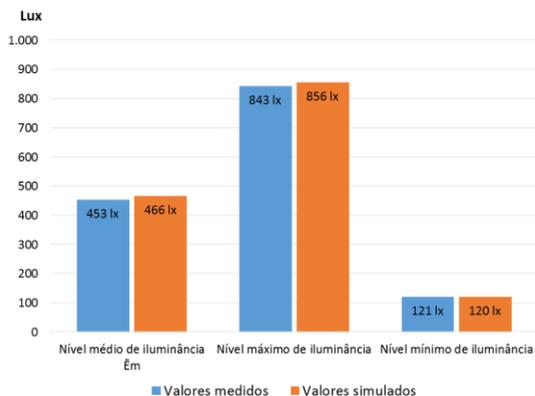
Os resultados obtidos com a medição e simulação para a malha com todos os pontos (39 pontos da malha e nove pontos no centro das áreas de tarefa) sofreram uma variação entre 0% e 18% e podem ser visualizados na Figura 54.

Figura 54. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para a mesma malha de pontos do sistema de iluminação com fluorescentes T8



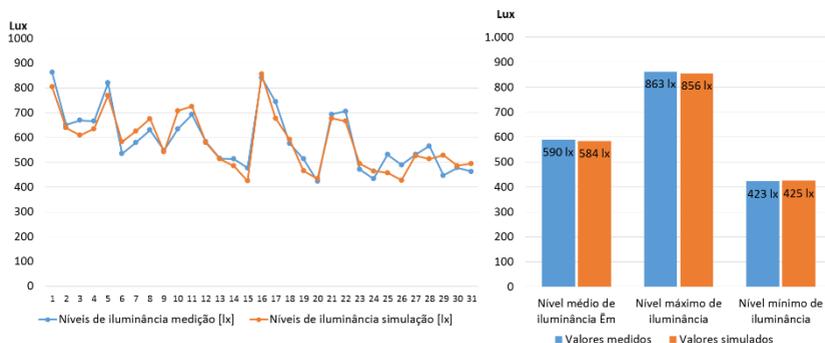
A avaliação dos níveis médios de iluminância (\bar{E}_m) mantidos no plano de trabalho do ambiente (altura de 0,70m), níveis máximos e níveis mínimos é apresentada na Figura 55. Os valores médios de iluminância \bar{E}_m tiveram uma variação de 3% (453 lux e 466 lux). Os níveis máximos de iluminância variaram 2% (843 lux e 856 lux) e os níveis mínimos, 1% (121 lux e 120 lux).

Figura 55. Comparação entre os níveis de iluminância médios \bar{E}_m , máximos e mínimos para a mesma malha de pontos medidos e simulados do sistema de iluminação com fluorescentes T8



Avaliações considerando as áreas de tarefa e entorno imediato (com o conhecimento do *layout*) também foram feitas, conforme a Figura 56, que ilustra a comparação entre os resultados de medição e simulação.

Figura 56. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos nas áreas de tarefa do sistema de iluminação com fluorescentes T8



A variação encontrada, para cada ponto, foi entre 0% e 18%, para os valores medidos e simulados. Para a análise dos valores médios, máximos e mínimos, a maior variação encontrada foi de apenas 1%. Os valores médios de iluminância nas áreas de tarefa, 590 lux e 584 lux, os níveis máximos de iluminância 863 lux e 856 lux e os níveis mínimos, 423 lux e 425 lux.

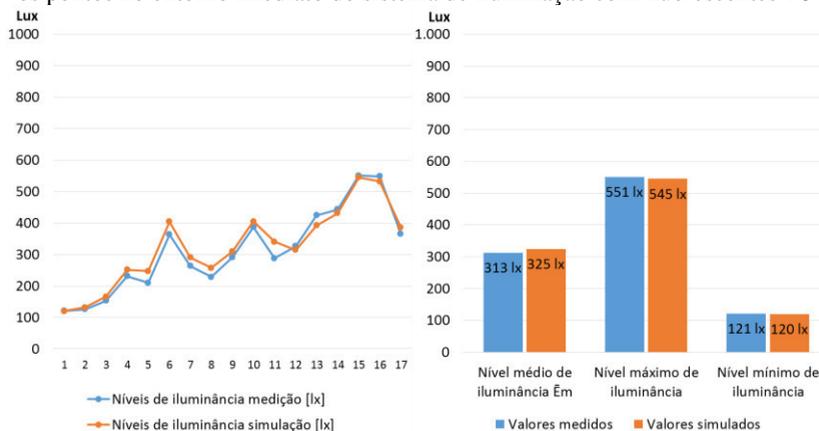
A uniformidade encontrada para as áreas de tarefa foi de 0,73 ($U = E_{\text{mínima}}/E_{\text{média}}$), variando em 2% o valor obtido com as medições, de 0,72.

Para o entorno imediato, houve variação entre 1% e 18% para cada ponto medido e simulado. Para a análise dos valores médios, máximos e mínimos, a maior variação foi de 4%. Os valores médios de iluminância \bar{E}_m no entorno imediato variaram 4% (313 lux e 325 lux), os níveis máximos variaram 1% (551 lux e 545 lux) e os níveis mínimos, 1% (121 lux e 120 lux).

A uniformidade encontrada para as áreas de entorno imediato foi de 0,37 ($U = E_{\text{mínima}}/E_{\text{média}}$), variando em 4% o valor obtido com as medições, de 0,39.

A Figura 57 mostra a comparação entre os pontos medidos e simulados para o entorno imediato.

Figura 57. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos no entorno imediato do sistema de iluminação com fluorescentes T8



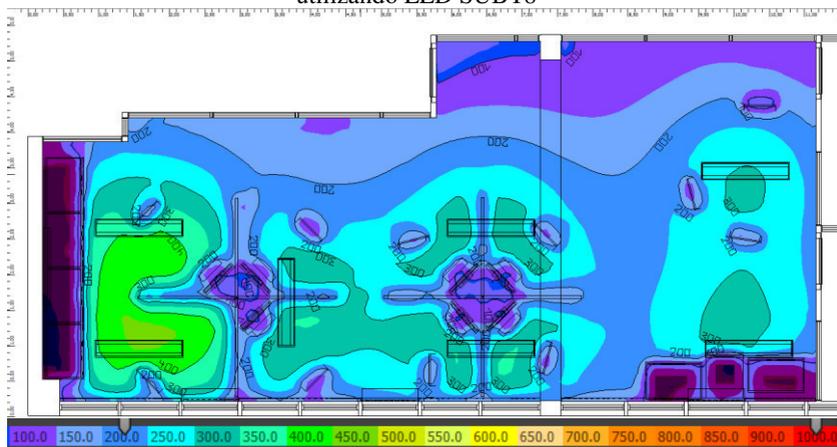
Os resultados bastante próximos entre os valores medidos e simulados para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 foram possíveis devido à utilização dos procedimentos de medição e equipamentos de precisão como o luxímetro T10 (Konika Minolta Sensing, INC.); aos dados completos fornecidos pelos fabricantes das lâmpadas e luminárias; à caracterização do ambiente com medições da geometria e das refletâncias das superfícies e à utilização do programa DIALux, consolidado como ferramenta de cálculo de iluminação.

Os valores médios e mínimos dos níveis de iluminância, com variações pouco significativas, de 3% e 1%, respectivamente, para o sistema com as fluorescentes T8, mostram que o DIALux é adequado para análises utilizando esses parâmetros exigidos pela NBR 8995-1.

4.6.3.2 LEDs SUBT8

As curvas isolux resultantes da simulação com as LEDs SUBT8 podem ser vistas em planta baixa da Figura 58, para todo o plano de uso do ambiente, a uma altura de 0,70 m do nível do piso, permitindo o entendimento da distribuição e quantidade de luz no plano de trabalho. Visivelmente, mantendo-se a escala de níveis de iluminância com a mesma configuração de cores utilizada na análise com as fluorescentes, esse sistema de iluminação apresenta níveis mais baixos de iluminância como um todo, o que já era esperado após a realização das medições em campo.

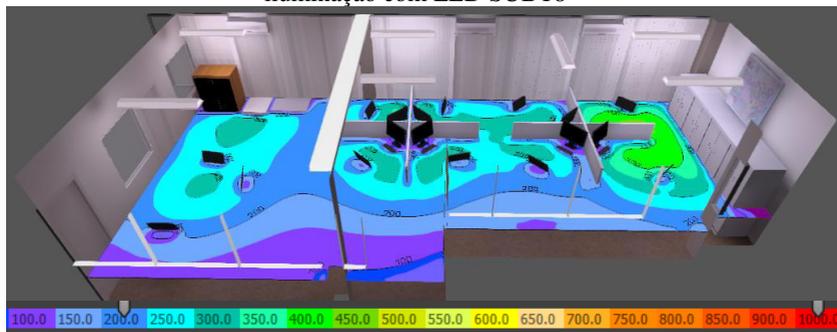
Figura 58. Planta com as curvas isolux geradas com sistema de iluminação utilizando LED SUBT8



A comparação entre os valores obtidos para os níveis de iluminância medidos e simulados baseou-se em superfícies de cálculo coincidentes à malha das medições em campo (conforme já verificado na Figura 50).

A Figura 59 ilustra em perspectiva tridimensional a relação entre o *layout* e o resultado das curvas isolux, ilustrando a interferência do mobiliário sobre a distribuição da luz.

Figura 59. Perspectiva do ambiente com as curvas isolux geradas por sistema de iluminação com LED SUBT8



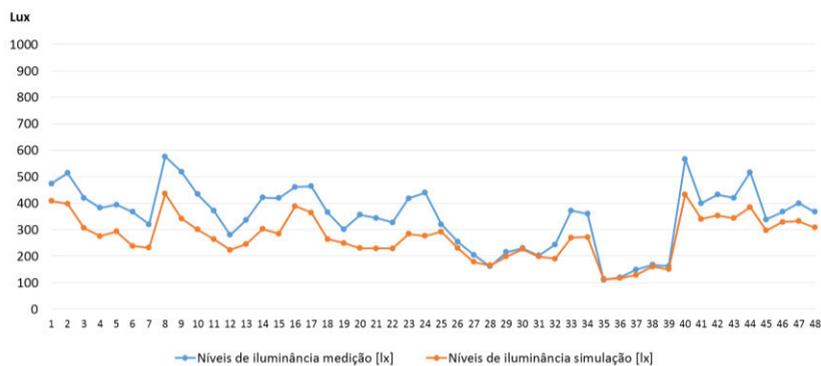
O nível médio de iluminância \bar{E}_m encontrado nos pontos do modelo simulado manteve-se como inadequado ao tipo de uso ou

atividade, confirmando os baixos níveis obtidos com as medições realizadas em campo. O nível máximo de iluminância no plano de trabalho foi de 436 lux e o nível mínimo foi de 113 lux. Como resultado, obteve-se uma iluminância média mantida no plano de trabalho de 249 lux. Este nível de iluminância foi 50% abaixo da recomendação da NBR 8995-1, definida como 500 lux, enquanto nas medições, o nível médio de 333 lux, estava 33% abaixo da recomendação normativa.

A variação da uniformidade ($U = E_{\text{mínima}}/E_{\text{média}}$) encontrada para o experimento de medição e o modelo simulado foi de 37% (com 0,33 para as medições e 0,45 no modelo no DIALux Evo 6.1).

A comparação dos resultados obtidos com a medição e simulação para a malha com todos os pontos (39 pontos da malha e nove pontos no centro das áreas de tarefa) variou entre 2% e 37%, conforme a Figura 60. A variação encontrada é muito superior à variação resultante da simulação com o sistema de iluminação utilizando fluorescentes T8, que foi entre 0% e 18%.

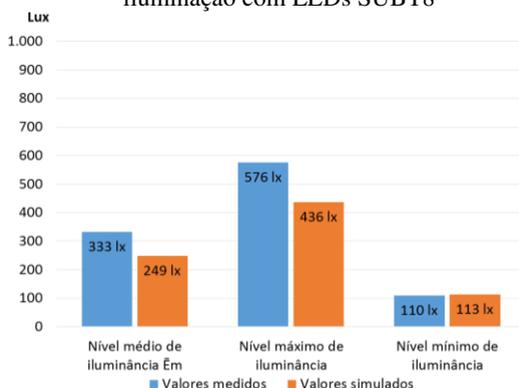
Figura 60. Níveis de iluminância medidos e simulados para a mesma malha de pontos do sistema de iluminação com LEDs SUBT8



A avaliação dos níveis médios de iluminância \bar{E}_m mantidos no plano de trabalho, máximos e mínimos, medidos e simulados, é apresentada na Figura 61. Os valores médios de iluminância variaram 25% (333 lux e 249 lux). Os níveis máximos, 24% (576 lux e 436 lux) e os níveis mínimos, 3% (110 lux e 113 lux). A variação dos níveis médios (25%) foi alta, quando comparada aos resultados com as fluorescentes T8, que foi de 3%. Níveis muito baixos de iluminância (abaixo de 300 lux) tiveram menor variação, conforme visualizado na Figura 60. Esse fato se confirma, na comparação dos níveis medidos e simulados, com variações

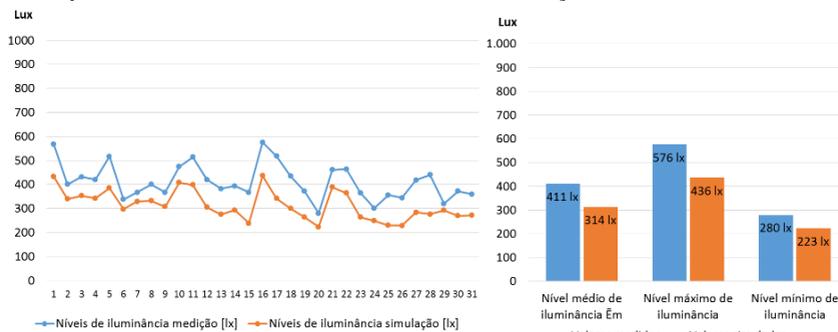
significativas para os valores médios e máximos e pouca variação dos níveis mínimos, visualizados na Figura 61.

Figura 61. Comparação entre os níveis de iluminância médios \bar{E}_m , máximos e mínimos medidos e simulados para a mesma malha de pontos do sistema de iluminação com LEDs SUBT8



Prosseguindo com a análise de cada nível de iluminância medido e simulado, para as áreas de tarefa foi encontrada uma variação entre os pontos de medição e simulação, entre 9% e 37%, conforme apresentado na Figura 62.

Figura 62. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos nas áreas de tarefa do sistema de iluminação com LEDs SUBT8



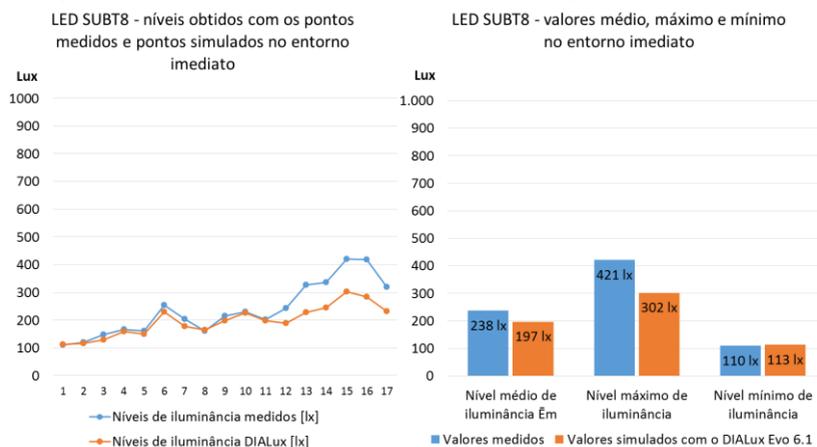
Quanto aos valores médios, máximos e mínimos medidos e simulados nas áreas de tarefa, a variação encontrada também foi superior à variação obtida com as fluorescentes T8. Os níveis médios de iluminância \bar{E}_m nas áreas de tarefa tiveram uma variação de 25% (411

lux e 306 lux), os níveis máximos variaram 26% (567 lux e 426 lux) e os níveis mínimos, 21% (280 lux e 220 lux).

