

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA- UFSC  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E  
URBANISMO- PósARQ**

Letícia Niero Moraes

**ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL  
COM DIFERENTES LUMINÁRIAS CONSIDERANDO A DISPONIBILIDADE  
DE LUZ NATURAL**

Dissertação apresentada ao Programa  
de Programa de Pós-Graduação em  
Arquitetura e Urbanismo da  
Universidade Federal de Santa  
Catarina para a obtenção do Título de  
Mestre em Arquitetura e Urbanismo  
Orientador:

Prof. Dr. Anderson Claro

Florianópolis

2012

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

Moraes, Leticia Niero

Estudo comparativo de sistemas de iluminação artificial com diferentes luminárias considerando a disponibilidade de luz natural [dissertação] / Leticia Niero Moraes ; orientador, Anderson Claro - Florianópolis, SC, 2012. 198 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo.

Inclui referências

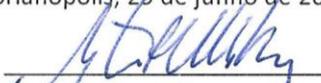
1. Arquitetura e Urbanismo. 2. Iluminação natural . 3. Iluminação artificial. 4. Qualidade de iluminação. 5. Consumo de energia. I. Claro, Anderson. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Letícia Niero Moraes

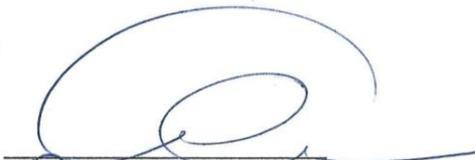
**ESTUDO COMPARATIVO DE SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL  
COM DIFERENTES LUMINÁRIAS CONSIDERANDO A DISPONIBILIDADE  
DA LUZ NATURAL**

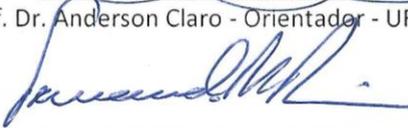
Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de “MESTRE”, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PósArq

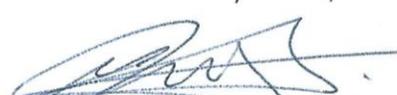
Florianópolis, 29 de junho de 2012.

  
Prof. Ayrton Bueno, Dr.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

  
Prof. Dr. Anderson Claro - Orientador - UFSC

  
Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, Ph.D. - UFSC

  
Prof. Dr. Martin Ordenes Mizgier. - UFSC

  
Prof.ª Dr.ª Cláudia Naves David Amorim – UnB

Dedico este trabalho à minha família.  
Desconheço palavras que expressem  
minha gratidão e afeto.



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, **Augusta e Gelson** e à minha irmã **Clarissa**, os quais amo muito, pelo exemplo de vida e família. Mesmo diante de todas as dificuldades sempre estiveram presentes, me apoiando em todas as etapas de minha formação, com dedicação, incentivo, carinho e paciência.

Ao meu orientador, **Anderson Claro**, pela orientação, paciência e dedicação.

Aos professores **Fernando, Martin e Cláudia**, por terem aceitado fazer parte da Banca examinadora.

À empresa *LightGroup*, em especial ao **Eduardo, Caio e Carlos** pela disponibilidade e fornecimento de informações fundamentais para o desenvolvimento do trabalho.

Ao Professor **Wilson Teixeira**, pela troca de informações e conhecimentos ao longo do trabalho.

Aos meus colegas, amigos e agregados do LabCon, em especial **Alejo, Renata, Adri, Lucas, Natália, Rupp, Laura, Rapha, Rafa, Marcelo, Ravenna, Gabriel, Ana, Nathália, e Carol**, por toda a ajuda, troca de conhecimento, amizade e fiel companheirismo em todas as horas e nos momentos mais difíceis.

Às amigas de Tuba, **Lê, Ise, Mary e Jú**, por compreenderem (ou não) minha ausência.

Ao meu amigo **Sobera**, pelo constante apoio, compreensão e períodos de distração ao longo desta caminhada.

À **Ana Maria**, pela cooperação e assistência prestadas.

Ao MEC pelo suporte na forma de bolsa de estudo.

E a todos que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para a elaboração deste trabalho.



## RESUMO

O aproveitamento da iluminação natural é indicado como um fator primordial na economia de energia das edificações, já que possibilita a redução do uso dos sistemas de iluminação artificial através de sistemas de controle. No entanto, a eficiência dos sistemas está associada também às características técnicas e ao desempenho de um conjunto de elementos do sistema de iluminação artificial. Este trabalho busca investigar os critérios e o impacto de projeto de sistemas de iluminação com diferentes luminárias considerando a disponibilidade de luz natural. A metodologia adotada é baseada na avaliação do desempenho luminoso, como uniformidade, níveis e distribuição de iluminâncias e consumo de energia de sistemas de iluminação artificial, através de simulação computacional. São estimadas disponibilidades de iluminação natural para dois modelos de escritório de planta livre, localizados na cidade de Florianópolis/SC. As análises de aproveitamento da luz natural são utilizadas para estimar o consumo energético para diferentes propostas de sistemas de iluminação artificial, através da divisão de circuitos de acionamento. Os sistemas de iluminação artificial propostos são diferenciados pelas fotometrias e disposições das luminárias. Para cada caso, são elaboradas reformulações dos sistemas, com o objetivo de verificar a influência de critérios como espaçamento, orientação e distribuição das luminárias no comportamento da iluminação, assim como no consumo de energia. Concluiu-se que a avaliação baseada em apenas um parâmetro não permitiu a definição da qualidade do projeto. Os resultados mostram que cada sistema proposto possui diferenças significativas quanto à distribuição da iluminação, assim como no consumo de energia da instalação. A consideração da iluminação natural não influenciou significativamente no que diz respeito às análises de qualidade da iluminação, mas nas análises de consumo constata-se que este está diretamente relacionado com a geometria do ambiente, chegando a economias de até 46%. Uma das principais contribuições deste estudo é obtenção de critérios que conduzam a um melhor dimensionamento do sistema de iluminação artificial.

**Palavras-chave:** iluminação natural, iluminação artificial, consumo de energia, qualidade de iluminação.



## ABSTRACT

The use of daylight is indicated as a primary factor in energy savings of buildings, since it can reduce the use of electric lighting through control systems. However, the efficiency of systems is also associated with technical characteristics and performance of various elements of the artificial lighting systems. This paper seeks to investigate the impact of design criteria and lighting systems with different fixtures considering the availability of daylight. The methodology is based on evaluating the performance of light, such as distribution of illuminance and estimated energy consumption of artificial lighting systems through computer simulation. Are estimated daylight availability for two models of open plan office, located in Florianópolis / SC. Analyses of daylight are used to measure the energy consumption for different proposals for lighting systems, by dividing the drive circuits. The systems are differentiated by photometry and disposal of the luminaires. For each case, artificial lighting system reformulations are made in order to verify the influence of criteria such as spacing, orientation and distribution of lighting fixtures in behavior, as well as in energy consumption. It was concluded that the evaluation based on only one parameter is not allowed the definition of design quality. The results show that each proposed system has significant differences in the distribution of illumination, as well as in power consumption of the installation. The consideration of daylight does not influence significantly in relation to the analysis of lighting quality, but the analysis of consumption it is clear that this is directly related to the geometry of the environment, reaching up to 46% savings. A major contribution of this study is to obtain criteria that lead to a better design of the artificial lighting system.

**Keywords:** daylight, electric light, energy consumption, light quality



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Quadro resumo da justificativa.....	22
<b>Figura 2:</b> Aspectos para elaboração do projeto de iluminação .....	25
<b>Figura 3:</b> Relação do DA médio com o consumo de energia de iluminação artificial.....	32
<b>Figura 4:</b> Mapas das zonas luminosas para três tipos de céu .....	35
<b>Figura 5:</b> Zonas de iluminação para modelo com abertura lateral.....	35
<b>Figura 6:</b> Distribuição do sistema de iluminação artificial considerando o zoneamento da luz natural .....	37
<b>Figura 7:</b> Tipos de iluminação .....	39
<b>Figura 8:</b> Processo interativo do método.....	41
<b>Figura 9:</b> Recomendação da distribuição das luminárias.....	47
<b>Figura 10:</b> Linhas isolux no plano de trabalho (9 luminárias).....	48
<b>Figura 11:</b> Resultados para configurações de 48 lâmpadas. (a) Iluminâncias no plano de trabalho através do método dos lúmens. (b) Resultado da aplicação do conceito GEO .....	49
<b>Figura 12:</b> Resultado da aplicação do conceito de Otimização Extrema Generalizada (GEO) para 10 lâmpadas.....	50
<b>Figura 13:</b> Disposição espacial das luminárias para as interações.....	50
<b>Figura 14:</b> Comparação de uniformidade de iluminação e valores máximos de iluminância vertical para posições de luminárias diferentes .....	51
<b>Figura 15:</b> Distribuições obtidas com diferentes luminárias.....	52
<b>Figura 16:</b> Exemplos de componentes de controle de luz: a) refletor; b) refrator; c) difusor; d) louvre .....	52
<b>Figura 17:</b> Curva de distribuição de intensidade luminosa .....	54
<b>Figura 18:</b> Classificação das luminárias.....	54
<b>Figura 19:</b> Reflexão da luz com a redução do diâmetro das lâmpadas.....	56
<b>Figura 20:</b> Custos referentes ao sistema de iluminação .....	61
<b>Figura 21:</b> Diferença entre iluminação direta e indireta: Sob iluminação direta os níveis de iluminância são maiores e o consumo de energia é reduzido.....	63
<b>Figura 22:</b> Exemplo de definição das luminárias no programa <i>LightTool</i> e sistema de locação das luminárias .....	67
<b>Figura 23:</b> Esquema metodológico .....	71
<b>Figura 24:</b> Geometrias dos modelos de ambiente .....	72
<b>Figura 25:</b> Corte e perspectivas dos protetores solares .....	73
<b>Figura 26:</b> Máscaras solares: (a) ponto no peitoral da janela (b) ponto no centro do ambiente.....	74
<b>Figura 27:</b> Processo de zoneamento para o modelo M01 .....	77

<b>Figura 28:</b> Exemplo de Reformulação 01 para a luminária DBL 3391 2x16W (a) R01_90 (b) R01_45 .....	82
<b>Figura 29:</b> Exemplo de Reformulação 02 para a luminária - BNI2x32W ....	83
<b>Figura 30:</b> Exemplo de Reformulação 04 para a luminária DBL 3391 2x16W .....	84
<b>Figura 31:</b> Exemplo de R05 para a luminária DBL 3391 2x16W .....	84
<b>Figura 32:</b> Exemplo de R05_2 para a luminária DBL 3391 2x16W .....	85
<b>Figura 33:</b> Exemplo de R06 para a luminária DBL 3391 4x16W .....	85
<b>Figura 34:</b> Exemplo de Reformulação 07 para a luminária DBL 3391 4x16W .....	85
<b>Figura 35:</b> Exemplo de gráfico de análise das zonas para luminária BNI3312 2x16W.....	87
<b>Figura 36:</b> Diferença entre a $E_{\min}/E_{\text{média}}$ e Desvio padrão para avaliar a uniformidade da iluminância .....	88
<b>Figura 37:</b> Médias de DA para cada zona .....	90
<b>Figura 38:</b> Exemplo de método gráfico para avaliação da primeira etapa – M01_DBL2x32W.....	91
<b>Figura 39:</b> Exemplo de mapa de distribuição luminosa – M01_DBL 4x32W .....	92
<b>Figura 40:</b> Distribuição das zonas de DA para 250 lux e 500 lux e zoneamento da luz natural para o modelo M01.....	93
<b>Figura 41:</b> Distribuição das zonas de DA para 250 lux e 500 lux e zoneamento da luz natural para o modelo M02.....	94
<b>Figura 42:</b> Gráficos de análise para luminárias da linha BNI .....	95
<b>Figura 43:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI3312 2x16W – M01.....	98
<b>Figura 44:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI3312 2x32W – M01.....	99
<b>Figura 45:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI3312 4x16W – M01.....	100
<b>Figura 46:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI3312 4x32W – M01.....	101
<b>Figura 47:</b> Gráfico de análise para luminárias da linha DBL .....	102
<b>Figura 48:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL3312 2x16W – M01.....	104
<b>Figura 49:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL3312 2x32W – M01.....	105
<b>Figura 50:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL3312 4x16W – M01.....	106

<b>Figura 51:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL3312 4x32W – M01.....	107
<b>Figura 52:</b> Gráfico de análise para luminárias da linha OCT.....	108
<b>Figura 53:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 2x16W – M01.....	110
<b>Figura 54:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 2x32W – M01.....	111
<b>Figura 55:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 1x32W – M01.....	112
<b>Figura 56:</b> Gráfico de análise para luminárias da linha DIF.....	113
<b>Figura 57:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DIF 2x16W – M01.....	115
<b>Figura 58:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DIF 2x32W – M01.....	116
<b>Figura 59:</b> Gráfico de análise para luminárias da linha BNI.....	118
<b>Figura 60:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI 2x16W – M02.....	119
<b>Figura 61:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI 2x32W – M02.....	120
<b>Figura 62:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI 4x16W – M02.....	121
<b>Figura 63:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI 4x32W – M02.....	122
<b>Figura 64:</b> Gráfico de análise para luminárias da linha DBL.....	123
<b>Figura 65:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL 2x16W – M02.....	125
<b>Figura 66:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL 2x32W – M02.....	126
<b>Figura 67:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL 4x16W – M02.....	127
<b>Figura 68:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL 4x32W – M02.....	128
<b>Figura 69:</b> Gráfico de análise para luminárias da linha OCT.....	129
<b>Figura 70:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 2x16W – M02.....	130
<b>Figura 71:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 1x32W – M02.....	131
<b>Figura 72:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 2x32W – M02.....	132
<b>Figura 73:</b> Gráfico de análise para luminárias da linha DIF.....	133

<b>Figura 74:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DIF 2x16W – M02.....	134
<b>Figura 75:</b> Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DIF 2x32W – M02.....	135
<b>Figura 76:</b> Exemplo de seleção do melhor projeto para luminária BNI 4x16W – M01.....	137
<b>Figura 77:</b> Gráfico comparativo de atendimento às zonas entre as melhores soluções para M01 ..	138
<b>Figura 78:</b> Gráfico comparativo entre as melhores soluções para M01 ..	139
<b>Figura 79:</b> Projetos selecionados com as melhores soluções e % de área compreendida no intervalo de 600 a 720 lux – M01.....	140
<b>Figura 80:</b> Exemplo de seleção do melhor projeto para luminária e % de área compreendida no intervalo de 600 a 720 lux - BNI 4x16W – M02 .....	141
<b>Figura 81:</b> Gráfico comparativo de atendimento às zonas entre as melhores soluções para M02 .....	142
<b>Figura 82:</b> Gráfico comparativo entre as melhores soluções para M02 ..	142
<b>Figura 83:</b> Médias dos valores de Daylight Autonomy (DA) para cada zona – M01 .....	143
<b>Figura 84:</b> Médias dos valores de Daylight Autonomy (DA) para cada zona – M02 .....	144
<b>Figura 85:</b> Estimativa de consumo para cada melhor solução, por circuito de acionamento – M01.....	146
<b>Figura 86:</b> Estimativa de consumo para cada melhor solução, por circuito de acionamento – M02.....	148
<b>Figura 87:</b> Diferença entre projetos com diferentes análises de zonas (a) Projeto com análise para 500 lux. (b) projeto com análise para 600 lux .....	154

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Tabela de fator de utilização para luminária da linha OCT1369 2x32W, fabricante <i>LightGroup</i> ( <a href="http://www.lightgroup.com.br">www.lightgroup.com.br</a> ) .....	42
<b>Tabela 2:</b> Fator de depreciação em função das condições do ambiente .....	43
<b>Tabela 3:</b> Fator de depreciação em função do período de manutenção do ambiente .....	43
<b>Tabela 4:</b> Valores recomendados para cada zona .....	45
<b>Tabela 5:</b> Classificação das zonas por intervalo de iluminância .....	58
<b>Tabela 6:</b> Percentual de redução da carga instalada em relação ao tipo de luminária.....	59
<b>Tabela 7:</b> Descrição dos Protocolos testados.....	67
<b>Tabela 8:</b> Parâmetros para a simulação - iluminação artificial.....	78
<b>Tabela 9:</b> Descrição das linhas de luminárias selecionadas para o estudo.....	79
<b>Tabela 10:</b> Características das luminárias selecionadas .....	80
<b>Tabela 11:</b> Planilha de cálculo para o luminária BNI - modelo M_01 .....	82
<b>Tabela 12:</b> Definição dos intervalos de análise das zonas .....	87
<b>Tabela 13:</b> Curvas de distribuição luminosa e fluxo luminoso total - linha BNI.....	96
<b>Tabela 14:</b> Curvas de distribuição luminosa e fluxo luminoso total - linha DBL .....	103
<b>Tabela 15:</b> Curvas de distribuição luminosa e fluxo luminoso total - linha OCT.....	109
<b>Tabela 16:</b> Curvas de distribuição luminosa e fluxo luminoso total - linha DIF .....	113
<b>Tabela 17:</b> Projetos selecionados com as melhores soluções por parâmetro analisado – M01.....	136
<b>Tabela 18:</b> Projetos selecionados com as melhores soluções por parâmetro analisado – M02.....	140
<b>Tabela 19:</b> Procedimento de determinação do tempo de utilização– M01 .....	143
<b>Tabela 20:</b> Procedimento de determinação do tempo de utilização – M02 .....	145
<b>Tabela 21:</b> Potência instalada e número de luminárias por zona – BNI ...	147
<b>Tabela 22:</b> Diferença entre consumo (kWh) do sistema totalmente ativo X zonas ativas: Projeto Original e reformulações selecionadas – M01	147
<b>Tabela 23:</b> Potência instala e número de luminárias por zona – BNI .....	148
<b>Tabela 24:</b> Diferença entre consumo (kWh) do sistema totalmente ativo X zonas ativas: Projeto Original e reformulações selecionadas – M02	149

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
CDL - Curva de distribuição luminosa  
CIE - Comissão Internacional de Iluminação  
Cu - Fator de utilização da luminária  
DA - *Daylight Autonomy*  
DA<sub>con</sub> - *Continuous Daylight Autonomy*  
DA<sub>máx</sub> - *Maximum Daylight Autonomy*  
DF - *Daylight Factor*  
E<sub>min</sub> - Iluminância Mínima  
E<sub>max</sub> - Iluminância Máxima  
E<sub>méd</sub> - Iluminância Média  
E<sub>alvo</sub> - iluminância alvo  
F<sub>p</sub> - Fator de depreciação  
IASPI - *Permanent Supplementary Artificial Lighting in Interiors*  
K - Índice do Ambiente  
LED - *Light-emitting diode*  
LEP - *Light-emitting plasma*  
MZ1\_250 – Média DA 250 lux da Zona 1  
MZ1\_500 - Média DA 500 lux da Zona 1  
MZ2\_250 - Média DA 250 lux da Zona 2  
MZ2\_500 - Média DA 500 lux da Zona 2  
PALN - Percentual de aproveitamento da Luz Natural  
NBR 5413 – Iluminância de interiores  
P<sub>t</sub> - Potência instalada  
OLED - *Organic light-emitting diode*  
PAF - Percentual de abertura na fachada  
TRY - *Test Reference Year*  
RTQ-C - Regulamento Técnico de Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos  
T<sub>u</sub> - 2080h  
T<sub>art</sub> - Tempo de utilização do sistema de iluminação artificial  
UDI - *Useful Daylight illuminances*  
U – Uniformidade  
 $\eta_R$  - Eficiência do Recinto ( $\eta_R$ )  
 $\eta_L$  - Eficiência da Luminária ( $\eta_L$ )  
 $\delta$  - Desvio padrão

## SUMÁRIO

<b>1.</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>20</b>
1.1	<i>JUSTIFICATIVA.....</i>	<i>21</i>
1.2	<i>OBJETIVOS .....</i>	<i>23</i>
1.2.1	<i>Objetivo geral .....</i>	<i>23</i>
1.2.2	<i>Objetivos específicos .....</i>	<i>23</i>
1.3	<i>ESTRUTURA DO TRABALHO .....</i>	<i>23</i>
<b>2.</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>24</b>
2.1	<i>O PROJETO DE ILUMINAÇÃO .....</i>	<i>24</i>
2.1.1	<i>Projeto de iluminação artificial: reflexos das crises energéticas.....</i>	<i>25</i>
2.2	<i>ILUMINAÇÃO EFICIENTE .....</i>	<i>26</i>
2.2.1	<i>Medidas de desempenho da luz natural.....</i>	<i>28</i>
2.2.2	<i>Integração da luz natural e artificial .....</i>	<i>30</i>
2.2.2.1	<i>Sistemas de controle .....</i>	<i>32</i>
2.2.2.2	<i>Conceito de zonas luminosas.....</i>	<i>34</i>
2.2.2.3	<i>Implicações do zoneamento nos projetos luminotécnicos.....</i>	<i>36</i>
2.3	<i>PROJETO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL .....</i>	<i>38</i>
2.3.1	<i>Tipos de iluminação .....</i>	<i>39</i>
2.3.2	<i>Métodos de cálculo .....</i>	<i>40</i>
2.3.3	<i>Distribuição das luminárias .....</i>	<i>46</i>
2.4	<i>LUMINÁRIAS.....</i>	<i>52</i>
2.4.1.1	<i>Curva de distribuição luminosa.....</i>	<i>53</i>
2.4.1.2	<i>Classificação das luminárias.....</i>	<i>54</i>
2.4.1.3	<i>Rendimento ou Eficiência da luminária.....</i>	<i>55</i>
2.5	<i>ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO.....</i>	<i>57</i>
2.5.1	<i>Qualidade da iluminação.....</i>	<i>57</i>
2.5.2	<i>Avaliação de consumo.....</i>	<i>58</i>
2.5.3	<i>Estudos de avaliação de desempenho do sistema de iluminação ..</i>	<i>62</i>
2.6	<i>SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA ILUMINAÇÃO.....</i>	<i>64</i>
2.6.1	<i>Simulação da iluminação natural.....</i>	<i>65</i>
2.6.2	<i>Simulação da iluminação artificial .....</i>	<i>66</i>
2.7	<i>CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</i>	<i>68</i>
<b>3.</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>70</b>
3.1	<i>MODELOS DE ANÁLISE .....</i>	<i>71</i>
3.1.1	<i>Aberturas e proteção solar.....</i>	<i>73</i>
3.2	<i>FERRAMENTAS DE CÁLCULO.....</i>	<i>74</i>
3.3	<i>ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE DA LUZ NATURAL .....</i>	<i>75</i>
3.3.1	<i>Definição das zonas de iluminação .....</i>	<i>75</i>
3.4	<i>DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL.....</i>	<i>77</i>

3.4.1	<i>Projeto luminotécnico.....</i>	77
3.4.2	<i>Escolha dos equipamentos.....</i>	78
3.5	<b>REFORMULAÇÕES DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL ...</b>	81
3.5.1	<i>Reformulação 01– Orientação das luminárias.....</i>	81
3.5.2	<i>Reformulação 02 – Zonas de iluminação natural.....</i>	82
3.5.3	<i>Reformulação 3 – Projeto Original desconsiderando <math>e=1,5h</math> .....</i>	83
3.5.4	<i>Reformulação 04 – Sistemas alternados.....</i>	83
3.5.5	<i>Reformulação 05 – Afastamentos.....</i>	84
3.5.6	<i>Reformulação 06 – Layout diferenciado.....</i>	85
3.5.7	<i>Reformulação 07 – Sistema alternado com rotação 45 graus .....</i>	85
3.6	<b>PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS.....</b>	86
3.6.1	<i>Distribuição de iluminâncias.....</i>	86
3.6.2	<i>Uniformidade de distribuição.....</i>	87
3.6.4	<i>Representação gráfica dos resultados.....</i>	91
<b>4.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>93</b>
4.1	<b>ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE DA LUZ NATURAL .....</b>	<b>93</b>
4.2	<b>SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL – 1ª ETAPA .....</b>	<b>94</b>
4.2.1	<i>Modelo M01 .....</i>	95
4.2.2	<i>Modelo M02 .....</i>	117
4.2.3	<i>Seleção dos projetos.....</i>	136
4.3	<b>AVALIAÇÃO DE CONSUMO – 2ª ETAPA.....</b>	<b>143</b>
<b>5.</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>150</b>
5.1	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>150</b>
5.1.1	<i>Considerações quanto à Metodologia.....</i>	151
5.1.2	<i>Conclusões quanto aos critérios de avaliação.....</i>	152
5.1.3	<i>Conclusões quanto ao aproveitamento da iluminação natural ..</i>	156
5.1.4	<i>Considerações sobre o processo de criação do projetista.....</i>	157
5.2	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>159</b>
5.2.1	<i>Limitações na realização do trabalho.....</i>	159
5.2.2	<i>Sugestões para trabalhos futuros .....</i>	159
<b>6.</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>160</b>
	<i>APÊNDICE A- Planilhas de cálculo – Método dos Lúmens – Modelo M01</i>	169
	<i>APÊNDICE B- Planilhas de cálculo – Método dos Lúmens – Modelo M02</i>	176
	<i>APÊNDICE C- Reformulações para o Modelo M01 .....</i>	183
	<i>APÊNDICE D- Reformulações para o Modelo M02.....</i>	190
	<i>APÊNDICE E – Planilhas de cálculo do fluxo lumionoso por zona.....</i>	194
	<i>APÊNDICE F- Potência instalada e quantidade de luminárias por zona .....</i>	196

## 1. INTRODUÇÃO

De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN, 2010), 47,6% do consumo energético total de energia elétrica do Brasil é devido a edifícios, sendo que os setores comerciais e públicos consomem respectivamente a 15,1% e 8,6% dessa energia. Pesquisas de avaliação do mercado de Eficiência Energética (BEN, 2010) destacam que 22% da distribuição do uso final nesses setores correspondem ao consumo de sistemas de iluminação.

Dentro deste contexto, o aproveitamento da iluminação natural é indicado como um fator primordial na economia de energia das edificações, já que possibilita a redução do uso dos sistemas de iluminação artificial. No entanto, a eficiência dos sistemas está associada também às características técnicas e ao desempenho de um conjunto de elementos, dentre os quais se destacam as lâmpadas, luminárias, circuitos de distribuição, cores das superfícies internas e o mobiliário (ELETROBRÁS, 2002). Diante dessa situação, é imprescindível que os projetos de iluminação visem à redução deste consumo, devendo incluir equipamentos de qualidade empregados de uma maneira eficaz. A correta integração deve resultar em ambientes energeticamente eficientes, sem sacrificar as qualidades da iluminação, como nível luminoso, distribuição de iluminâncias, contrastes e reprodução de cores.

Assim, cabe ao profissional responsável pelo projeto de iluminação considerar todas estas questões para a elaboração de um projeto eficiente. Alguns trabalhos sugerem recomendações para projetos, como Robbins (1986), Moore (1993), Ganslandt e Hofmann (1992) e Toledo (2008), na tentativa de criar uma ferramenta de auxílio aos projetistas. No entanto, estes referenciais e as questões energéticas discutidas no meio acadêmico deveriam influenciar a prática profissional. Considera-se fundamental a busca do projeto integrado de iluminação natural e artificial, explorando as possibilidades e as alternativas disponíveis, visando uma maior atenção para o sistema de iluminação, para que este seja melhor concebido.

## 1.1 JUSTIFICATIVA

Existem muitos estudos que tratam de diferentes métodos para análise da disponibilidade de luz natural em projetos arquitetônicos e outros tantos sobre como utilizar os diferentes circuitos de uma dada instalação para obter mais eficiência (como sistemas de controle), caracterizando o fenômeno de forma satisfatória.

Com relação ao sistema de iluminação artificial, o foco das pesquisas reside sobre a eficiência dos equipamentos que compõem o sistema, apontando quais as lâmpadas, luminárias e reatores mais eficientes. Porém, uma vez que se reconhece esta eficiência, é necessário o conhecimento do comportamento destes equipamentos quanto à distribuição da iluminação no espaço. Sabendo-se que o posicionamento e as especificações das lâmpadas e luminárias podem contribuir de forma crucial para o conforto ambiental e para a conservação de energia, observa-se uma lacuna nos estudos do projeto de iluminação artificial, em termos de distribuição de iluminâncias, aliados à eficiência energética do sistema e custos, entre outras coisas.

No Brasil, a concepção de um projeto de arquitetura é geralmente uma associação entre o cliente, o arquiteto, engenheiros e demais profissionais envolvidos no processo. Na elaboração do projeto, aspectos físicos e estéticos predominam como mais importantes, sendo o projeto de iluminação muitas vezes deixado de lado. A escolha para a iluminação do interior é muitas vezes realizada pelo instalador do sistema e o resultado desta prática é uma grande quantidade de ambientes com sistemas de iluminação artificial ineficientes, com desperdícios em áreas que não estão em uso ou fornecendo mais luz do que o necessário.

Verifica-se também que o projeto de iluminação limita-se usualmente aos sistemas artificiais. Os edifícios devem ser projetados de modo a aproveitar ao máximo a iluminação natural, sendo responsabilidade do arquiteto a consideração desta fonte de luz. A correta avaliação da iluminação natural pode resultar em projetos luminotécnicos que possibilitam a redução das horas de utilização do sistema de iluminação artificial. Tais preocupações e métodos, no

entanto, não fazem parte da prática consolidada atualmente dos projetos de iluminação em arquitetura pelos profissionais afins.