A uniformidade encontrada para os pontos nas áreas de tarefa com os resultados de simulação foi de 0,71, variando em 4% o valor obtido com as medições, de 0,68.

No entorno imediato foi encontrada uma variação entre 2% e 32% para os pontos medidos e simulados. A Figura 63 apresenta os gráficos dos pontos medidos e simulados e a comparação entre os valores médios, máximos e mínimos medidos e simulados para o entorno imediato.

Figura 63. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos no entorno imediato do sistema de iluminação com LEDs SUBT8



Os valores médios de iluminância \bar{E}_m no entorno imediato tiveram uma variação de 17% (238 lux e 197 lux), os níveis máximos de iluminância variaram 28% (421 lux e 302 lux) e os níveis mínimos, 3% (110 lux e 113 lux).

A uniformidade encontrada para as áreas de entorno imediato foi de 0,57, variando 24% em relação ao valor obtido com as medições, de 0,46.

O entorno imediato possui os valores mais baixos de iluminância, visto que a distribuição das luminárias priorizava as áreas de tarefa. Os gráficos para o entorno imediato reforçam que houve maior proximidade entre valores medidos e simulados para níveis de iluminância abaixo de 300 lux. Apesar disso, a variação encontrada entre medição e simulação com LEDs, nos resultados para níveis médios e máximos e para todos os

pontos da malha, inviabiliza comparações de resultados de iluminância e uniformidade.

Os parâmetros fixos inseridos no DIALux, descritos no 4.6.1, mostram que as luminárias apresentam um rendimento (ou LOR) de 74%. Esse rendimento, assim como a fotometria para a luminária, foi determinado a partir de medições em laboratório, gerados para lâmpadas fluorescentes e fornecidos pelo fabricante das luminárias. Para a inserção de lâmpadas LED SUBT8, não existe um arquivo específico para a luminária, ou seja, não existem medições da eficácia e dados fotométricos do conjunto da luminária com lâmpadas LED SUBT8. Os mesmos resultados de testes em laboratório que são fornecidos pelo fabricante das luminárias inserindo lâmpadas fluorescentes, seriam necessários para gerar dados consistentes para as LEDs substitutivas. Seriam necessários, portanto, dados específicos para a luminária com LEDs tubulares, para que os resultados fossem condizentes ao rendimento e a curva gerada a partir dessa substituição.

Considerando que o projeto das lâmpadas LED não resulta em um ângulo de abertura de 360° para o fecho luminoso, como ocorre com as fluorescentes, é previsto que não ocorra a mesma perda por reflexões para as mesmas luminárias com as LEDs. Nesse caso, o rendimento da luminária com a substituição por LEDs tende a ser maior do que os 74% previstos em projeto, sendo que para as LED SUBT8, o ângulo de abertura especificado é de $100^\circ \times 150^\circ$.

O resultado dos níveis de iluminância medidos no experimento de campo foram 26% mais altos nos níveis médios (\bar{E}_m) para as LEDs. Esse resultado corrobora com a expectativa de que não ocorram, com as LEDs, as mesmas perdas calculadas no DIALux Evo 6.1 com as fluorescentes T8.

Para a realização de um estudo de desempenho energético e econômico do sistema, foi necessário ajustar o modelo com as LEDs a fim de que não fosse subestimada quantidade de luz nas superfícies de cálculo do programa de simulação. Para isso, com as LEDs, o rendimento das luminárias foi considerado próximo de 100%, estimando-se que não ocorram perdas por reflexão nas luminárias.

4.6.4 Ajuste do modelo para o sistema de iluminação com LEDs SUBT8

O ajuste do modelo para o sistema de iluminação com LEDs SUBT8 tornou-se necessário para a análise de desempenho energético e econômico, pois foi verificada uma variação significativa nos níveis de iluminância medidos e simulados.

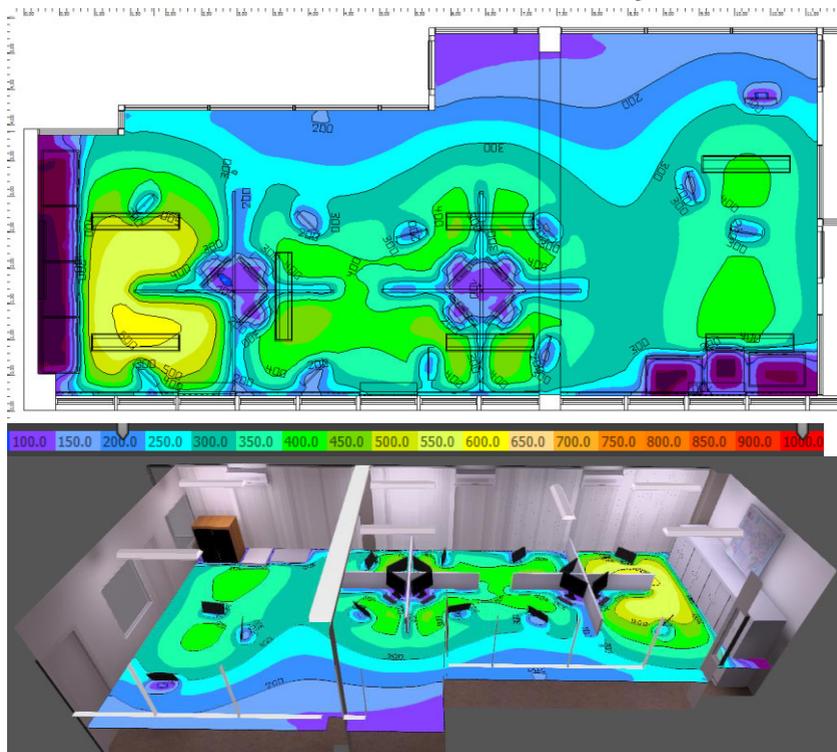
O estudo sobre as características das lâmpadas LED tubulares evidencia que o ângulo de abertura e o fecho luminoso terá como rendimento um resultado diferente dos dados fornecidos pelos fabricantes para as luminárias projetadas para as fluorescentes.

Sabendo que o ângulo de abertura das LEDs utilizadas é de $100^\circ \times 150^\circ$, o rendimento para as luminárias foi considerado total, (100%), estimando-se que não ocorram perdas por reflexão nas luminárias. Portanto, os 1650lm especificados para cada LED sofriram, com a perda calculada pelas luminárias, uma redução de 26%, como se o conjunto, então, produzisse 74% dos lumens iniciais.

Os valores de quantidade de lumens inseridos para cada lâmpada LED SUBT8 foram ajustados para que a perda estimada em 26% (rendimento ou LOR = 74%), automaticamente calculada pela luminária no programa, resultasse no valor total de lumens especificados para cada LED. Majorando o valor inicial de lumens para cada lâmpada LED, para 2230 lm, obteve-se, com a perda fixada pela luminária, um valor equivalente aos 1650lm iniciais produzidos por cada lâmpada LED, ou seja, equivalente ao cálculo de rendimento da luminária LOR = 100%.

Os resultados obtidos com a simulação no DIALux utilizando lâmpadas LED SUBT8, ajustadas para um rendimento de 100% da luminária, ou seja, sem perdas, podem ser vistos em planta baixa e em perspectiva nas curvas isolux da Figura 64.

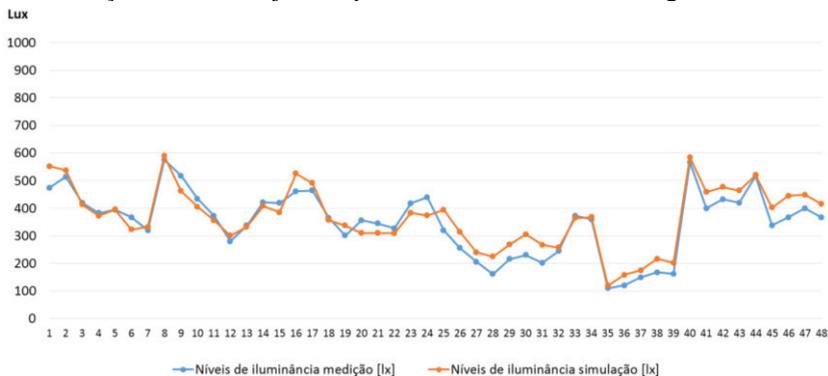
Figura 64. Imagens com curvas isolux geradas com sistema de iluminação utilizando LED SUBT8 com rendimento da luminária igual a 100%



A comparação dos resultados obtidos com a medição e simulação ajustada, para a malha com todos os pontos teve uma variação de 0% a 39%. As maiores variações entre medição e simulação, com mais de 30%, ocorreram nos valores abaixo de 300 lux, localizados no entorno imediato. Isso era previsto, já que esses valores tiveram resultados mais próximos para a simulação antes da realização do ajuste. Com isso, 8% dos pontos simulados variaram mais de 30%, e 15%, mais de 23%.

A Figura 65 mostra a comparação dos valores medidos e simulados após o ajuste, com destaque para a maior diferença entre medição e simulação nos níveis abaixo de 300 lux.

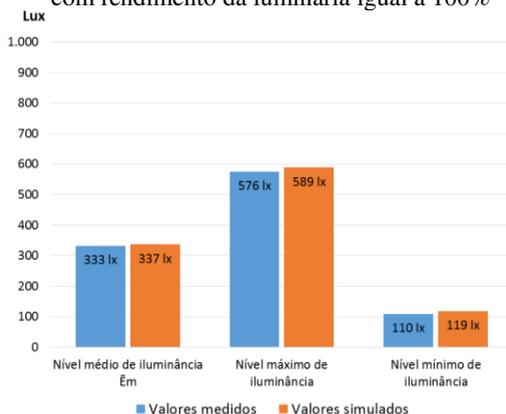
Figura 65. Níveis de iluminância medidos e simulados para o sistema de iluminação com LEDs ajustado para rendimento da luminária igual a 100%



A comparação dos níveis médios, mínimos e máximos, medidos e simulados, no plano de trabalho, é apresentada na Figura 66. Como resultado, obteve-se uma iluminância média no plano de trabalho de 337 lux, variando 1% em relação aos valores medidos ($\bar{E}_m = 333$ lux). O nível máximo de iluminância no plano de trabalho foi de 589 lux, variando 2% para o máximo valor medido (576 lux) e o nível mínimo foi de 119 lux, variando 8% em relação ao valor medido (110 lux).

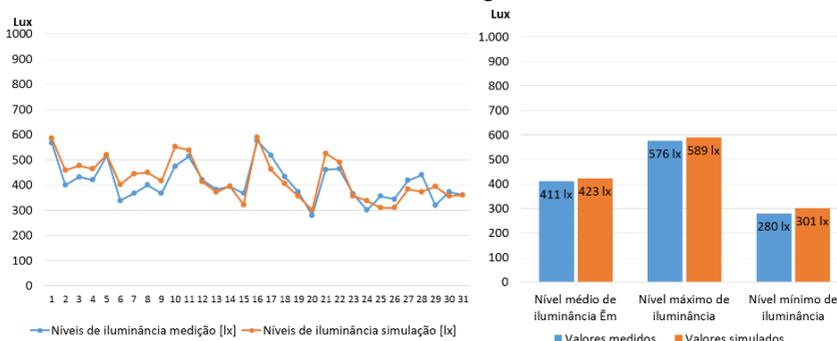
A variação da uniformidade encontrada para o experimento de medição e esse modelo simulado foi de 7% (com 0,33 para as medições e 0,35 no modelo no DIALux Evo 6.1).

Figura 66. Comparação entre os níveis de iluminância médios, máximos e mínimos medidos e simulados para o sistema de iluminação com LEDs SUBT8 com rendimento da luminária igual a 100%



Nas áreas de tarefa foi encontrada uma variação entre os pontos de medição e simulação, entre 0% e 23%, apresentada na Figura 67.

Figura 67. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos nas áreas de tarefa do sistema de iluminação com LEDs SUBT8 com rendimento da luminária igual a 100%

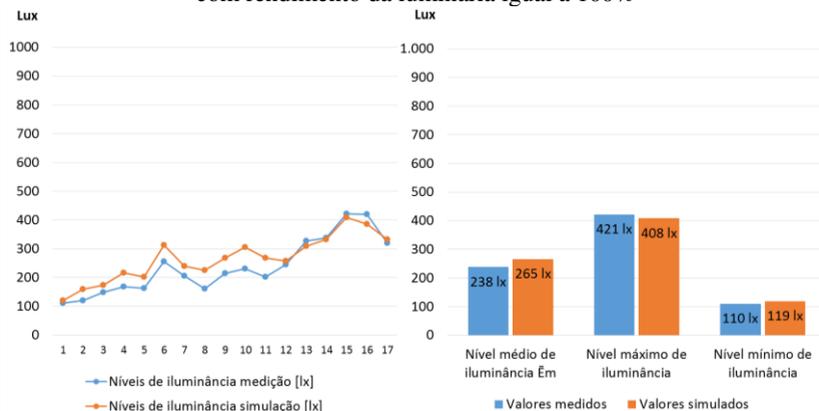


Quanto aos valores médios, máximos e mínimos medidos e simulados nas áreas de tarefa, os níveis encontrados para esse modelo ajustado ficaram próximos aos níveis medidos no experimento de campo. Os níveis médios de iluminância \bar{E}_m , que no modelo sem o ajuste, tiveram uma variação de 25% (411 lux e 306 lux), resultaram, nesse modelo calibrado, numa variação de apenas 3% (411 lux e 423 lux). Os níveis máximos de iluminância medidos e simulados nas áreas de tarefa tiveram variação de 2% (576 lux e 589 lux) e os níveis mínimos, 8% (280 lux e 301 lux).

A uniformidade encontrada para os pontos nas áreas de tarefa com os resultados de simulação com o modelo calibrado foi de 0,71, variando em 4% o valor obtido com as medições, de 0,68.

No entorno imediato, a variação dos resultados, entre 1% e 39% para os pontos medidos e simulados pode ser vista na Figura 68. A comparação entre os valores médios, máximos e mínimos medidos e simulados do entorno imediato também teve maior compatibilidade após o ajuste do modelo. Os valores médios de iluminância \bar{E}_m no entorno imediato tiveram uma variação de 11% (238 lux e 265 lux), os níveis máximos de iluminância variaram 3% (421 lux e 408 lux) e os níveis mínimos, 8% (110 lux e 119 lux).

Figura 68. Comparação entre os níveis de iluminância medidos e simulados para os pontos no entorno imediato do sistema de iluminação com LEDs SUBT8 com rendimento da luminária igual a 100%



A uniformidade encontrada para as áreas de entorno imediato foi de 0,45, com uma variação de 3% sobre o valor obtido com as medições (0,46).

O ajuste feito no modelo de simulação para o sistema de iluminação utilizando LEDs tornou possível a análise de desempenho energético e econômico, quando compatibilizou as medições realizadas no experimento de campo e as medidas obtidas com as superfícies de cálculo do DIALux, principalmente em relação aos valores médios, máximos e mínimos.

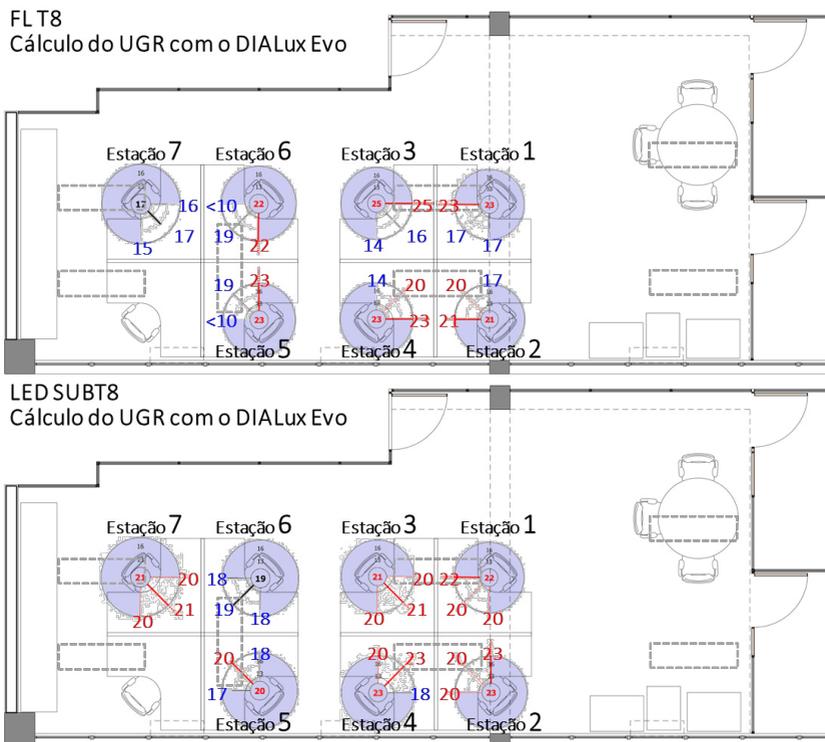
Os valores muito baixos de iluminância apresentaram as maiores variações para o modelo ajustado (em média, 8%). Isso era esperado, uma vez que apresentaram as menores variações (em média, 3%) na primeira simulação para os LEDs (sem ajuste), comparados aos valores medidos. Entretanto, os valores médios, de iluminância mantida no plano de trabalho (\bar{E}_m), que são as medidas utilizadas para verificação de iluminância conforme a NBR 8995-1, resultou em 1% de variação nessa avaliação, mostrando-se adequado para realização de comparações dessa grandeza.

4.6.5 Análise de ofuscamentos medidos e calculados com o DIALux Evo 6.1

Os graus de ofuscamento obtidos com o programa DIALux foram calculados para a mesma altura do olhar do observador (a 1,20 m do nível

do piso) e as mesmas direções das medições em campo. Esses resultados, calculados para os dois sistemas de iluminação avaliados, podem ser vistos na Figura 69.

Figura 69. Cálculo do UGR utilizando o DIALux Evo 6.1



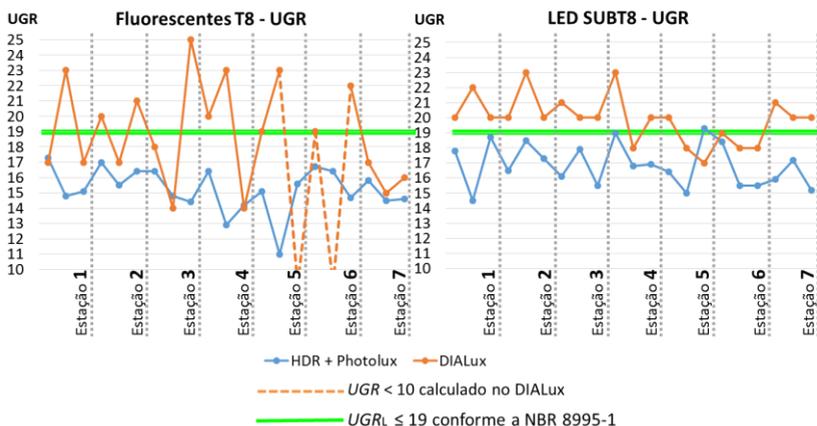
- Direções selecionadas para emissão do cálculo de UGR
- 7 Estações, cada uma com:
 - 3 direções
 - Altura do cálculo do UGR: 1,20m (altura do olhar do observador conforme a NBR 8995-1)
 - ■ UGR > UGRl (19)
 - ■ UGR ≤ UGRl (19)

Observou-se que, para o sistema com fluorescentes, 38% dos valores encontrados para o UGR foram superiores a 19 e com LEDs, 71% foram calculados acima desse limite. Portanto, os resultados para o UGR, calculados pelo DIALux, foram considerados inadequados em relação ao

limite do Índice de Ofuscamento Unificado $UGR_L = 0,19$, levando-se em conta a prerrogativa da NBR 8995-1, de que, “o maior valor do UGR encontrado deve ser considerado um valor típico para a instalação inteira e deve estar conforme o UGR limite”.

Em contraste com esses cálculos, os resultados obtidos em campo com a Câmera Canon EOS 60D e utilização do Photolux, com as imagens HDR, foram adequados em relação à NBR 8995-1 para todos os ângulos verificados, tanto para o sistema de iluminação utilizando fluorescentes, quanto para as LEDs. A Figura 70 ilustra a relação entre os valores de UGR obtidos com medição e simulação.

Figura 70. Comparação dos valores para UGR medidos e simulados



Não é possível, conforme visualizado nos gráficos da Figura 70, estabelecer uma relação entre os valores medidos e os valores simulados. Os valores mais altos, encontrados para ambos os sistemas de iluminação nos resultados da simulação, podem ser questionáveis, quando comparados às imagens com mapeamento de luminâncias obtidas em campo.

Quanto às luminâncias das fontes (luminárias acesas) mais altas, encontradas nas medições, chegou-se ao valor máximo de 11.400 cd/m^2 para as fluorescentes e 18.800 cd/m^2 para as LEDs. Geralmente, ofuscamentos são associados a grandes planos iluminantes, que interferem na direção do olhar do observador, provocando desconforto visual por ofuscamento velador ou, ofuscamentos refletidos, especialmente quando há uso de computadores.

Com a iluminação artificial, podem ocorrer ofuscamentos pelo brilho das fontes no campo visual e reflexões perturbadoras das fontes sobre os monitores de trabalho. Para a proteção no campo visual, a NBR 8995-1 apresenta, entre os limites de corte da luz, 15° para lâmpadas com luminâncias de 20.000cd/m² a 50.000 cd/m², que são atendidos pela luminária utilizada. Além do corte que é produzido pelas paredes laterais, as luminárias possuem aletas, que colaboram com a diminuição da probabilidade de ofuscamentos.

Para evitar reflexões nos monitores, a norma brasileira também limita em 1.000 cd/m² o brilho observado na tela positiva (fundo claro) e 200 cd/m² telas negativas (fundo escuro). Os valores máximos encontrados com as imagens HDR nas telas de computadores, não chegaram a atingir 10 cd/m², com monitores desligados, estando bem abaixo dos limites recomendados.

Outra questão importante sobre as reflexões nos monitores, refere-se à possibilidade de adaptação da posição ou inclinação da tela conforme a necessidade do usuário. Pequenos ajustes podem eliminar reflexões, nesse caso, proveniente das fontes de iluminação artificial.

O fórum do DIALux Evo 6.1 mostra um questionamento de um usuário sobre valores mais altos encontrados para cálculos de UGR, em relação à versão 4.1 do programa. Em resposta, justifica-se que a nova versão calcula, para cada ponto da malha, UGR de 15° em 15°, de 0° até 360°, abrangendo, portanto, mais direções em relação à versão anterior e aumentando a probabilidade de encontrar novos valores. Entretanto, no caso desse trabalho, foi feita uma comparação, com as mesmas direções das medições em campo, descartando essa possibilidade. As variações foram significativas e não apresentaram correlação possível entre medição e simulação.

A partir dessas evidências, os valores calculados tornaram-se questionáveis, impossibilitando, nesse trabalho, as comparações dos valores de cálculo no DIALux para os valores de UGR.

4.7 ANÁLISE DE DESEMPENHO LUMINOSO, ENERGÉTICO E ECONÔMICO DOS SISTEMAS

As LEDs projetadas para a substituição de fluorescentes T8, em geral, não possuem parâmetros fotométricos equivalentes, de forma que possa ser feita uma troca direta a partir da equiparação desses dados, verificando-se o potencial de economia a partir da eficácia luminosa da lâmpada que fará a substituição. Diferentes conjuntos de parâmetros fotométricos, como visto nos resultados das medições realizadas em

campo e nas simulações do programa DIALux Evo 6.1, resultaram em diferentes níveis de iluminação, distribuição e qualidade da luz, graus de ofuscamento e finalmente, em diferentes resultados do ambiente luminoso.

As medições realizadas em experimento de campo e a relação dessas com os resultados das simulações no programa DIALux Evo 6.1, tornaram possível a definição de parâmetros para avaliação de desempenho energético e econômico dos dois sistemas.

Para a análise de desempenho energético e econômico, foram considerados o perfil de utilização do ambiente, fator de manutenção (MF), os dados fornecidos pelo fabricante para manutenção de lumens e vida útil das lâmpadas e níveis de iluminação (iluminância média mantida no plano de trabalho \bar{E}_m) equivalentes para os dois sistemas. Para o desempenho econômico, também foram utilizados os custos dos conjuntos dos equipamentos, luminárias, lâmpadas e reatores (fluorescentes T8) ou lâmpadas com drivers embutidos (LEDs SUBT8) e tarifa de consumo de energia elétrica com base na conta de energia de um mês de consumo em 2016 (custo do kWh).

Os cenários projetados para fluorescentes T8 e para LEDs SUBT8 no programa DIALux Evo 6.1 foram desenvolvidos de acordo com a NBR 8995-1, para ambiente de escritório com *layout* flexível considerando, portanto, a área total da sala para o desenvolvimento das tarefas e com faixa marginal de 0,5 m no seu perímetro.

4.7.1 Parâmetros de cálculo

4.7.1.1 Materiais de acabamento

Para os acabamentos das superfícies internas do ambiente, piso, paredes de alvenaria com pintura, divisórias e forro, excluindo-se o mobiliário, foram utilizadas as mesmas refletâncias das simulações da seção 4.6.1.1, calculadas com os dados coletados em campo com o ALTA II.

4.7.1.2 Lâmpadas, luminárias, fator de manutenção e perfil de utilização

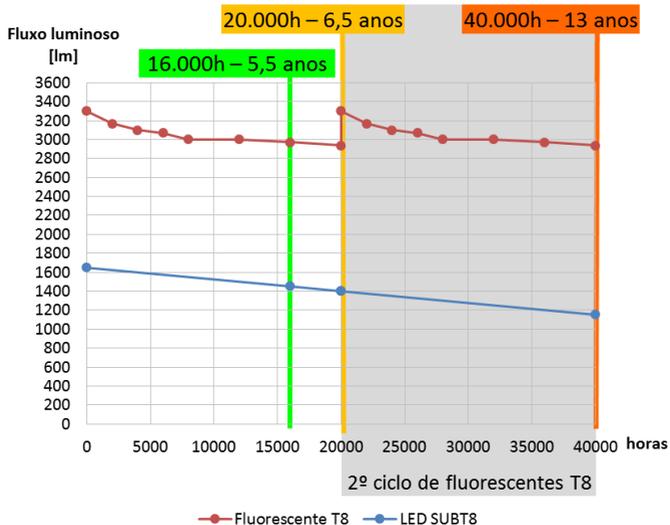
Os tipos de lâmpadas utilizados para os dois sistemas de iluminação tiveram como base os mesmos arquivos utilizados para as análises dos sistemas, feitas nas seções 4.6.2.1 e 0, como mencionado, obtidos com *plug-in* disponibilizado pelo fabricante (OSRAM, 2015) e compatível com a aplicação no programa DIALux Evo 6.1.

As luminárias utilizadas para os dois sistemas de iluminação foram mantidas como parâmetros fixos utilizados para as comparações, conforme os dados apresentados no Quadro 7 (seção 4.6.1.2) como parâmetros inseridos no DIALux.

O posicionamento e a quantidade das luminárias foram definidos com a variação do fator FMFL (depreciação do fluxo luminoso da lâmpada), ao final do ciclo de vida útil para cada tipo de sistema, mantendo-se, ao final, o nível de iluminamento médio de 500 lux. Os ciclos que definiram a manutenção de lumens das lâmpadas foram de 20.000h para as fluorescentes T8 e 40.000h para as LED SUBT8. Assim, os modelos foram projetados para que, ao final de cada ciclo, em quantidade de horas e com a manutenção de lumens especificada pelo fabricante, tivessem o nível médio de iluminamento (\bar{E}_m) mantido em 500 lux. Conseqüentemente, no início de cada ciclo, tanto das fluorescentes, quanto das LEDs SUBT8, os níveis de iluminância foram superiores a 500 lux, em função da depreciação do fluxo luminoso que cada tipo de lâmpada sofreria.

A Figura 71 mostra a relação dos fluxos luminosos para as fluorescentes T8 e para as LEDs ao longo do período de utilização, baseados no fator de manutenção do fluxo luminoso da lâmpada fornecido pelo fabricante (FMFL). A partir desses dados, para a comparação dos sistemas, foram consideradas: para as fluorescentes T8, trocas de duas lâmpadas para cada ciclo de 16.000h (quatro lâmpadas ao final) mais duas trocas completas dos jogos de lâmpadas, ao final de 20.000h. Para as LEDs SUBT8, foi contabilizado um jogo completo ao final do ciclo total de 40.000h.

Figura 71. Resultado da manutenção do fluxo luminoso para as fluorescentes T8 e para as LEDs SUBT8



Os ciclos, em horas, foram divididos em anos com base no período de funcionamento do escritório, elucidado no Quadro 8 (seção 4.6.1.3). O Perfil de Utilização considerou as 2.880 horas por ano, inseridas no DIALux com separação entre horas do dia e da noite, com resultado de 2.640 horas por ano (dia) e 240 horas por ano (noite).

O resultado dos cálculos dos fatores de manutenção para cada sistema de iluminação teve três itens relevantes na inserção dos parâmetros de cálculo para comparação dos sistemas. O primeiro, relacionado à variação do fluxo luminoso das lâmpadas para cada sistema de iluminação, conforme o tempo de utilização (horas de lâmpadas acesas). O segundo item, relativo ao fluxo luminoso corrigido das lâmpadas LED SUBT8, ajustado para compensação do rendimento da luminária, equivalente a 100%, conforme avaliação feita na seção 4.6.4. O terceiro parâmetro que teve papel de grande importância, foi o fator de manutenção (MF), fixado em 0,81 para fluorescentes e 0,86 para as LEDs, de acordo com os resultados do Quadro 8, seção 4.6.1.3. O resultado desses parâmetros de inserção no DIALux pode ser visualizado no Quadro 11.

Quadro 11. Parâmetros de inserção no DIALux Evo 6.1 para simulação dos sistemas de iluminação: resultado da relação dos fatores de manutenção e fluxo luminoso das lâmpadas

		Fluorescente T8	LED SUBT8	
Potência nominal		38 W	16 W	
Fator de manutenção (MF)^(a)		0,81^(a)	0,86^(a)	
Ciclo 1 LED SUBT8	Ciclo 1 FL T8	Início (0 h)		
		Fluxo luminoso [lm]	3.300 (100%)	2.230^(b) (1)
	16.000 h			
	Fluxo luminoso [lm]	2.970 (90%)	1.962^(b) (8)	
	Troca de lâmpadas	2 (10%)	0	
	20.000 h			
	Fluxo luminoso [lm]	2.937 (89%)	1.895^(b) (8)	
	Troca de lâmpadas	16 (50%)	0	
	Ciclo 2	40.000 h		
		Fluxo luminoso [lm]	2.937 (89%)	1.561^(b) (7)
	Troca de lâmpadas	8 (50%)	0	
Total de lâmpadas utilizadas ao final dos ciclos		36	24	
		2x 8 conjuntos + 2x 2 lâmpadas	1x	

Observações:
(a) Cálculo do fator de manutenção (MF) com base no valor fixado após a verificação das medições realizadas em campo, estabelecidos nos resultados dos itens 4.6.3 e 0
 $MF = FMFL \times FSL \times FML \times FMSS$
FMFL = depreciação do fluxo luminoso da lâmpada
FSL = falha por envelhecimento da lâmpada
FML = redução do fluxo luminoso por sujeira nas luminárias
FMSS = redução da refletância por sujeira nas superfícies do ambiente
(b) Fluxo luminoso corrigido para que o rendimento da luminária, LOR = 74%, seja

4.7.1.3 Superfícies de cálculo e escala dos níveis de iluminância

Os níveis de iluminância (\bar{E}_m) e UGR foram resultantes de simulação no DIALux Evo 6.1, baseados na grade de cálculo padrão do programa, prevista pela NBR 8995-1.