Com a preocupação do aproveitamento da iluminação natural, com o desenvolvimento de novas fontes de luz e equipamentos de iluminação, surgem tanto oportunidades como desafios para os projetistas, possibilitando novas abordagens de práticas de projetos que conciliem qualidade e eficiência. No entanto, uma vez que a variedade e o número de equipamentos de iluminação têm crescido constantemente, é imprescindível o conhecimento, por parte do projetista, das características e do desempenho das luminárias, assim como também são necessários avanços na prática de projeto dos sistemas de iluminação. Ao invés de olhar para as muitas tentativas que têm ocorrido ao longo dos anos para se desenvolver fontes de luz cada vez melhores, este estudo tratará do desenvolvimento da prática do projeto de iluminação.

Sendo assim, considera-se importante o desenvolvimento de estudos considerando uma nova abordagem para a concepção do projeto luminotécnico, incluindo a integração com a iluminação natural, que possa contribuir com a prática profissional. A partir da práxis atual, serão estudados comparativamente projetos luminotécnicos utilizando diferentes tipos de luminárias, aqui consideradas o principal componente do sistema, tendo como preocupação a qualidade e o melhor aproveitamento da luz natural em sua integração com a iluminação artificial. A Figura 1 apresenta o quadro resumo da justificativa.



Figura 1: Quadro resumo da justificativa

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Investigar os critérios e o impacto de projetos de sistemas de iluminação com diferentes luminárias considerando a disponibilidade de luz natural, através da análise de desempenho de indicadores de nível e distribuição luminosa e consumo de energia.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Testar procedimentos comuns de projeto de iluminação frente a critérios que conduzam a uma melhor qualidade de iluminação, associada a um menor consumo energético;
- Investigar critérios para a escolha do sistema de iluminação artificial a partir do zoneamento da disponibilidade da luz natural no interior dos ambientes;
- Verificar o desempenho da iluminação, considerando diferentes fotometrias e configurações de luminárias e distribuição em circuitos, quanto a níveis e distribuição de iluminâncias, potência instalada e consumo.

## 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em seis capítulos. O **primeiro capítulo** corresponde à introdução, onde são explicados a justificativa do estudo proposto e os objetivos. O **segundo capítulo** corresponde à revisão bibliográfica, que aborda os seguintes temas: projeto de iluminação, métodos de cálculo e componentes do sistema de iluminação artificial e avaliação de desempenho, assim como simulação computacional. O **terceiro capítulo** retrata a metodologia, descrevendo o procedimento de obtenção das disponibilidades de luz natural, dimensionamento dos sistemas artificiais e critérios de avaliação. O **quarto capítulo** corresponde às análises dos resultados. No **quinto capítulo** são apresentadas as conclusões, as limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros. No **sexto capítulo** do trabalho são apresentadas as referências bibliográficas, seguido dos apêndices.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica do tema do trabalho. Aborda aspectos referentes ao projeto de iluminação, dimensionamento e componentes dos sistemas de iluminação artificial, aspectos de desempenho e programas de simulação computacional.

### **2.1 O PROJETO DE ILUMINAÇÃO**

Reconhece-se que a forma do projeto tem um efeito primário sobre o desempenho da iluminação natural (MOORE, 1991). Sendo assim, é fundamental que o projetista considere aspectos básicos desde discussões iniciais do projeto arquitetônico, envolvendo uma variedade de elementos, como dimensionamento das aberturas, altura do pé direito, refletâncias das superfícies e a orientação e proteção solar. Robbins (1986) ressalta que pelo fato do projeto de iluminação natural ser intimamente ligado ao projeto do edifício, a equipe de projetistas tem muitas oportunidades de promover a integração dos vários sistemas ambientais com a estrutura e a forma do mesmo. Entretanto, projetar a iluminação natural é talvez a forma mais desafiadora de projeto, devido à sua variabilidade e, mais ainda, devido ao seu impacto sobre vários aspectos de um edifício.

Assim como elementos arquitetônicos influenciam no efeito da iluminação natural sobre o espaço, no projeto do sistema de iluminação artificial, a principal decisão é a definição dos componentes (lâmpadas, luminárias, reatores, sistemas de controle, etc.) e a distribuição dos circuitos, que possuem comportamentos e qualidades diferentes. A eficiência do sistema adotado e a qualidade da iluminação obtida dependem do desempenho particular de todos os elementos envolvidos e da correta integração dos sistemas. Segundo Boyce e Raynham (2009), projetar um sistema de iluminação, como em qualquer processo de projeto, envolve a resolução de uma série de objetivos muitas vezes conflitantes. O projetista deve conciliar múltiplos critérios a fim de alcançar um projeto de iluminação bem-sucedido, conforme Figura 2.



**Figura 2:** Aspectos para elaboração do projeto de iluminação. Fonte: adaptado de Boyce e Raynham (2009)

No entanto, verifica-se que a definição "projeto de iluminação" ainda é vista de forma distinta por acadêmicos e profissionais atuantes no mercado de trabalho. Usualmente, em trabalhos científicos, o significado abrange iluminação natural e artificial; entretanto, fora do meio acadêmico, o termo é utilizado, em geral, para designar exclusivamente o projeto de iluminação artificial (TOLEDO, 2008). Toledo (2008), em entrevistas realizadas em 14 escritórios brasileiros de luminotecnica, constatou que 71,42% fazem somente projetos de iluminação artificial, enquanto apenas 28,58% produzem tanto projetos de iluminação artificial quanto natural.

Como consequência disso, muitas vezes a iluminação é tratada como um adendo ao projeto de edificações. Uma vez que o projeto de arquitetura foi estabelecido, as chances de se obter um bom projeto de iluminação integrado (artificial e natural) são menores, e a qualidade da solução é limitada. Sendo assim, é fundamental o conhecimento por parte do projetista tanto do comportamento da luz natural quanto dos tipos de equipamentos de iluminação a serem utilizados. De acordo com Lima (2007), decisões iniciais de um projeto são, inclusive, as mais influentes para o desempenho energético da edificação.

### **2.1.1 Projeto de iluminação artificial: reflexos das crises energéticas**

Nos últimos anos, o campo do projeto de iluminação tem sido muito estudado devido a dois aspectos: a eficiência energética e a

qualidade de iluminação. Assim como a qualidade é tida como essencial para o conforto e bem-estar, a eficiência energética também surge como uma preocupação no desenho das edificações (BENYA, 2001). A busca por uma iluminação eficiente dominou o campo do projeto de iluminação, criando dilemas difíceis para os projetistas.

O evento crucial que ajudou a moldar os contornos atuais do projeto de iluminação foi a crise de 1970. O embargo do petróleo e o conseqüente aumento nos custos de energia rapidamente abriram caminho para uma nova ênfase na conservação de energia na área da construção. Da crise energética surgiram leis/resoluções do governo e o desenvolvimento de códigos de energia, tais como ASHRAE/IESNA 90.1. No Brasil, após a crise de energia em 2001, o uso consciente da energia se deu através de uma iniciativa do Ministério de Minas e Energia (MME) e Eletrobrás, através da criação do programa Procel EDIFICA, que visa incentivar a construção de edifícios mais eficientes.

Assim, juntamente com os sistemas de condicionamento de ar, a iluminação assumiu uma posição de destaque nas pesquisas. Antes destas crises, a ênfase do projeto de iluminação era sobre a quantidade de luz, seguindo o conceito de "*quanto mais luz, melhor a visão*". A energia era vista como um recurso abundante e inesgotável. Com a repercussão da crise de 1970, o conceito foi alterado para: "*A quantidade certa de luz, no lugar certo e na hora certa*".

No entanto, a qualidade visual e a eficiência energética não são fundamentalmente opostas (NEWSHAM & VEITCH, 1997). Sendo assim, hoje em dia, o projetista de iluminação deve, simultaneamente, determinar os níveis de iluminação apropriados ("*a quantidade certa de luz...*"), com a colocação correta das luminárias ("*... no lugar certo...*") e a integração adequada dos sistemas de iluminação natural e artificial ("*... na hora certa*").

## 2.2 ILUMINAÇÃO EFICIENTE

A iluminação consome cerca de 15% da energia elétrica fornecida aos edifícios comerciais (MME, 2010). A estratégia mais eficaz para minimizar este consumo é reduzir a demanda e a carga de energia elétrica, muito influenciada por decisões do projeto arquitetônico, como visto anteriormente, padrões de utilização do espaço e uso de equipamentos eficientes.

O tempo de utilização do sistema artificial e a minimização da potência instalada são apontados como os principais aspectos definidores da eficiência energética. O uso de componentes com alta eficiência luminosa, luminárias reflexivas, reatores com alto fator de potência e a elaboração de um projeto luminotécnico criterioso contribuem para a minimização da potência instalada. No entanto, de acordo com Ghisi (1997), mesmo quando a potência instalada de iluminação é inferior aos limites estipulados, deve-se verificar o potencial de conservação de energia elétrica através da verificação do regime de utilização do sistema. O uso da luz natural e de sistemas de controle minimiza o tempo de utilização, provendo uma quantidade adequada de iluminação artificial quando necessária (IWASHITA, 2004). Uma operação ineficiente, mantendo acesas áreas onde a iluminação é desnecessária, contribui para desperdícios de energia.

Dentro deste contexto, observa-se que o parâmetro de limitação presente nos códigos de energia, como o Regulamento Técnico de Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos (RTQ-C) <sup>1</sup> - densidade de potência ( $W/m^2$ ) - não é suficiente como medida para avaliação de energia. Apenas esta não retrata a realidade da utilização da iluminação artificial, fator determinante no conforto e energia elétrica para iluminação. Segundo Warren (2008), este parâmetro deve ser watt-hora/ $m^2$ , e não  $W/m^2$ , considerando o tempo de utilização do sistema.

As tecnologias de iluminação têm avançado muito nas últimas décadas, através do surgimento de novas fontes de luz com alta eficiência e durabilidade, o que tem contribuído para a redução de eletricidade consumida (WWF, 2006). Dentro do conceito de eficiência energética em iluminação, as tecnologias de lâmpadas LED (*light-emitting diode*), OLED (*organic light-emitting diode*) e LEP (*light-emitting plasma*) se destacam pela elevada vida útil e eficiência. Além disso, opções de projeto surgem como alternativas para reduzir a potência instalada, como o uso de iluminação geral/tarefa (GODOY, 2005).

Apesar das evoluções, encontra-se na literatura diversos trabalhos relatando ineficiências associadas a projetos inadequados, como superdimensionamento (LIMA & BATISTA, 2011), utilização de

---

<sup>1</sup> RTQ - C - ação lançada pela Eletrobrás através do programa Procel EDIFICA, em setembro de 2008, e visa qualificar e quantificar o consumo de energia elétrica nas edificações.

lâmpadas e luminárias ineficientes e a disposição incorreta das luminárias (GHISI, 1997; LOPES, 2006). Lima & Batista (2011) identificaram um superdimensionamento no projeto de iluminação de um supermercado, onde poderiam ser retiradas 633 lâmpadas para se manter o nível de iluminância requerido para o espaço (750 lux).

Além da economia proporcionada pelo uso da iluminação natural, a utilização de equipamentos econômicos e sistemas de controle podem otimizar o gasto de energia. Assim, é sempre possível reduzir o consumo de energia através da adoção de iluminâncias menores, o que acarreta em um número menor de luminárias ou usando fontes de luz eficientes. No entanto, estas ações podem gerar prejuízos para a qualidade da iluminação.

Waggoner et al. (2011) ressalta que, por causa da conservação de energia, agora vive-se em um mundo de mínimos, ao invés de níveis ideais de iluminação. Warren (2011) questiona a adoção de parâmetros de limitação como densidade de potência (DPI) pelos códigos de energia. Para o autor, o fato de a forma seguir a eficiência energética na arquitetura pode ser uma infeliz consequência da adoção de parâmetros como a DPI. Sendo assim, é essencial a consideração de aspectos que realmente influem na qualidade da iluminação, considerando o conforto visual e a eficiência energética, para a determinação da eficiência dos sistemas. Assim, será possível a restauração do lema funcionalista da arquitetura moderna do século XIX - *“A forma segue a função”* na iluminação.

De acordo com Boyce (2011), a perspectiva mais promissora é por meio de esclarecimentos, informações e da sensibilização, junto com progressos técnicos. Isso pode ajudar a aumentar a consciência para que soluções de iluminação mais eficientes sejam postas em prática. Esta abordagem é igualmente aplicável a mudanças na forma como se define o ambiente iluminado naturalmente, e, portanto, como pode ser quantificado e mensurado (LOE, 2009).

### **2.2.1 Medidas de desempenho da luz natural**

A última década assistiu a vários avanços de como analisar numericamente o desempenho geral dos espaços iluminados naturalmente, incluindo uma tendência de fugir da simulação estática para a dinâmica (NABIL & MARDALJEVIC, 2005; NABIL & MARDALJEVIC,

2006; REINHART et al., 2006). Porém, essas inovações estão em forte contraste com a prática corrente de projeto de iluminação, sendo a luz natural um recurso muito pouco aproveitado, dada a falta de realismo do método padrão de previsão: a abordagem do *Daylight Factor- DF* (NABIL & MARDALJEVIC, 2006). O DF, ao utilizar apenas o céu encoberto, não retrata a realidade da iluminação natural no ambiente, já que desconsidera a radiação solar direta, que exerce forte influência no que diz respeito ao conforto visual e térmico. Diante destas dificuldades, desde 2001 (REINHART & WALKENHORST, 2001), um esforço substancial foi canalizado para o desenvolvimento das chamadas medidas dinâmicas de desempenho, que permitem uma avaliação do comportamento da luz natural ao longo do ano, baseada em níveis de iluminância sob condições de céu múltiplas.

Para serem utilizadas diretamente na avaliação ou concepção de projetos, geralmente as medidas possuem valores de referência, acima do qual um ponto no espaço pode ser definido como “iluminado” (REINHART & WEISSMAN, 2012). Como por exemplo, a certificação LEED<sup>2</sup>, que na sua versão antiga, adotava que um espaço é iluminado naturalmente se mais de 75% de sua área possuir valores de *Daylight Factor* acima de 2%. Já a versão mais recente do LEED 3.0, determina níveis de iluminação mínimos para determinadas condições (USGBC, 2009).

Dentre as medidas dinâmicas de desempenho, a ***Autonomia da Luz Natural – DA*** é definida como a percentagem das horas ocupadas por ano, nas quais um nível de iluminância pode ser mantido apenas pela iluminação natural. A ***Autonomia Contínua da Luz Natural – DAcon***, em contraste com a definição de DA, considera o tempo em que o nível luminoso está abaixo do nível alvo, concedendo créditos parciais (REINHART; MARDALJEVIC; ROGERS, 2006); essencialmente, a métrica reconhece que mesmo uma contribuição parcial de luz para iluminar um espaço ainda é benéfica. Já a ***Autonomia Máxima da Luz Natural – DAmáx*** indica a percentagem de horas no ano, que um local é ocupado, na qual o nível luminoso alvo em um ponto do plano de trabalho é excedido em dez vezes.

---

<sup>2</sup> *Leadership in Energy and Environmental Design*®. - é um sistema de pontuação desenvolvido pelo USGBC (Green Building Council dos EUA) para medir o desempenho ambiental de *design*, construção e manutenção de edifícios.

Outra medida é a **Iluminância Útil da Luz Natural (UDI)**, introduzida por Nabil & Mardaljevic (2005). É dada pela frequência de ocorrência da iluminância de acordo com faixas pré-estabelecidas. Considera três faixas, limitadas por valores de iluminâncias estimados a partir estudos sobre conforto humano em espaços iluminados pela luz natural, definindo limites de iluminação superior e inferior a uma faixa considerada útil, de 100lux e 2000lux. Mardaljevic, Heschong e Lee (2009) subdividiram a faixa considerada útil em uma "complementar" (100 e 500lux) e uma "autônoma" (500 e 2000lux), devido ao grande intervalo considerado para esta faixa.

Moraes e Pereira (2011) propuseram um procedimento alternativo simplificado à simulação computacional para obtenção de métricas dinâmicas de desempenho, tendo como base a utilização do *DF* para obtenção da iluminância difusa externa necessária para a manutenção de uma iluminância interna alvo, definida segundo a frequência de ocorrência destas iluminâncias (klux), conforme Baker & Steemers (2002). Tal procedimento permite a subdivisão das faixas de UDI em demais faixas, que podem ser determinadas por sucessivos levantamentos das autonomias (DA) com diferentes iluminâncias alvo, definindo assim os limites de cada intervalo (0 a 100, 100 a 500, 500 a 1000, 1000 a 2000 e assim por diante) (MORAES & PEREIRA, 2011).

### **2.2.2 Integração da luz natural e artificial**

Embora o aproveitamento da luz natural num edifício dependa fortemente de fatores arquitetônicos, cabe ao projetista de iluminação decidir como aproveitá-la e integrá-la com a iluminação artificial. A escolha e localização adequada das luminárias/lâmpadas implicarão diretamente na potência consumida pelo sistema e em melhores níveis de iluminação no ambiente.

A eficiência energética em iluminação deve aproveitar ao máximo a disponibilidade de luz natural, para assim reduzir a necessidade de iluminação artificial. Segundo Amorim (2002), a disponibilidade de luz natural nas regiões tropicais é grande, devendo ser usada de forma criteriosa. Não se trata de simplesmente abrir janelas ou zenitais indiscriminadamente, mas sim equilibrar o ingresso de luz difusa, bloqueando a luz solar direta, associada ao desconforto térmico e visual devido à incidência direta dos raios solares. Nesta

situação, a tendência é que o usuário bloqueie a luz natural e acione a artificial.

Robbins (1986) aponta algumas decisões de projeto que estão relacionados com a integração entre a luz natural e a artificial:

- determinação do conceito do controle do sistema artificial;
- estabelecimento do *layout* das luminárias de forma que estas possam complementar a luz natural ou atuar quando a mesma não estiver disponível;
- escolha de um tipo de lâmpada energeticamente eficiente e escolha da luminária apropriada para a estratégia de controle e o tipo de lâmpada escolhido.

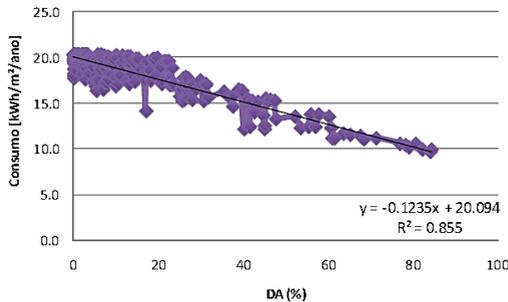
Existem dois métodos mais conhecidos que abordam essa questão. O método IASPI, originalmente conhecido por *PSALI – Permanent Supplementary Artificial Lighting in Interiors* (MOORE, 1993), propõe a divisão do ambiente em zonas de diferentes níveis de iluminância (iluminação natural), mostrando onde há necessidade do uso da iluminação artificial suplementar à luz natural para a execução de determinada tarefa. Apesar de superficial, o método tem como vantagens a rápida aplicação e o fácil entendimento.

O método PALN, proposto por Souza (2003), consiste em uma metodologia para estimar a Potencialidade de Aproveitamento da Luz Natural através da utilização de sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica gasta em iluminação artificial. Permite avaliar os tipos de controle para a iluminação artificial aplicados ao ambiente em questão, auxiliando na escolha da alternativa que proporciona maior economia de energia (SOUZA, 2003).

O aproveitamento da luz natural é associado às análises focadas na eficiência energética dos edifícios. Didoné (2009) avaliou o comportamento da luz natural para diferentes modelos de escritórios localizados na cidade de Florianópolis. O aproveitamento da luz natural proporcionou reduções de 20% a 62% no consumo de energia com iluminação artificial, o que influencia positivamente no comportamento do ar condicionado, reduzindo o consumo de energia, devido à redução das cargas internas provenientes do sistema de iluminação artificial.

Ainda segundo a autora, quanto maior a DA menor o consumo do sistema de iluminação artificial. O gráfico da Figura 3 mostra esta relação para os modelos mais profundos simulados (8m e 16m). Observa-se que grande parte dos casos se concentra na faixa entre 0%

e 20% de DA, pois possuem poucas ou nenhuma hora do ano atingindo os 500 lux da iluminância alvo estipulada. Acima de 80% de DA, o consumo é nulo, pois a luz natural fornece luz suficiente. Por outro lado, não descreve os períodos de excesso de luz natural, que pode implicar com que o usuário feche as cortinas, bloqueando a iluminação natural no interior do ambiente.



**Figura 3:** Relação do DA médio com o consumo de energia de iluminação artificial.  
Fonte: Didoné (2009)

Roisin et al. (2008), baseados em medições, calcularam a economia de eletricidade utilizando a integração da luz natural com a artificial em três localidades na Europa, para as quatro orientações e obtiveram taxas entre 45 e 61%. Níveis semelhantes foram obtidos por Ihm et al. (2009) em espaços perimetrais iluminados por luz natural, conforme constatado na pesquisa realizada em escritórios comerciais de pequeno porte no Colorado, EUA. Ghisi e Tinker (2006) experimentaram a captação da luz natural através de fibras óticas e verificaram aumento na economia de energia, porém o investimento é pouco atrativo quando comparado com a integração do sistema de iluminação artificial com a luz natural vinda de janelas.

### 2.2.2.1 Sistemas de controle

Segundo Akashi & Boyce (2006), grande parte da energia de uma edificação comercial é perdida em iluminação de espaços que não estão em uso ou porque se provê mais luz do que o necessário. Um edifício, não importa quão bem concebido, economiza energia somente se a iluminação natural pode efetivamente substituir o uso de

iluminação elétrica, que pode ser efetivada através da utilização de sistemas de controle (MOORE, 1991).

De acordo com Souza (2003) os controles automáticos podem ser: liga/desliga, de passos ou dimerizável. O sistema de passos é usado em luminárias com mais de uma lâmpada, e funciona ligando ou desligando parte delas. Como por exemplo, quando há níveis suficientes de iluminação natural, as lâmpadas podem ser desligadas. Apenas uma lâmpada pode ser acesa, ou ambas as lâmpadas acesas, conforme necessidade de suplementar a iluminação natural. Cada um desses estágios é conhecido com um passo. Já um sistema dimerizável utiliza um dispositivo chamado *dimmer* que controla a corrente elétrica liberada para alimentar a lâmpada resultando em uma variação da intensidade do fluxo luminoso.

Estudos de laboratório e de campo mostraram que o controle de iluminação individual está associado com satisfação e benefícios de economia de energia. Moore et al. (2004) avaliaram 7 edifícios onde os usuários possuíam controle manual sobre a iluminação e 7 edifícios sem esse controle. Concluíram que, além da preferência por controles individuais, os usuários escolhem trabalhar com níveis de iluminância diferentes dos recomendados pelas normas - alguns mais altos e alguns abaixo, resultado similar obtido por Newsham et al (2004), Newsham et al. (2008), Escuyer e Fontoynt (2001), e Boyce et al. (2006a), o que pode implicar em economia de energia. Newsham & Veitch (2006), mostram que os usuários (80%) selecionaram potências cerca de 25% inferiores ao nível recomendado pelas normas.

Newsham et al. (2008) mostram que a preferência de níveis de iluminação no plano de trabalho, quando dado o controle individual, varia muito entre os indivíduos e para uma única pessoa ao longo do dia, ou seja, os ocupantes não usam os controles manuais para manter uma iluminação constante. Isto sugere que os controles automáticos destinados a manter iluminação constante tendem a serem menos desejáveis para os ocupantes do que o controle manual, fato que também foi comprovado no estudo de Boyce et al. (2000). No entanto, em termos de economia de energia, os controles automáticos são mais eficientes, mesmo quando a densidade de potência instalada do sistema de iluminação automática é 50% maior que a convencional (GALASIU & NEWSHAM, 2009).

Galasiu et al. (2007) mostra que a combinação de três controles (individual e dois sensores – um de escurecimento ou outro de desligamento, localizados nas luminárias) pode reduzir a demanda de potência em horário de pico em média 65-70% em relação a um sistema convencional de iluminação. Porém, a poupança de energia por si só não deve ser o único fator na determinação do sistema de controle mais eficaz. Os controles manuais são baratos, de fácil calibração, e o mais importante, são os preferidos pelos usuários. Jennings et al. (2002) afirmam que os interruptores manuais devem sempre fazer parte de todo sistema de controle, mesmo nos automáticos. Porém, os benefícios só se tornam eficientes quando a atitude do usuário diante destes sistemas se dá adequadamente.

### **2.2.2.2 Conceito de zonas luminosas**

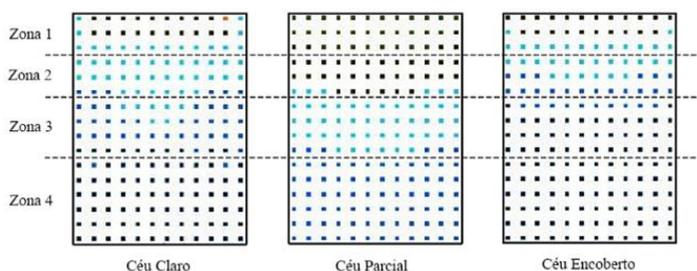
O primeiro passo para um projeto integrado de iluminação é o conhecimento das características do desempenho da luz natural para cada ambiente a ser trabalhado. As áreas onde esta integração ocorre devem ser divididas em zonas luminosas. Este conceito foi primeiramente proposto por Robbins (1986), caracterizando áreas que apresentam uma distribuição semelhante de iluminação natural. O tamanho da zona depende da configuração da abertura, das condições de céu, e do período (mês, dia e hora).

De acordo com Robbins (1986), não existem regras para o estabelecimento das zonas de iluminação; elas podem ser determinadas por vários critérios. No seu conceito inicial, proposto em uma época em que não se dispunha de ferramentas de simulação computacional como atualmente, a distribuição da luz no interior do ambiente era analisada em períodos de no mínimo quatro meses (correspondentes às estações do ano), em dois horários do dia. Uma simples observação visual da distribuição da luz também pode ser utilizada. No entanto, devido à grande variação da luz natural, podem ocorrer divergências na percepção.

Baseado no conceito, Souza (2003) propôs um procedimento para obtenção de zonas de iluminação através da determinação das iluminâncias a cada hora (das 8:00h às 18:00h) para cada parcela do plano de análise (75 cm do piso), para três tipos de céu. Através de simulação computacional, foram calculadas as iluminâncias para cada

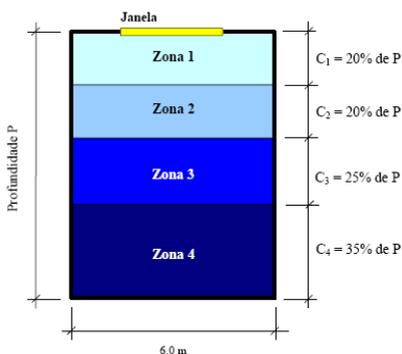
ponto do plano de análise, para cada condição de céu a cada hora. As zonas de cada hora simulada tiveram os seguintes limites: Emin (Iluminância Mínima); 3xEmín., 9xEmín.; 27x Emín., 81xEmín e assim sucessivamente até atingirem a iluminância máxima do ambiente.

Após a identificação das zonas, vinculou-se cada parcela do plano de trabalho à zona que nela incidiu com maior frequência. Assim, podem-se gerar mapas de distribuição de zonas luminosas para cada tipo de céu. Diante dos três mapas relativos aos tipos de céu, Souza (2003) considerou visualmente a distribuição definitiva das zonas luminosas no plano de trabalho, conforme Figura 4.



**Figura 4:** Mapas das zonas luminosas para três tipos de céu. Fonte: Souza (2003)

A Figura 5 ilustra a distribuição de zonas para um modelo de ambiente unilateral.



**Figura 5:** Zonas de iluminação para modelo com abertura lateral. Fonte: Souza (2003)

Dentro deste contexto, o trabalho realizado por Reinhart e Weissman (2012) procurou comparar a percepção visual de estudantes de arquitetura com a delimitação de uma zona iluminada e uma zona

não iluminada dentro de um espaço, com as medidas de avaliação de desempenho (*Daylight Factor*, autonomia da luz natural, iluminâncias úteis e LEED), obtidas através de simulação computacional. Os resultados mostraram que as medidas DA e a “*rules of thumbs*”, foram as que mais se aproximaram das percepções visuais dos estudantes. No entanto, os autores afirmam que são necessários mais estudos, em um número maior de ambientes e com mais pessoas, para poder tirar conclusões mais precisas.

### **2.2.2.3 Implicações do zoneamento nos projetos luminotécnicos**

A delimitação de zonas de iluminação natural diferenciadas pode representar áreas de análise que posteriormente influenciarão no desenho da iluminação artificial (ROBBINS, 1986).

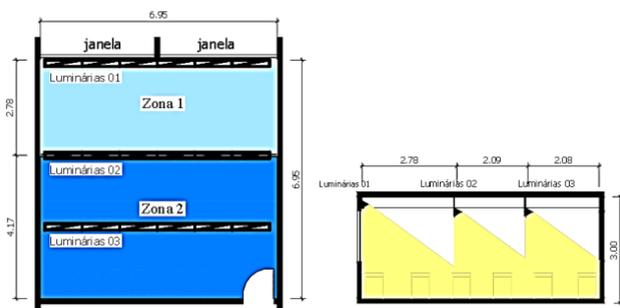
Ming-Chin et al. (2008), após escolherem o tipo de protetor solar mais eficaz para salas de aula localizadas em Taiwan, simularam o comportamento luminoso das salas apenas com a fileira de luminárias mais distante da janela ligadas. Concluíram que a iluminação artificial, aliada com o uso de proteção solar eficaz, auxiliou na obtenção da uniformidade de distribuição da iluminação do ambiente, reduzindo o consumo de energia em cerca de 70%.