A superfície de cálculo planejada incluiu os parâmetros de cálculo “Potência luminosa vertical (adaptativo)” e “Unified Glare Rating (UGR)”. Esses parâmetros possibilitaram a avaliação dos níveis de iluminância e graus de ofuscamento para um objeto de cálculo, incluindo 1 plano de uso com zona marginal de 0,50 m. Esse plano de uso generalista permitiu o estudo do ambiente para um *layout* flexível, de planta livre.

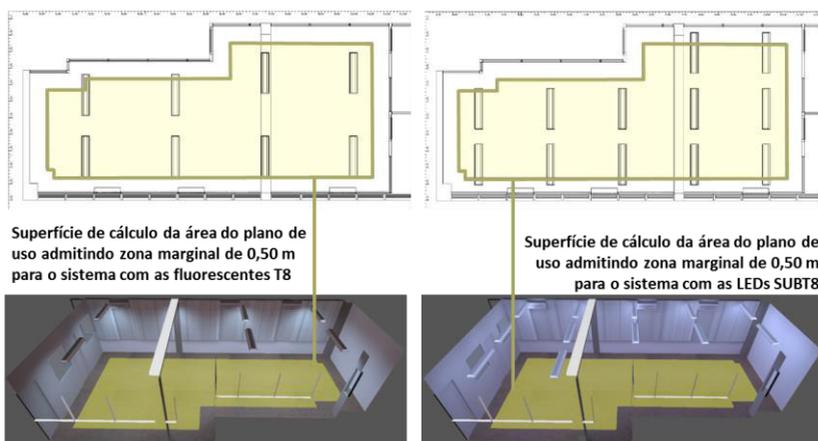
As configurações dos parâmetros de cálculo para a superfície com níveis de iluminância foram ajustadas para 0,70 m (a mesma altura

utilizada para as medições realizadas em campo e análises de cálculo das seções 4.2 e 4.5).

Os resultados de índice de ofuscamento UGR foram obtidos pelos parâmetros de cálculo padrão do DIALux, a partir de uma altura de 1,20 m, prevista pela posição de altura do olhar do observador sentado, de 15° em 15°, partindo de 0° até completar 360°.

As superfícies de cálculo resultantes para os dois sistemas, com fluorescentes T8 e LEDs SUBT8, podem ser visualizadas na Figura 72.

Figura 72. Superfícies de cálculo para os sistemas com as fluorescentes T8 e as LED SUBT8



O resultado da quantidade e distribuição dos conjuntos com as fluorescentes T8 e LEDs SUBT8, descrito na seção 4.7.1.2, também são vistos na Figura 72. Foram 8 luminárias com 16 lâmpadas fluorescentes T8 e 8 reatores eletrônicos, e 12 luminárias com 24 lâmpadas LED SUBT8, (drive embutido na lâmpada), para atingir, ao final do ciclo de vida, níveis de iluminância média mantida no plano de trabalho de 500 lux.

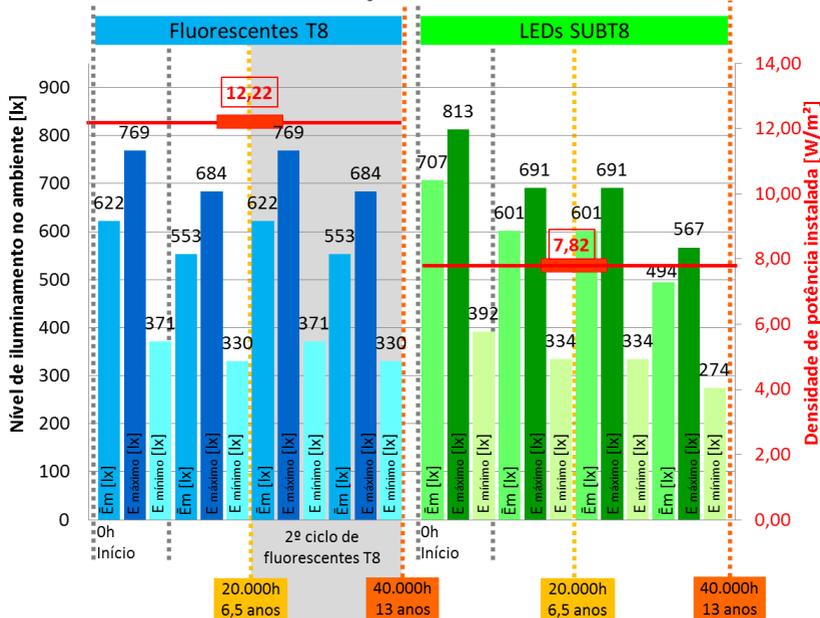
A configuração para a escala dos níveis de iluminância foi a mesma utilizada para os resultados analisados anteriormente, nos itens 4.6.3 e 4.6.4.

4.7.2 Níveis de iluminância e depreciação do fluxo luminoso

Uma avaliação de sistemas de iluminação quanto aos indicadores de eficiência energética, como discutido nesse trabalho, deve incluir parâmetros de conforto visual, a fim de manter a equiparação de fatores importantes na qualidade da iluminação nos ambientes. Distorções importantes nos níveis de iluminância, por exemplo, podem ser encontrados ao considerar os parâmetros de desempenho energético dos equipamentos, como apontado pelos pesquisadores Ryckaert et al. (2012), em propostas de substituição de fluorescentes T8 por LEDs tubulares.

Nesse sentido, os projetos com as fluorescentes T8 e LEDs SUBT8 foram estudados para manutenção mínima de 500 lux ao final do ciclo de uso, obtendo, assim, relações de densidade de potência instalada para cada sistema, visíveis na Figura 73.

Figura 73. Resultado dos níveis de iluminância e densidade de potência instaladas nos sistemas de iluminação com fluorescentes T8 e LEDs SUBT8



Apesar da necessidade de maior número de luminárias e lâmpadas, o sistema com as LEDs apresentou menor densidade de potência instalada, conforme observado na Figura 73. O final dos ciclos foi

estabelecido em 20.000h para as fluorescentes T8 e 40.000h para as LEDs SUBT8. Com isso, o resultado das densidades de potência instaladas para cada sistema, foi de 12,22 W/m² para o sistema com as fluorescentes T8 e 7,82 W/m² para o sistema com as LEDs. Dentro dos limites atuais do RTQ-C (2010), o sistema de iluminação com as fluorescentes T8 estaria dentro de uma classificação “B”, cujo limite de densidade de potência DPI_L para ambientes de escritório, planta livre, é fixado em 12,60 W/m². O sistema com as LEDs teria classe “A”, cujo limite é estabelecido em 10,50 W/m².

O sistema com as fluorescentes T8 iniciou seu ciclo de uso com iluminância média de 622 lux no plano de trabalho, e ao final das 20.000h, equivalente a 6,5 anos para o ambiente analisado, com 553 lux. Esse valor corresponde a 89% da iluminância média inicial, conforme ocorre a degradação do fluxo luminoso. Esses valores de iluminância no plano de trabalho simulados, são correlatos, percentualmente, aos valores especificados pelo fabricante para manutenção do fluxo luminoso (FMFL) ao longo do tempo (em horas de utilização).

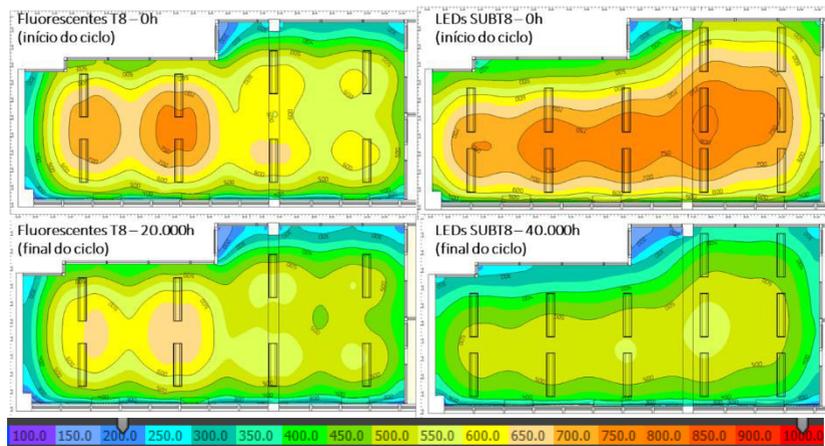
O sistema com as LEDs SUBT8 teve nível médio de iluminância no plano de trabalho inicial de 707 lux. Iniciou, portanto, com maior quantidade de luz, 12% a mais do que o sistema com as fluorescentes T8. Ao final do ciclo completo de 20.000h para as fluorescentes, o sistema com LEDs apresentou nível médio de iluminância de 601 lux, 9% acima do nível final do ciclo das fluorescentes ($\bar{E}_m = 553$ lux). Nesse ponto, após 20.000h do sistema com LEDs, as fluorescentes receberiam novo ciclo de uso, aumentando o nível de iluminância para o inicial, de 622 lux, superando o nível de iluminância do sistema com LEDs em 3%.

Ao final de 40.000h, o nível de iluminância no plano de trabalho para o sistema com LEDs atingiu o mínimo, com 494 lux para um ciclo de manutenção de 70% do seu fluxo luminoso (FMFL). O nível de 494 lux mantido no plano de trabalho com LEDs foi 11% inferior ao nível de iluminância final (2º ciclo) das fluorescentes. Foi também, 1% abaixo do nível de 500 lux estabelecido pela ABNT NBR ISO/CIE 8995 (2013), dentro da tolerância admitida, de 10% para cálculo dos níveis de iluminância.

É importante destacar que, enquanto a maioria dos sistemas com fluorescentes sofre a falha ou “queima” das lâmpadas, as LEDs tendem a sofrer a redução do seu fluxo luminoso sem que haja falha da lâmpada. Por isso são recomendadas as programações para troca total do sistema, mesmo que as lâmpadas ainda estejam funcionando.

As curvas isolux para os sistemas de iluminação com fluorescentes e com LEDs, no início e final dos seus ciclos, são apresentadas na Figura 74.

Figura 74. Curvas isolux para fluorescentes e LEDs, no início e final dos seus ciclos



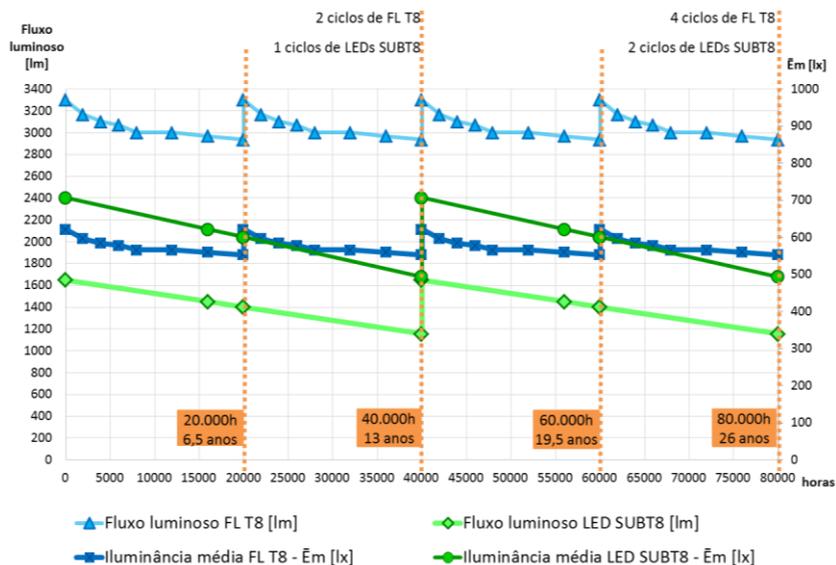
Os níveis médios de iluminância com os LEDs SUBT8 tiveram uma queda, do início do seu ciclo, ao final, após 40.000h de utilização, de 30% do valor. Esse decréscimo poderia ter um efeito sobre a percepção de satisfação e conforto visual do usuário, que para as fluorescentes, teria, em espaços mais curtos de tempo de utilização, de 20.000h, um decréscimo de 11% do nível médio de iluminância inicial. Entretanto, distribuídas as horas em 13 anos, aquele decréscimo percentual pode passar despercebido pelos usuários.

Por outro lado, caso os referidos sistemas de iluminação, com a mesma distribuição, fossem dimerizados, além de proporcionarem menor consumo de energia no início dos ciclos de utilização, poderiam, com a redução de potência, ajustar a proporção entre o nível de iluminância médio inicial, e o nível final, para 500 lux. Esse ajuste inicial do nível médio de iluminância mantida no plano de trabalho, possível de ser executado com a instalação de dimer, reduziria os picos de iluminância média dos LEDs SUBT8 e tornariam ainda mais constantes os níveis dos sistemas com as fluorescentes T8.

A relação do nível de iluminância e do fluxo luminoso para dois ciclos das LEDs SUBT8 e quatro ciclos das fluorescentes T8 é visível na

Figura 75. Ficou evidente a relação direta entre a variação do fluxo luminoso e o nível de iluminância médio mantido no plano de trabalho.

Figura 75. Relação do nível de iluminância e depreciação do fluxo luminoso das lâmpadas para cada sistema



Além disso, o rendimento da luminária igual a 74% teve efeito sobre o fluxo luminoso das fluorescentes T8, que têm ângulo do fecho luminoso omnidirecional, produzindo perdas por reflexões internas à luminária. Isso reduz o aproveitamento da quantidade de luz sobre o plano de trabalho. Enquanto isso, os LEDs SUBT8 foram instalados nas luminárias, sem, entretanto, sofrer as perdas por reflexões, devido aos ângulos de abertura de $100^\circ \times 150^\circ$, ou seja, não emitem luz em direção à parte superior das luminárias.

Como resultado do rendimento diferenciado para as LEDs SUBT8, com maior concentração do fecho luminoso na direção do plano de trabalho, percebe-se, na Figura 75, que, mesmo com menor fluxo luminoso, ocorreu uma equiparação dos níveis médios de iluminância.

A uniformidade para os dois sistemas, dada pela relação entre o nível mínimo e o nível médio de iluminância no plano de trabalho, visou atender à NBR 8995-1, que recomenda, para locais sem definição das estações de trabalho, o planejamento de 0,6. Segundo a norma, esse valor

é suficiente, como mostra a experiência, para uniformidades mínimas de 0,7 nas áreas de tarefa individuais.

Quanto aos resultados de uniformidade, o sistema com fluorescentes atingiu 0,6, enquanto com LEDs obteve-se 0,55. Os níveis médios mais elevados com LEDs resultaram nesta relação mais baixa de uniformidade, dada pelo equilíbrio entre o nível mínimo e o nível médio. A relação de 0,6 para 0,55 é de 8%, podendo ser considerada dentro do limite de tolerância.

O estabelecimento dessas relações, entre os níveis médios de iluminância mantida no plano de trabalho para os dois sistemas de iluminação analisados, conforme o ciclo de utilização, possibilitaram a sua comparação quanto à eficiência energética e relação de custo, tanto para o consumo de energia, quanto para os equipamentos necessários.

Cabe ressaltar, entretanto, que as verificações à norma consideradas visaram evitar discrepâncias na busca de sistemas eficientes, bem como, minimamente equilibrar quantidades e distribuições da luz. Uma análise mais aprofundada sobre o conforto visual resultante exigiria maior complexidade nas relações dos indicadores nesse tema.

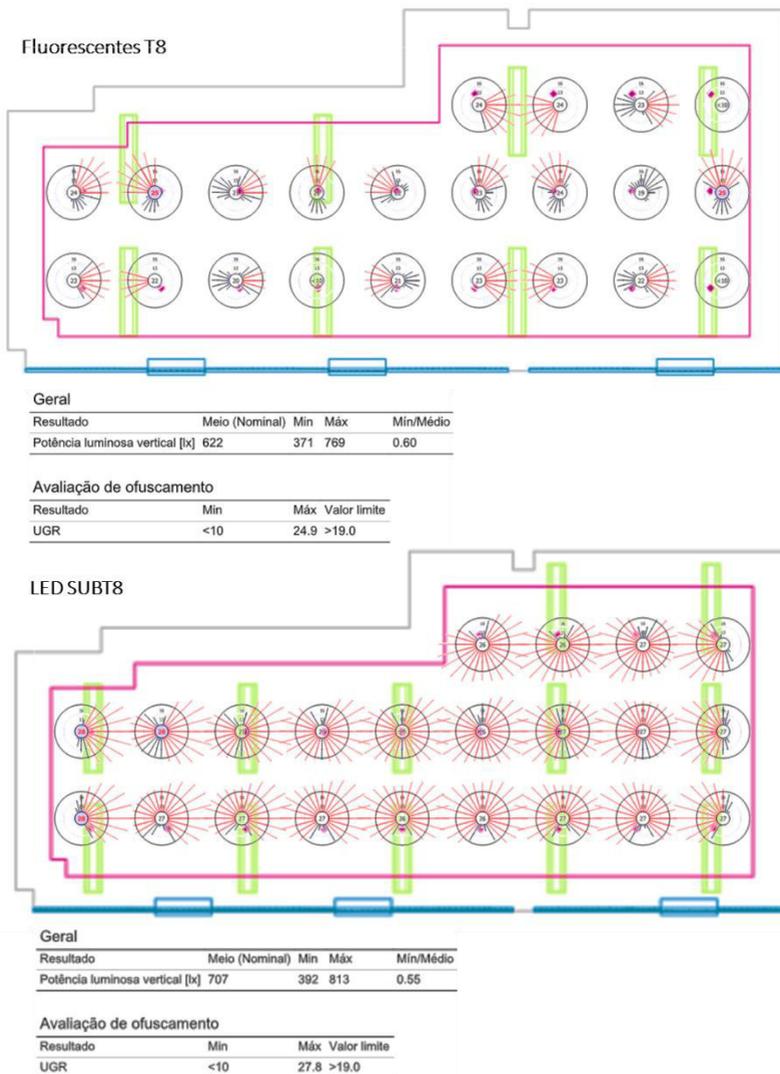
4.7.3 Ofuscamentos

Os resultados de cálculo dos ofuscamentos, dados pelo Índice de Ofuscamento Unificado UGR, foram iguais a 24,9 para as fluorescentes e 27,8 para as LEDs. Como previsto, após a comparação dos valores de UGR medidos e simulados na seção 4.6.5, os resultados calculados com o DIALux foram altos, acima do $UGR_L = 19$.

Ao definir mais direções, de 15° em 15°, entre 0° e 360° e com maior quantidade de luz para os dois sistemas, os resultados para UGR foram ainda mais elevados. Isso pode ocorrer devido ao aumento da probabilidade de ofuscamentos, com maior quantidade de brilho atingindo o observador. Entretanto, como observado na comparação entre os resultados anteriores, os valores de UGR calculados com o DIALux eram superiores aos resultados das imagens HDR (obtidas a partir de levantamento em campo). Desse modo, confirmou-se a expectativa de que a simulação esteja majorando os resultados para UGR, tornando pouco confiáveis as comparações desse parâmetro.

A Figura 76 extraída do relatório de cálculo do DIALux, apresenta os resultados de cálculo com valores para níveis de iluminância e UGR com fluorescentes e LEDs, sendo que as direções assinaladas em vermelho correspondem a valores acima do limite de 19.

Figura 76. Resultados de cálculo com o DIALux Evo 6.1 para fluorescentes T8 e LEDs SUBT8



4.7.4 Parâmetros de consumo e custo dos sistemas de iluminação

A partir dos resultados da inserção dos parâmetros de cálculo no programa DIALux Evo 6.1, incluindo os perfis de utilização e os fatores de manutenção, foram atribuídos os resultados de consumo para cada sistema, com base na tarifa de energia (relativo à média do valor do kWh cobrado na fatura mensal de energia elétrica do estabelecimento) e nos custos dos equipamentos (conjuntos de luminárias, lâmpadas e reatores). Os parâmetros de custo inicial dos sistemas, de consumo anual e de valor do kWh podem ser visualizados na Tabela 9. Resumo dos parâmetros de cálculo de consumo e custo iniciais dos sistemas de iluminação.

Tabela 9. Resumo dos parâmetros de cálculo de consumo e custo iniciais dos sistemas de iluminação

	Custo inicial do sistema de iluminação com fluorescentes T8			Custo inicial do sistema de iluminação com LEDs SUBT8		
	Valor unitário [R\$]	Quantidade	Valor parcial [R\$]	Valor unitário [R\$]	Quantidade	Valor parcial [R\$]
Luminária	164,81	8	1.318,48	164,81	12	1.977,72
Lâmpada	11,54	16	184,64	80,00	24	1.920,00
Reator	40,21	8	321,68	-	-	-
Valor dos conjuntos			1.824,80			3.897,72
Consumo	Custo do kWh [R\$]	Tempo de utilização por ano [h]	Custo do kWh [R\$]	Tempo de utilização por ano [h]		
		0,65	2880	0,65	2880	
Consumo [kWh/a]			1.728			1.106

4.7.5 Relação do consumo de energia e custo

Após o ajuste do modelo utilizando LEDs e a equiparação do nível mínimo de iluminância no plano de trabalho para os dois sistemas, foi possível analisar consumo energético e custo, com fluorescentes T8 e LEDs SUBT8.

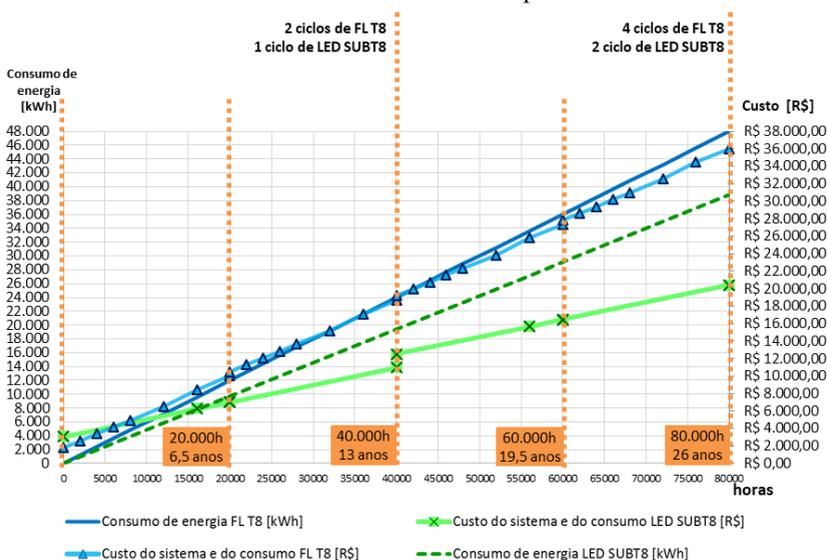
O custo total de instalação do sistema com fluorescentes, é praticamente a metade (53%) do custo de instalação do sistema com LEDs (R\$ 1.824,80 e R\$ 3.897,72). Entretanto, antes que acabe o

primeiro ciclo com as fluorescentes, ou mesmo antes da previsão da queima de qualquer uma das lâmpadas fluorescentes, com menos de 7.000h de uso (menos de dois anos e meio), o custo do sistema com LEDs se equipara e passa a ser mais econômico em relação às fluorescentes.

Analisando apenas o consumo energético, o sistema com LEDs, ao final das 40.000h, teve como resultado a redução de 36% do consumo de energia elétrica, correspondente a menos 12,67 kWh/m².a em relação ao sistema com fluorescentes. Isso representou uma economia, ao final da utilização das LEDs, de cerca de R\$ 5.600 na conta de energia, ou, em média, mais de R\$ 400,00 reais por ano.

Entretanto, foram considerados, para os custos totais, os valores dos equipamentos somados ao consumo de energia. A Figura 77 ilustra essa relação de custo e consumo entre os sistemas.

Figura 77. Relação de consumo de energia e custo dos sistemas de iluminação com fluorescentes T8 e LEDs SUBT8 no período de 40.000h



Os APÊNDICE B e C mostram a base de elaboração dos gráficos da Figura 77. O sistema com LEDs possui maior número de conjuntos de lâmpadas e luminárias, com custos mais elevados para as lâmpadas. Portanto, comparando-se o custo total, contando com o custo dos equipamentos, além do consumo de energia, ao final de 40.000h, o sistema com LEDs mostrou uma economia de 26% em relação ao custo

total do sistema com fluorescentes, em valores, mais de R\$ 4.700,00. Ao final de duas trocas das lâmpadas LED SUBT8 (80.000h), a economia sobre o custo total foi de 28%, cerca de R\$ 10.200,00.

É importante destacar que essas comparações entre os custos apresentados permitem fazer uma aferição entre os dois sistemas, no entanto, não possuem correção financeira. Nesse caso, os valores são efetivos na análise comparativa entre os sistemas, entretanto, não representam aplicação prática para cálculos financeiros.

Com a perspectiva de redução do custo dos equipamentos LED e aumento da eficácia das lâmpadas compatíveis, sabe-se ainda que existe a possibilidade de um aumento progressivo de economia de energia quando ocorrerem novas trocas de lâmpadas. Mas, na escolha de lâmpadas mais eficientes, percebe-se a importância de se avaliar novamente os dados fotométricos e os resultados de quantidade e distribuição da iluminação, visto que as trocas em proporção de 1:1 podem não ser adequadas, dado o exemplo desse trabalho.

Com a finalidade de se fazer uma comparação econômica entre as soluções, os fluxos de desembolsos de ambas foram descontados e trazidos a valor presente. Para tal, todos os montantes anuais foram descontados pela taxa referência na correção monetária decorrente de inflação (6,29%), com base no Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo – IPCA de 2016 (IBGE (2017)). Embora a aplicação do Valor Presente Líquido (VPL) seja comumente empregada na comparação alternativas de investimentos, justifica-se o seu emprego neste trabalho, uma vez esta permite trazer todo o fluxo de desembolsos para uma mesma base de referência, que seria o valor do dinheiro gasto com cada sistema no tempo presente ($t=0$).

Considerando que os valores dos equipamentos LED não tendem a acompanhar o crescimento dado à inflação ao longo do tempo, devido à escala de produção e oferta no mercado, esses custos não foram corrigidos no período analisado. O mesmo critério foi adotado em relação às fluorescentes. Os desembolsos relacionados aos ciclos de vida dos equipamentos que compõem os sistemas foram dispostos anualmente para o cálculo do VPL de cada sistema.

Quanto à tarifa de energia, devido à complexidade de composição do seu reajuste anual, que não depende apenas da correção do índice da inflação (IGP-M ou IPCA), optou-se pela correção apresentada pela concessionária da região referente ao reajuste médio para 2015, igual a 3,61% (CELESC, 2015).

Cabe ressaltar que há registros de reajustes de aumento e de redução na tarifa de energia. Portanto, ao considerá-la para efeito de

cálculo, é importante destacar que aumentos ou reduções na tarifa de energia não alteram o fato de que o sistema com LEDs é menos custoso quando comparados os VPLs para LEDs e para fluorescentes. Entretanto, quanto maior for o aumento do custo da energia, em menos tempo os custos dos sistemas se igualam, e maior será a economia do sistema com LEDs em relação ao sistema com fluorescentes. A Tabela 10 apresenta os VPLs para os sistemas com fluorescentes e com LEDs.

Tabela 10. Valor Presente Líquido buscando comparação dos custos dos sistemas

Ano (utilização = 2880h /ano)	Custo dos equipamentos FLT8	Custo da energia por ano FL T8	Custo da energia por ano (corrigido) FLT8 3,61% (CELESC, 2015)	Custo (por ano) do sistema FL T8 (consumo de energia + equipamentos)	VPL FL T8	Custo dos equipamentos LED SUBT8	Custo da energia por ano LED SUBT8 (corrigido) LED SUBT8 3,61% (CELESC, 2015)	Custo (por ano) do sistema LED SUBT8 (consumo de energia + equipamentos)	VPL LED SUBT8
0	R\$ 1.824,80	R\$ -	R\$ -	R\$ 1.824,80	R\$ 1.824,80	R\$ 3.897,72	R\$ -	R\$ -	R\$ 3.897,72
1		R\$ 1.123,20	R\$ 1.163,75	R\$ 1.163,75	R\$ 1.094,88	R\$ 718,90	R\$ 744,85	R\$ 744,85	R\$ 700,77
2		R\$ 1.123,20	R\$ 1.205,76	R\$ 1.205,76	R\$ 1.067,27	R\$ 718,90	R\$ 771,74	R\$ 771,74	R\$ 683,10
3		R\$ 1.123,20	R\$ 1.249,29	R\$ 1.249,29	R\$ 1.040,36	R\$ 718,90	R\$ 799,60	R\$ 799,60	R\$ 665,88
4		R\$ 1.123,20	R\$ 1.294,39	R\$ 1.294,39	R\$ 1.014,13	R\$ 718,90	R\$ 828,47	R\$ 828,47	R\$ 649,09
5	R\$ 369,28	R\$ 1.123,20	R\$ 1.341,11	R\$ 1.341,11	R\$ 1.260,76	R\$ 718,90	R\$ 858,37	R\$ 858,37	R\$ 632,72
6	R\$ 506,32	R\$ 1.123,20	R\$ 1.389,53	R\$ 1.389,53	R\$ 1.314,77	R\$ 718,90	R\$ 889,36	R\$ 889,36	R\$ 616,77
7		R\$ 1.123,20	R\$ 1.439,69	R\$ 1.439,69	R\$ 939,34	R\$ 718,90	R\$ 921,47	R\$ 921,47	R\$ 601,22
8		R\$ 1.123,20	R\$ 1.491,66	R\$ 1.491,66	R\$ 915,65	R\$ 718,90	R\$ 954,73	R\$ 954,73	R\$ 586,06
9		R\$ 1.123,20	R\$ 1.545,51	R\$ 1.545,51	R\$ 892,57	R\$ 718,90	R\$ 989,20	R\$ 989,20	R\$ 571,28
10		R\$ 1.123,20	R\$ 1.601,30	R\$ 1.601,30	R\$ 870,06	R\$ 718,90	R\$ 1.024,91	R\$ 1.024,91	R\$ 556,88
11		R\$ 1.123,20	R\$ 1.659,11	R\$ 1.659,11	R\$ 848,12	R\$ 718,90	R\$ 1.061,91	R\$ 1.061,91	R\$ 542,84
12	R\$ 369,28	R\$ 1.123,20	R\$ 1.719,01	R\$ 1.719,01	R\$ 1.004,34	R\$ 718,90	R\$ 1.100,24	R\$ 1.100,24	R\$ 529,15
13	R\$ 506,32	R\$ 1.123,20	R\$ 1.781,06	R\$ 1.781,06	R\$ 1.034,99	R\$ 718,90	R\$ 1.139,96	R\$ 1.139,96	R\$ 515,84
				VPL FL T8	R\$ 15.122,05			VPL LED	R\$ 12.618,07

Obs:

1. Taxa de Atratividade Mínima IPCA = 6,29% - ano base 2016 (IBGE, 2017)

2. Reajuste da tarifa da energia elétrica = 3,61 (CELESC, 2015)

Fonte: Elaborada com base nos dados de Indicadores (IBGE, 2016) e Notícias (CELESC, 2015)

O período adotado para realizar esta conferência corresponde a 13 anos, baseado em um ciclo completo do sistema com LEDs e dois ciclos completos do sistema com as fluorescentes, de acordo com as horas de utilização.