Souza (2003) concluiu que, dentre as estratégias de controle adotadas em seu estudo - liga/desliga, três passos e dimerizável- os controles automáticos resultaram na maior economia de energia, chegando a atingir um PALN máximo de 87%; já os manuais foram os que apresentaram menores economias.

Sabry & Faggal (2005) realizaram um estudo para identificar a definição de zonas de iluminação e a estratégia de controle mais adequada para cada zona. Em um ambiente com iluminação unilateral foram identificadas 3 zonas. Como resultado do estudo, para a zona 3 (menos iluminada), o sistema teria de ser ligado durante todo o horário de trabalho. A zona 2 poderia ser ligada por apenas 5 horas e a zona 1 poderia depender apenas da iluminação natural. Concluíram que se 70% das luzes fossem ligadas (zonas 2 e 3) durante o dia, o consumo de energia de iluminação seria reduzido 65%.

Já Lopes (2006), utilizou como base o sistema de zoneamento unilateral proposto por Souza (2003) para avaliar duas alternativas de

sistemas de iluminação artificial complementar em salas de aula padrão. Neste caso, as zonas propostas por Souza (2003) foram agrupadas de duas em duas, resultando em uma proporção de 40% (zona 1 próxima à janela) e 60% da profundidade do ambiente. A autora afirma que visualmente o usuário observa facilmente a diferença entre duas zonas principais, a da área mais clara próxima à janela e da mais escura na direção oposta, enquanto que a divisão em quatro zonas (Figura 5) pode passar despercebida ao olhar do usuário (LOPES, 2006). A Figura 6 exemplifica um dos sistemas propostos.



**Figura 6:** Distribuição do sistema de iluminação artificial considerando o zoneamento da luz natural. Fonte: Lopes (2006)

As luminárias foram dispostas de acordo com as zonas de iluminação, divididas em três circuitos com acionamentos independentes. As luminárias que compõem o circuito 01 são compostas por uma lâmpada de 32 W, enquanto que os demais circuitos, compostos por luminárias com duas lâmpadas de 32W cada. De acordo com Lopes (2006), o objetivo principal é complementar a iluminação natural, acionando primeiramente os pontos localizados próximos da zona mais sombria e à medida que os níveis de iluminação decaíssem ao longo do dia, os demais circuitos fossem acionados até que todos estivessem ligados, nas horas finais do dia.

Assim, conclui-se que cada zona pode receber um tratamento diferenciado na distribuição de luminárias, que deverão ser distribuídos de tal forma que possam ser acionados separadamente (TOLEDO, 2008). De acordo com Souza (2003), o projeto luminotécnico deverá determinar uma distribuição uniforme dentro das zonas de iluminação, formando um conjunto uniforme quando todas as zonas de iluminação estão ligadas. Este conceito pode ser analisado tomando como base a

Figura 5: o autor sugere que, ao realizar o projeto luminotécnico, tem-se um fluxo luminoso total que deverá ser fornecido pelo sistema, logo as luminárias colocadas nas zonas 1, 2, 3 e 4 deverão fornecer respectivamente, 20%, 20%, 25% e 35% do fluxo luminoso total.

No caso do RTQ-C, a divisão de circuitos do sistema de iluminação artificial é definida de acordo com a área do ambiente. Para ambientes com área inferior a 250 m<sup>2</sup>, o regulamento permite apenas um controle para todo o espaço; já para ambientes com grandes áreas, acima de 250 m<sup>2</sup>, o RTQ-C determina a divisão do sistema em parcelas menores, de no máximo 250 m<sup>2</sup>, cada uma com um controle independente. No entanto, estas considerações revelam que o RTQ-C ainda não atende certos requisitos que introduzam a luz natural, deixando de aproveitar todo o potencial fornecido por este fenômeno.

### **2.3 PROJETO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL**

De acordo com Cuttle (2010), pode-se dizer que a profissão projetista de iluminação surgiu em 1898, quando uma reunião de engenheiros realizada em Paris lançou as bases para um sistema internacional de fotometria. Como resultado, foi adotado um sistema padrão para especificar a distribuição de intensidade luminosa das luminárias, uma vez que as leis fundamentais da Iluminação (MOORE, 1993), dominavam os cálculos de projetos luminotécnicos na época.

Mais tarde, com a introdução do Método dos Lúmens, a luz refletida passou a ser considerada nos cálculos. De acordo com Cuttle (2010), em um primeiro momento, a iluminância média no plano de trabalho horizontal e a uniformidade se tornaram a base dos padrões de iluminação em todo o mundo. Já a segunda fase consistiu no fornecimento de níveis de iluminância adequadas às necessidades humanas, com base no desempenho visual. No entanto, o mesmo autor afirma que a segunda fase falhou, e que a prática atual dos projetos de iluminação artificial continua a ser dominada pelo objetivo da primeira fase, ou seja, o fornecimento de uma iluminação uniforme. Esta falha, deve-se ao fato de que as pessoas muitas vezes preferem níveis diferentes aos fornecidos por normas, fato comprovado por estudos de Newsham et. al (2004), Newsham et al. (2008), Escuyer e Fontoynt (2001), e Boyce et al. (2006a), conforme já citado.

Dentro deste contexto, discussões têm sido realizadas a respeito das métricas utilizadas para especificar, medir e calcular os níveis de iluminação (Cuttle, 2010). Sendo assim, uma terceira etapa é sugerida, baseada na aceitação do usuário quanto ao brilho, e para isso, os padrões de iluminação são baseados na luz refletida que chega ao olho do usuário. No entanto, ainda são necessários estudos de como aplicar o conceito na prática projetual.

### 2.3.1 Tipos de iluminação

O sistema de iluminação artificial utilizado depende da tarefa visual a ser executada, do tipo de luminária empregada e sua distribuição. A Figura 7 exemplifica o comportamento dos sistemas de iluminação em relação à disposição das luminárias.

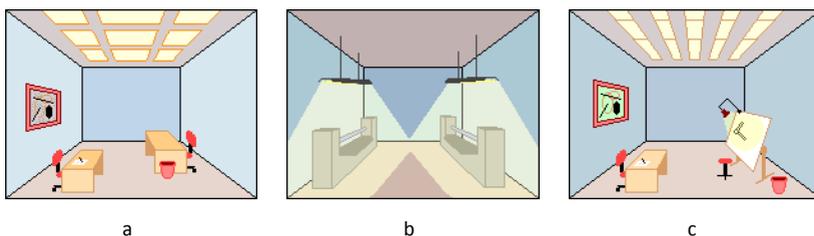


Figura 7: Tipos de iluminação. Fonte: Teixeira (s. d.)

**Iluminação geral** (Figura 8a): Proporcionam uma iluminação uniforme sobre toda a área do plano de trabalho de um ambiente, com luminárias fixadas regularmente no teto. Neste tipo de sistema, toda a área de trabalho é considerada como o plano de trabalho para a iluminância de projeto (OSRAM, 2008).

**Iluminação geral localizada** (Figura 8b): As luminárias são colocadas para iluminar as regiões onde são realizadas tarefas visuais e proporcionam uma iluminação de fundo no ambiente. Somente as áreas de tarefas apresentam o nível de iluminação de projeto.

**Iluminação localizada** (Figura 8c): Proporcionam uma concentração maior de luminárias em determinadas posições de trabalho onde se exige uma iluminância suficientemente elevada.

### 2.3.2 Métodos de cálculo

Os métodos de cálculo são comumente utilizados para se determinar a quantidade de luz necessária para determinado ambiente, assim como o número de luminárias necessário para atender a determinado nível de iluminância.

O **Método Ponto a Ponto** não é diretamente utilizado para a determinação do número de luminárias a ser implantada, mas é capaz de determinar a iluminância em qualquer ponto do ambiente. Já o **Método das cavidades zonais** é utilizado em ambientes que requerem um alto padrão técnico e exigem maior precisão de cálculos. A seguir são explicados dois métodos: o **Método dos Lúmens**, mais difundido entre os projetistas e o método **Iluminação geral/tarefa**, apontado como grande promissor na redução de consumo de energia.

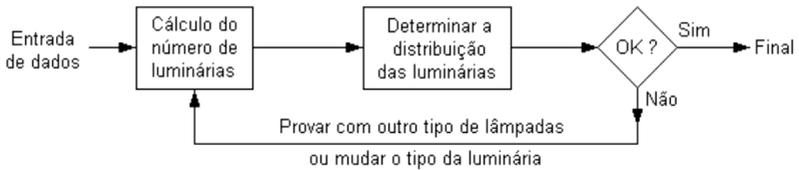
Estes cálculos seriam simples se toda a luz emitida atingisse a área de trabalho, sem considerar as perdas provocadas pela luminária e pela absorção e reflexão de luz pelas superfícies. Esta redução da iluminância também é influenciada pelas condições de manutenção do ambiente, lâmpadas e luminárias. No entanto, o projeto não é tão simples assim. Vários fatores afetam o fluxo luminoso que atinge o plano de trabalho, conforme explicitado nos itens a seguir.

#### **Método dos Lúmens (Método da Iluminância Média)**

Esse método é o mais difundido e utilizado por projetistas de iluminação de ambientes internos (Cuttle, 2010). Foi originalmente desenvolvido presumindo que não havia obstruções de qualquer tipo no espaço, assumindo que a luz emitida pela luminária é uniformemente distribuída sobre o plano horizontal de trabalho. No entanto, reconhece-se que obstruções, tais como mobiliário e a distribuição de intensidade da luminária podem afetar a iluminação de um espaço (HADWAN & CARTER, 2006; NEWSHAM & SANDER, 2003).

Segundo TEIXEIRA (s.d.), sua aplicação compreende um processo interativo, onde o projetista precisa estipular previamente a iluminância média de projeto, o tipo da lâmpada/ luminária, bem como a quantidade de lâmpadas em cada luminária (entrada de dados), conforme Figura 8. Ao final do processo, ele deve avaliar se essas

escolhas foram acertadas. Caso contrário esses elementos devem ser modificados e os cálculos refeitos, até que o resultado seja adequado.



**Figura 8:** Processo iterativo do método. Fonte: Teixeira (s. d.)

Esse método é baseado na determinação do fluxo luminoso total que as lâmpadas a serem instaladas devem emitir, necessário para a obtenção de um nível de iluminância médio desejado no plano de trabalho, obtido através da Equação 1:

$$\phi = \frac{A \cdot E}{C_u \cdot F_d} \quad \text{Equação 1}$$

$\phi$  é o Fluxo luminoso desejado (lm);  $F_d$  é o Fator de depreciação;

$A$  é a área de trabalho (m<sup>2</sup>);  $C_u$  é o Fator de Utilização.

$E$  é a Iluminância média (lux)

O **Fator de utilização da luminária** ( $C_u$ ) representa a percentagem do fluxo das lâmpadas que atinge o plano de trabalho num ambiente. É um número complexo que representa a eficiência da luminária (tamanho e a forma como ela distribui a luz) e as características do ambiente (refletâncias das superfícies e a geometria) que se exprime através do Índice do Ambiente ( $K$ ). Em catálogos de fabricantes, existem dez índices, que variam de 0,60 a 5,00, sendo que quanto menor o índice  $K$ , menor é o ambiente. A forma mais usual, recomendada para ambientes quadrados e retangulares com iluminação direta, semi-direta e difusa, é dada pela Equação 2.

$$K = \frac{LC}{h(L+C)} \quad \text{Equação 2}$$

$K$  é o índice de ambiente (adimensional)

$C$  é comprimento do ambiente (m)

$L$  é largura do ambiente (m)

$h$  é a altura de montagem entre a superfície de trabalho e o teto (m)

Outras variações da fórmula podem ser encontradas, para instalações com iluminação indireta ou diferentes geometrias, todas variando em função da formulação geral, apresentada na Equação 3:

$$K = \frac{\sum(\text{área\_teto} + \text{área\_plano\_trabalho})}{\sum(\text{áreas\_paredes})} \quad \text{Equação 3}$$

O produto da Eficiência do Recinto ( $\eta_R$ )<sup>3</sup> pela Eficiência da Luminária ( $\eta_L$ ) resulta no Fator de Utilização (OSRAM, 2008), através da Equação 4:

$$Cu = \eta_R \cdot \eta_L \quad \text{Equação 4}$$

**Cu** = fator de utilização

$\eta_R$  = Eficiência do recinto

$\eta_L$  = Eficiência da luminária

Os fabricantes costumam apresentar uma tabela relacionando o índice de ambiente com as refletâncias do teto, parede e piso, para determinação do **Cu**. Apesar de serem semelhantes às tabelas de Eficiência do Recinto, os valores nelas encontrados não precisam ser multiplicados pela Eficiência da Luminária, uma vez que cada tabela é específica para uma luminária. Na Tabela 1 tem-se o exemplo de **Cu** para uma luminária da linha OCT, do fabricante *LightGroup*.

**Tabela 1:** Tabela de fator de utilização para luminária da linha OCT1369 2x32W, fabricante *LightGroup* ([www.lightgroup.com.br](http://www.lightgroup.com.br))

K	751	731	711	551	531	511	351	331	311
0,60	0,45	0,40	0,36	0,44	0,39	0,36	0,44	0,39	0,36
0,80	0,54	0,49	0,44	0,53	0,48	0,44	0,52	0,48	0,44
1,00	0,55	0,49	0,45	0,54	0,49	0,44	0,53	0,49	0,44
1,25	0,63	0,58	0,54	0,61	0,57	0,54	0,60	0,56	0,53
1,50	0,64	0,59	0,55	0,62	0,58	0,54	0,60	0,56	0,53
2,00	0,72	0,66	0,63	0,70	0,66	0,62	0,68	0,65	0,61
2,50	0,78	0,75	0,72	0,77	0,73	0,71	0,75	0,72	0,70
3,00	0,78	0,75	0,72	0,77	0,73	0,72	0,74	0,72	0,70
4,00	0,79	0,76	0,72	0,77	0,74	0,72	0,74	0,72	0,71
5,00	0,85	0,83	0,81	0,84	0,82	0,80	0,82	0,80	0,79

<sup>3</sup> Dado por tabelas contidas nos catálogos dos fabricantes, onde se relacionam os valores de Coeficiente de Reflexão do teto, paredes e piso, com a Curva de Distribuição Luminosa da luminária utilizada e o Índice do Ambiente (OSRAM, 2008).

De acordo com a Tabela 1, para sua determinação, basta relacionar as refletâncias com o índice do ambiente (k). Supondo-se que o K é igual a 3 e o teto, parede e piso têm refletâncias de 70%, 50% e 10% respectivamente, o valor das refletâncias é caracterizado como 751, e o coeficiente de utilização  $C_u$  será igual a 0,78.

O último fator necessário para a determinação do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas é **Fator de depreciação** ( $F_p$ ), relacionado à diminuição do fluxo luminoso no ambiente com o decorrer do tempo, devido à depreciação normal do seu fluxo e devido ao acúmulo de poeira sobre a lâmpada e o refletor. Utiliza-se o  $F_p$  para compensar esta depreciação, para que a diminuição do nível de iluminância ao longo da vida útil da lâmpada seja premeditada. Dessa forma, no período de implantação do sistema, ou logo após a manutenção, o ambiente apresentará níveis superiores aos requeridos.

Na prática, é possível prever este efeito através da adoção de valores segundo alguns critérios. Porém, conforme tabelas a seguir, percebe-se que há diferenças entre diversos autores. Na Tabela 2, Philips (1981), por exemplo, sugere valores de acordo com o período de manutenção do ambiente.

**Tabela 2:** Fator de depreciação em função das condições do ambiente

Ambiente	Período de manutenção		
	2.500 hs	5.000 hs	7500 hs
Limpo	0,95	0,91	0,88
Normal	0,91	0,85	0,80
Sujo	0,8	0,66	0,57

Fonte: PHILIPS, 1981

Já Itaim (2008) sugere valores de acordo com as condições de limpeza do ambiente, Tabela 3:

**Tabela 3:** Fator de depreciação em função do período de manutenção do ambiente

Ambiente	Fator de depreciação
Limpo	0,8
Médio	0,7
Sujo	0,6

Fonte: ITAIM, 2008

A quantidade de luminárias necessária para atender a esse fluxo é dada pela Equação 5. O valor adotado deve ser ajustado de

acordo com a geometria do ambiente, para um valor inteiro mais próximo, como objetivo de se atingir uma distribuição uniforme.

$$N = \frac{A.E}{C_u.F_d.\phi}$$

**Equação 5**

$\phi$  é o Fluxo luminoso desejado (lm);  $F_d$  é o Fator de depreciação;  
 $A$  é a área de trabalho (m<sup>2</sup>);  $C_u$  é o Fator de Utilização.  
 $E$  é a Iluminância média (lux)

As informações necessárias para a realização do cálculo do número de luminárias são apresentadas pelos seus fabricantes. No entanto, a falta de informações por parte dos fabricantes sobre as informações relevantes (como tabelas e coeficientes) para a criação de um projeto luminotécnico calculado por este método é recorrente nas reclamações de pesquisadores da área (RIBEIRO & CARLO, 2011). Cabe salientar que apesar de ser o método mais comumente utilizado por profissionais e pelo RTQ-C, estudos apontam limitações. Ribeiro e Carlo (2011) ressaltam que a precisão obtida com este método é relativamente baixa, podendo gerar níveis de iluminância iniciais muito superiores aos indicados pela norma brasileira NBR 5413, o que compromete a qualidade do projeto e aumenta os custos de energia.

## **Iluminação geral/tarefa**

Por influência do surgimento dos códigos de energia, novas práticas de projeto têm sido exploradas. A norma europeia EN 12464<sup>4</sup> – Parte 1 – “Iluminação de ambientes de trabalhos internos” (CEN, 2002), introduz novos conceitos na área do projeto e do planejamento em iluminação de escritórios, através da definição de zonas de local de trabalho e área circundante, onde são utilizadas iluminações diferenciadas para geral e tarefa, diferente ao Método dos lúmens. Segundo Godoy (2005), esta abordagem prioriza a uniformidade e iluminâncias corretas nos planos de trabalho. No conceito da iluminação de tarefa, o ambiente deve ser dividido em áreas e zonas diferenciadas, dependentes da utilização e do *layout* a ser implantado.

---

<sup>4</sup> Outra denominação para esta norma é ISO/CIE 8995.

A iluminância mantida das áreas do entorno imediato deve ser mais baixa que a iluminância da área da tarefa, porém, não deve ser inferior aos valores estabelecidos na Tabela 4.

**Tabela 4:** Valores recomendados para cada zona

<b>Iluminância da tarefa (lux)</b>	<b>Iluminância do entorno imediato (lux)</b>
≥ 750	500
500	300
300	200
≤ 200	Mesma iluminância da área de tarefa

Fonte: CEN, 2002

De acordo com Caton (2007), o processo de projeto destes sistemas pode ser definido pelas seguintes etapas:

- Definição das superfícies de tarefa, a sua localização no espaço e a sua função;
- Estabelecimento da iluminância desejada nas superfícies de tarefa e áreas circundantes;
- Seleção das luminárias adequadas para as funções;
- Cálculo da iluminação geral uniforme e da complementação com iluminação de tarefa nos planos de trabalho.

Esta abordagem possui benefícios potencialmente significativos no potencial de redução da potência instalada em relação a um esquema de iluminação uniforme (LOE, 2003; ENERGY DESIGN RESOURCES, 2007; CATON, 2007). A economia de energia para esta nova abordagem tem sido estimada em até a 50% (LOE, 2003). Yamakawa et al. (2000) realizaram um estudo de uso desta estratégia num espaço de escritório. Os participantes foram expostos à luz ambiente com luminárias parabólicas e utilizaram sistemas de controle dimerizados para selecionar um nível preferencial para a luz de tarefa. Como resultado, uma redução de 100 lx na iluminação geral foi compensada pelo aumento de 30lux na luz de tarefa.

Além de reduzir a potência instalada, pode possibilitar maior conforto ao usuário, caso dispositivos de controle individuais sejam disponibilizados. Boyce et al. (2006b), em estudo com usuários, concluiu que sistemas de iluminação geral e de tarefa com controle individual foram preferidos por 90% dos participantes. Newsham et al (2008) revelaram que ocupantes não percebem e aceitam uma redução de iluminância ambiente, mantendo a iluminação da tarefa adequada.

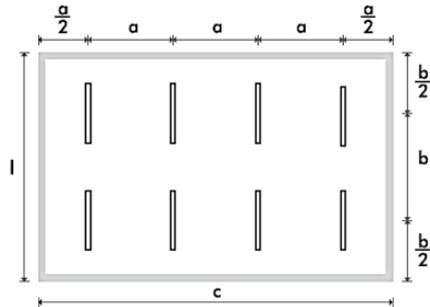
No entanto, a iluminação geral uniforme é ainda a abordagem de projeto mais praticada devido à percepção de que na prática de tarefa/ambiente o equipamento de iluminação é mais caro, e ao fato de criar um espaço interior inflexível. Porém, estes sistemas estão se tornando mais atraentes com o desenvolvimento de novos equipamentos de iluminação, o uso de programas de computador e com custos crescentes de energia elétrica. As relações de luminância são um conceito importante para aplicar no desenvolvimento de requisitos de desempenho dentro desta estratégia. O *IESNA Lighting Handbook* (IESNA, 2000) sugere limites máximos de iluminação dentro de uma taxa de luminância de 3:1, para evitar contrastes acentuados.

### **2.3.3 Distribuição das luminárias**

De uma maneira geral, não existem regras que estabelecem um padrão para a distribuição das luminárias no interior do espaço. O que rege a prática projetual para iluminação geral são recomendações resultantes do próprio exercício prático, que definem critérios de espaçamento em função da geometria do ambiente e do fluxo luminoso emitido pelas lâmpadas.

Dependendo do ambiente a ser iluminado pode existir uma série de condições que determinam o arranjo da iluminação, como por exemplo, a presença de elementos que interferem na distribuição, como modulações de forro ou até mesmo mobiliário. De acordo com Marinoski et al. (2001), em determinados locais do ambiente, mais próximos às paredes e entre duas luminárias adjacentes, os níveis de iluminação poderão estar abaixo da média, dependendo do tipo de distribuição luminosa da luminária adotada. Para evitar esse problema, o projetista deve estar atento para a distribuição de luminárias, respeitando certos limites de distância entre elas.

A prática de projeto de iluminação uniforme recomenda que a distância "a" ou "b" entre as luminárias seja o dobro da distância entre estas e as paredes laterais, conforme Figura 9. Assim, as luminárias são espaçadas e posicionadas de uma maneira que considera as dimensões espaciais do ambiente, o que muitas vezes acarreta no aumento do número mínimo de luminárias. Este aumento ocorre, muitas vezes, devido à incapacidade de se colocar as luminárias no espaçamento regular que o método de cálculo uniforme assume (CATON, 2007).



**Figura 9:** Recomendação da distribuição das luminárias. Fonte: ITAIM (2008)

No entanto, existem alguns limites de espaçamento entre as luminárias que influenciam a distribuição da luminosidade conforme a composição das luminárias. PHILIPS (1986) apud Marinowski et al. (2001) recomenda que a distância máxima entre duas luminárias adjacentes seja de  $2/3$  da altura de montagem, na direção transversal às luminárias, e  $1/3$  da altura de montagem, na direção longitudinal às luminárias. Ghisi (1997), por exemplo, adotou  $2/3$  da altura de montagem como espaçamento máximo entre luminárias nos dois sentidos: longitudinal e transversal.

De uma forma geral, para a maioria das luminárias e condições de locais, se assume que se obtém uma distribuição de luz satisfatória, com um espaçamento das luminárias igual ou inferior a uma vez e meia a distância entre as luminárias e o plano de trabalho (PHILIPS, 1996 apud GHISI, 1997), dada pela Equação 6.

$$e_L = 1,5 h$$

**Equação 6**

$e_L$  é o espaçamento máximo entre luminárias

$h$  é a altura da fonte luminosa ao plano de trabalho

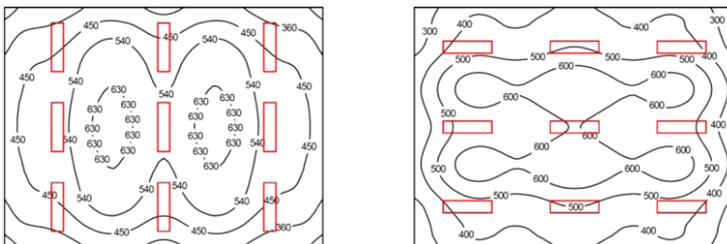
No caso da abordagem de iluminação uniforme, relacionada ao Método dos Lúmens, ressalta-se que método não define um espaçamento entre as luminárias, mas sim um fluxo luminoso total necessário para fornecer um determinado nível de iluminância pré-determinado dentro de um espaço (com base na tarefa a ser desempenhada) e o número necessário de luminárias que atende à esse fluxo (Equação 5). No entanto, não há como assegurar que a configuração encontrada para a distribuição das luminárias forneça um

fluxo luminoso adequado ou que haja uniformidade deste fluxo ao longo do plano de trabalho.

Assim, Marinoski et al. (2001) ressalta que um sistema composto por luminárias que provoquem um direcionamento maior do fluxo luminoso em direção ao plano de trabalho, deverá apresentar menor distanciamento entre as luminárias. Ainda segundo a autora, muitas vezes, a necessidade de aproximação entre as luminárias para garantir a uniformidade dos níveis de iluminância no plano de trabalho acaba por superdimensionar o sistema de iluminação.

Um detalhe importante diz respeito ao posicionamento no sentido transversal ou longitudinal das luminárias. A escolha por uma ou outra posição deve ser função da curva de distribuição da luminária e da posição dos usuários na sala, considerando requisitos de ofuscamento, além do posicionamento das janelas e da contribuição da luz natural (GHISI, 1997). Deve-se atentar também para o chamado “efeito caverna”, quando o fundo da sala fica escuro comparado às outras superfícies.

Sugestões de projeto indicam que a maior dimensão da luminária seja paralela a maior dimensão do ambiente (TEIXEIRA, s.d). A Figura 10 apresenta duas situações, onde o mesmo número de luminárias, orientadas de diferentes maneiras, proporciona diferentes níveis de iluminâncias no espaço.



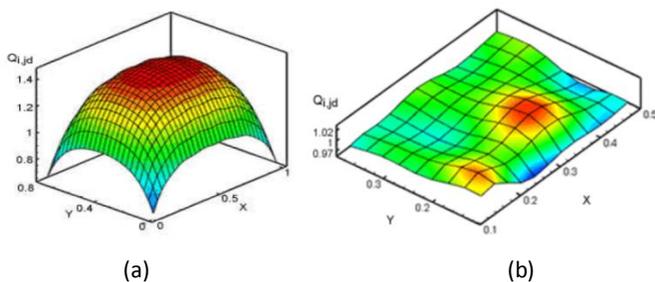
**Figura 10:** Linhas isolux no plano de trabalho (9 luminárias). Fonte: Teixeira (s. d.)

Embora tenha uma aplicação simples, o método dos lúmens apresenta problemas de precisão de dimensionamento, o que fez surgir propostas de métodos numéricos visando sua correção (CASSOL, 2009). Diante desta problemática, estudos de Albuquerque (2007) e Cassol (2009, 2011) apresentam uma nova metodologia para encontrar a localização ideal e a potência necessária de um determinado número de lâmpadas para satisfazer uma iluminação prescrita no plano de

trabalho, utilizando um conceito de Algoritmo de Otimização. Este conceito adota um processo onde se deseja a identificação de soluções ótimas diante de interações entre algumas variáveis, através da utilização de modelos matemáticos avançados e complexos.

Os métodos comuns trabalham determinando o número e a posição necessária das luminárias em resposta a um fluxo necessário na superfície de trabalho, através de um processo iterativo de tentativa e erro, conforme visto anteriormente. O método utilizado por Cassol (2009, 2011) adota um conceito inverso, que utiliza cálculos de radiação térmica, baseado no processo de transferência radiante, que pretende identificar as melhores maneiras de se projetar um experimento<sup>5</sup>.

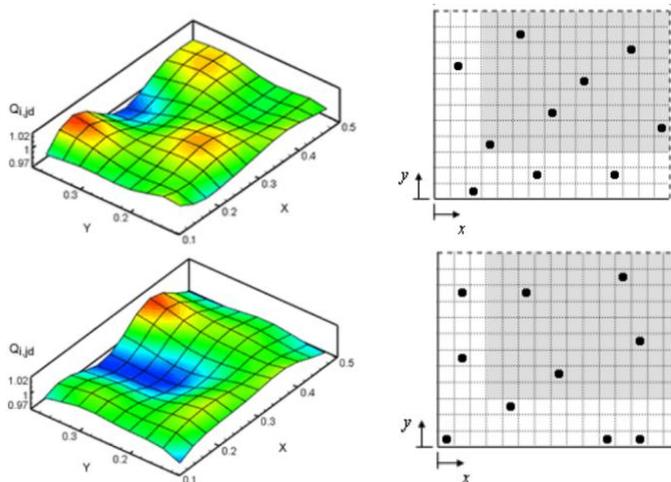
A Figura 11 mostra alguns resultados do estudo. Com o mesmo número de lâmpadas, 48, percebe-se claramente a diferença entre os padrões de distribuição das luminárias. Para o Método dos Lúmens (Figura 11a) há uma concentração de iluminâncias elevadas no centro do ambiente; já a aplicação do algoritmo de otimização (Figura 11b) resulta em valores de iluminâncias semelhantes e melhor distribuídos.



**Figura 11:** Resultados para configurações de 48 lâmpadas. (a) Iluminâncias no plano de trabalho através do método dos lúmens. (b) Resultado da aplicação do conceito GEO. Fonte: Cassol (2009)

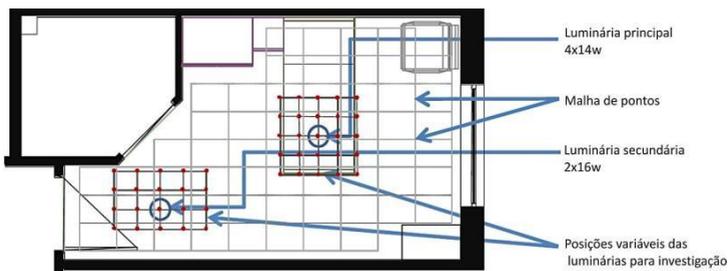
Na Figura 12 é possível observar que diferentes posicionamentos das fontes de luz produzem resultados de uniformidade de distribuição de iluminâncias satisfatórios, o que também é verificado quando são utilizados outros números de lâmpadas, com qualquer configuração proposta através do método inverso.

<sup>5</sup> No estudo, experimento se refere aos sistemas de iluminação artificial.



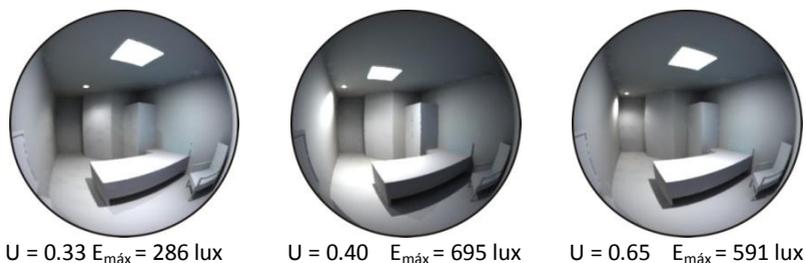
**Figura 12:** Resultado da aplicação do conceito de Otimização Extrema Generalizada (GEO) para 10 lâmpadas. Fonte: Cassol (2009)

Shikder (2010), através de uma metodologia de otimização utilizando um algoritmo genético (processo analítico) integrado à simulação computacional baseada no *Radiance*, identificaram as posições adequadas para duas luminárias no interior de um ambiente, visando atender à uma iluminância horizontal e requisitos específicos de luminância verticais. A Figura 13 mostra as posições variáveis para cada luminária: a luminária principal (4x14W) possui 25 posições e a luminária secundária possui 20 posições. Através do processo de algoritmo genético, foram encontradas e simuladas interações de posições entre estas posições variáveis.



**Figura 13:** Disposição espacial das luminárias para as interações. Fonte: Adaptado de Shikder (2010)

A Figura 14 mostra uma comparação de resultados diferentes (uniformidade e iluminação vertical máximo) produzidas por três soluções selecionadas aleatoriamente. A configuração que apresentou melhores resultados é a que apresenta uniformidade maior, de 65.

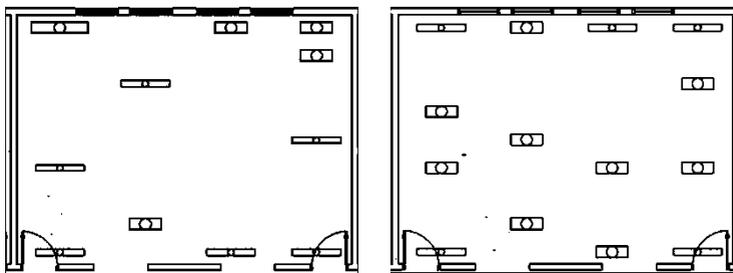


**Figura 14:** Comparação de uniformidade de iluminação e valores máximos de iluminância vertical para posições de luminárias diferentes. Fonte: Shikder (2010)

Entre os resultados encontrados destes estudos, tornou-se claro que uma uniformidade na superfície de trabalho não significa necessariamente uma uniformidade na distribuição das luminárias. No entanto, estas metodologias ainda são pouco estudadas, além do fato de utilizarem relações numéricas muito complexas e o tempo computacional elevado.

Albuquerque (2007) desenvolve uma ferramenta para otimização do projeto de iluminação em ambientes fechados, que otimiza os parâmetros nível e a uniformidade da iluminância, custo de instalação e custo de operação, através da utilização do algoritmo de têmpera simulada. Este conceito parte de uma solução inicial e modifica-a de forma aleatória num processo iterativo, utilizando modelos computacionais e matemáticos avançados, muito além da prática projetual atual.

A Figura 15 apresenta alguns resultados do estudo. A distribuição de luminárias proposta foge dos padrões utilizados, pois além da assimetria no posicionamento, o projeto não utiliza apenas um tipo de luminária, e sim de um grupo de luminárias com características semelhantes, sendo este recurso um dos principais responsáveis pelos resultados obtidos (ALBUQUERQUE, 2007).

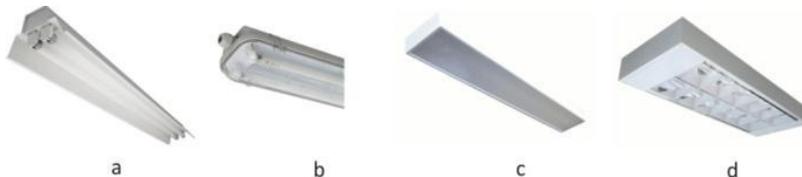


**Figura 15:** Distribuições obtidas com diferentes luminárias. Fonte: Albuquerque (2007)

## 2.4 LUMINÁRIAS

A maioria das lâmpadas emite luz em praticamente todas as direções, e sua aplicação eficiente requer componentes de controle para coletar e distribuir essa luz. Luminárias, segundo ABNT (1991), são aparelhos que distribuem, filtram ou transformam a luz emitida por uma ou mais lâmpadas e que compreendem todas as partes necessárias para sustentar, fixar e proteger as lâmpadas.

A luminária, como elemento responsável pela distribuição da luz, é um dos principais fatores de qualidade da iluminação. Através da seleção de material e forma apropriada, a luminária pode maximizar o uso da luz emitida pela lâmpada e, desta forma, diminuir a carga total de iluminação. No caso de luminárias para edificações, a diversidade de tipos é extensa e variada, variedade esta provocada não só pelo número e potência das lâmpadas utilizadas e pelos modos de instalação e montagem, mas principalmente pela forma de controle de luz. A Figura 16 ilustra exemplos de tipos de componentes de controle de luz mais utilizados, definidos por IESNA (2000).



**Figura 16:** Exemplos de componentes de controle de luz: a) refletor; b) refrator; c) difusor; d) louver. Fonte: adaptado de IESNA (2000)

Os **refletores** são dispositivos geralmente de metal ou plástico metalizado com alta refletância e são formatados de modo a redirecionar a luz emitida pela lâmpada por reflexão. Podem ter acabamentos especular, semi-especular ou difuso.

Os **refratores** são dispositivos de controle que tiram proveito da mudança de direção da luz quando esta atravessa materiais de diferentes transmitâncias ópticas. Podem ser de vidro ou plástico, constituídos por prismas lineares ou prismáticos tridimensionais.

Os **difusores** são elementos de controle que redirecionam a luz em várias direções. Também são usados para distribuir a luz, obscurecer o interior de luminárias, esconder a lâmpada e reduzir altas luminâncias, aumentando a área de emissão de luz da luminária.

Os **louvres** são elementos opacos ou translúcidos que controlam a direção da luz e reduzem ou eliminam a visão direta da lâmpada sob determinados ângulos. Podem ser dispostos em grelhas retangulares, ou dispostos linearmente, denominados de aletas.

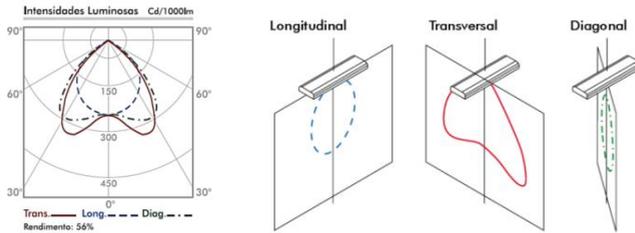
Para análise de desempenho, é necessário conhecimento das características fotométricas das luminárias. Desta forma, a seguir são apresentados conceitos e representações para análise de fotometrias.

#### **2.4.1.1 Curva de distribuição luminosa**

Cada luminária se caracteriza por um diagrama polar de intensidade luminosa, conhecido como curva de distribuição luminosa (CDL). Segundo a ABNT (1991), são geralmente representadas em coordenadas polares e mostram a variação da intensidade luminosa num plano que passa através da fonte (lâmpada ou luminária), em função do ângulo medido a partir de uma direção determinada.

Às vezes, apesar de serem similares, as luminárias possuem curvas fotométricas diferentes, ou seja, distribuem de maneira diferente o fluxo luminoso. Sendo assim, é fundamental o conhecimento de sua fotometria, propriedades e custo para determinar sua utilização no projeto luminotécnico. Para luminárias internas é convencionalizado que as intensidades luminosas são obtidas variando-se os ângulos nas direções vertical e horizontal em função da origem, referência perpendicular ao plano formado pela luminária, passando pelo centro da mesma, no sentido inferior. A Figura 17 mostra a distribuição da luz da luminária em três planos: eixo

longitudinal da luminária (plano C0° - C180°), eixo transversal da luminária (plano C90° - C270°) e eixo diagonal (plano C45° - C225°).

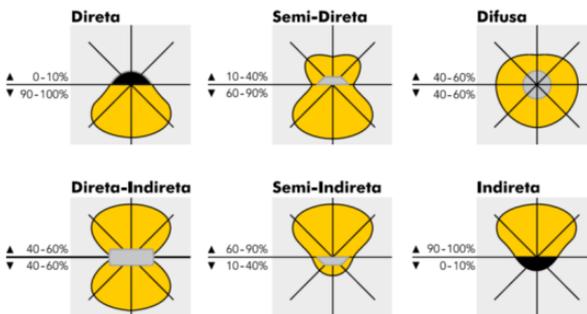


**Figura 17:** Curva de distribuição de intensidade luminosa. Fonte: ITAIM (2008)

As CDLs podem ser apresentadas em candelas (cd) ou candelas por 1000 lumens (cd/1000lm). A segunda representação, entretanto, é a mais usual, pois independe do fluxo luminoso da lâmpada utilizada. Desta forma, é possível com a mesma curva, obter as intensidades luminosas da luminária com uma lâmpada fluorescente de 32W com 2.700lm ou com uma lâmpada fluorescente de 36W com 3.350lm, bastando para isto, multiplicar os valores das intensidades luminosas em cd/1000lm da curva pelo valor do fluxo luminoso das lâmpadas em questão, dividido por 1000 (IWASHITA, 2005).

### 2.4.1.2 Classificação das luminárias

Ainda em relação à distribuição do fluxo luminoso, as luminárias são classificadas pela “*Commission Internationale de L’Eclairage*” (CIE), em grupos conforme a parcela dos fluxos luminosos emitidos para o hemisfério superior e inferior da luminária (Figura 18).



**Figura 18:** Classificação das luminárias. Fonte: ITAIM (2008)

•**Direta:** quando o sistema ótico direciona 90% a 100% de seu fluxo luminoso emitido para baixo.

•**Semi-direta:** quando o fluxo luminoso do sistema ótico é emitido mais para baixo (60% a 90%), mas uma pequena parte é direcionada para cima, iluminando o teto e a parte superior das paredes;

•**Uniforme ou difusa:** quando as porções do fluxo luminoso ascendente e descendente se equivalem, medindo cada uma delas entre 40% e 60%, o sistema ótico é dito uniforme ou difuso.

•**Semi-indireta:** é caracterizada pela distribuição luminosa inversa ao sistema semi-direta, ou seja, quando a maior parte do fluxo luminoso é direcionada para cima da luminária (60% a 90%), e o restante é direcionado para baixo;

•**Indireta:** sistemas óticos classificados como indiretos são aqueles cujo fluxo luminoso é predominantemente ascendente (90% a 100%) iluminando o teto e a parte superior das paredes.

Através das curvas de distribuição luminosa, é possível a identificação das luminárias que são mais comumente utilizadas em determinados tipos de ambientes, em função da distribuição da luz. Segundo Iwashita (2004), a iluminação direta, por exemplo, é o tipo de iluminação mais utilizada em aplicações comerciais e é a mais eficiente energeticamente, por concentrar maior quantidade de luz no plano de trabalho. No entanto, deve-se ter cuidado com o ofuscamento.

Dessa forma, cabe ao projetista escolher a luminária de acordo com a classificação e a curva de distribuição luminosa mais adequada ao ambiente. Para tanto, é necessário discernir a melhor opção de luminária, levando-se em consideração a otimização do rendimento luminoso, dos níveis de ofuscamento, de reflexo, do nível de iluminamento e eficiência e as características do ambiente.

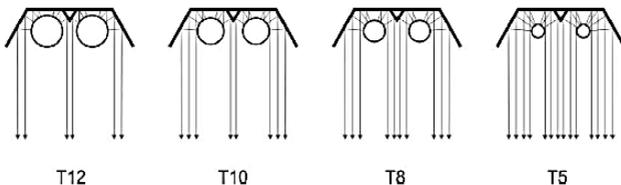
#### **2.4.1.3 Rendimento ou Eficiência da luminária**

A eficiência de uma luminária pode ser obtida pela relação entre o fluxo de luz emitido pela mesma e o fluxo de luz emitido pela lâmpada. Como geralmente a lâmpada é instalada dentro de luminárias, o Fluxo Luminoso final que se apresenta é menor do que o irradiado pela lâmpada, devido à absorção, reflexão e transmissão da luz pelos materiais com que são construídas (OSRAM, 2008).

Caso a luminária não disponha de um refletor adequado para a lâmpada ou o refletor não seja de boa qualidade de reflexão, grande parte do fluxo da lâmpada não será refletido no ambiente e conseqüentemente haverá desperdício de luz e baixo rendimento luminoso. Segundo Ghisi (1997), a forma das luminárias, a existência ou não de aletas, o material e o tipo de pintura do refletor são os componentes que mais influenciam na eficiência da luminária. Góven (1997) mostra que o uso de um material mais reflexivo pode melhorar o potencial de economia de energia numa instalação.

A análise de catálogos de fabricantes de luminárias mostra que as luminárias com maiores rendimentos são aquelas sem componentes de controle de luz. Estes diminuem o rendimento da luminária na medida em que absorvem, refletem e transmitem a luz pelos materiais utilizados na sua composição (IWASHITA, 2005). Uma luminária com refletor e sem aletas da marca *LightGroup*, modelo IDL 2404, apresenta rendimento de 87,6%; já uma luminária da mesma marca modelo BNI 3312, com aletas, apresenta um rendimento de 71,1%. No entanto, apesar do rendimento inferior, esta possui controle de ofuscamento, através da presença de aletas.

As características das lâmpadas também influenciam no rendimento das luminárias, principalmente em relação ao bulbo. A Figura 19 mostra que quanto menor o bulbo, maior será o rendimento, uma vez que os bulbos com menores diâmetros possibilitam maior reflexão do fluxo luminoso (IWASHITA, 2004).



**Figura 19:** Reflexão da luz com a redução do diâmetro das lâmpadas. Fonte: Iwashita (2004)

Desta forma, na especificação de uma luminária, o rendimento ou eficiência deve ser ponderado, analisando-se a distribuição luminosa e o grau de controle de ofuscamento que a luminária deve possuir para a atividade a ser desenvolvida. Recomenda-se, portanto, que o rendimento seja considerado para comparar luminárias do mesmo tipo e para mesma aplicação (IWASHITA, 2004).

## 2.5 ANÁLISE DE DESEMPENHO DO SISTEMA DE ILUMINAÇÃO

A análise do desempenho do sistema de iluminação consiste em avaliar a quantidade de luz disponibilizada, levando em consideração o tipo de atividade que se desenvolve no ambiente, as condições para a realização dessas atividades, a escolha adequada do tipo de lâmpada e luminária e os custos do sistema. Antes de iniciar a discussão sobre trabalhos que analisam os sistemas de iluminação, é necessário o conhecimento dos aspectos que são considerados nestas avaliações.

### 2.5.1 Qualidade da iluminação

#### Níveis de iluminância

No Brasil, a norma NBR 5413 – Iluminância de interiores-recomenda valores médios mínimos de iluminância de acordo com a atividade visual, considerando a idade dos usuários, a velocidade e precisão da tarefa e a refletância da superfície. Define também que a iluminação em qualquer ponto do ambiente não deve ser inferior a 70% da iluminância média de referência estipulada. Esta norma está sendo revisada, baseada a norma europeia EN 12464 (CEN, 2002).

A distribuição dos níveis de iluminação no interior do ambiente pode ser apresentada através de mapas de curvas de iluminância - *isolux*. Assim, as curvas *isolux* definirão áreas que se apresentam dentro de um mesmo intervalo de iluminação. É possível a análise de desempenho através de zonas de iluminação, onde intervalos de iluminâncias são definidos de acordo com critérios qualitativos.

Kremer (2002) propôs critérios para a definição destes intervalos. Tomando como base o valor de iluminância média de referência (no caso 500 lux) e a recomendação de 70% da norma NBR5413, definiu intervalos para classificação de 5 zonas de iluminância. Utilizando como critério de 70% e 130% da iluminância média para determinação do limite inferior e superior, respectivamente, define-se a região de iluminância suficiente (350 a 650 lux). Todavia, de acordo com a norma, 300 lux ainda podem ser considerados como um valor mínimo admissível. Assim, propõe-se a

criação de uma zona de transição inferior. Esta zona intermediária está situada entre a zona insuficiente e a suficiente (300 a 349 lux). Sabendo que até 1000 lux não é indesejável para o conforto visual, este é o limite superior da zona de transição superior. Valores abaixo de 300 lux são classificados na zona com iluminância insuficiente e valores acima de 1000 lux na zona com iluminância excessiva, conforme Tabela 5:

**Tabela 5:** Classificação das zonas por intervalo de iluminância

Intervalo de iluminância	Zona	Classificação
< (70% EM – 50 lux)	Insuficiente	Ruim
(70% EM – 50 lux) a 70% EM	Transição inferior	Regular
70% EM a 130%EM	Suficiente	Aceitável
130%EM a 1.000 lux	Transição superior	Bom
> 1.000 lux	Excessiva	Ruim

Fonte: adaptado de Kremer (2002)

## Uniformidade

A uniformidade de uma iluminação é medida pela razão entre a iluminância mínima ( $E_{\min}$ ) e a média aritmética das iluminâncias ( $E_{\text{méd}}$ ) obtidas na área iluminada. Este parâmetro depende do tipo e arranjo das luminárias, da geometria do sistema de iluminação e do tipo de superfícies que é iluminada, sendo um parâmetro importante para o conforto e o desempenho visual.

Segundo Mamede (2007), valores para a uniformidade acima de 0,33 são aceitáveis, mas na prática devem estar próximos de 0,7. A revisão da norma brasileira NBR5413 mostra que o conceito de uniformidade deve se alterar gradualmente na tarefa e no entorno imediato. Recomenda-se que a uniformidade da iluminância na tarefa não seja menor que 0,7 e a da iluminância no entorno imediato não seja inferior a 0,5.

### 2.5.2 Avaliação de consumo

A análise de consumo pode ser realizada sob vários aspectos: comparação entre sistemas alternativos, avaliação do potencial de conservação de energia, a avaliação dos procedimentos de manutenção necessários ao sistema de iluminação, a análise de custo benefício, dentre outros.

## Potência Total Instalada

O consumo de energia de uma instalação de iluminação é fortemente dependente dos sistemas de controle. No entanto, a carga de energia elétrica de uma instalação de iluminação é frequentemente a primeira medida significativa para o consumo de energia (RYCKAERT et al, 2010). A potência instalada ( $P_t$ ) é a somatória da potência de todos os aparelhos instalados na iluminação, expressa em quilowatts, aplicando-se portanto o quociente 1000 na Equação 7. Ressalta-se que potência instalada e consumo de energia são conceitos diferentes.

$$P_t = \frac{N.W}{1000} \quad \text{Equação 7}$$

**P<sub>t</sub>** é a potência total instalada, em kW;

**N** é a quantidade de lâmpadas;

**W** é a potência consumida por: luminária + lâmpadas + acessórios.

Além da quantidade de lâmpadas, a  $P_t$  é influenciada pelas características das luminárias. Ghisi & Lamberts (1998) obtiveram conclusões a respeito da influência das características reflexivas de determinados tipos de luminárias na potência instalada do sistema de iluminação. Concluíram que, em geral, as luminárias com refletores confeccionados em alumínio e sem aletas apresentam a melhor eficiência. A substituição de luminárias com refletor de alumínio sem aletas por outros tipos acarretam um acréscimo na carga instalada em iluminação, conforme pode ser visto na Tabela 6.

**Tabela 6:** Percentual de redução da carga instalada em relação ao tipo de luminária

Tipo de luminária	Redução na carga instalada (%)
Refletor branco com difusor	0,0
Refletor branco sem aletas	15,2
Refletor e aletas em alumínio	18,9
Refletor e aletas brancos	19
Refletor de alumínio e aletas brancas	31,9
Refletor de alumínio sem aletas	34,6

Fonte: GHISI & LAMBERTS, 1998

Apesar da luminária confeccionada em refletores de alumínio e sem aletas apresentar a melhor eficiência, nem sempre é a mais

indicada para a iluminação de determinados ambientes, pois pode não apresentar um direcionamento do fluxo luminoso compatível com o ambiente a ser iluminado, o que pode ser observado através da sua curva de distribuição luminosa (ver item 2.4.1.1), assim como também pode provocar sensações de ofuscamento.

### Densidade de Potência

A comparação entre projetos luminotécnicos só se torna efetiva quando se considera níveis de Iluminância iguais para diferentes sistemas. Assim, um sistema luminotécnico só é mais eficiente do que outro, se consumir menos watts por metro quadrado, mantendo um mesmo nível de Iluminância. O parâmetro que permite esta comparação é a densidade de potência, definida pela Equação 8:

$$D = \frac{Pt.1000}{A} \qquad \text{Equação 8}$$

onde:

**D** é a densidade de potência (W/m<sup>2</sup>)

**A** é a área (m<sup>2</sup>)

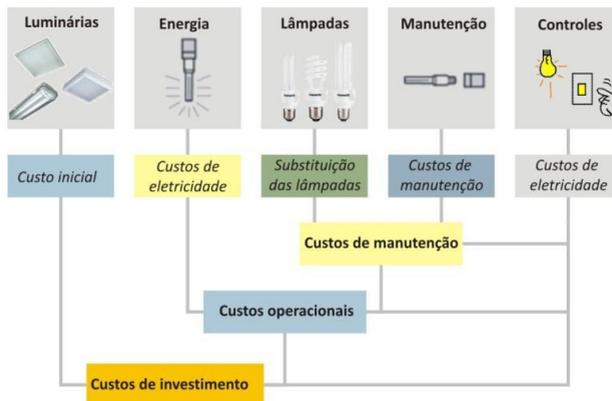
A densidade de potência representa uma ferramenta de normalização para limitar o consumo de energia elétrica. O RTQ-C utiliza esta variável, estabelecendo valores limites médios de densidade de potência a serem atendidos. Na sua primeira versão de 2008, estudos apontaram limitações encontradas para a sua aplicação, como limitações no método de cálculo do sistema (Método dos lumens) e a consideração da iluminância inferior da norma brasileira NBR 5413 (ABNT, 1992) para a definição dos limites de potência instalada, fazendo com que projetos que adotem níveis maiores apresentem menor eficiência, conforme o regulamento (RIBEIRO & CARLO, 2011).

Deve-se, no entanto, ressaltar que as restrições impostas pelos códigos de energia não devem servir como limitações para a prática de projeto, e sim, como uma ferramenta de auxílio na busca da eficiência em iluminação, que muitas vezes é reduzida a critérios de iluminação simples expressos em termos quantitativos, por critérios principalmente econômicos.

## Análise de custos

Lam (1986, pag.6) destaca que “um projeto sem considerar os custos de energia é semelhante à agricultura, sem considerar o abastecimento de água”. Custo é sempre uma preocupação para qualquer projeto, sendo de extrema importância sua consideração desde o início do processo (BOYCE & RAYNHAM, 2009).

Apenas um bom projeto de iluminação não é suficiente. A operação e a manutenção da instalação de iluminação devem ser bem administradas, para se evitar perdas de energia desnecessárias. A utilização inadequada da iluminação pode gerar consequências do ponto de vista econômico, como gastos excessivos de energia e maiores custos de instalação e manutenção. A Figura 20 mostra os principais custos referentes ao projeto de iluminação.



**Figura 20:** Custos referentes ao sistema de iluminação. Fonte: Adaptado de LiTG. (s.d.)

O **custo de investimento** é a somatória dos custos de aquisição de todos os equipamentos que compõem o sistema, tais como lâmpadas, luminárias, reatores, transformadores, e a fiação, acrescidos dos custos de mão de obra dos profissionais envolvidos. Os **custos operacionais** referem-se à somatória de todos os custos apresentados após a completa instalação do sistema, como custos de manutenção de energia. O **custo de manutenção** engloba o custo de aquisição de novas unidades e o custo da mão de obra necessária a executar a manutenção, resultando na soma das horas mensais de utilização das lâmpadas dividida pela sua vida útil.

### 2.5.3 Estudos de avaliação de desempenho do sistema de iluminação

Encontram-se na literatura diversos estudos que abordam a análise de desempenho dos sistemas de iluminação: sistemas de *retrofit*, substituindo o sistema de iluminação existente por um mais eficiente; comparação entre tipos de luminárias e avaliações de consumo energético através do sistema de controles. Em estudo comparativo entre 14 sistemas de iluminação em escritórios de planta livre utilizando o programa *Lightscape*, Newsham & Sander (2003) realizaram simulações combinando parâmetros como altura de suspensão das luminárias e refletância das superfícies. Na análise entre luminárias diretas parabólicas, luminárias indiretas e diretas/indiretas, verificaram para luminárias parabólicas diretas, os níveis de iluminância são menos afetados pelo aumento na altura da suspensão das luminárias.

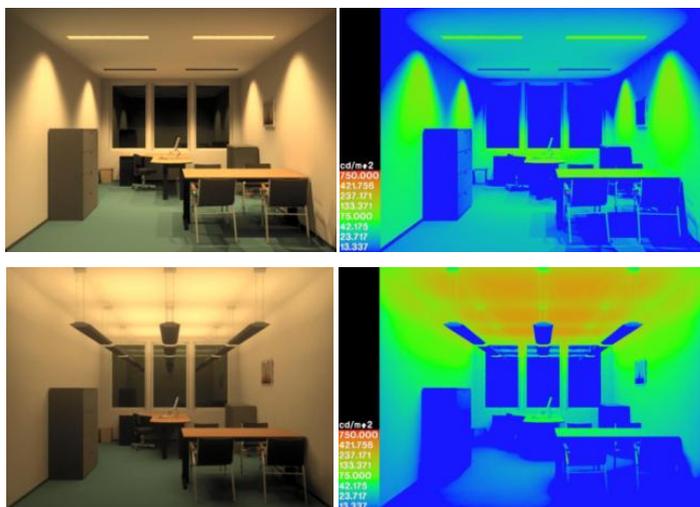
Iwashita e Saidel (2005) analisaram alguns tipos de luminárias comerciais, lâmpadas e reatores em relação ao desempenho energético, de acordo com dados fornecidos pelos fabricantes. No caso das luminárias comerciais, a análise do desempenho fotométrico mostra que, maneira geral, que as luminárias com refletor de alumínio representam os maiores rendimentos (média de 81%). Já as luminárias com aletas parabólicas e com difusor, são as que apresentaram os mais baixos rendimentos (61% e 64% respectivamente). Segundo os autores, a dificuldade em encontrar informações relevantes para a elaboração e dimensionamento adequados de projetos luminotécnicos é uma reclamação recorrente de pesquisadores da área.

Uma análise econômica é apresentada por Gugel e Westphal (2006), que verificaram o custo, de aquisição dos conjuntos (luminária + 2 lâmpadas fluorescentes tubulares + reator) na cidade de Florianópolis/SC e o custo do consumo de energia elétrica e da substituição das lâmpadas após a vida útil para quatro sistemas de iluminação. Verificou-se que o menor valor presente entre os sistemas é o que contempla lâmpadas de 28W com luminárias com refletor e aletas e com os preços reduzidos (licitados), seguidos do sistema com lâmpadas de 32W e com luminárias sem refletores.

Shiga et al (2008) desenvolveram um estudo de *retrofit* no sistema de iluminação artificial em instalações de uma universidade. O

sistema de iluminação existente (lâmpadas FLC de 110W) foi substituído por um mais eficiente (lâmpadas FLC T5 de 54W). Como resultado, o sistema *retrofit* resultou em maiores níveis de iluminância e redução de consumo de energia.