O resultado do VPL para fluorescentes igual a R\$ 15.122,05 e o VPL para LEDs igual a R\$ 12.618,07 indicam que os gastos totais com fluorescentes foram maiores do que com as LEDs. Trazendo todos os desembolsos realizados ao longo do tempo para o valor presente, ou seja, descontados esses valores com base no IPCA, o sistema com LEDs mostra-se mais vantajoso do ponto de vista econômico, pois demonstra menor custo de investimento e de consumo ao longo do tempo.

5 CONCLUSÃO

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar sistemas de iluminação LED em reformas de sistemas de iluminação quanto ao seu desempenho luminoso, energético e econômico. Para isso, foram realizadas duas grandes etapas de método experimental. A primeira incluiu medições em campo. A outra grande etapa foi principalmente teórica, com o auxílio de programas de simulação e cálculo, visando o tratamento e análise dos dados obtidos em campo e novas simulações para análise de desempenho energético e econômico.

A princípio, a substituição das fluorescentes T8 por LEDs SUBT8 pode ser entendida como a realização de uma troca direta, ou seja, troca de uma lâmpada fluorescente T8 por uma LED. Entretanto, em virtude de as propriedades fotométricas não serem equivalentes, optou-se pela escolha das lâmpadas conforme a indicação do fabricante.

A maior parte das LEDs substitutivas encontradas no mercado brasileiro, e disponíveis para a utilização no experimento, apresentavam fluxo luminoso da lâmpada entre 1000 lm e 2000 lm, com eficácia luminosa entre 70 lm/W e 110 lm/W. A avaliação isolada desses indicadores possibilita que o consumidor seja induzido ao erro. Por exemplo, um forte indicador utilizado nas comparações entre os sistemas é a eficácia luminosa da lâmpada. Considerando-se as LEDs utilizadas no experimento, apresentadas pelo fabricante como solução para substituição de fluorescentes T8, verifica-se que possuem 103 lm/W, enquanto as fluorescentes T8, 87 lm/W. Isoladamente, esse parâmetro evidencia o benefício das LEDs. Entretanto, o fluxo luminoso inverte os papéis. Para as fluorescentes, o fluxo luminoso das lâmpadas é de 3.300 lm, o dobro do fluxo luminoso das LEDs, que é de 1650 lm. Posteriormente, tratando do rendimento das luminárias, essas apresentavam LOR de 74%. Mas as perdas são apresentadas apenas para as fluorescentes, desconhecendo-se o comportamento para as mesmas luminárias utilizando as LEDs tubulares. Com um fluxo luminoso das LEDs pela metade, possivelmente, numa troca de 1:1, era previsto que houvesse uma queda no nível de iluminação no ambiente, mesmo que as perdas provocadas pelas luminárias pudessem ser mais significativas para as fluorescentes do que para as LEDs. Nesse sentido, conhecendo as dificuldades em comparar os sistemas, optou-se por realizar um experimento de campo verificando medidas de conforto visual, como os níveis de iluminância e os índices de ofuscamento.

5.1 MEDIÇÕES EM CAMPO

As medidas aferidas em campo, mais os dados de fotometria e da eficácia luminosa dos equipamentos de iluminação utilizados, permitiu uma primeira etapa de análise dos ambientes luminosos resultantes para os dois sistemas de iluminação, com fluorescentes T8 e LEDs SUBT8.

Quanto à quantidade de luz disponibilizada no plano de trabalho, a substituição direta (mantendo-se a mesma quantidade de luminárias e lâmpadas) provocou uma queda significativa no nível de iluminância do ambiente, com decréscimo de 26% para as LEDs, ou de 453 lux para 333 lux no nível médio de iluminamento. Isso mostrou a necessidade de um ajuste na quantidade de conjuntos com LEDs, a fim de obter um nível médio de iluminamento equivalente para os dois sistemas nos planos de trabalho. Segundo a NBR 8995-1, o nível médio de iluminamento para as fluorescentes foi considerado adequado para as áreas de tarefa (590 lux para o mínimo de 500 lux) e para o entorno imediato (313 lux para o mínimo de 300 lux). Com as LEDs os níveis médios não foram adequados, ultrapassando a tolerância de até 10% nas medições de níveis de iluminância. Foram encontrados níveis médios de 404 lux nas áreas de tarefa (19% abaixo do limite) e 238 lux (21% abaixo do limite) no entorno imediato.

Sobre a distribuição da luz, analisada pela uniformidade ($E_{\text{mínima}}/E_{\text{média}}$), os valores encontrados para os dois sistemas foram adequados, considerando-se uma uniformidade de 0,7 para as áreas de tarefa e de 0,5 para o entorno imediato, estando dentro do limite de tolerância de 10%.

As verificações da qualidade da luz, incluindo o índice de reprodução de cor (IRC ou R_a); temperatura de cor correlata (TCC) e espectros mostraram correspondência entre as medições e os valores especificados pelo fabricante para os dois sistemas.

Em relação aos ofuscamentos, analisados a partir de imagens HDR e utilização do programa Photolux, os valores obtidos para o índice de ofuscamento unificado (UGR) foram considerados adequados para os dois sistemas, estando dentro do limite UGR_L igual a 19, dado pela NBR 8995-1.

As medições realizadas em campo permitiram concluir que não é adequado substituir as fluorescentes T8 por LEDs SUBT8 mantendo a mesma quantidade de luminárias e lâmpadas existentes.

5.2 SIMULAÇÕES COM O DIALUX EVO 6.1

Observadas as diferenças fotométricas e os resultados de desempenho luminoso entre os sistemas com fluorescentes T8 e com LEDs SUBT8, buscou-se, por meio de simulação e cálculo no DIALux, equilibrar os níveis de iluminância médios no plano de trabalho para os dois sistemas prevendo, conjuntamente, a depreciação do fluxo luminoso e as trocas das lâmpadas.

Reproduzidos os sistemas de iluminação no DIALux, foi possível comparar os resultados simulados aos resultados obtidos em campo. O modelo do sistema de iluminação para as fluorescentes teve variação de 3% para os níveis médios de iluminância mantida no plano de trabalho em relação às medições realizadas em campo. O modelo para o sistema com LEDs, inicialmente, apresentou uma variação de 25% em relação aos valores médios de iluminância medidos no plano de trabalho. Após o ajuste realizado, estimando-se rendimento da luminária igual a 100% (sem perdas), essa variação diminuiu para 1%, permitindo o prosseguimento das análises.

Para as análises de ofuscamento, os valores de UGR (índice de ofuscamento unificado) calculados por meio do DIALux foram significativamente mais elevados do que os valores analisados nas imagens HDR por meio do Photolux. Enquanto as imagens HDR tiveram valores adequados para todas as direções dentro do limite estabelecido pela NBR 8995-1, as simulações ultrapassaram o $UGR_L = 19$ em 38% dos valores para as fluorescentes e em 71% dos valores para as LEDs. O UGR máximo calculado no DIALux foi de 25 para fluorescentes e 28 para LEDs.

Não foi possível estabelecer uma relação entre os valores medidos e simulados para o UGR. Visto que não há ocorrência de grandes planos iluminantes, havendo apenas luminárias adequadas aos padrões de luminâncias da NBR 8995-1 e com aletas que contribuem para uma menor probabilidade de ofuscamentos, conclui-se que esse índice calculado pelo DIALux merece maior investigação, resultando em questionável sua utilização na avaliação dos sistemas.

5.2.1 Desempenho energético e luminoso dos sistemas

Após a verificação do modelo, partiu-se para uma avaliação do desempenho energético, considerando-se parâmetros de conforto visual definidos pela NBR 8995-1. Para uma comparação entre os dois sistemas buscou-se de uma iluminância média mínima de 500 lux mantida no plano

de trabalho ao final dos seus ciclos. A uniformidade planejada foi de 0,6 para o ambiente, desprezando-se a zona marginal. Para atingir esses requisitos, o sistema com LEDs teve maior quantidade de luminárias e lâmpadas instaladas. Foram 12 conjuntos com 24 lâmpadas LED e 8 conjuntos com 16 lâmpadas fluorescentes T8 (mais 8 reatores).

Em relação à quantidade de luz, a variação sofrida pela iluminância média ratificou a degradação do fluxo luminoso sofrida pelas lâmpadas. As fluorescentes tiveram, no início da sua utilização, o nível médio de iluminância no plano de trabalho igual a 622 lux, caindo 14% ao atingir o mínimo de 553 lux no final do seu ciclo de uso. Sem perdas por reflexão nas luminárias, o sistema com LEDs teve, inicialmente, 707 lux de nível de iluminância no plano de trabalho, caindo 30% ao dispor 494 lux no final do seu ciclo de uso. No começo, as LEDs ultrapassam em 14% a quantidade de luz em relação às fluorescentes, entregando no final, 11% menos luz no plano de trabalho.

Sobre a distribuição da luz, avaliada pela uniformidade, foram observados os limites da NBR 8995-1, sendo que os níveis médios mais altos para as LEDs deixaram esse coeficiente um pouco abaixo da relação encontrada entre níveis mínimos e médios com as fluorescentes (0,55 para LEDs e 0,6 para fluorescentes). Concluiu-se como sendo adequada a uniformidade encontrada, segundo a NBR 8995-1.

Quanto ao desempenho energético dos sistemas, apesar do sistema com LEDs conter maior número de conjuntos de luminárias e lâmpadas, sua densidade de potência instalada foi mais baixa, com 7,82 W/m², enquanto com as fluorescentes obteve-se 12,22 W/m², respectivamente, representado as classes “A” e “B” no RTQ-C.

Ao final de um ciclo de LEDs SUBT8, ou seja, da sua instalação até a troca das lâmpadas passadas 40.000 h, o consumo energético para fluorescentes resultou em 35,20 kWh/m².a, enquanto com as LEDs, o consumo foi de 22,53 kWh/m².a. Houve uma redução de 36% no consumo energético em relação ao sistema com fluorescentes T8 ou, de 12,67 kWh/m².ano. Isso representaria uma economia na fatura de energia elétrica de cerca de R\$ 5.600,00 ao final da utilização das LEDs, ou seja, cerca de R\$ 400,00 por ano.

Concluiu-se que o sistema com LEDs possui maior eficiência energética, mesmo apresentando maior quantidade de equipamentos instalados, com 36% de redução no consumo. Os níveis de iluminância para esse sistema, entretanto, sofrem maior queda do início ao final do ciclo quando comparados aos níveis de iluminância do sistema com as fluorescentes. Apesar disso, esse decréscimo de pelo menos 30%

distribui-se ao longo de 13 anos de acordo com o perfil de utilização do ambiente, podendo ser imperceptível para os usuários.

5.2.2 Custos dos sistemas

O sistema com fluorescentes representa metade do custo total de instalação inicial em relação ao sistema com LEDs. Contudo, antes da primeira troca do sistema com as fluorescentes (por volta de 7.000 h de uso), os custos totais incluindo valores dos equipamentos e consumo de energia se equiparam. Portanto, diante do perfil de utilização da sala, após menos de dois anos e meio ou 29 meses (equivalente às 7.000 h), as LEDs passam a ser mais econômicas.

Levando-se em conta os custos totais dos sistemas, chega-se uma economia de 26% para o sistema com LEDs ao final das 40.000 h (quando deve ser realizada a primeira troca das LEDs). Isso representa cerca de R\$ 4.700,00 de diferença em relação às fluorescentes. Em duas trocas de lâmpadas LED, após 80.000 h, obtém-se 28% de economia sobre o custo total, o equivalente a R\$ 10.200,00.

A avaliação econômica entre os sistemas foi realizada comparando-se os VPLs de ambos. Trazendo todos os desembolsos descontados pela taxa de correção monetária decorrente de inflação ao valor presente, concluiu-se que o sistema as LEDs SUBT8 são mais econômicas em relação às fluorescentes T8.

5.3 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Ao final deste trabalho, concluiu-se que foi atingido o objetivo geral, tendo o sistema com LEDs se mostrado mais eficiente em relação ao sistema com fluorescentes, resultando em economia de energia e redução do custo total do sistema de iluminação. Essa comparação foi possível após a verificação dos modelos utilizados para simulação, mantendo-se os níveis de iluminância equivalentes ao final dos ciclos de cada sistema. A verificação dos sistemas de iluminação por meio de investigação experimental realizada em campo foi fundamental para realizar as análises dos sistemas, conferindo maior confiabilidade aos resultados.

Ressalta-se que os parâmetros de conforto visual considerados consistem numa análise simplificada, buscando atender, minimamente, aos requisitos da NBR 8995-1. Todavia, estudos de maior complexidade, com adição de outros parâmetros ou mesmo a inclusão do usuário, seriam necessários para dar maior profundidade a esse tema.

Como pôde ser observado ao longo das etapas deste trabalho, a complexidade envolvida nas comparações dos sistemas trouxe questionamentos sobre o apelo feito às substituições de fluorescentes T8 por LEDs em larga escala. As indicações feitas para as trocas não deixam claro aos projetistas a quantidade e a distribuição da luz que será entregue ao ambiente. A utilização de programas de simulação e cálculo para realizar o estudo dessa substituição também não se mostrou precisa quando foram inseridas as LEDs em luminárias projetadas para as fluorescentes. Notoriamente, existe um grande potencial de economia nas substituições, como visto nos resultados apresentados. Entretanto, a não compatibilidade entre os ambientes luminosos resultantes após a troca de fluorescentes por LEDs em 1:1, pode trazer frustrações na sua aplicação, possivelmente, prejudicando a imagem das LEDs quanto ao seu potencial.

Em atenção às LEDs integradas (voltadas a novos projetos ou reformas sem o aproveitamento da luminária das fluorescentes) percebe-se que há maior controle e disponibilidade de *plug-ins*, arquivos fotométricos completos com dados precisos, permitindo maior domínio nas propostas de iluminação. Seus designs permitem extrair das LEDs seu maior potencial de eficácia e distribuição, possibilitando projetos inovadores.

A investigação realizada permitiu não apenas conferir a maior ou a menor eficiência e economia dos sistemas, mas apontou questões importantes que devem ser consideradas em reformas de sistemas de iluminação prevendo a substituição de fluorescentes T8 por LEDs. A avaliação de indicadores de eficiência energética de maneira combinada e considerando parâmetros de conforto visual mínimos foi fundamental para as avaliações. Além disso, a dificuldade em encontrar dados completos e parâmetros fotométricos resultantes da instalação das LEDs nas luminárias projetadas para fluorescentes expôs limitações e provocou discussões que merecem ser aprofundadas em trabalhos futuros.

5.4 LIMITAÇÕES

É importante salientar que este trabalho está limitado, primeiramente, ao tempo, sabendo que as pesquisas com LEDs evoluem rapidamente e que os equipamentos encontrados em 2015, à disposição no mercado brasileiro, para o fabricante utilizado podem apresentar novas soluções ou variações significativas para o ano de 2016, e assim por diante.

- A escolha das lâmpadas foi limitada aos produtos encontrados no mercado brasileiro, baseados na indicação

fornecida por um fabricante. Essa restrição de escolha deveu-se à dificuldade em encontrar os valores equivalentes entre os produtos LED e fluorescentes T8 para quaisquer fabricantes pesquisados.

- Os parâmetros de conforto visual considerados neste trabalho foram baseados nos limites da NBR 8995-1, podendo ser considerados simplificados em relação a análises mais completas envolvendo a qualidade do ambiente luminoso.
- As análises de ofuscamentos para o UGR por meio de simulação mostraram-se incompatíveis com as análises realizadas por meio de imagens *HDR* no Photolux obtidas em campo, limitando as conclusões sobre esse índice na avaliação final dos sistemas de iluminação utilizando o DIALux Evo 6.1.
- A falta de dados fotométricos medidos em laboratório e disponibilizados para as luminárias com LEDs afetou a precisão na análise dos resultados do sistema com LEDs por meio de simulação e comparação com as medições em campo realizadas para o mesmo sistema.
- A falta de *plug-in* disponível para a simulação com a luminária, gerado especificamente para LEDs, afetou a precisão dos resultados de simulação com LEDs.
- Ressalta-se que existe uma limitação na falta de dados reais de medições de sistemas com LEDs para a quantidade total de horas prevista no seu ciclo de vida pelos fabricantes. Os dados para a estimativa do ciclo de vida e a manutenção do fluxo luminoso são estimados pelos fabricantes por medições em laboratório (In Situ Temperature Measurement Test – ISTMT).