Alguns sites na internet disponibilizam ferramentas para comparação entre diferentes projetos. A Figura 21 mostra um exemplo retirado do site "[http://sts.bwk.tue.nl/artificial\\_light/](http://sts.bwk.tue.nl/artificial_light/)", com projetos de iluminação distintos para o mesmo ambiente. O sistema direto oferece níveis de iluminâncias mais elevados e consome menos energia ( $4 \times 2 \times 28W = 224W$ ); já o sistema com iluminação indireta consome mais energia ( $9 \times 1 \times 35W = 315W$ ) e possui níveis de iluminância baixos.



**Figura 21:** Diferença entre iluminação direta e indireta: Sob iluminação direta os níveis de iluminância são maiores e o consumo de energia é reduzido. Fonte: [http://sts.bwk.tue.nl/artificial\\_light/](http://sts.bwk.tue.nl/artificial_light/)

Shailesh e Raikar (2010) compararam dois diferentes esquemas de iluminação com luminárias fluorescentes (com e sem luz natural) e outro com luminárias LED com aproveitamento da luz natural, usando sistemas de controle. Através de simulação computacional com o programa *Relux*, analisaram a uniformidade da distribuição das iluminâncias e custos. Verificaram que apesar de mais caras para aquisição, as luminárias LED são eficientes quanto à distribuição uniforme sobre o plano de trabalho e possuem maior vida útil.

Fotios & Cheal (2011), com o uso de fontes de luz com diferentes distribuições e potência para iluminação exterior, mostraram que algumas fontes de luz geram percepções de maior brilho e maior segurança do que outras, bem como uma aparência mais preferida de cores. Estes resultados apoiam a idéia de que é possível usar algumas fontes de luz ao ar livre a uma menor iluminância do que outros e, portanto, um menor consumo de energia, preservando ou mesmo aumentando a satisfação das pessoas com a iluminação.

Percebe-se que o profissional, ao definir o sistema de iluminação, influi de forma marcante no ambiente, gerando efeitos visuais e quantitativos adequados ou não às necessidades de conforto lumínico e energético para o desempenho das atividades.

## **2.6 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA ILUMINAÇÃO**

O uso de programas de simulação vem ganhando importância no campo da construção civil devido à crescente procura por ambientes confortáveis energeticamente eficientes, aumentando a busca por estes tipos de avaliações de desempenho e fazendo surgir uma série de programas com tais finalidades.

Devido a esta demanda, um número crescente de programas de simulação de iluminação está sendo propostos constantemente. Uma questão a ser analisada, sob esse aspecto, é a avaliação das informações produzidas por estes programas. Segundo Carvalho (2009), existem poucas informações disponíveis sobre a precisão e aplicabilidade, muitas vezes resultando em avaliações equivocadas da construção quando comparada com os objetivos do projeto original, (por exemplo, o consumo de energia e conforto dos ocupantes).

A Comissão Internacional de Iluminação (CIE, *Commission Internationale de l'Éclairage*) elaborou um relatório com estudos de caso a serem testados em programas de simulação de iluminação, a fim de avaliar a confiabilidade dos resultados obtidos em simulações computacionais, o relatório CIE 171:2006 (CIE, 2006). Sendo assim, diversos trabalhos foram realizados a fim de validar os programas de simulação da iluminação natural e artificial (MAAMARI et al., 2006; CHRISTAKOU, 2004; CARVALHO, 2009; PEREIRA, 2008, CUNHA, 2011; MORAES & CLARO, 2011) provando a confiabilidade dos programas para se estudar o comportamento da iluminação.

### 2.6.1 Simulação da iluminação natural

A análise da iluminação natural através de simulação computacional pode ser realizada de maneira estática ou dinâmica. Uma simulação estática verifica a distribuição da luz natural para um dia e hora específicos e expressa resultados na forma de imagens foto realísticas ou valores de iluminância, em relação a um céu de referência, como o *Daylight Factor* (DF) e valores de iluminância. Já as simulações dinâmicas permitem a avaliação do desempenho da luz natural ao longo do ano, utilizando dados de radiação local, hora a hora, que podem ser obtidos através de arquivos climáticos anuais.

Os métodos de cálculo mais utilizados são: *Radiosity* (Radiosidade) e *Ray-tracing* (raio traçado). O método da radiosidade é usado para modelar a interação da luz entre superfícies difusoras, já o *Ray tracing* adiciona destaques, reflexões, efeitos especulares e transparências. O programa APOLUX, desenvolvido por Claro (1998), trabalha com simulação estática e com o método da radiosidade, utilizando o algoritmo de cálculo para iluminação natural batizado como Modelo vetorial Esférico, proposto por Claro (1998), que já foi validado por Carvalho (2009), Pereira (2008) e Cunha (2011). O programa calcula e representa a luz natural em espaços arquitetônicos (abertos e fechados), usando arquivos tridimensionais gerados em editores gráficos em formato DXF. Outra ferramenta brasileira de simulação da iluminação é o programa TROPLUX, que se baseia em três conceitos fundamentais: o método Monte Carlo, o método do raio traçado e o conceito de coeficientes de luz natural (CABÚS, 2002).

O programa *Daysim* (desenvolvido pelo *National Research Council Canada – NRCC*) utiliza o algoritmo do programa *Radiance*, que utiliza o método do raio traçado (*Raytracing*). O programa calcula o perfil anual de iluminação, o que viabiliza o tempo de simulação para todas as horas do ano, evitando a necessidade de simular todas as condições de céu (REINHART, 2006). O programa permite o cálculo do *Daylight Factor* (DF), e de medidas dinâmicas para cada ponto de referência. Ressalta-se também que existem sites como o *Building Energy Tools Directory*<sup>6</sup>, mantido pelo Departamento de Energia dos

---

<sup>6</sup> [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools\\_directory/](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/tools_directory/)

EUA, que apresenta uma base de dados com informações sobre mais de 400 programas de simulação disponíveis.

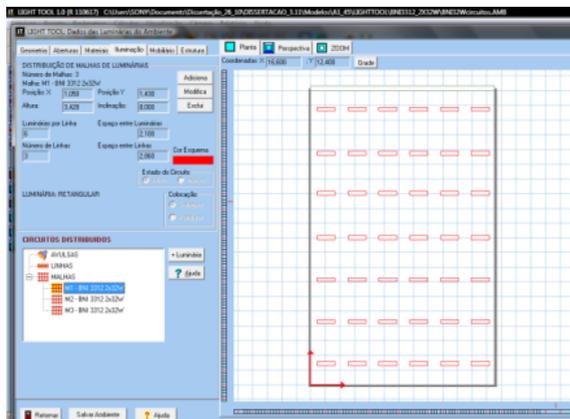
### 2.6.2 Simulação da iluminação artificial

Quanto ao método de cálculo da simulação da iluminação artificial, o mais comum é o da intensidade (ponto a ponto), seguido do cálculo da radiosidade. Dentre os programas, destacam-se o *Dialux*, *Relux* e *LightTool*, devido ao método de cálculo de iluminação integrada (natural + artificial) e disponibilidade gratuita na Internet.

O *Dialux* (disponível em [www.dial.de](http://www.dial.de)) apresenta visualização 3D fotográfica realística do ambiente. Importa e exporta arquivos DXF e DWG de todos os *softwares* CAD disponíveis no mercado, assim como permite a construção de modelos no próprio programa. Apresenta uma biblioteca de curvas fotométricas de luminárias de diferentes fabricantes. O *Relux* (disponível em [www.relux.biz](http://www.relux.biz)) possui processo de modelagem similar ao *Dialux*. É um aplicativo que possui biblioteca de materiais, objetos de mobiliário, vegetação e luminárias. As luminárias podem ser inseridas a partir do banco de dados existente no programa ou por seleção *on-line* através de uma caixa de diálogo na qual são fornecidas as informações do fabricante, o modelo da luminária com foto e as propriedades fotométricas das lâmpadas.

O *LightTool* (disponível em [www.lightgroup.com.br](http://www.lightgroup.com.br)) avalia a iluminação natural e artificial por meio da troca de radiações entre superfícies opacas e difusas (MORAES & CLARO, 2011). Possui uma ferramenta própria de modelagem, não necessitando de interface com outros programas. O programa inicia o procedimento de cálculo com o cálculo da visibilidade (fator de forma), associada fundamentalmente à geometria do ambiente. O programa oferece 5 graus de refinamento de visibilidade pré-definidos, utilizados conforme necessidade de detalhamento, que varia de **muito baixa** a **muito alta**. A próxima etapa é o cálculo da iluminação, que considera a radiosidade (de 3 e 40 ciclos de radiosidade), um modelo de troca de energia através da radiação eletromagnética.

O programa permite carregar arquivos digitais no formato IES de diferentes tipos de luminárias, sendo possível visualizar todo o conjunto de suas informações. As luminárias são inseridas através de coordenadas, conforme Figura 22.



**Figura 22:** Exemplo de definição das luminárias no programa *LightTool* e sistema de locação das luminárias

Para garantir a confiabilidade dos resultados, o programa foi testado de acordo com o Relatório Técnico da CIE: 171:2000 (MORAES & CLARO, 2011). O programa utiliza o mesmo algoritmo de cálculo para iluminação natural do programa APOLUX (CLARO, 1998), que já foi validado por Carvalho (2009), Pereira (2008) e Cunha (2011). Portanto, os protocolos do Relatório Técnico utilizados para validação referem-se à avaliação da simulação da iluminação artificial, uma vez que a validação da iluminação natural já foi realizada. Foram utilizados três protocolos, cada dedicado a um aspecto particular da iluminação artificial, conforme Tabela 7:

**Tabela 7:** Descrição dos Protocolos testados

<b>Protocolo 4</b>	Verificação da consistência do algoritmo de cálculo da luz artificial, assim como a conservação do fluxo luminoso que deixa a luminária e atinge as superfícies do ambiente.
<b>Protocolo 5.2</b>	Avaliação da capacidade do programa para calcular a iluminância direta de uma fonte pontual de luz descrita por um arquivo fotométrico.
<b>Protocolo 5.8</b>	Verificação da consistência da equação da radiosidade, que computa o acréscimo de luz nas superfícies em função das inter-reflexões luminosas.

Para o Protocolo 4 foi realizada a comparação dos resultados com o *Relux* e *Dialux*. Os modelos foram simulados e comparados aos dados de referência fornecidos pelo Relatório Técnico CIE, obtidos

através de medições experimentais em cenários reais (Protocolo 4) e de cálculos analíticos (Protocolo 5.2 e 5.8). O *LightTool* apresentou nos testes, tanta confiabilidade quanto os outros dois programas, sendo que o algoritmo de cálculo do *LightTool* conduziu a resultados bastante próximos ao do *Relux*. Os resultados dos testes permitiram tirar conclusões quanto à capacidade do programa *LightTool* para simular com confiabilidade os diferentes aspectos de propagação da iluminação.

## **2.7 CONSIDERAÇÕES SOBRE A REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A revisão da literatura deste trabalho teve como objetivo apresentar alguns conceitos teóricos que fazem parte do tema em estudo, assim como algumas das pesquisas realizadas nesta área. Diante do exposto, verifica-se que a questão do projeto integrado de iluminação é ainda incipiente, com dificuldades de integração entre a prática projetual e os avanços relatados no meio científico. Muitos trabalhos apontam o potencial do aproveitamento da luz natural para reduções de consumo de energia. Por outro lado, existem também muitas informações a respeito de lâmpadas e luminárias, assim como análises comparativas entre diferentes equipamentos, relacionadas principalmente ao desempenho e eficiência energética.

A diversidade de luminárias existentes e a vasta gama de critérios para se fazer um projeto de iluminação eficiente, possibilita inúmeras maneiras de se projetar o sistema de iluminação. Conforme visto, o projeto de iluminação é uma tarefa complexa, devido à necessidade de satisfazer diversos critérios, que muitas vezes entram em conflito uns com os outros. Assim, por exemplo, a posição de luminárias pode ter impactos decisivos sobre vários critérios, bem como no consumo de energia do sistema de iluminação.

No entanto, no levantamento de estudos para a revisão da bibliografia deste trabalho, percebeu-se que a maioria dos trabalhos que tratam da iluminação artificial se restringe a análises entre diferentes luminárias com foco na eficiência energética alcançada pelos sistemas (IWASHITA & SAIDEL, 2004; IWASHITA, 2004; MARINOSKI, 2001; GUGEL & WESTPHAL, 1998; FERREIRA ET AL, 2010; CARLO & RIBEIRO, 2011).

A partir das referências, identificaram-se alguns critérios para a elaboração do projeto de iluminação geral baseada no Método dos Lúmens, relacionados à localização das luminárias, espaçadas regularmente no teto. Porém, trabalhos (SHIKDER, 2010, CASSOL, 2009 e 2011 e SANTOS 2010) mostraram que a uniformidade de distribuição da iluminância no plano de trabalho não está relacionada à distribuição uniforme das luminárias no teto. No entanto, as metodologias apresentadas nestes trabalhos utilizam algoritmos de otimização, muito complexos, utilizando formulações matemáticas complicadas, inaplicáveis à prática projetual. Além disso, não foi encontrado nenhum trabalho dentro do conceito de otimização que considerou o aproveitamento da iluminação natural.

Ainda em relação aos processos de otimização, o balanço entre o número de luminárias, a distribuição e a potência das mesmas e a uniformidade da iluminância fazem com que a melhor configuração fique atrelada às necessidades do projeto, principalmente por aspectos visuais e estéticos. Essas propostas de distribuição podem não ser bem aceitas caso o projetista busque valor estético para o ambiente. Desta forma, cabe ao projetista decidir sobre a melhor configuração do projeto de iluminação, assim como a escolha eficiente dos equipamentos utilizados. Para isso, é necessário que o projetista tenha conhecimento das alternativas disponíveis, para assim decidir os componentes e o conceito do sistema de iluminação, que influem significativamente na sua eficiência e qualidade.

Percebe-se que a questão do projeto de iluminação está em constante evolução, na tentativa de se definir critérios que conduzam a um projeto eficiente do ponto de vista qualitativo e quantitativo. Percebe-se a necessidade de estudos que aproveitem o potencial oferecido pela iluminação natural na elaboração do projeto de iluminação artificial, assim como critérios para a escolha e a distribuição das fontes de luz.

Estas constatações são importantes para o desenvolvimento desta pesquisa, já que mostram que a prática de projeto atual possui aspectos que podem ser otimizados, se melhor conhecidos.

### 3. METODOLOGIA

A metodologia adotada é baseada na avaliação e comparação de níveis de iluminância, uniformidade de distribuição e estimativa de consumo de energia de sistemas de iluminação artificial, através de resultados obtidos por simulação computacional. Neste trabalho, considera-se que a questão da disponibilidade de luz natural possui estudos que caracterizam satisfatoriamente o seu potencial. Neste sentido, procura-se realizar o processo de projeto de iluminação artificial, buscando compreender como considerar esta disponibilidade, assim como avaliar os resultados. Esta abordagem é facilitada pelas possibilidades oferecidas pelos recursos computacionais, que são ferramentas poderosas de auxílio ao projetista, possibilitando estudos com agilidade e precisão.

As etapas metodológicas utilizadas estão apresentadas na sequência.

Primeiramente, são construídos modelos-base, localizados na cidade de Florianópolis/SC. Através de simulação computacional com o programa *Daysim*, são estimadas disponibilidades de iluminação natural no interior dos modelos. De acordo com a distribuição da luz natural, são propostas zonas de iluminação, com o intuito de integrar os sistemas de iluminação natural e artificial através da divisão de circuitos de acionamento, que influenciarão na análise de aproveitamento da luz natural e consumo energético.

Definidas as zonas, são selecionadas luminárias para compor as diferentes alternativas de sistemas de iluminação artificial. Primeiramente, para que se possa ter uma idéia da quantidade de luminárias necessárias para atingir os níveis de iluminâncias determinados por norma, é utilizado o Método dos Lúmens. A partir desta definição, são elaborados novos sistemas, diferenciados pelas fotometrias das luminárias e disposições das mesmas. Inicialmente, para cada novo sistema proposto são avaliados níveis de iluminância e uniformidade de distribuição. Este procedimento é realizado para cada linha selecionada de luminárias e, dentro de cada linha, para cada tipo escolhido. Os projetos que, para cada tipo / linha, obtiveram melhor desempenho diante dos parâmetros analisados, são selecionados e avaliados quanto ao consumo energético.

A Figura 23 apresenta a síntese da metodologia adotada neste trabalho.

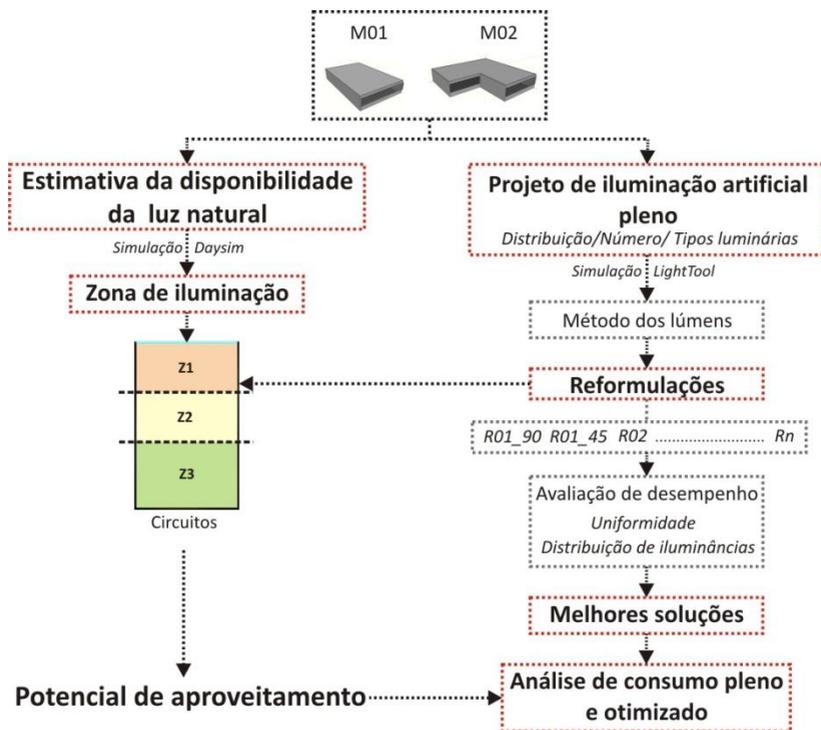


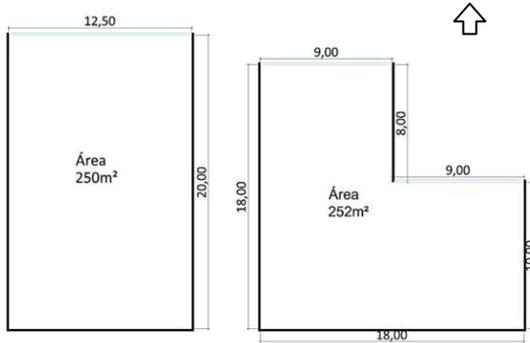
Figura 23: Esquema metodológico

### 3.1 MODELOS DE ANÁLISE

São propostos dois modelos hipotéticos de escritórios de planta livre, sem mobília, e com grande área e profundidade, com o intuito de se obter maior variação nos níveis de iluminação natural e permitir maior grau de variabilidade na distribuição das luminárias de cada reformulação. O modelo 01 (M01) é um ambiente retangular de abertura unilateral voltada para o Norte, com área de 250m<sup>2</sup>. O modelo 02 (M02) é um ambiente em formato “L”, com duas aberturas na mesma fachada, e uma área de 252m<sup>2</sup>, conforme Figura 24.

A adoção de um modelo em forma de “L” procura avaliar a aplicação do Método dos Lúmens e a concepção do projeto luminotécnico para ambientes irregulares. Isto porque programas

computacionais que concebem o projeto luminotécnico através do Método dos Lúmens, gerando uma distribuição uniforme das luminárias automaticamente, como o *Softlux* e *Winelux*<sup>7</sup>, só realizam os cálculos para ambientes retangulares ou quadrados.



**Figura 24:** Geometrias dos modelos de ambiente

Como o objetivo é avaliar os sistemas de iluminação artificial a partir de uma disponibilidade de luz natural, e não esta propriamente dita são utilizadas apenas duas variações de modelos. Os mesmos modelos são utilizados tanto para as simulações de iluminação natural quanto para todos os sistemas de iluminação artificial propostos. Os dados resultantes das simulações são obtidos através de uma malha de pontos regular de 0,5m x 0,5m, situada a 0,75m acima do nível do piso.

Quanto às características físicas dos materiais das superfícies internas, teto, piso e paredes são definidos como difusores opacos. As refletâncias das superfícies são definidas com base nas tabelas do Fator de utilização (*Cu*) dos fabricantes das luminárias, conforme item 2.3.2, devido ao fato de se utilizar o Método dos Lúmens para a estimativa do número de luminárias. Cada modelo de luminária possui valores para o índice do ambiente (*K*), fornecidos nas tabelas dos catálogos dos fabricantes, que variam de acordo com a geometria do ambiente e com as refletâncias das superfícies, dadas através de três algarismos que representam as refletâncias do teto, paredes e piso respectivamente. Para este estudo, o teto apresenta 70% de reflexão, as paredes 50% e o piso 10%, sendo o valor das refletâncias caracterizado como 751.

<sup>7</sup> *Programas computacionais para cálculo luminotécnico disponíveis gratuitamente na internet. Softlux: disponível em <http://www.itaimiluminacao.com.br>. Winelux: disponível em <http://www.eee.pt/pt1/downloads>.*

### 3.1.1 Aberturas e proteção solar

Para efeito de uma hipótese de disponibilidade de luz natural mais consistente, consideraram-se os modelos localizados em Florianópolis, com utilização genérica de espaço de escritório, sem *layout* especificado, com um nível arbitrado de iluminância de 500 lux.

As aberturas correspondem a janelas em fita, com largura equivalente à largura das fachadas e com orientação Norte. Tomando-se como base a consideração de Didoné (2009), que quanto mais abundante é a luz natural no ambiente e menor é o consumo com iluminação artificial, decidiu-se por adotar um percentual de abertura na fachada (PAF) médio, de 50%. Tal consideração deve-se ao fato de que a disponibilidade de luz natural estimada para este trabalho é referente a apenas dois modelos, sem variações paramétricas como tamanho de janela, pé direito ou geometria do ambiente. A altura do pé-direito foi fixada em 3m para ambos os modelos.

Parte-se do pressuposto do controle da radiação solar direta no interior do ambiente, para fins de projeto luminotécnico, com o objetivo de evitar que o usuário feche as cortinas e influencie na admissão de luz natural. Assim, adota-se uma configuração de protetores solares horizontais, compostos por quatro elementos, conforme estudo de Fiuza (2004), e dois protetores verticais nos limites da janela, com dimensões de 0,5 m x 1,5 m (altura da janela) (Figura 25). As placas horizontais possuem dimensões de 0,50m x dimensão da janela, intercaladas a cada 0,5m, atendendo às necessidades de sombreamento nos horários críticos, conforme as máscaras solares apresentadas na Figura 26. Para simulação, consideram-se brises com refletância de 50%.

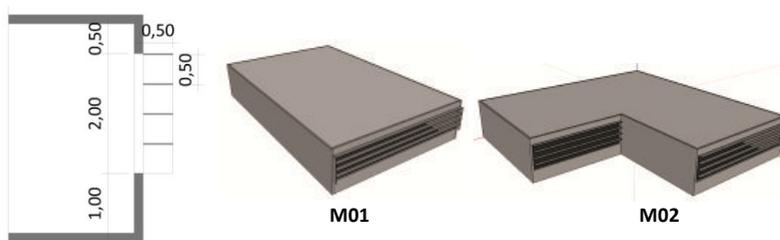
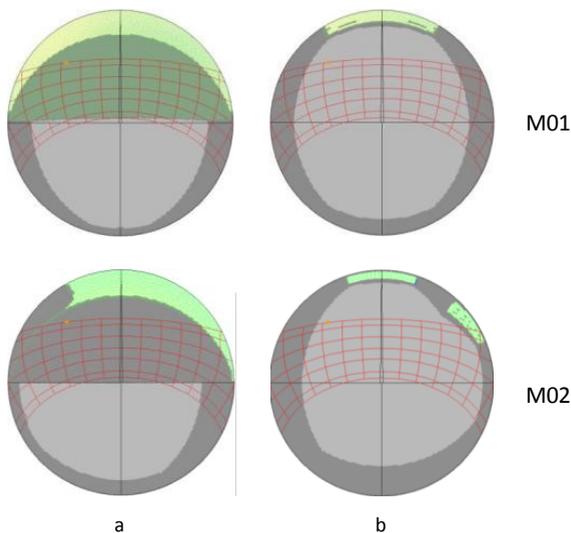


Figura 25: Corte e perspectivas dos protetores solares



**Figura 26:** Máscaras solares: (a) ponto no peitoral da janela (b) ponto no centro do ambiente

### 3.2 FERRAMENTAS DE CÁLCULO

Para estimar a disponibilidade de luz natural é utilizado o programa de simulação dinâmica *Daysim*. Os modelos são construídos no programa *Sketchup* (disponível em <http://www.sketchup.com/>) onde são definidas as propriedades dos materiais e a orientação (Norte). As simulações são realizadas com o uso de um arquivo de dados climáticos do tipo *TRY* (*Test Reference Year*) que contém dados anuais, dispostos dia a dia / hora a hora. Para este trabalho foi adotado como dado de entrada o arquivo climático TRY de referência para a cidade de Florianópolis/SC, disponibilizado no site do Laboratório de Eficiência Energética em Edificações (LabEEE) da Universidade Federal de Santa Catarina (<http://www.labeee.ufsc.br>). Os modelos foram simulados todos os dias úteis do ano (de segunda-feira a sexta-feira) em intervalos de 60min, das 08h00minh às 18h00minh, totalizando 2.080h anuais de ocupação ( $T_u$ ).

O programa *LightTool* foi escolhido como ferramenta de simulação da iluminação artificial, devido ao constante suporte técnico e possibilidade de adaptação do programa, direcionado para as

necessidades do trabalho. Foram utilizadas as seguintes configurações de simulação: Resolução ALTA com 40 ciclos de radiosidade (Grau de Refinamento Geométrico: ALTO e Grau de Refinamento Visual: ALTO), o que permite uma alta precisão nos resultados.

### **3.3 ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE DA LUZ NATURAL**

Como apresentado anteriormente, o aproveitamento da luz natural de forma adequada pode economizar grande parte dos custos de energia. No entanto, na prática, a distribuição da iluminação no espaço interno não é homogênea, e nem todo ambiente recebe a quantidade desejada de luz natural devido à orientação da edificação, às dimensões do ambiente e das aberturas, dentre outros fatores. Portanto, há uma exigência de iluminação artificial como complemento durante as horas do dia em que a iluminação natural por si só não fornece níveis suficientes de iluminação.

Para a estimativa da disponibilidade da iluminação natural para os dois modelos em análise neste trabalho adota-se um conceito de zoneamento da luz natural utilizando medidas dinâmicas de avaliação. Utiliza-se a medida *Daylight Autonomy* (DA), que possibilita a identificação da percentagem de tempo em que a luz natural atinge determinado valor de iluminância, implicando no tempo em que é necessário o uso do sistema de iluminação artificial durante o ano. Esta opção relaciona-se com o fato de que a hipótese do sistema de controle adotado é de passos, e não dimerizado, como se verá adiante.

#### **3.3.1 Definição das zonas de iluminação**

Como princípios iniciais para a definição das zonas de iluminação observaram-se os princípios de zoneamento das salas simulados por Souza (2003) e a consideração de Didoné (2009): entre 0 - 20% de DA o consumo de energia dos sistemas de iluminação artificial é mais elevado, já que precisa ficar ligado o maior tempo durante o ano e acima de 80% de DA o sistema artificial pode ser desligado.

Como não existem ainda indicações para a divisão de zonas considerando uma medida dinâmica de avaliação, foram definidos alguns critérios, com base nas considerações acima e na percepção da

autora, atuando como projetista. Neste trabalho são identificadas três zonas: uma zona com autonomia 0 a 20%, onde será necessário o uso de sistemas artificiais durante todo o tempo, ao longo do ano; outra zona com autonomies maiores que 80%, fato que implica no desligamento total do sistema artificial (nas zonas próximas à janela); e, por último, uma zona com autonomies intermediárias, que apresentam grandes variações de valores (de 20 a 80%), o que implica no acionamento parcial do sistema de iluminação artificial. Assim, são definidos intervalos de valores de DA de 0-20%; 20-80% e 80-100%.

Para a identificação destes intervalos, são calculadas autonomies para dois valores de iluminâncias – 250 e 500 lux, com o auxílio do programa *Daysim*. Os valores de DA 250 lux permitem identificar o tempo em que o sistema pode ser ligado apenas em meio circuito (metade das luminárias ligadas ou metade das lâmpadas de cada luminária acesas), onde a luz natural fornece 250 lux e o sistema artificial à complementação referente a meio circuito. Já os valores de DA 500 lux fornece o tempo em que o sistema de iluminação artificial precisa ser ligado ou desligado completamente durante o ano.

Os dados resultantes das simulações com o programa *Daysim* são inseridos no programa *Winsurf*, um programa de mapeamento de superfícies que interpola os dados espaçados em uma grade regular, permitindo a visualização gráfica dos resultados através de curvas de Autonomia da luz natural – *isoDA*. Com os gráficos *isoDa* para os dois valores de DA, são identificados e marcados os intervalos de valores de DA de 0-20%; 20-80% e 80-100%, em cada gráfico.

A Figura 27 ilustra o processo de zoneamento para o modelo M01. No gráfico DA 250lux, é delimitada a ZONA 03, que corresponde àquela onde a luz natural nunca atinge 250 lux (nem 500lux), necessitando do sistema de iluminação artificial completamente ativo para fornecer a iluminação adequada. A ZONA 02 é delimitada através do somatório do intervalo 20-80% para cada valor de DA. Já a ZONA 01 é identificada no gráfico DA 500lux, onde acima de 80% do tempo há autonomia da luz natural para este valor de iluminância, implicando no desligamento total do sistema artificial.

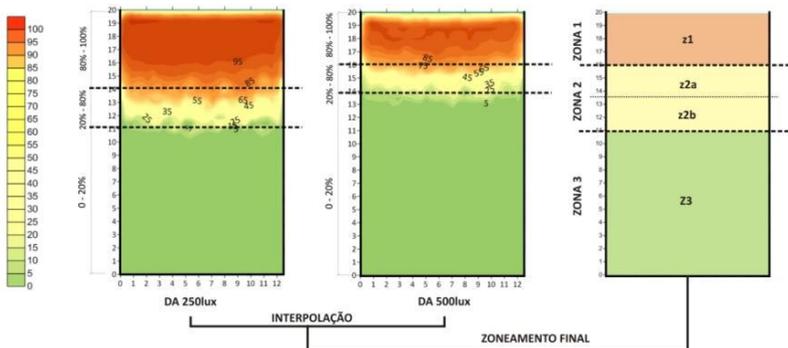


Figura 27: Processo de zoneamento para o modelo M01

### 3.4 DEFINIÇÃO DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL

A concepção do projeto de iluminação artificial aborda o conceito de uma iluminação geral para espaços genéricos. Os projetos são concebidos conforme os parâmetros explicitados a seguir.

#### 3.4.1 Projeto luminotécnico

Os projetos são elaborados inicialmente tendo como base o Método dos Lúmens, com um único tipo de luminária e com uma distribuição uniforme para cada ambiente. Nesta etapa, os critérios de distribuição das luminárias consideram alguns critérios apontados na revisão da bibliografia: a distância entre as luminárias é o dobro da distância entre estas e as paredes laterais, não ultrapassando 1,5 vezes a altura de montagem entre a luminária e o plano de trabalho. As luminárias possuem orientação no sentido longitudinal (0 grau). Para esta primeira etapa, os projetos são identificados pela nomenclatura "ORIGINAL". Para cada luminária, é gerada uma planilha de cálculo no programa *Microsoft Excel*, conforme apresentado nos **APÊNDICE A** (modelo M01) e **APÊNDICE B** (modelo M02).

O Fator de utilização ( $C_u$ ) utilizado para o cálculo da quantidade de luminárias através da Equação 1 é obtido através das tabelas fornecidas no catálogo do fabricante *LightGroup*. Para isso, são calculados os índices de ambiente ( $K$ ) para modelo de ambiente.

Cruzando-se as refletâncias das superfícies (caracterizadas como 751) com o índice K, é obtido o fator de utilização para cada tipo de luminária. Nos casos em que o índice do ambiente não condizia com o valor da tabela do *Cu*, este foi obtido por interpolação.

O projeto luminotécnico inicia com uma estimativa do número de luminárias necessárias para se atingir um nível de iluminância de referência, no caso 500 lux. No entanto, para facilitar análises posteriores, adota-se o valor de 600 lux<sup>8</sup>, sugerindo que o Fator de depreciação (*Fd*) está incluso no valor da iluminância, ou seja, ao invés da consideração do *Fd* igual a 0,8 (recomendado), considera-se *Fd* igual 1. Assim, acrescenta-se 20% do valor da iluminância de referência (500lux), incorporando-se a depreciação luminosa (envelhecimento da lâmpada, acúmulo de sujeira, etc.) ao longo da vida útil do equipamento. Com a adoção destes parâmetros busca-se analisar o projeto segundo a iluminância provida pelo sistema desde a sua implantação, no caso, 600 lux, embora a integração com a luz natural seja analisada em função de 500 lux. A síntese dos parâmetros utilizados na simulação é apresentada na Tabela 8.

**Tabela 8:** Parâmetros para a simulação - iluminação artificial

Iluminância de referência	Fator de depreciação ( <i>Fd</i> )	Fator de manutenção*	Fator de utilização ( <i>Cu</i> )
600 lux	1	100%	Retirado do catálogo do Fabricante

\*O Fator de Manutenção é inserido no programa *LightTool*, e corresponde à percentagem do fluxo inicial das luminárias efetivamente disponível após um período sem manutenção.

### 3.4.2 Escolha dos equipamentos

Os equipamentos são selecionados por meio de consulta ao catálogo do fabricante *LightGroup*, devido à facilidade de contato técnico<sup>9</sup> e compatibilidade dos arquivos fotométricos digitais com o programa *LightTool*.

<sup>8</sup> O programa *LightTool* foi desenvolvido pelo Prof. Anderson Claro em parceria com a empresa *LightGroup* ([www.lightgroup.com.br](http://www.lightgroup.com.br)).

<sup>9</sup> A utilização de *Fu* 0,8 e uma iluminância alvo de 500 lux equivale à utilização de *Fu* 1 e uma iluminância alvo de 600 lux. Adota-se 600 lux para evitar a presença de zonas excessivas na avaliação nos mapas de distribuição luminosa, realizada com base em 600 lux.

As luminárias utilizadas são as mais comumente encontradas para iluminação geral em ambientes de escritórios. São estudadas duas linhas de luminárias com aletas, uma linha com luminárias com elemento difusor e outra com luminárias apenas com refletores, apresentadas na Tabela 9.

**Tabela 9:** Descrição das linhas de luminárias selecionadas para o estudo

Linha	BNI	DBL	OCT	DIF
				
<b>Corpo</b>	Branco	Branco	Branco	Branco
<b>Aletas</b>	Branco	Alumínio	-	-
<b>Refletores</b>	Alumínio	Alumínio	Alumínio	-
<b>Difusor</b>	-	-	-	Prismático

Durante a análise dos catálogos, identificaram-se informações sobre cada equipamento, necessários para a criação dos projetos luminotécnicos. A Tabela 10 mostra as características das luminárias selecionadas, compostas por lâmpadas fluorescentes tubulares T8, variando potências de 16W e 32W e número de lâmpadas. Apesar de existir lâmpadas T5 com fluxo luminoso de 2900 lumens e eficiência luminosa de 104 lm/W, optou-se por lâmpadas mais comuns devido à disponibilidade de compra e usabilidade.

**Tabela 10: Características das luminárias selecionadas**

Luminária	Fluxo luminoso (lm)	Eficiência (lm/W)	Potência (W)	Dimensões	CDL
BNI 3312 2x16W	1200	75	32		
BNI 3312 2x32W	2600	81,3	64		
BNI 3312 4x16W	1200	75	64		
BNI3312 4x32W	2700	84,3	128		
DBL 3391 2x16W	1200	75	32		
DBL 3391 2x32W	2700	84,3	64		
DBL 3391 4x16W	1200	75	64		
DBL2391 4x32W	2700	84,3	128		
OCT 1369 2x16W	1200	75	32		
OCT 1369 2x32W	2700	84,3	64		
OCT 1369 1x32W	2700	84,3	32		
DIF2351 2x16W	1200	75	32		
DIF2351 2x32W	2700	84,3	64		

### **3.5 REFORMULAÇÕES DOS SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL**

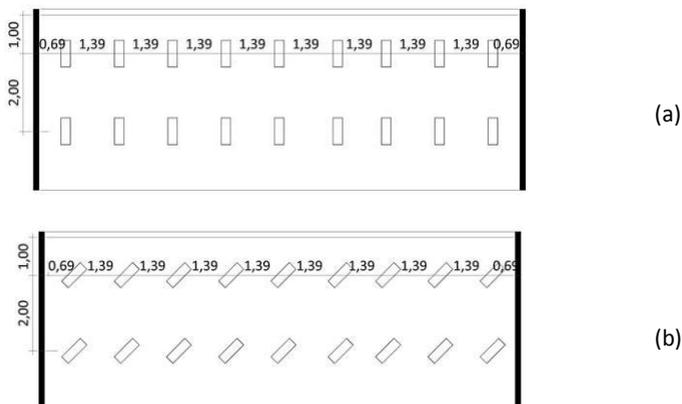
Baseando-se nas constatações realizadas sobre os sistemas originais e também sobre os estudos encontrados, foram identificadas características que poderiam ser investigadas para a melhor concepção do projeto luminotécnico. Dessa forma, são elaboradas sete reformulações dos sistemas de iluminação artificial, que procuram verificar a influência de critérios como espaçamento, orientação e distribuição das luminárias no comportamento da iluminação.

Nesta etapa, procura-se manter certa uniformidade de distribuição, mesmo reconhecendo-se que a melhor distribuição apontada em estudos anteriores implica no uso de diferentes luminárias em um mesmo projeto e posições diferenciadas (ALBUQUERQUE, 2007; CASSOL, 2009, 2011 e SANTOS, 2010). Esta consideração deve-se ao fato de que, em termos projetuais, distribuições como às apontadas nos estudos tornam-se impraticáveis e também desagradáveis visualmente.

Em cada modelo são realizadas as reformulações propostas, sendo que nem todas as luminárias são utilizadas para todas as sete reformulações, explicadas a seguir. As reformulações realizadas para cada modelo de luminária encontram-se nos **APÊNDICE C** e **APÊNDICE D**.

#### **3.5.1 Reformulação 01– Orientação das luminárias**

A primeira reformulação dos sistemas procura verificar a influência da orientação das luminárias na distribuição da iluminação sobre o plano de trabalho. As luminárias são rotacionadas em 45 graus (R01\_45) e 90 graus (R01\_90), mantendo-se o espaçamento entre as luminárias, assim como a distância entre as linhas de luminárias. A Figura 28 mostra um exemplo das reformulações de orientação para a luminária da linha DBL 3391 2x16W.



**Figura 28:** Exemplo de Reformulação 01 para a luminária DBL 3391 2x16W (a) R01\_90 (b) R01\_45

### 3.5.2 Reformulação 02 – Zonas de iluminação natural

A segunda reformulação procura verificar a influência do zoneamento da iluminação natural na disposição das luminárias, tendo como base a recomendação de Souza (2003), que sugere a distribuição uniforme das luminárias em cada zona de iluminação, considerando-se o fluxo luminoso necessário em função da área de cada zona. A partir do fluxo luminoso desejado para atingir a iluminância alvo de 600 lux em toda a área do ambiente, obtido através da Equação 1 (pág. 42), são calculados o fluxo luminoso e também a quantidade de luminárias para cada zona, como pode ser visto na Tabela 11. As planilhas de cálculo completas são apresentadas no **APÊNDICE E**.

**Tabela 11:** Planilha de cálculo para o luminária BNI - modelo M\_01

% Área /zona		Z 1(m <sup>2</sup> ) 20	Z 2(m <sup>2</sup> ) 25	Z 3(m <sup>2</sup> ) 55	Z1	Z2	Z3
BNI	Fluxo luminoso (lm)	Fluxo luminoso (lm) por zona			Qtidade de luminárias por zona		
<b>2x16w</b>	208333	41667	52083	114583	18	21	48
<b>2x32w</b>	223881	44776	55970	123135	10	10	24
<b>4x16w</b>	200000	40000	50000	110000	8	11	23

O melhor resultado obtido entre o sistema Original e a R01 serviu de base para a definição da orientação das luminárias. A Figura 29 mostra o exemplo para a luminária BNI 2X32W. O procedimento para o modelo M01: para Zona 1 (Z1), o fluxo luminoso será 20% do fluxo total; para Zona 2 (Z2), 25% do fluxo total; e para Zona 3 (Z3), o fluxo luminoso será 55% do fluxo total.

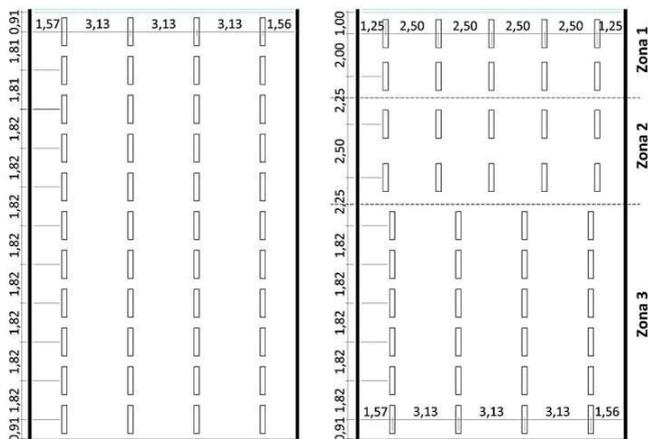


Figura 29: Exemplo de Reformulação 02 para a luminária - BNI2x32W

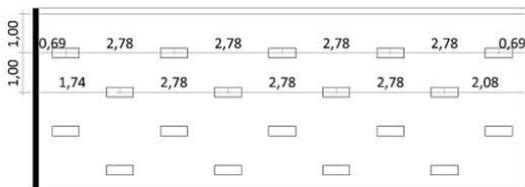
### 3.5.3 Reformulação 3 – Projeto Original desconsiderando $e=1,5h$

Para os sistemas que necessitaram de acréscimo no número de luminárias para manter o critério de afastamento adotado, foram refeitos os projetos com o número de luminárias resultante do cálculo através do Método dos Lúmens, desconsiderando-se o critério utilizado no projeto original: distância máxima entre as luminárias igual à no máximo 1,5 vezes a altura de montagem entre a luminária e o plano de trabalho.

### 3.5.4 Reformulação 04 – Sistemas alternados

A partir do projeto que obteve melhor resultado entre as reformulações anteriores, foram excluídas luminárias alternadas em cada linha. Os afastamentos entre as linhas foram reduzidos à metade,

conforme Figura 30. O número de luminárias manteve-se o mesmo, mas em alguns casos foi necessário o acréscimo ou a retirada de luminárias para compor a configuração alternada.

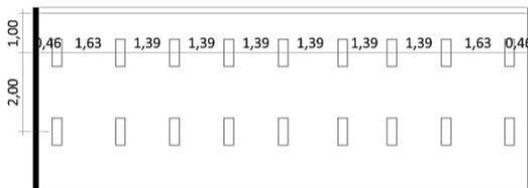


**Figura 30:** Exemplo de Reformulação 04 para a luminária DBL 3391 2x16W

### 3.5.5 Reformulação 05 – Afastamentos

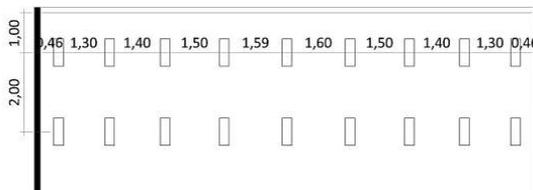
A partir da constatação realizada nas bibliografias consultadas, que apontam níveis mais baixos de iluminância próximo às paredes e mais elevados no centro do ambiente, procurou-se verificar os parâmetros de espaçamentos entre as luminárias.

Inicialmente os afastamentos das luminárias próximas às paredes foram reduzidos à 1/3 da distância entre as luminárias, caracterizando a reformulação R05, conforme Figura 31.



**Figura 31:** Exemplo de R05 para a luminária DBL 3391 2x16W

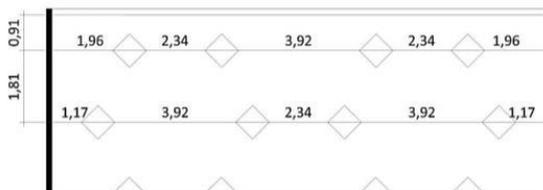
Ainda sobre a constatação de estudos anteriores, é proposta uma reformulação com o aumento crescente do distanciamento das luminárias em relação ao centro do ambiente, apontado como zona de concentração de iluminâncias elevadas. A nomenclatura adotada é R05\_2 (Figura 32).



**Figura 32:** Exemplo de R05\_2 para a luminária DBL 3391 2x16W

### 3.5.6 Reformulação 06 – *Layout diferenciado*

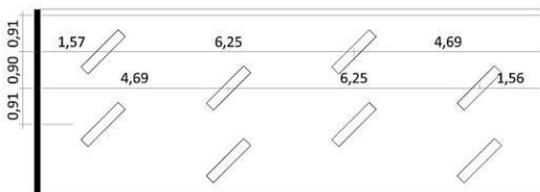
Como forma de diferenciar a distribuição regular das luminárias no teto, em alguns casos propõe-se a adoção de distribuições circulares, conforme Figura 33.



**Figura 33:** Exemplo de R06 para a luminária DBL 3391 4x16W

### 3.5.7 Reformulação 07 – Sistema alternado com rotação 45 graus

A última reformulação dos sistemas possui uma configuração com base no sistema alternado, com luminárias rotacionadas 45 graus, conforme Figura 34.



**Figura 34:** Exemplo de Reformulação 07 para a luminária DBL 3391 4x16W

## 3.6 PROCESSAMENTO E ANÁLISE DE DADOS

Os resultados obtidos nas simulações são analisados em duas partes. Na primeira, é realizada a avaliação quanto à distribuição de iluminâncias e uniformidade do sistema, para todas as reformulações realizadas. Destas, os projetos que obtiveram melhor resultado quanto à distribuição de iluminâncias e uniformidade são selecionados e comparados entre si, caracterizando a segunda parte da análise. Nesta segunda parte, são analisadas a potência instalada e o consumo energético de cada sistema.

Os parâmetros de análise utilizados são detalhados abaixo.

### 3.6.1 Distribuição de iluminâncias

Para a análise do desempenho luminoso é utilizado um zoneamento de iluminâncias definidos sobre um nível mínimo de iluminação, o que permite avaliar a adequação dos resultados de cálculo frente a uma iluminância de referência, utilizando para isto um gráfico de cinco categorias de cores.

O programa *LightTool* oferece uma ferramenta que permite a visualização destas zonas em curvas de iluminância - *isolux*, denominada “Análise de zonas”, que foi utilizada neste trabalho. É importante salientar que esta é uma ferramenta auxiliar, não possuindo nenhuma relação direta com o corpo da Norma NBR5413, mas que permite avaliar o quanto o projeto diverge, por falta ou por excesso, das determinações de referência da norma.

Para este estudo adota-se a classificação para um valor médio de referência de 600 lux. A definição dos intervalos é apresentada na Tabela 12. O primeiro intervalo corresponde a valores abaixo de 70% do valor da iluminância alvo ( $E_{alvo}$ ). O segundo corresponde a valores entre 70% da  $E_{alvo}$  até o valor da  $E_{alvo}$ . Já o terceiro, compreende valores entre  $E_{alvo}$  até um Valor de Tolerância (de 20% adicional à  $E_{alvo}$ ). O quarto intervalo vai do valor de tolerância até um limite superior de 50% adicional à  $E_{alvo}$ . E o quinto corresponde a valores superiores a este último.

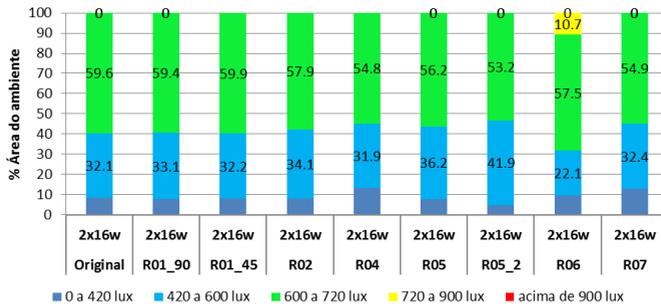
Como não existem normas estabelecidas, adotou-se como referência o valor de 120% da iluminância alvo para delimitação do terceiro intervalo, ao invés de 130%, conforme proposto por Kremer

(2002), procurando delimitar, com mais proximidade ao valor da  $E_{alvo}$ , os valores compreendidos no intervalo de 600 a 720 lux.

**Tabela 12:** Definição dos intervalos de análise das zonas

Intervalo de iluminância	Zona	
Valores abaixo de 70% $E_{alvo}$	0 a 420 lux	■
Valores entre 70% $E_{alvo}$ até $E_{alvo}$	420 a 600 lux	■
Valores entre $E_{alvo}$ até 120% $E_{alvo}$	600 a 720 lux	■
Valores entre 120% $E_{alvo}$ até 150% $E_{alvo}$	720 a 900 lux	■
Valores acima de 150% $E_{alvo}$	Acima de 900 lux	■

A Figura 35 exemplifica o gráfico de análise de zonas para a luminária 2X16W da linha BNI 3312.



**Figura 35:** Exemplo de gráfico de análise das zonas para luminária BNI3312 2x16W

### 3.6.2 Uniformidade de distribuição

O critério de uniformidade adotado é a razão entre a iluminância mínima ( $E_{min}$ ) e a média ( $E_{média}$ ) obtida para os pontos do ambiente, dada pela Equação 9:

$$U = (E_{min}/E_{média})$$

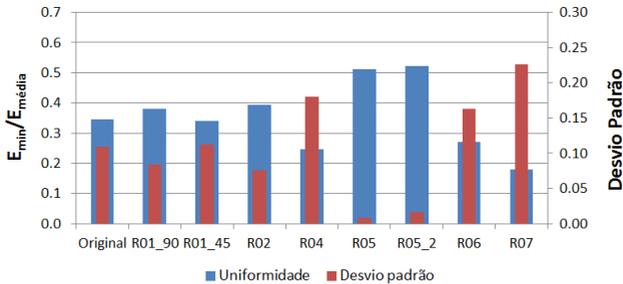
**Equação 9**

Inicialmente pensou-se em utilizar como base o valor de 0,5 para uniformidade da iluminação geral, apontada pela norma europeia (CEN, 2002). Assim, foi calculado o desvio padrão para cada sistema, o que permite a verificação de quanto o valor da uniformidade encontrado para cada projeto luminotécnico diverge do valor recomendado, dado pela Equação 10.

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x - \bar{x})^2}$$

**Equação 10**

No entanto, percebeu-se que o desvio padrão e os valores da razão  $E_{\min}/E_{\text{média}}$  possibilitaram a mesma análise. Pelo gráfico da Figura 36, verifica-se que quando o valor da razão é elevado, como no caso da R05, o desvio padrão é baixo. Como a informação gerada permite a mesma interpretação para os dois parâmetros, decidiu-se por adotar a razão  $E_{\min}/E_{\text{média}}$  como critério de análise para a uniformidade. Considera-se a razão mais interessante por ser mais facilmente calculada e produzida, já que a utilização desta razão é mais difundida entre os projetistas.



**Figura 36:** Diferença entre a  $E_{\min}/E_{\text{média}}$  e Desvio padrão para avaliar a uniformidade da iluminância

### 3.6.3 Avaliação de consumo

A estimativa do consumo de energia do sistema de iluminação artificial é calculada a partir dos dados de tempo de utilização (horas) e da potência instalada (kW) requerida pelo sistema, por cada zona de iluminação natural. Tem como objetivo apresentar a viabilidade de cada sistema em relação ao potencial de economia de energia. Aqui foi considerado um sistema de controle de três passos, possibilitando ligar ou desligar totalmente o circuito ou metade dele em cada zona.

O tempo de utilização do sistema de iluminação artificial ( $T_{\text{artificial}}$ ), em cada zona é obtido através dos dados de Autonomia da luz natural (DA) resultantes das simulações no programa *Daysim*. Para isso, são calculadas as médias dos valores de DA em cada ponto para cada zona. Estas médias indicam que nestas percentagens de tempo a luz

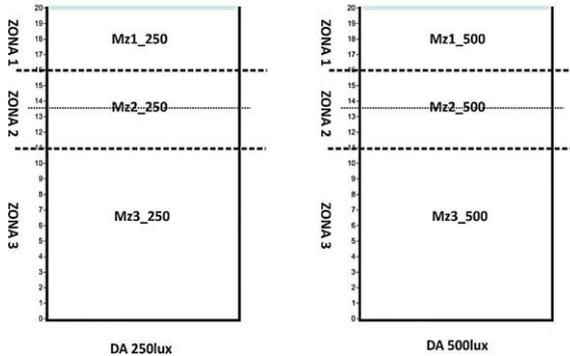
natural fornece níveis suficientes de iluminância em relação à iluminância alvo estipulada. No restante do tempo é necessário o uso da iluminação artificial. Sendo assim, a subtração do valor de 100% das médias de DA para cada zona resulta no tempo em que será necessário o uso de iluminação artificial ao longo do ano, em relação às horas ocupadas, 2080h ( $T_u$ ). Este procedimento é utilizado para o cálculo do tempo de utilização em cada zona, para cada modelo de ambiente.

Considera-se que quando a disponibilidade de luz natural atinge o valor de 500 lux, o sistema pode ser desativado. Quando a iluminância varia entre 250 e 500 lux, pode-se utilizar meio circuito de iluminação, sendo que a complementaridade é feita pela iluminação natural. Já quando a autonomia para a zona é 0 (iluminância fornecida pela luz natural é menor que 500 lux), o sistema precisa ser ativado durante todo o tempo, ao longo do ano. Esta abordagem caracteriza um sistema de controle de 3 passos.

A Potência instalada (medida em kW) é verificada em cada zona e no sistema totalmente ligado, permitindo a análise do consumo de energia quando a luz natural é aproveitada pelo sistema de zoneamento. Para o cálculo, são contabilizadas apenas as potências das luminárias presentes em cada zona.

O consumo de energia (kWh) é calculado multiplicando-se a potência instalada do sistema de iluminação artificial ( $P_z$ ) em cada zona de iluminação natural, pelo tempo em que o sistema de iluminação artificial necessita ser ligado durante o ano ( $T_{art}$ ), obtido através das médias das DAs para cada zona. A Figura 37 apresenta o esquema das médias de cálculo de DA para cada zona ( $Mz$ ). Na figura,  $Mz1_{250}$  se refere à média dos valores de DA 250 para a zona 1;  $Mz1_{500}$  se refere à média dos valores de DA 500 para a zona 1. Esta nomenclatura é adotada para as demais zonas, através das médias representadas pela sigla  $Mz$ . Para a zona 2, adota-se  $Mz2_{250}$  e  $Mz2_{500}$ ; para a zona 3, adota-se  $Mz3_{250}$  e  $Mz3_{500}$ .

A seguir é explicado o procedimento de cálculo do tempo de utilização do sistema e consumo energético.



**Figura 37:** Médias de DA para cada zona

São consideradas duas situações de acionamento para cada zona. O sistema pode ser utilizado em meio circuito, o que caracteriza a **Situação 1**; ou o circuito inteiro, definindo a **Situação 2**:

**Situação 1:** A subtração das médias de DA dos dois gráficos resulta no tempo em que o sistema de iluminação artificial pode ser utilizado em meio circuito (MZ1\_250 - MZ1\_500), onde os níveis de iluminância variam entre 250 e 500 lux.

**Situação 2:** A subtração de 100% da média da DA 250 (100% - MZ1\_250) resulta no tempo em que o sistema será totalmente ligado.

Dessa forma, o tempo de utilização do sistema de iluminação artificial ( $T_{art}$ ) para cada situação é definido pelas Equações 11 e 12.  $T_u$  equivale às horas de ocupação do espaço durante o ano (2080h).

$$T_{art \text{ Zona}} (\text{Situação 1}) = (Mz\_250 \text{ lux} - Mz\_500) * T_u \quad \text{Equação 11}$$

$$T_{art \text{ Zona}} (\text{Situação 2}) = (100\% - Mz\_250) * T_u \quad \text{Equação 12}$$

Assim, os cálculos de consumo para cada zona são dados pela Equação 13, sendo que  $P_z$  se refere à potência instalada em cada zona. Para Situação 1 é utilizada metade da potência instalada em cada zona, visto que esta situação utiliza meio circuito; já para a Situação 2, é contabilizada a potência total de cada zona. Para cada zona são calculadas as duas situações.

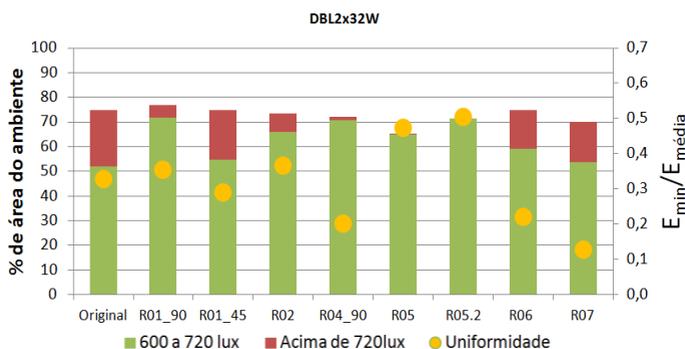
$$\text{Consumo da Zona} = P_z * T_{art \text{ Zona}} (\text{Situação 2}) + \frac{P_z}{2} * T_{art \text{ Zona}} (\text{Situação 1}) \quad \text{Equação 13}$$

Para o cálculo do consumo do sistema totalmente ativo nas horas definidas de ocupação do espaço, multiplica-se a potência total do sistema pelas horas em que o sistema é ativo durante o ano.

### 3.6.4 Representação gráfica dos resultados

Os dados obtidos com as simulações são sistematizados na forma de gráficos no *Microsoft Excel*. Os gráficos apresentam relações entre diferentes variáveis, analisadas em cada etapa do trabalho. Para a primeira etapa, são elaborados gráficos que permitem visualizar cada projeto no que diz respeito ao atendimento à análise de zonas de iluminação e à uniformidade. As análises são feitas por grupos de reformulações para cada luminária, em cada modelo de ambiente.