5.5 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O trabalho realizado buscou comparar os sistemas fluorescentes T8 e LEDs quanto ao desempenho luminoso e energético, além de verificar seus custos. Entretanto, a continuação de pesquisas relacionadas ao tema é necessária, visto que são amplos os investimentos em substituição dessas tecnologias convencionais por LEDs. O trabalho apresentado observou a complexidade para realizar as comparações entre os sistemas, evidenciando a impossibilidade de substituição direta de 1:1, das

fluorescentes T8 por LEDs. Nesse sentido, outros fatores que diferenciam os sistemas estudados podem ser tratados quando complementadas as suas análises.

- Dada a análise simplificada para os parâmetros de conforto visual, a pesquisa poderia ser ampliada considerando mais indicadores da qualidade do ambiente luminoso e incluindo a percepção/preferência do usuário.
- Aprofundando-se os estudos sobre o potencial de redução no consumo energético em comparação entre os sistemas, análises incluindo medições com sistemas dimerizáveis poderiam verificar sua influência sobre os resultados, otimizando-se a economia de energia e gastos relacionados.
- Medições de consumo de energia teriam um papel importante na verificação da eficiência energética e na análise econômica entre os dois sistemas.
- A análise térmica com medições poderia trazer avanços sobre diferenças entre os sistemas na forma de dissipação do calor, aquecimento e, portanto, consumo de energia para resfriamento por meio do condicionamento de ar.

REFERÊNCIAS

- ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR ISO/CIE 8995-1 de 03/2013 - Iluminação de ambientes de trabalho - Parte 1: Interior. Rio de Janeiro, 2013.
- DE ALMEIDA, A.; SANTOS, B.; PAOLO, B.; QUICHERON, M. Solid state lighting review - Potential and challenges in Europe. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 34, p. 30–48, 2014.
- ALVARENGA, Darlan (São Paulo). Portal G1. **Indústria do LED diz que país pode reduzir 10% do consumo de energia**. 2015. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?View=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D&Team=¶ms=itemID=%7B6ECFAA92-B35C-4F89-8BA9-1958B9B912AE%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>>. Acesso em: 13 fev. 2015.
- AMAN, M. M.; JASMON, G. B.; MOKHLIS, H.; BAKAR, A. H. A. Analysis of the performance of domestic lighting lamps. **Energy Policy**, v. 52, p. 482–500, 2013. Elsevier.
- ASHRAE Standard 90.1–2010. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. Atlanta, 2010.
- BOYCE, P. R.; SMET, K. A. G. LRT symposium “Better metrics for better lighting” – a summary. **Lighting Research and Technology**, v. 46, n. 6, p. 619–636, 2014.
- BRASIL. AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Cálculo tarifário e metodologias**: Reajuste Tarifário Anual. 2016. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/entendendo-a-tarifa/-/asset_publisher/uQ5pCGhnyj0y/content/reajuste-tarifario-anual/654800?inheritRedirect=false>. Acesso em: 06 fev. 2016.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético - Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Plano Nacional de Energia 2030**, 2007. Rio de Janeiro, 2007.
- BRASIL. Ministério do desenvolvimento, indústria e comércio exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). **Portaria nº 372, de 17 de setembro de 2010. Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**, 2010. Rio de Janeiro, 2010.

BRASIL. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão. Secretaria de Logística e Tecnologia da Informação - SLTI. **Instrução Normativa N°2, de 4 de junho de 2014**, 2014. Brasília, 2014.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético - Empresa de Pesquisa Energética (EPE). **Balanco Energético Nacional 2015 - Relatório Síntese - ano base 2014**, 2015a. Rio de Janeiro, 2015.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Secretaria de Planejamento e Desenvolvimento Energético - Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Balanco Energético Nacional 2015 - ano base 2014**, 2015b. Rio de Janeiro, 2015.

BRASIL. Nota técnica DEA 12/16 - Avaliação da Eficiência Energética para os próximos 10 anos (2015-2024). **Nota técnica DEA 16/12 - Avaliação da Eficiência Energética para os próximos 10 anos (2012-2021)**, 2016. Rio de Janeiro.

BRENDOLAN, R. **Projeto de Iluminação Artificial e Eficiência Energética: Entraves e Potencialidades para a Aplicação do RTQ-C**. 2012. 171 f.. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de Brasília, Brasília, 2012.

BRODRICK, J. R. United States Department of Energy - USDOE. **Emerging Lighting Technologies**, 2005. Las Vegas, 2005.

CAICEDO, D.; PANDHARIPANDE, A.; LEUS, G. Occupancy-based illumination control of LED lighting systems. **Lighting Research and Technology**, v. 43, p. 217–234, 2011.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **2013 Building Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings**. Title 24, part 6 and Associated Administrative Regulations in Part 1. May 2012. Sacramento, 2012a.

CALIFORNIA ENERGY COMMISSION. **2013 Building Energy Efficiency Standards for Residential and Nonresidential Buildings**. Sacramento, 2012b.

CARLUCCI, S.; CAUSONE, F.; DE ROSA, F.; PAGLIANO, L. A review of indices for assessing visual comfort with a view to their use in optimization processes to support building integrated design. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 47, n. 7491, p. 1016–1033, 2015. Elsevier.

CELESC (Santa Catarina) (Org.). **Reajuste tarifário médio será de 3,61% na área de concessão da Celesc: Bandeiras tarifárias e revisão extraordinária anteciparam receita e provocaram reajuste menor**. 2015.

Disponível em: <<http://www.celesc.com.br/portal/index.php/noticias/1579-reajuste-tarifario-medio-sera-de-361-na-area-de-concessao-da-celesc>>.

Acesso em: 04 ago. 2015.

CRAWFORD, M. H. LEDs for solid-state lighting: Performance challenges and recent advances. **IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics**, v. 15, n. 4, p. 1028–1040, 2009.

DANGOL, R.; ISLAM, M. S.; HYVARINEN, M.; et al. User acceptance studies for LED office lighting: Preference, naturalness and colourfulness. **Lighting Research and Technology**, v. 47, p. 36–53, 2015.

DILAURA, David L. et al. **The Lighting Handbook: Tenth Edition: Reference and Application**. 10. ed. Nova Iorque: Illuminating Engineering Society (ies), 2011.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas acrílica e PVA**. 2008. 160 f.. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2008.

DUBOIS, M.-C.; BLOMSTERBERG, Å. Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 10, p. 2572–2582, 2011. Elsevier B.V.

FOTIOS, S.; ATLI, D.; CHEAL, C.; HOUSER, K.; LOGADOTTIR, A. Lamp spectrum and spatial brightness at photopic levels: A basis for developing a metric. **Lighting Research & Technology**, v. 47, p. 80–102, 2015.

GENERAL ELECTRIC COMPANY. GE Lighting Solutions. **LED Luminaire Lumen Maintenance Ratings**, 2011. Nova Iorque, 2011.

GERMAN ELECTRICAL AND ELECTRONICAL MANUFACTURERS' ASSOCIATION. ZVEI Electric Luminaires. **ZVEI Guide to DIN-EN-12464-1. Lighting of work places part1: Indoor work places**, 2005. Frankfurt, 2005.

GLOBAL ENERGY STATISTICAL YEARBOOK 2016 (Londres). Enerdata (Org.). **Electricity domestic consumption: Stagnation of electricity consumption, mainly due to the slowdown in China and drop in the USA**. 2015. Disponível em: <<https://yearbook.enerdata.net/#electricity-domestic-consumption-data-by-region.html>>. Acesso em: 01 jun. 2016.

HANSELAER, P.; LOOTENS, C.; RYCKAERT, W. R.; DECONINCK, G.; ROMBAUTS, P. Power density targets for efficient lighting of interior task areas. **Lighting Research and Technology**, v. 39, n. 2007, p. 171–184, 2007.

HIRNING, M. B.; ISOARDI, G. L.; COWLING, I. Discomfort glare in open plan green buildings. **Energy and Buildings**, v. 70, p. 427–440, 2014. Elsevier B.V.

HUPPERT, David. **LED There Be Light**. Imagem cedida por EnergyStar. Disponível em: <<http://ww2.kqed.org/quest/2013/06/27/comparing-led-cfl-incandescent-light-bulbs-energy-saving/>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

IACOMUSSI, P.; RADIS, M.; ROSSI, G.; ROSSI, L. Visual Comfort with LED Lighting. **Energy Procedia**, v. 78, p. 729–734, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Indicadores IBGE - Sistema Nacional de Índices de Preços ao Consumidor IPNA e INPC. **Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE**, p. 14–49, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo Demográfico 2010 - Características da População e dos Domicílios - Resultados do Universo. , p. 270, 2011.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Newsletter 1: Overview and first results. IEA SHC Task 50: Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings. **Solar Heating & Cooling Programme SHC**, p. 1–11, 2015. Stuttgart.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Advanced Lighting Solutions for Retrofitting Buildings - Official Website. , p. 3–4, 2016. Disponível em: <<http://task50.iea-shc.org/>>. Acesso em 13 jun. 2016.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY; ORGANIZATION FOR ECONOMIC CO-OPERATION AND DEVELOPMENT; EUROPEAN STATISTICAL SYSTEM. **Energy Statistics Manual**. França, 2010. 196p.

ISLAM, M. S.; DANGOL, R.; HYVARINEN, M.; et al. User acceptance studies for LED office lighting: Lamp spectrum, spatial brightness and illuminance. **Lighting Research and Technology**, v. 47, p. 54–79, 2015.

LEITE, P. R. **Requisitos dos Sistemas de Iluminação Artificial das Certificações Leed, Etiqueta Pbe Edifica e Aqua em Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos: Barreiras e Potencialidades**. 2013. 242 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Escola de Arquitetura, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

LINHART, F.; SCARTEZZINI, J. L. Evening office lighting - visual comfort vs. energy efficiency vs. performance? **Building and Environment**, v. 46, p. 981–989, 2011.

MORE: Mecanismo online para referências, versão 2.0. Florianópolis: UFSC Rexlab, 2013. Disponível em: <<http://www.more.ufsc.br/>>. Acesso em: 01 ago. 2015.

LUMILÂNDIA (São Bernardo do Campo). **Lâmpadas**: O que é uma lâmpada e um pouco de sua história. Extraído do site da Phillips. Disponível em: <<http://www.lumilandia.com.br/dicasluminosas.html>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

OFFICE OF ENERGY EFFICIENCY & RENEWABLE ENERGY. United States Department of Energy USDOE. **LED Basics**. 2013. Disponível em: <<http://energy.gov/eere/ssl/led-basics>>. Acesso em: 10 dez. 2013.

OSRAM (Brasil). **Ferramentas**: DIALux e RELUX. 2015. Disponível em: <http://www.osram.com.br/osram_br/ferramentas-e-servicos/ferramentas/dialux-e-relux/index.jsp>. Acesso em: 25 out. 2015.

PANDHARIPANDE, A.; CAICEDO, D. Daylight integrated illumination control of LED systems based on enhanced presence sensing. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 4, p. 944–950, 2011. Elsevier B.V.

PESSOA, J. L. N.; GHISI, E. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3E - UFSC. **Nota Técnica: Eficiência luminosa de produtos LED encontrados no mercado brasileiro (Versão 3: revisada e ampliada)**, 2015. Florianópolis, 2015.

PESSOA, J. L. N.; GHISI, E.; LAMBERTS, R. Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações - CB3E - UFSC. **Estado da arte em eficiência energética: iluminação e envoltória**, 2013. Florianópolis, 2013.

POPPE, A. View This Issue - October 2014 Determine LED temperature effects for reliable SSL products (MAGAZINE). **Leds Magazine**, , n. 8, p. 9–17, 2014.

PORTAL HOSPITAIS BRASIL (São Paulo). Publimed Editora (Ed.). **Funfarme e CPFL implantam projeto para economia de energia e financeira no Hospital de Base e Hospital da Criança e Maternidade, de São José do Rio Preto**: Serão substituídas 16.042 de lâmpadas fluorescentes por LEDs. 2016. Disponível em: <[http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-](http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D¶ms=itemID=%7B1EC80E8F-8330-4470-AED8-AA56EDA55ED0%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D)

[482D3D66BB65%7D¶ms=itemID=%7B1EC80E8F-8330-4470-AED8-AA56EDA55ED0%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D](http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D¶ms=itemID=%7B1EC80E8F-8330-4470-AED8-AA56EDA55ED0%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D)>. Acesso em: 26 fev. 2016.

PROCEL INFO (Rio de Janeiro). **CPFL Paulista investe R\$ 709 mil em programa de eficiência energética na UNIFEB.** 2016. Disponível em: <<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?ViewID=%7BF5EAADD6-CCB0-4E29-A0C4-482D3D66BB65%7D¶ms=itemID=%7B3AD544F9-A0B0-44AC-83D4-AF2E8FA1E300%7D;&UIPartUID=%7BD90F22DB-05D4-4644-A8F2-FAD4803C8898%7D>>. Acesso em: 26 fev. 2016.

RAMOS, G.; LAMBERTS, R. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE). UFSC. **Relatório Técnico do Método de Avaliação do Sistema de Iluminação do RTQ-C**, 2010. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

ROMÉRO, M. D. A.; PHILIPPI, A. J. A conservação de energia como instrumento de política e gestão. **Anais do XXVII Congresso da ABES**, p. 1–6, 2000. Porto Alegre, 2000.

ROYER, M. Lumen Maintenance and Light Loss Factors: Consequences of Current Design Practices for LEDs. **Leukos**, v. 10, p. 77–86, 2014.

RYCKAERT, W. R.; LOOTENS, C.; GELDOLF, J.; HANSELAER, P. Criteria for energy efficient lighting in buildings. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 341–347, 2010.

RYCKAERT, W. R.; SMET, K. A G.; ROELANDTS, I. A A; VAN GILS, M.; HANSELAER, P. Linear LED tubes versus fluorescent lamps: An evaluation. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 429–436, 2012. Elsevier B.V.

SANTAMOURIS, M.; DASCALAKI, E. Passive retrofitting of office buildings to improve their energy performance and indoor environment: The OFFICE project. **Building and Environment**, v. 37, p. 575–578, 2002.

SOFT ENERGY CONSULTANTS (França). ENTPE. **Photolux 3.1 Users' Guide for Canon EOS**. Villeurbanne: Soft Energy Sarl, 2009. 12 p.

SOKANSKÝ, K.; BALEJA, R.; BOS, P.; NOVÁK, T. Potential Influence of Light Sources on Human Circadian Rhythms. **Proceedings of the First International Scientific Conference “Intelligent Information Technologies for Industry” (IITI’16)**, v. 450, p. 409–419, 2016.

THEJOKALYANI, N.; DHOBLE, S. J. Novel approaches for energy efficient solid state lighting by RGB organic light emitting diodes – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 32, p. 448–467, 2014. Elsevier.

UDDIN, S.; SHAREEF, H.; MOHAMED, A.; HANNAN, M. A; MOHAMED, K. LEDs as energy efficient lighting systems: A detail review.

2011 IEEE Student Conference on Research and Development, p. 468–472, 2011.

UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs Population Division. Population Division. **World population prospects: The 2012 revision: Key Findings and Advance Tables**, 2013. Nova Iorque, 2013. Disponível em: <<http://esa.un.org/unpd/wpp/Excel-Data/population.htm>>. .

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Energy Efficiency & Renewable Energy. . New York, setembro 2013. 12 p.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. Buildings Technologies Program. Energy Efficiency and Renewable Energy 2010. **Energy Efficiency of White LEDs**, 2010. Nova Iorque, 2010.

UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. United States Department of Energy (U.S. DOE). Pacific Northwest National Laboratory. **CALIPER. Report 21.2: Linear (T8) LED Lamp Performance in Five Types of Recessed Troffers. May 2014**, 2014. New York, 2014.