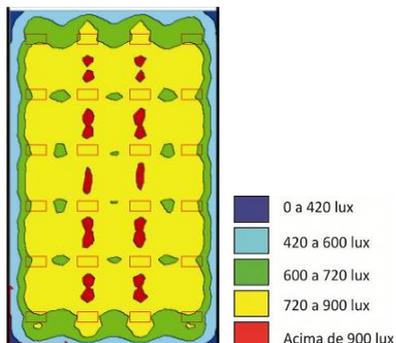
São analisados os intervalos de iluminâncias compreendidas entre 600 a 720 lux, assim como a percentagem de área do ambiente com iluminâncias superiores a 720 lux. A Figura 38 ilustra o exemplo para a luminária da linha DBL2X32W, para o modelo M01. As barras representam a percentagem de área do ambiente nos intervalos analisados; os círculos amarelos representam a razão da uniformidade.



**Figura 38:** Exemplo de método gráfico para avaliação da primeira etapa – M01\_DBL2x32W

Como complementação às análises dos projetos, são plotados mapas de distribuições luminosas gerados pelo próprio programa de simulação, o *LightTool*, para todas as propostas de projeto. A Figura 39 ilustra um exemplo de mapa para a luminária da linha DBL 4X32W, sendo que a divisão das zonas equivale à definição apresentada no

item 3.6.1. A partir destes mapas pode-se ter uma resposta rápida da configuração da distribuição da iluminação no plano de trabalho, permitindo uma avaliação da relação entre a curva de distribuição luminosa (CDL) de cada luminária e a forma como a luminária distribui a luz no plano de trabalho.



**Figura 39:** Exemplo de mapa de distribuição luminosa – M01\_DBL 4x32W

Assim, é possível relacionar, para cada luminária, os parâmetros analisados, assim como visualizar as melhores soluções. Com base nas análises dos gráficos como os representados acima, são selecionados os projetos que obtiveram as melhores soluções em cada luminária e em cada modelo. O critério para tomada de decisão entre o melhor sistema reformulado para cada luminária foi o que apresentou maior área compreendida no intervalo de 600 a 720 lux, juntamente com a melhor distribuição da iluminação, possível de ser visualizada nos mapas de distribuição luminosa. Da mesma forma que na primeira etapa, na segunda etapa os resultados são plotados em gráficos de consumo energético.

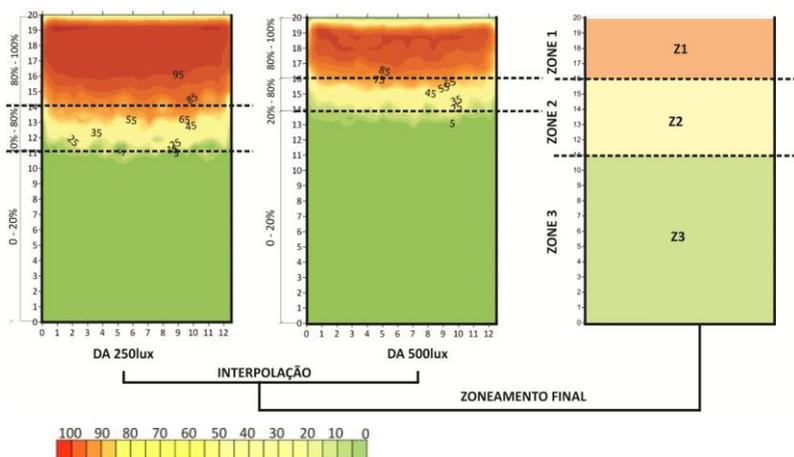
## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são expostos e discutidos os resultados obtidos através da metodologia utilizada nesta pesquisa, detalhada no capítulo anterior.

### 4.1 ESTIMATIVA DA DISPONIBILIDADE DA LUZ NATURAL

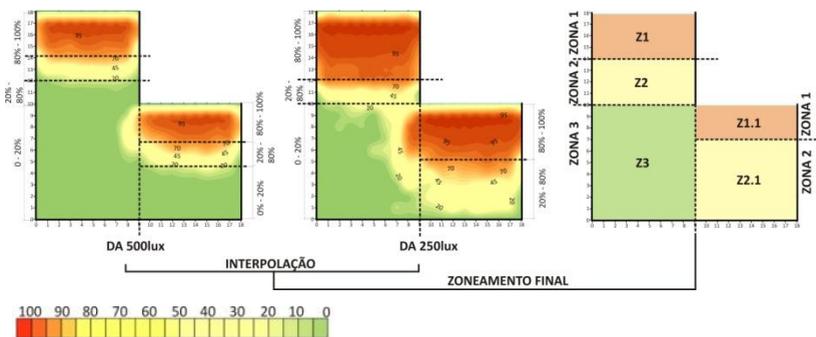
O modelo M\_01 foi simulado no programa Daysim, onde foram obtidos os valores de DA de para 250 lux e 500 lux. Foram gerados gráficos de curvas de *Daylight Autonomy – isoDA* no programa *Winsurf*, conforme Figuras 40 e 41. O processo utilizado para a definição das zonas é o apresentado no item 3.3.1. No gráfico DA 250lux, é delimitada a Zona 3; a Zona 2 é delimitada através do somatório do intervalo 20-80% para cada valor de DA; e a Zona 1 é identificada no gráfico DA 500lux.

A Figura 40 apresenta o zoneamento para o modelo M01. A configuração de uma abertura unilateral determina a criação de três zonas paralelas à abertura: a Zona 1 (Z1) representa 20% da área total do ambiente; a Zona 2 (Z2), 25% da área total; e a Zona 3 (Z3), 55% da área total.



**Figura 40:** Distribuição das zonas de DA para 250 lux e 500 lux e zoneamento da luz natural para o modelo M01

A configuração das zonas de iluminação para o modelo M02 é mostrada na Figura 41. Conforme pode ser visto, são definidas cinco zonas: Z1, 14% da área total do ambiente; Z2, 14%; Z3, 36%; Z1.1, 11%; Z2.1, 25%. Para as análises de consumo de energia, as zonas Z1 e Z1.1 são somadas, assim como as zonas Z2 e Z2.1.



**Figura 41:** Distribuição das zonas de DA para 250 lux e 500 lux e zoneamento da luz natural para o modelo M02

Estes zoneamentos serão utilizados para os cálculos de consumo de energia, conforme descrito adiante no item 4.3, assim como para a reformulação R02 dos sistemas de iluminação artificial.

## 4.2 SISTEMAS DE ILUMINAÇÃO ARTIFICIAL – 1ª ETAPA

Cada projeto luminotécnico foi desenvolvido inicialmente com base em recomendações a partir do Método dos Lúmens. A partir do projeto Original foram propostas modificações para cada sistema de luminária, conforme item 3.5. Cada projeto foi construído e simulado no programa *LightTool*.

A primeira parte da análise é realizada entre os projetos Originais e todas as reformulações propostas, buscando identificar as melhores soluções para cada projeto, assim como analisar a influência das reformulações em cada tipo de luminária. Para isso, os dados resultantes das simulações com o programa *LightTool* são representados em mapas de distribuição luminosa e na forma de gráficos, de acordo com o item 3.6.4. Uma informação adicional para

comparar estas diferentes luminárias é a observação da curva de distribuição luminosa (CDL).

A seguir são apresentados os resultados, divididos em grupos de linhas de luminárias para cada modelo de ambiente.

### 4.2.1 Modelo M01

#### Linha BNI

A Figura 42 mostra os resultados da primeira etapa para as luminárias da linha BNI. A leitura dos gráficos permite algumas descrições comuns entre as luminárias. Em todos os casos percebe-se uma grande variação nos valores de uniformidade para as reformulações propostas. Para todas as luminárias desta linha, o maior valor de uniformidade é alcançado com a mudança de espaçamento entre as luminárias - reformulações R05 e R05\_2.

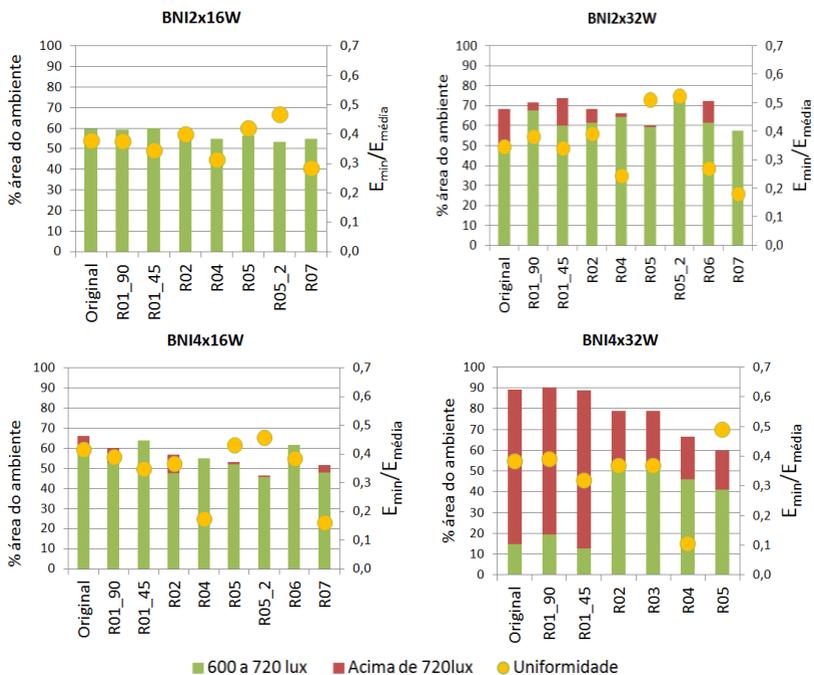
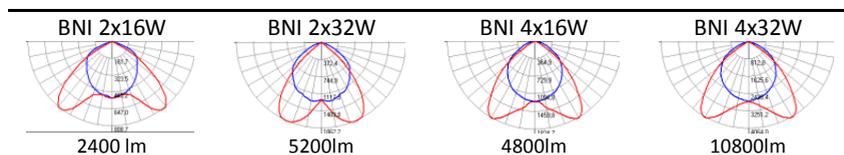


Figura 42: Gráficos de análise para luminárias da linha BNI

As CDLs para as luminárias desta linha são apresentadas na Tabela 13. Os gráficos da Figura 42 e a CDL de cada luminária são relacionados e analisados juntamente com os mapas de zonas luminosas apresentados nas Figuras 43, 44, 45 e 46 para cada luminária.

**Tabela 13:** Curvas de distribuição luminosa e fluxo luminoso total - linha BNI



Conforme Figura 42, a reformulação R05\_2 apresenta maior uniformidade para a luminária BNI2x16W (0,47). No entanto, o projeto Original e as duas reformulações de orientação – R01\_90 e R01\_45 - apresentam as maiores áreas dentro da zona 600 a 720 lux - 59,6%, 59,4% e 59,9%, respectivamente - sem iluminâncias excessivas (acima de 720 lux). A Figura 43 permite uma análise visual dos resultados, realizada sobre os mapas de zonas luminosas, mostrando que estes projetos também apresentam uma melhor distribuição dos valores de iluminância no plano de trabalho, em relação aos demais. Quando se analisa a CDL e os mapas de distribuição luminosa, pode-se inferir que o fecho mais aberto e o pequeno fluxo luminoso (2400lm) resultam em um maior número de luminárias, o que proporciona uma distribuição mais uniforme da iluminação no plano de trabalho.

O gráfico da luminária BNI2x32W (Figura 42) revela que, assim como para a luminária 2X16W, a R05\_2 apresenta maior uniformidade (0,52) e também maior área compreendida na zona de 600 a 720 lux (72,9%). Neste caso, não há dúvidas sobre a definição do melhor projeto. Ressalta-se que a mudança na orientação da luminária, com rotação 90 graus (R01\_90), implica em uma melhor distribuição do fluxo emitido pela luminária, eliminando a concentração de zonas excessivas entre uma luminária e outra, conforme pode ser visualizado na Figura 44. Esta constatação confirma a prática recomendada, onde a maior dimensão da luminária deve ser paralela à maior dimensão do ambiente. Esta rotação, aliada à mudança de afastamento, contribuem para uma melhor distribuição da iluminação no espaço, devido à maior

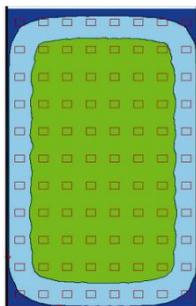
curva de intensidade ser a transversal, conforme CDL da Tabela 13, o que distribui melhor o fluxo proveniente da luminária.

Para a luminária 4x16W, novamente a R05\_2 possui maior uniformidade (0,46) e 50,2% da área compreendida no intervalo 600 a 720 lux. As maiores áreas compreendidas entre 600 e 720 lux e que não apresentam iluminâncias excessivas são encontradas em R01\_45 (63,7%) e R06 (61,6%). No entanto, as uniformidades para estas duas reformulações são de 0,35 para R01\_45 e 0,39 para R06. Para esta luminária, verifica-se que a mudança de orientação, com rotação 45 graus, contribui para uma melhor distribuição da iluminação, o que pode ser verificado nos mapas da Figura 45.

A luminária BNI 4x32W foi a que apresentou os resultados menos satisfatórios dentre todas as outras analisadas da linha BNI. Em todos os casos há a existência de zonas com iluminação excessiva. Apesar de a R05 apresentar a maior uniformidade (0,49), possui 40,9% da área do ambiente no intervalo 600 a 720 lux. Os mapas de análise de zonas (Figura 46) mostram que a distribuição da iluminação para esta reformulação é concentrada, sendo que zonas excessivas são localizadas próximas às luminárias, devido ao alto fluxo luminoso emitido pela luminária (10800lm) e a forma mais fechada do fecho luminoso (Tabela 13). Já R02 e R03 coincidem na distribuição das luminárias e apresentam maior área entre 600 e 720 lux (52%), porém menor uniformidade (0,37).

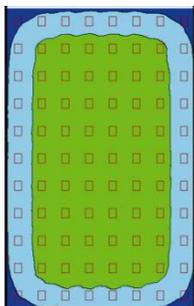
Para esta luminária, os sistemas Original, R01\_90 e R01\_45 mostraram-se superdimensionados devido à adoção do critério de espaçamento entre as luminárias - distância não superior a 1,5h- o que fez aumentar a quantidade das mesmas. Quando se reduz a quantidade de luminárias, a distância entre elas aumenta, como em R02 e R03, implicando em reduções nas zonas excessivas. Aqui é importante observar que o critério (1,5h) não é recomendado para este tipo de luminária.

Importante destacar que o projetista procuraria ajustar o projeto para evitar estas zonas excessivas de iluminação, utilizando lâmpadas e luminárias diferentes. Como neste adota-se apenas um tipo de luminária por ambiente, com configurações pré-determinadas, não foram propostas modificações deste tipo.



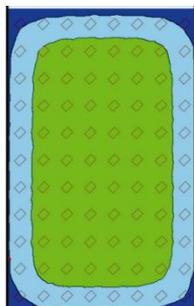
**ORIGINAL**

$E_{média} = 595 \text{ lux}$   $E_{mín} = 225 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 701 \text{ lux}$   $U = 0.38$



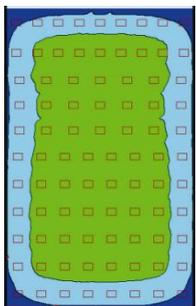
**R01\_90**

$E_{média} = 594 \text{ lux}$   $E_{mín} = 223 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 716 \text{ lux}$   $U = 0.37$



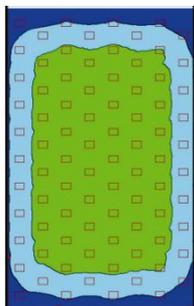
**R01\_45**

$E_{média} = 595 \text{ lux}$   $E_{mín} = 205 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 696 \text{ lux}$   $U = 0.34$



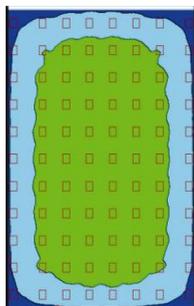
**R02**

$E_{média} = 586 \text{ lux}$   $E_{mín} = 233 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 695 \text{ lux}$   $U = 0.40$



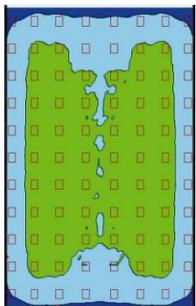
**R04**

$E_{média} = 575 \text{ lux}$   $E_{mín} = 179 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 705 \text{ lux}$   $U = 0.31$



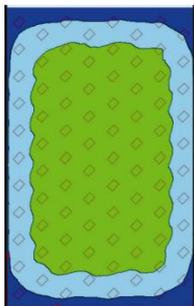
**R05**

$E_{média} = 582 \text{ lux}$   $E_{mín} = 244 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 710 \text{ lux}$   $U = 0.42$



**R05\_2**

$E_{média} = 577 \text{ lux}$   $E_{mín} = 269 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 675 \text{ lux}$   $U = 0.47$



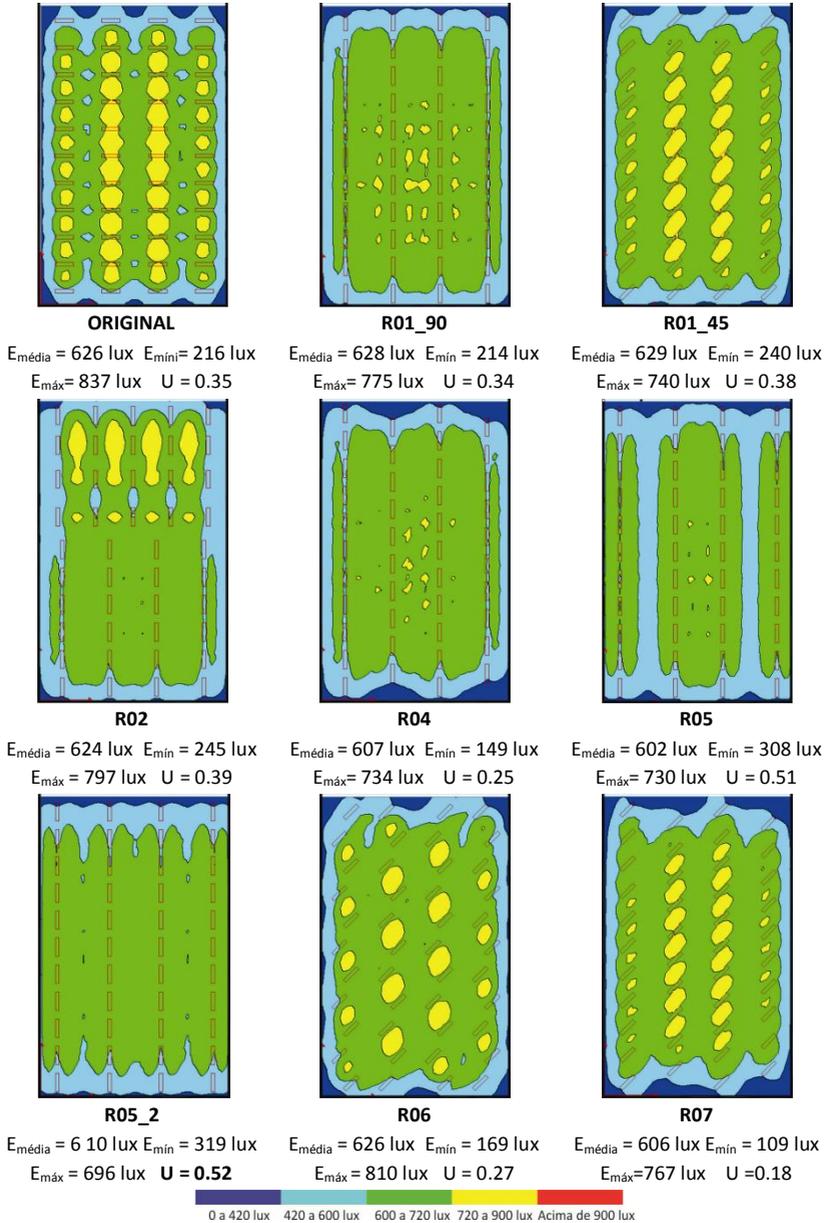
**R07**

$E_{média} = 574 \text{ lux}$   $E_{mín} = 163 \text{ lux}$   
 $E_{máxima} = 702 \text{ lux}$   $U = 0.28$

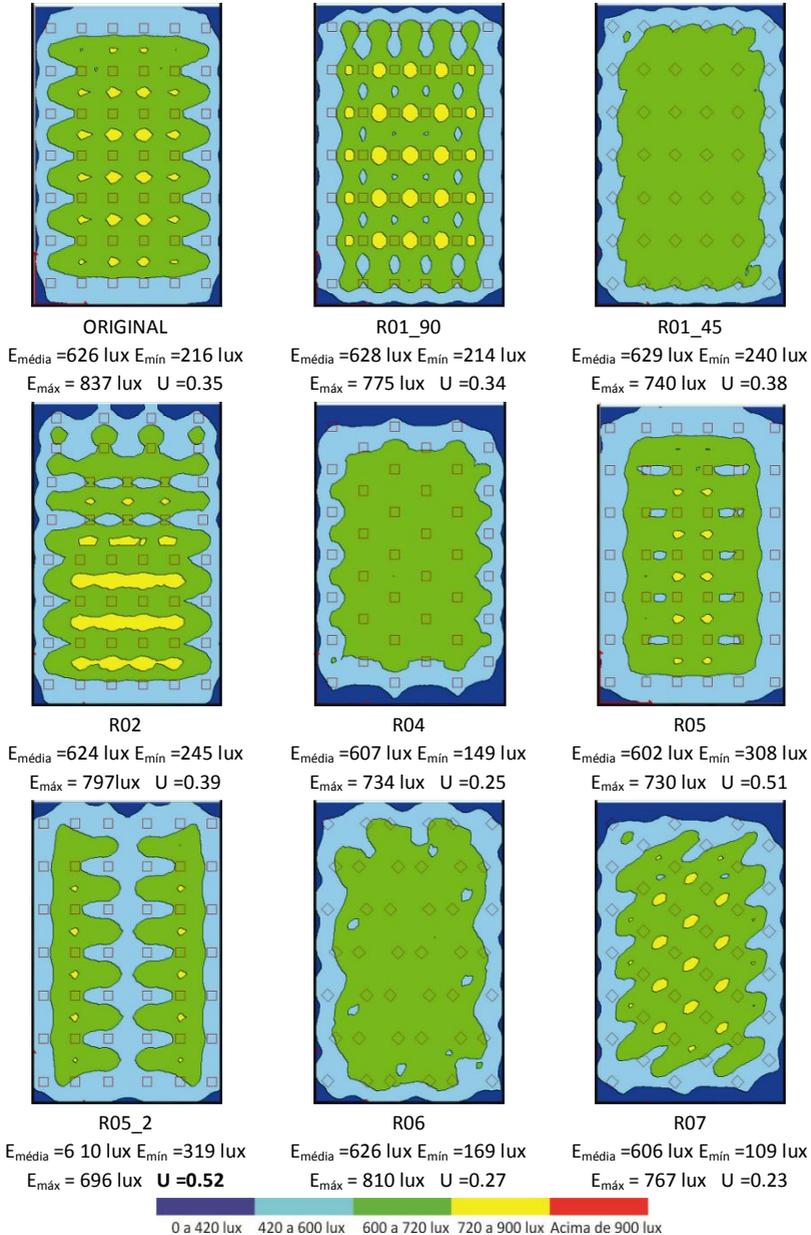


*\*A reformulação R06 não foi realizada devido à pequena dimensão da luminária, o que impossibilitou a distribuição das luminárias para esta reformulação.*

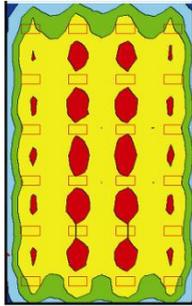
**Figura 43:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI3312 2x16W – M01



**Figura 44:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI3312 2x32W – M01

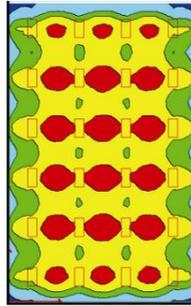


**Figura 45:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI3312 4x16W – M01



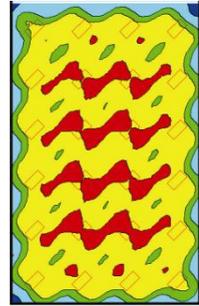
ORIGINAL

$E_{m\acute{e}dia} = 779 \text{ lux}$   $E_{m\acute{i}n} = 300 \text{ lux}$   
 $E_{m\acute{a}x} = 1009 \text{ lux}$   $U = 0.39$



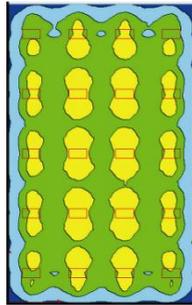
R01\_90

$E_{m\acute{e}dia} = 779 \text{ lux}$   $E_{m\acute{i}n} = 305 \text{ lux}$   
 $E_{m\acute{a}x} = 1062 \text{ lux}$   $U = 0.39$



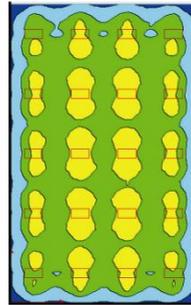
R01\_45

$E_{m\acute{e}dia} = 780 \text{ lux}$   $E_{m\acute{i}n} = 250 \text{ lux}$   
 $E_{m\acute{a}x} = 978 \text{ lux}$   $U = 0.32$



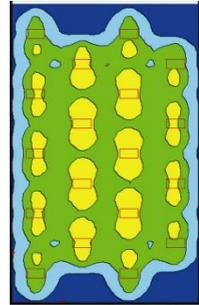
R02\*

$E_{m\acute{e}dia} = 654 \text{ lux}$   $E_{m\acute{i}n} = 241 \text{ lux}$   
 $E_{m\acute{a}x} = 839 \text{ lux}$   $U = 0.37$



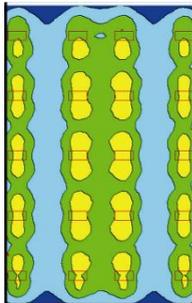
R03\*

$E_{m\acute{e}dia} = 654 \text{ lux}$   $E_{m\acute{i}n} = 241 \text{ lux}$   
 $E_{m\acute{a}x} = 839 \text{ lux}$   $U = 0.37$



R04

$E_{m\acute{e}dia} = 597 \text{ lux}$   $E_{m\acute{i}n} = 63 \text{ lux}$   
 $E_{m\acute{a}x} = 837 \text{ lux}$   $U = 0.11$



R05

$E_{m\acute{e}dia} = 616 \text{ lux}$   $E_{m\acute{i}n} = 303 \text{ lux}$   
 $E_{m\acute{a}x} = 812 \text{ lux}$   $U = 0.49$

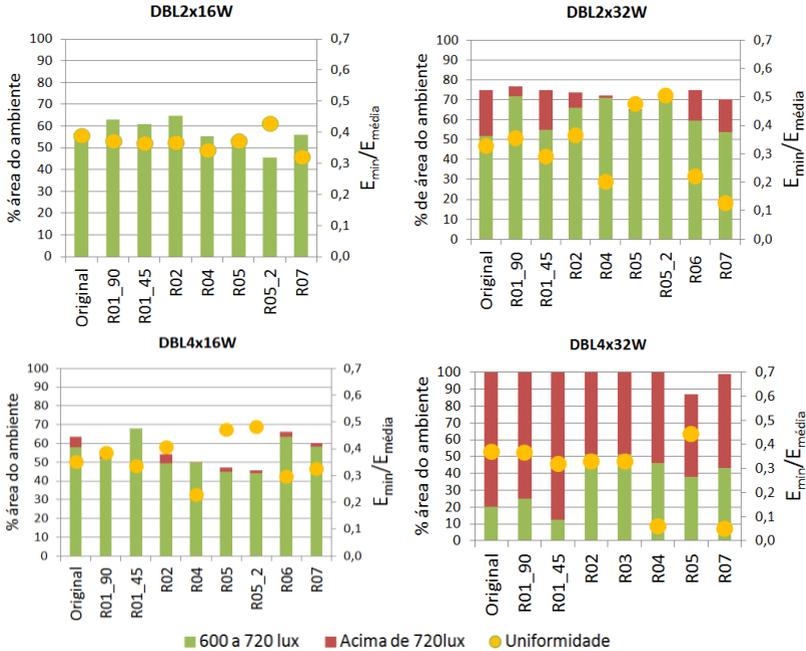


*\*A configuração de distribuição das luminárias para as reformulações R2 e R3 coincidiram, fato que explica os resultados iguais apresentados na figura.*

**Figura 46:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI3312 4x32W – M01

## Linha DBL

Assim como para a linha BNI, a linha DBL apresenta maiores níveis de uniformidade para as reformulações R05 e R05\_2, conforme Figura 47.



**Figura 47:** Gráfico de análise para luminárias da linha DBL

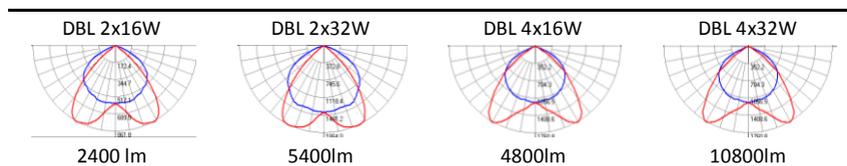
Diferentemente da primeira linha de luminárias, a luminária DBL 2x16W apresenta menor variação nos valores de uniformidade, sendo que a R05\_2 apresenta o maior valor - 0,43. Porém, esta reformulação é a que apresenta menor área compreendida no intervalo 600 a 720 lux (46%). A análise de zonas mostra que as reformulações que proporcionam maiores áreas do ambiente neste intervalo coincidem em R01\_90 e R02, com 63% da área total. Dentre estas duas, a maior uniformidade é encontrada na R02 - 0,37. Em todos os projetos não é verificada a existência de iluminâncias acima do intervalo considerado, diferentemente do que ocorre para os projetos elaborados com as demais luminárias desta linha (Figura 48).