VERNIER SOFTWARE & TECHNOLOGY (Estados Unidos da América) (Org.). **ALTA II Reflectance Spectrometer**. Disponível em: <<http://www.vernier.com>>. Acesso em: 20 ago. 2015.

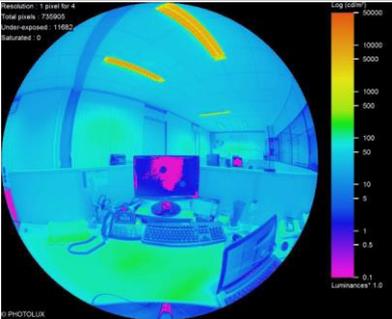
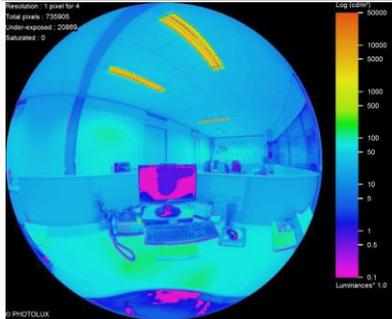
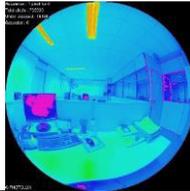
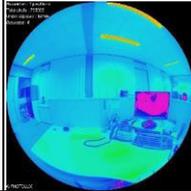
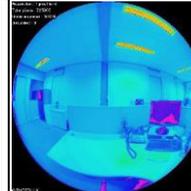
WORLD ENERGY COUNCIL. **World Energy Perspective Energy efficiency policies: what works and what does not**. 2013.

APÊNDICE A – Imagens HDR

O Quadro 12 apresenta os resultados obtidos para a análise de ofuscamentos para o sistema com as fluorescentes T8 e as LEDs SUBT8 utilizando as imagens HDR

Quadro 12. Resultados das imagens HDR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 e com LEDs SUBT8

continua

Estação 1 – FL T8 -				Estação 1 – LED SUBT8					
Frente (0°)				Frente (0°)					
UG R	17,3	L _{média} [cd/m ²]	L _{máx} [cd/m ²]	L _{mín} [cd/m ²]	UG R	17,8	L _{média} [cd/m ²]	L _{máx} [cd/m ²]	L _{mín} [cd/m ²]
VCP	84 %	149	11.100	0,69	VCP	81 %	93	10.400	0,42
									
Direita (45°)		Esquerda (315°)		Direita (45°)		Esquerda (315°)			
UGR	14,8	UGR	15,1	UGR	14,5	UGR	18,7		
VCP	87%	VCP	85%	VCP	88%	VCP	83%		
									

Quadro 12. Resultados das imagens HDR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 e com LEDs SUBT8

continuação

Estação 2 – FL T8				Estação 2 – LED SUBT8					
Frente (0°)				Frente (0°)					
UG	17,0	$L_{m\acute{e}dia}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{a}x}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{i}n}$ [cd/m ²]	UG	16,5	$L_{m\acute{e}dia}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{a}x}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{i}n}$ [cd/m ²]
R					R				
VCP	83%	135	10.400	0,53	VCP	84%	84	9.200	0,47
Direita (45°)		Esquerda (315°)		Direita (45°)		Esquerda (315°)			
UGR	15,5	UGR	16,4	UGR	18,5	UGR	17,3		
VCP	87%	VCP	84%	VCP	85%	VCP	84%		

Quadro 12. Resultados das imagens HDR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 e com LEDs SUBT8

continuação

Estação 3 – FL T8				Estação 3 – LED SUBT8					
Frente (0°)				Frente (0°)					
UG	16,4	$L_{m\acute{e}dia}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{a}x}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{i}n}$ [cd/m ²]	UG	16,1	$L_{m\acute{e}dia}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{a}x}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{i}n}$ [cd/m ²]
R					R				
VCP	84%	125	10.600	0,46	VCP	85%	76	8.700	0,36
Direita (45°)		Esquerda (315°)		Direita (45°)		Esquerda (315°)			
UGR	14,8	UGR	14,4	UGR	17,9	UGR	15,5		
VCP	82%	VCP	85%	VCP	82%	VCP	85%		

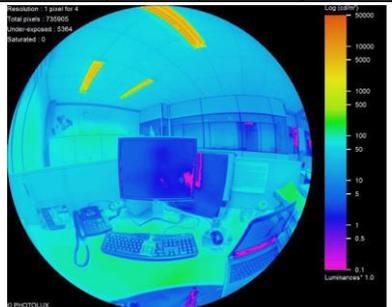
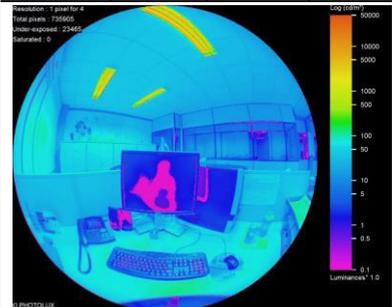
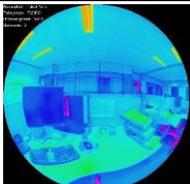
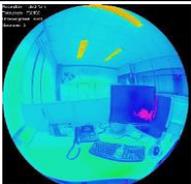
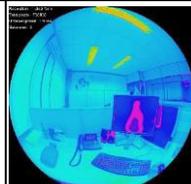
Quadro 12. Resultados das imagens HDR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 e com LEDs SUBT8

continuação

Estação 4 – FL T8				Estação 4 – LED SUBT8			
Frente (0°)				Frente (0°)			
UGR 16,4	$L_{m\acute{e}dia}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{a}x}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{i}n}$ [cd/m ²]	UGR 19,0	$L_{m\acute{e}dia}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{a}x}$ [cd/m ²]	$L_{m\acute{i}n}$ [cd/m ²]
VCP 84%	131	10.900	0,66	VCP 80%	106	16.100	0,51
Direita (45°)		Esquerda (315°)		Direita (45°)		Esquerda (315°)	
UGR	12,9	UGR	14,2	UGR	16,8	UGR	16,9
VCP	87%	VCP	85%	VCP	82%	VCP	84%

Quadro 12. Resultados das imagens HDR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 e com LEDs SUBT8

continuação

Estação 5 – FL T8				Estação 5 – LED SUBT8					
Frente (0°)				Frente (0°)					
UG R	15,1	L _{média} [cd/m ²]	L _{máx} [cd/m ²]	L _{mín} [cd/m ²]	UG R	16,4	L _{média} [cd/m ²]	L _{máx} [cd/m ²]	L _{mín} [cd/m ²]
VCP	87%	127	10.500	0,56	VCP	88%	90	10.100	0,50
									
Direita (45°)		Esquerda (315°)		Direita (45°)		Esquerda (315°)			
UGR	11	UGR	15,6	UGR	15	UGR	19,3		
VCP	92%	VCP	86%	VCP	90%	VCP	85%		
									

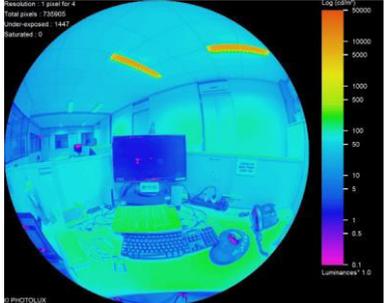
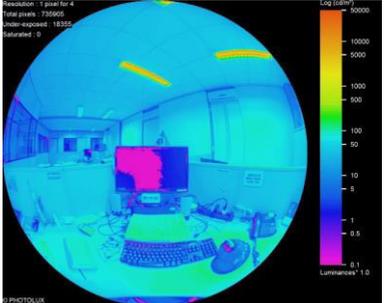
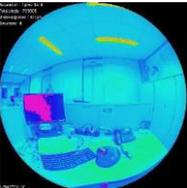
Quadro 12. Resultados das imagens HDR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 e com LEDs SUBT8

continuação

Estação 6 – FL T8				Estação 6 – LED SUBT8			
Frente (0°)				Frente (0°)			
UG R	16,7	L _{média} [cd/m ²]	L _{máx} [cd/m ²]	UG R	18,4	L _{média} [cd/m ²]	L _{mín} [cd/m ²]
VCP	82%	123	11.100	VCP	80%	80	0,36
Direita (45°)		Esquerda (315°)		Direita (45°)		Esquerda (315°)	
UGR	16,4	UGR	14,7	UGR	15,5	UGR	15,5
VCP	79%	VCP	85%	VCP	84%	VCP	85%

Quadro 12. Resultados das imagens HDR para o sistema de iluminação com fluorescentes T8 e com LEDs SUBT8

conclusão

Estação 7 – FL T8				Estação 7 – LED SUBT8			
Frente (0°)				Frente (0°)			
UG	15,8	L _{média} [cd/m ²]	L _{máx} [cd/m ²]	UG	15,9	L _{média} [cd/m ²]	L _{mín} [cd/m ²]
R		113	11.700	R		75	9.200
VCP	76%		0,65	VCP	77%		0,57
							
Direita (45°)		Esquerda (315°)		Direita (45°)		Esquerda (315°)	
UGR	14,5	UGR	14,6	UGR	17,2	UGR	15,2
VCP	77%	VCP	72%	VCP	77%	VCP	70%
							

APÊNDICE B – Parâmetros de cálculo de consumo e custos do sistema com fluorescentes T8

A Tabela 11 apresenta os parâmetros de cálculo de consumo e custos do sistema de iluminação com fluorescentes T8.

Tabela 11. Consumo e custo do sistema de iluminação com fluorescentes T8

FL T8										
Potência nominal		38 W								
FMFL (fluxo luminoso)	FSL (falha)	Utilização [h]	Fluxo luminoso [lm]	Eficácia luminosa [lm/W]	Em [lx]	Consumo de energia FL T8 [kWh]	Custo da energia	Custo do sistema (conjuntos)	Custo do sistema e do consumo FL T8 [R\$]	
100%	100%	0	3300	87	622	0	0	R\$ 1.824,80	R\$ 1.824,80	
96%	99%	2000	3168	83	597	1200	R\$ 780,00	R\$ 1.824,80	R\$ 2.604,80	
94%	99%	4000	3102	82	585	2400	R\$ 1.560,00	R\$ 1.824,80	R\$ 3.384,80	
93%	99%	6000	3069	81	578	3600	R\$ 2.340,00	R\$ 1.824,80	R\$ 4.164,80	
91%	99%	8000	3003	79	566	4800	R\$ 3.120,00	R\$ 1.824,80	R\$ 4.944,80	
91%	99%	12000	3003	79	566	7200	R\$ 4.680,00	R\$ 1.824,80	R\$ 6.504,80	
90%	90%	16000	2970	78	560	9600	R\$ 6.240,00	R\$ 2.194,08	R\$ 8.434,08	
89%	50%	20000	2937	77	553	12000	R\$ 7.800,00	R\$ 2.194,08	R\$ 9.994,08	
100%		20000	3300	87	622	12000	R\$ 7.800,00	R\$ 2.700,40	R\$ 10.500,40	
96%		22000	3168	83	597	13200	R\$ 8.580,00	R\$ 2.700,40	R\$ 11.280,40	
94%		24000	3102	82	585	14400	R\$ 9.360,00	R\$ 2.700,40	R\$ 12.060,40	
93%		26000	3069	81	578	15600	R\$ 10.140,00	R\$ 2.700,40	R\$ 12.840,40	
91%		28000	3003	79	566	16800	R\$ 10.920,00	R\$ 2.700,40	R\$ 13.620,40	
91%		32000	3003	79	566	19200	R\$ 12.480,00	R\$ 2.700,40	R\$ 15.180,40	
90%		36000	2970	78	560	21600	R\$ 14.040,00	R\$ 3.069,68	R\$ 17.109,68	
89%		40000	2937	77	553	24000	R\$ 15.600,00	R\$ 3.069,68	R\$ 18.669,68	
100%	100%	40000	3300	87	622	24000	R\$ 15.600,00	R\$ 3.576,00	R\$ 19.176,00	
96%	99%	42000	3168	83	597	25200	R\$ 16.380,00	R\$ 3.576,00	R\$ 19.956,00	
94%	99%	44000	3102	82	585	26400	R\$ 17.160,00	R\$ 3.576,00	R\$ 20.736,00	
93%	99%	46000	3069	81	578	27600	R\$ 17.940,00	R\$ 3.576,00	R\$ 21.516,00	
91%	99%	48000	3003	79	566	28800	R\$ 18.720,00	R\$ 3.576,00	R\$ 22.296,00	
91%	99%	52000	3003	79	566	31200	R\$ 20.280,00	R\$ 3.576,00	R\$ 23.856,00	
90%	90%	56000	2970	78	560	33600	R\$ 21.840,00	R\$ 3.945,28	R\$ 25.785,28	
89%	50%	60000	2937	77	553	36000	R\$ 23.400,00	R\$ 3.945,28	R\$ 27.345,28	
100%		60000	3300	87	622	36000	R\$ 23.400,00	R\$ 4.451,60	R\$ 27.851,60	
96%		62000	3168	83	597	37200	R\$ 24.180,00	R\$ 4.451,60	R\$ 28.631,60	
94%		64000	3102	82	585	38400	R\$ 24.960,00	R\$ 4.451,60	R\$ 29.411,60	
93%		66000	3069	81	578	39600	R\$ 25.740,00	R\$ 4.451,60	R\$ 30.191,60	
91%		68000	3003	79	566	40800	R\$ 26.520,00	R\$ 4.451,60	R\$ 30.971,60	
91%		72000	3003	79	566	43200	R\$ 28.080,00	R\$ 4.451,60	R\$ 32.531,60	
90%		76000	2970	78	560	45600	R\$ 29.640,00	R\$ 4.820,88	R\$ 34.460,88	
89%		80000	2937	77	553	48000	R\$ 31.200,00	R\$ 4.820,88	R\$ 36.020,88	

APÊNDICE C – Parâmetros de cálculo de consumo e custos do sistema com LEDs SUBT8

A Tabela 12 apresenta os parâmetros de cálculo de consumo e custo do sistema de iluminação com LEDs SUBT8.

Tabela 12. Consumo e custo do sistema de iluminação com LEDs SUBT8

LED SUBT8										
Potência nominal 16 W										
FMFL (fluxo luminoso)	FSL (falha)	Utilização [h]	Fluxo luminoso [lm]	Eficácia luminosa [lm/W]	Êm [lx]	Consumo de energia LED SUBT8 [kWh]	Custo da energia	Custo do sistema (conjuntos)	Custo do sistema e do consumo LED SUBT8 [R\$]	
100%	100%	0	1650	103	707	0	0	R\$ 3.897,72	R\$ 3.897,72	
88%		16000	1452	91	622	6144	R\$ 3.993,89	R\$ 3.897,72	R\$ 7.891,61	
85%		20000	1402,5	88	601	7681	R\$ 4.992,36	R\$ 3.897,72	R\$ 8.890,08	
85%		20000	1402,5	88	601	7681	R\$ 4.992,36	R\$ 3.897,72	R\$ 8.890,08	
70%		40000	1155	72	494	15361	R\$ 9.984,72	R\$ 3.897,72	R\$ 13.882,44	
100%	100%	40000	1650	103	707	15361	R\$ 9.984,72	R\$ 5.817,72	R\$ 15.802,44	
79%		56000	1452	81	622	21506	R\$ 13.978,61	R\$ 5.817,72	R\$ 19.796,33	
85%		60000	1402,5	88	601	23042	R\$ 14.977,08	R\$ 5.817,72	R\$ 20.794,80	
85%		60000	1402,5	88	601	23042	R\$ 14.977,08	R\$ 5.817,72	R\$ 20.794,80	
70%		80000	1155	72	494	30722	R\$ 19.969,44	R\$ 5.817,72	R\$ 25.787,16	

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Departamento de Engenharia Civil, do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil

Orientador: Prof. Roberto Lamberts, PhD

Coorientador: Prof. Fernando Oscar Ruttkay
Pereira, PhD

Florianópolis, 2016