A análise para a luminária DBL2x32W mostra que para as reformulações R05 e R05\_2, os valores de uniformidade são maiores –

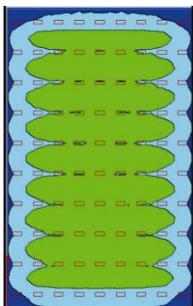
0,48 e 0,51, respectivamente - e não há a presença de iluminação excessiva. A maior área encontrada para a zona 600 a 720 lux pertence à R05\_2, correspondendo a 72% da área do ambiente, seguida de R04, com 71%. No entanto, R04 apresenta um índice muito baixo de uniformidade – 0,2 - em contraste com 0,51 resultantes da R05\_2.

A luminária 4x16W mostra comportamento semelhante ao da linha BNI. A rotação da luminária em 45 graus proporciona os melhores resultados nas análises de zonas, com 68% e 64% da área compreendida no intervalo 600 a 720 lux, para R01\_45 e R06, respectivamente. Porém, quando se analisa a uniformidade, os valores encontrados são de 0,34 para R01\_45 e 0,30 para R06, quando que para R05\_2, este valor atinge 0,48. Quando se analisam os mapas (Tabela 14), percebe-se que apesar de R05\_2 ter maior uniformidade, possui grande área com iluminâncias abaixo de 600 lux (47%) e um padrão de distribuição menos uniforme da iluminação.

**Tabela 14:** Curvas de distribuição luminosa e fluxo luminoso total - linha DBL

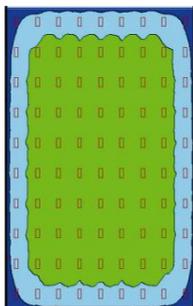


A concentração de fluxo luminoso próxima às luminárias é evidente nos mapas de distribuição da Figura 51, para a DBL 4X32W. Apesar de R05 apresentar maior uniformidade (0,45), a Figura 52 revela que R02 e R03 são as soluções que permitem uma melhor distribuição no ambiente, eliminando parte das áreas excessivas, assim como na linha BNI. Porém, devido ao comportamento da CDL, mostrada na Tabela 14, com fecho fechado e alto fluxo luminoso, zonas de concentração ainda permanecem próximas às luminárias. Assim como ocorre na linha BNI, os sistemas Original, R01\_90 e R01\_45 são superdimensionados devido à adoção do critério de espaçamento entre as luminárias - distância não superior a 1,5h.



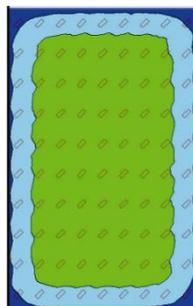
ORIGINAL

$E_{média} = 583 \text{ lux}$   $E_{mín} = 227 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 706 \text{ lux}$   $U = 0.39$



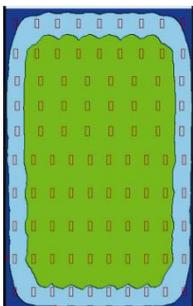
R01\_90

$E_{média} = 585 \text{ lux}$   $E_{mín} = 219 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 680 \text{ lux}$   $U = 0.37$



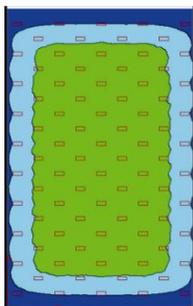
R01\_45

$E_{média} = 584 \text{ lux}$   $E_{mín} = 219 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 680 \text{ lux}$   $U = 0.36$



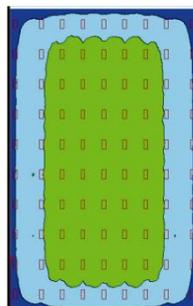
R02

$E_{média} = 598 \text{ lux}$   $E_{mín} = 220 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 714 \text{ lux}$   $U = 0.37$



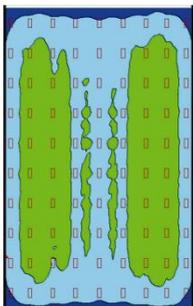
R04

$E_{média} = 564 \text{ lux}$   $E_{mín} = 194 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 674 \text{ lux}$   $U = 0.34$



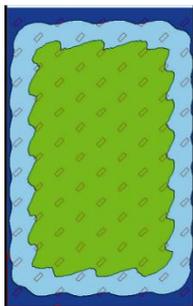
R05

$E_{média} = 575 \text{ lux}$   $E_{mín} = 214 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 682 \text{ lux}$   $U = 0.37$



R05\_2

$E_{média} = 573 \text{ lux}$   $E_{mín} = 246 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 680 \text{ lux}$   $U = 0.43$



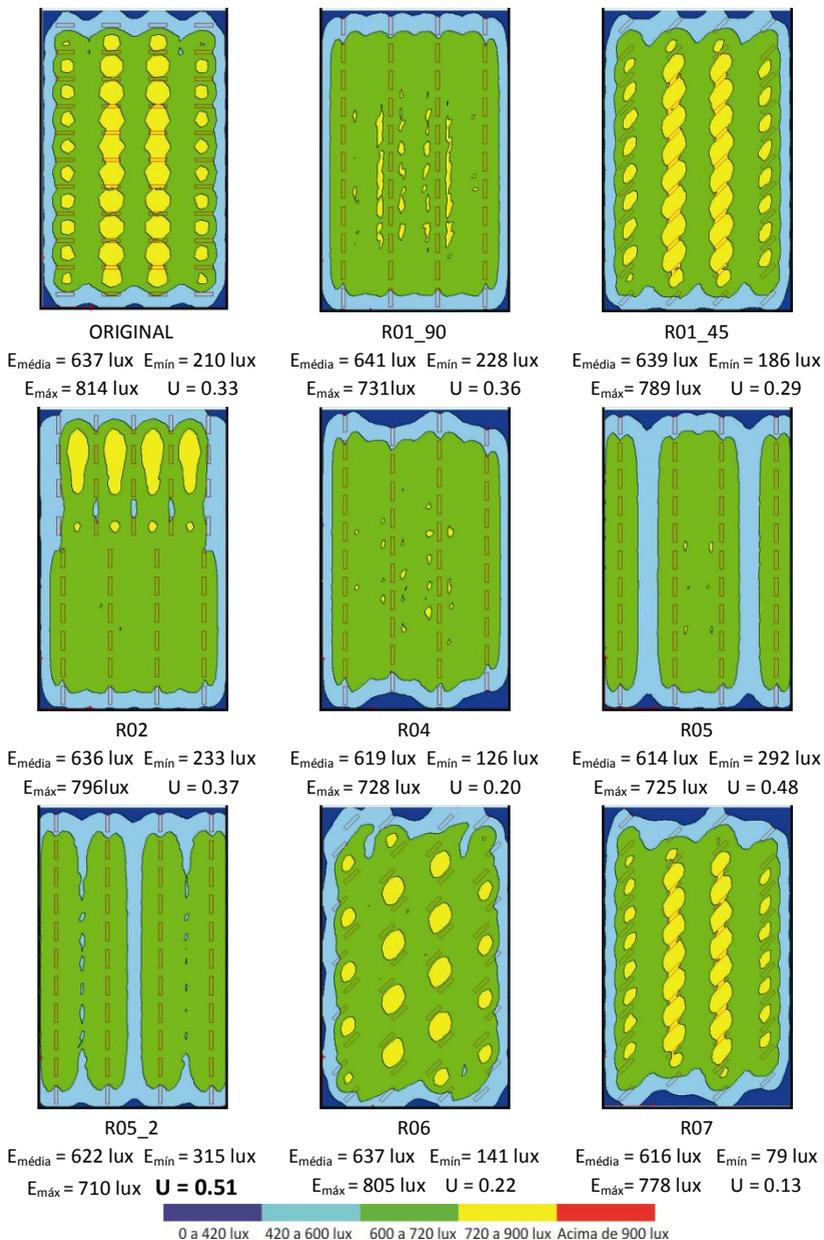
R07

$E_{média} = 564 \text{ lux}$   $E_{mín} = 182 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 680 \text{ lux}$   $U = 0.32$

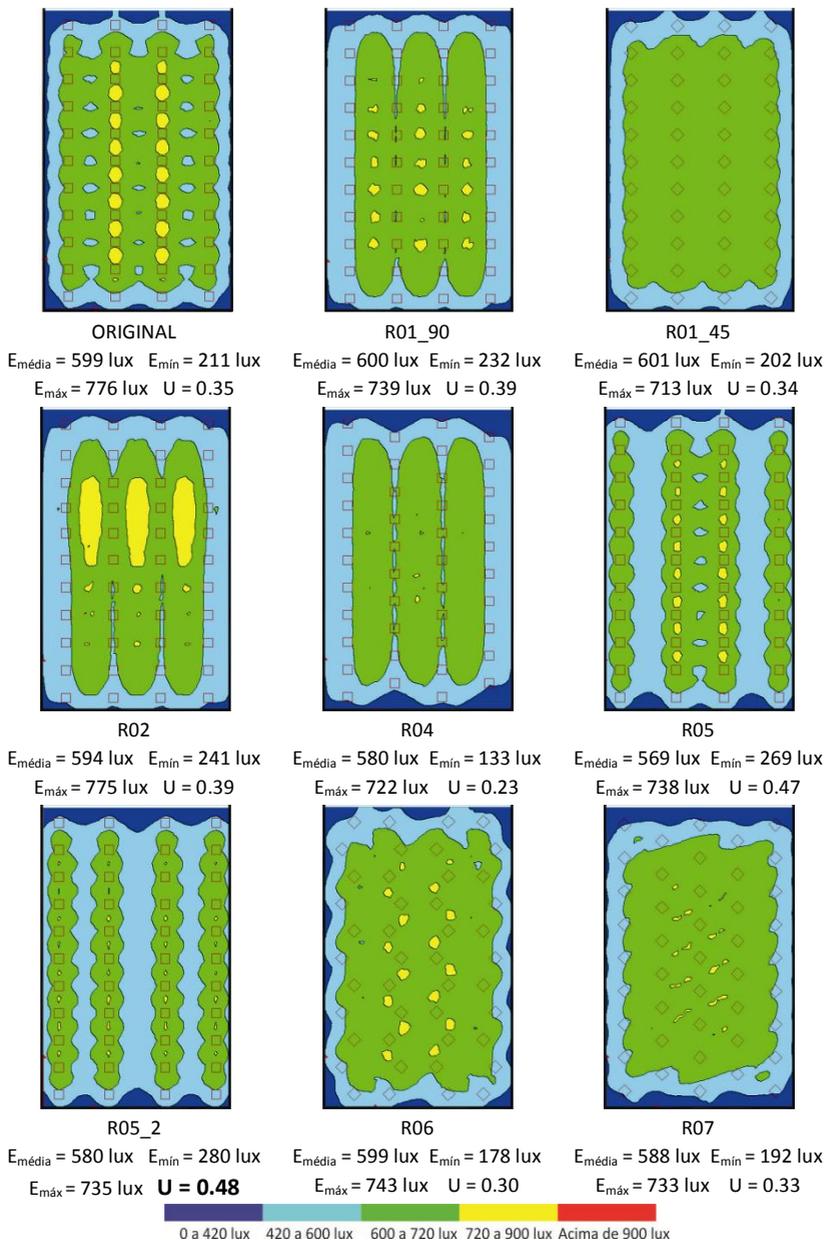


*\*A reformulação R06 não foi realizada devido à pequena dimensão da luminária, o que impossibilitou a distribuição das luminárias para esta reformulação.*

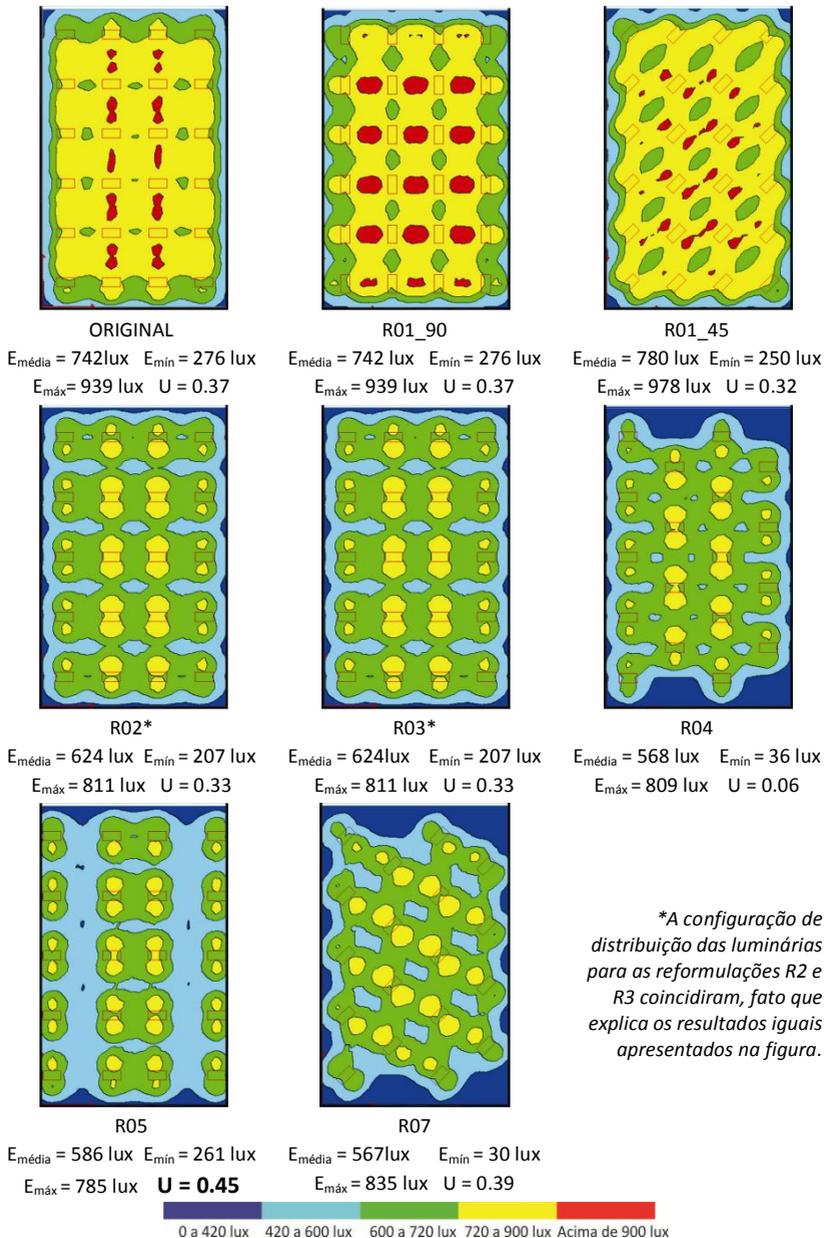
**Figura 48:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL3312 2x16W – M01



**Figura 49:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL3312 2x32W – M01



**Figura 50:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL3312 4x16W – M01

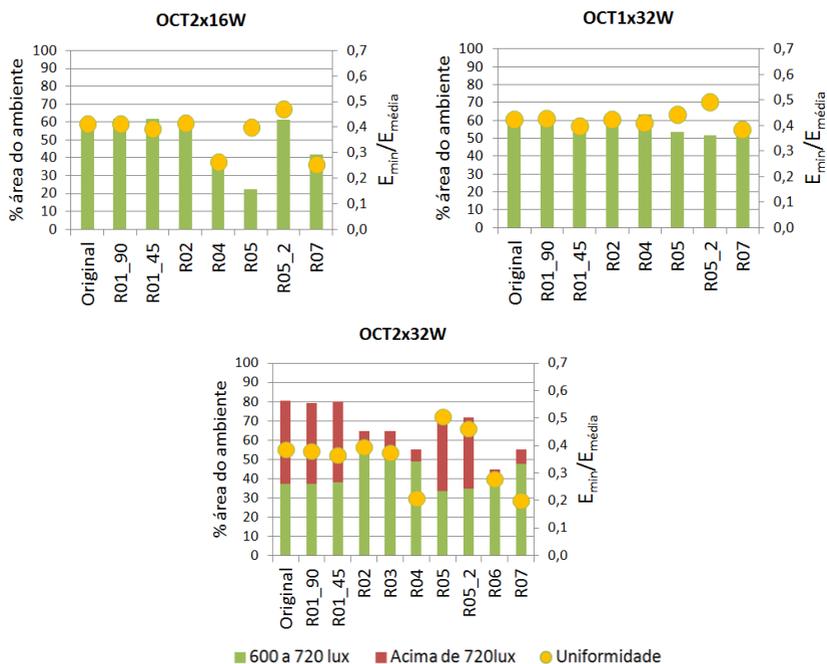


*\*A configuração de distribuição das luminárias para as reformulações R2 e R3 coincidiram, fato que explica os resultados iguais apresentados na figura.*

**Figura 51:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL3312 4x32W – M01

## Linha OCT

Nas três luminárias analisadas para linha apenas com refletor observa-se que R05 e R05\_2 também são as reformulações responsáveis pelos maiores níveis de uniformidade, conforme Figura 52. Os gráficos revelam que para as luminárias 2x16W e 1x32W, não há a existência de zonas excessivas.

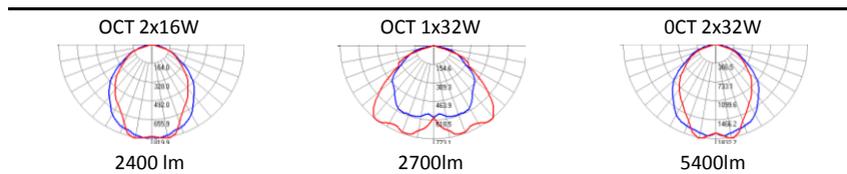


**Figura 52:** Gráfico de análise para luminárias da linha OCT

Para o caso da luminária OCT2x16W as maiores áreas no intervalo 600 a 720 lux (62%) coincidem em R01\_90, R01\_45 e R05\_2. Quanto à uniformidade, o maior valor - 0,47 - pertence à R05\_2. Destaca-se que em todos os projetos não ocorrem zonas com iluminação excessiva (acima de 720 lux). A mudança de afastamento em R05 provoca uma queda nas zonas analisadas, que passam a ser 23% da área do ambiente, conforme Figura 52. No entanto, a uniformidade para este caso é de 0,4, semelhante aos valores referentes às reformulações Original (0,41), R01\_90(0,41), R01\_45 (0,40) e R02(0,41). O gráfico da Figura 52 mostra que enquanto

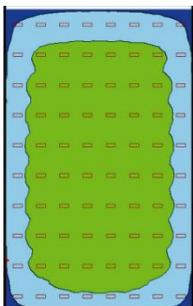
possuem valores de uniformidade próximos, a diferença na análise de zonas é bastante significativa, chegando a ser 62% da área do ambiente nas soluções R01\_90, R01\_45 e R05\_2. A configuração das curvas de intensidade (Tabela 15), concentradas e semelhantes para as duas orientações (transversal e longitudinal), influenciam na distribuição da iluminação quando é modificado o afastamento entre as luminárias, conforme gráficos da Figura 53.

**Tabela 15:** Curvas de distribuição luminosa e fluxo luminoso total - linha OCT



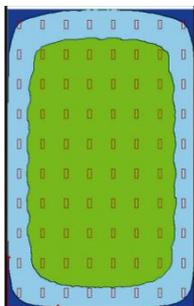
Já para as reformulações da luminária 1x32W, R02 e R04 possuem maior área na zona 600 a 720 lux (63%), enquanto que R05\_2, que apresenta maior uniformidade (0,49), tem 52%. Percebe-se que a uniformidade varia muito pouco em relação às outras luminárias desta linha. Apenas em R05\_2 há o aumento significativo do valor, devido principalmente à redução da iluminância média e aumento da iluminância mínima. Quando se associa a CDL (Tabela 15) com os mapas de distribuição luminosa (Figura 54), observa-se que a luminária composta por apenas uma lâmpada possui um fecho mais aberto e menor intensidade, distribuindo melhor a luz no plano de trabalho.

A Figura 55 revela que para a luminária 2X32, quando o projeto é definido desconsiderando o critério de espaçamento (R02 e R03) ocorre a redução da área de zonas excessivas. Em R02, 55% da área total pertencem ao intervalo de 600 a 720 lux, o maior para esta luminária. Em R03, 50% da área total pertencem ao intervalo de 600 a 720 lux, sendo que a uniformidade para este caso é de 0,38. A maior uniformidade é em R05 – 0,51 – que possui 33% da área no intervalo e a menor em R04 – 0,21, com 55% da área no intervalo. Aqui se percebe a influência da CDL (Tabela 15), que possui um fecho mais fechado, maior fluxo luminoso e intensidade, implicando na maior concentração de luz em torno das luminárias.



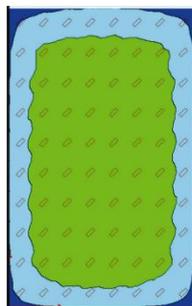
ORIGINAL

$E_{média} = 600 \text{ lux}$   $E_{min} = 247 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 701 \text{ lux}$   $U = 0.41$



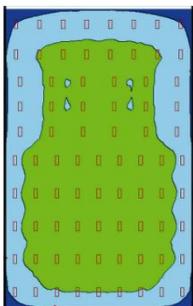
R01\_90

$E_{média} = 601 \text{ lux}$   $E_{min} = 248 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 695 \text{ lux}$   $U = 0.41$



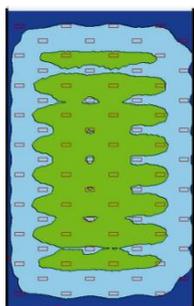
R01\_45

$E_{média} = 600 \text{ lux}$   $E_{min} = 237 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 702 \text{ lux}$   $U = 0.40$



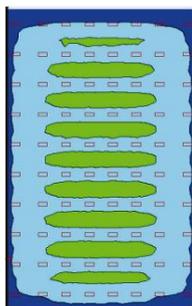
R02

$E_{média} = 593 \text{ lux}$   $E_{min} = 246 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 712 \text{ lux}$   $U = 0.41$



R04

$E_{média} = 541 \text{ lux}$   $E_{min} = 143 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 664 \text{ lux}$   $U = 0.26$



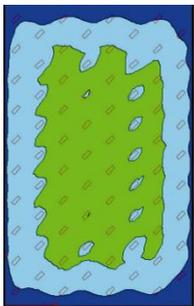
R05

$E_{média} = 531 \text{ lux}$   $E_{min} = 213 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 643 \text{ lux}$   $U = 0.40$



R05\_2

$E_{média} = 590 \text{ lux}$   $E_{min} = 278 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 668 \text{ lux}$   $U = 0.47$

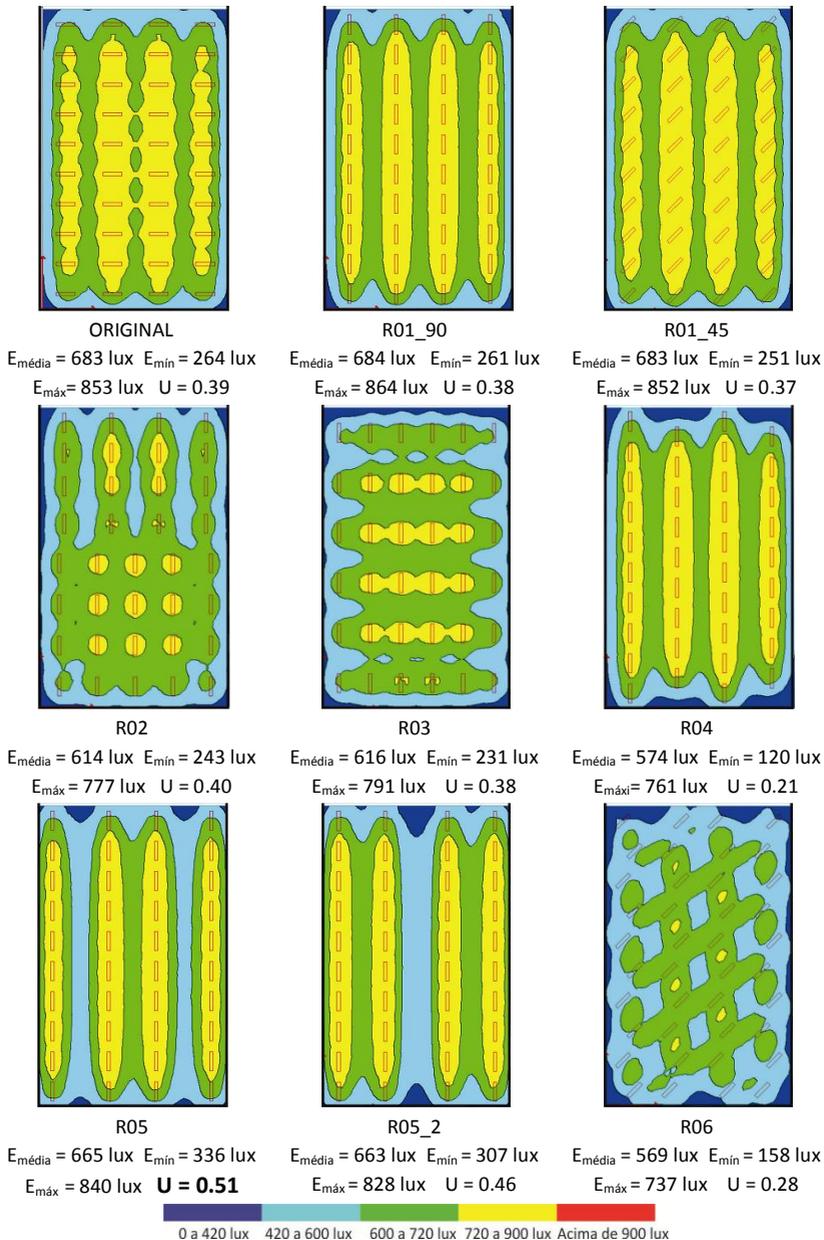


R07

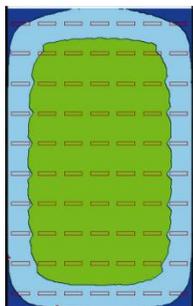
$E_{média} = 540 \text{ lux}$   $E_{min} = 138 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 660 \text{ lux}$   $U = 0.26$



**Figura 53:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 2x16W – M01

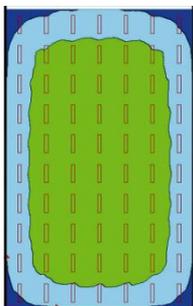


**Figura 54:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 2x32W – M01



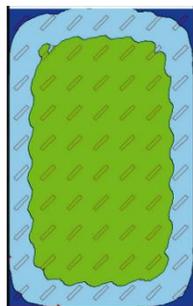
ORIGINAL

$E_{\text{média}} = 594 \text{ lux}$   $E_{\text{min}} = 252 \text{ lux}$   
 $E_{\text{máx}} = 695 \text{ lux}$   $U = 0.42$



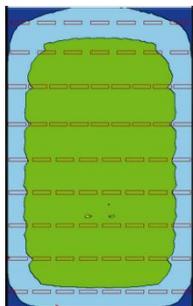
R01\_90

$E_{\text{média}} = 594 \text{ lux}$   $E_{\text{min}} = 253 \text{ lux}$   
 $E_{\text{máx}} = 702 \text{ lux}$   $U = 0.43$



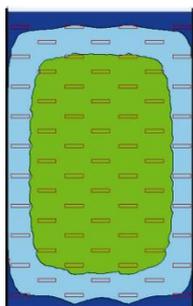
R01\_45

$E_{\text{média}} = 594 \text{ lux}$   $E_{\text{min}} = 236 \text{ lux}$   
 $E_{\text{máx}} = 704 \text{ lux}$   $U = 0.40$



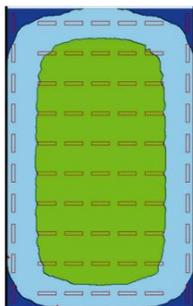
R02

$E_{\text{média}} = 600 \text{ lux}$   $E_{\text{min}} = 253 \text{ lux}$   
 $E_{\text{máx}} = 722 \text{ lux}$   $U = 0.42$



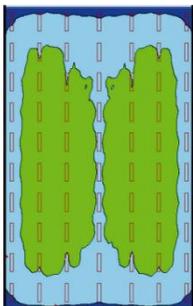
R04

$E_{\text{média}} = 572 \text{ lux}$   $E_{\text{min}} = 234 \text{ lux}$   
 $E_{\text{máx}} = 687 \text{ lux}$   $U = 0.41$



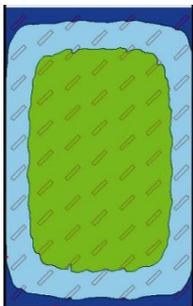
R05

$E_{\text{média}} = 580 \text{ lux}$   $E_{\text{min}} = 256 \text{ lux}$   
 $E_{\text{máx}} = 693 \text{ lux}$   $U = 0.44$



R05\_2

$E_{\text{média}} = 577 \text{ lux}$   $E_{\text{min}} = 284 \text{ lux}$   
 $E_{\text{máx}} = 657 \text{ lux}$   **$U = 0.49$**



R07

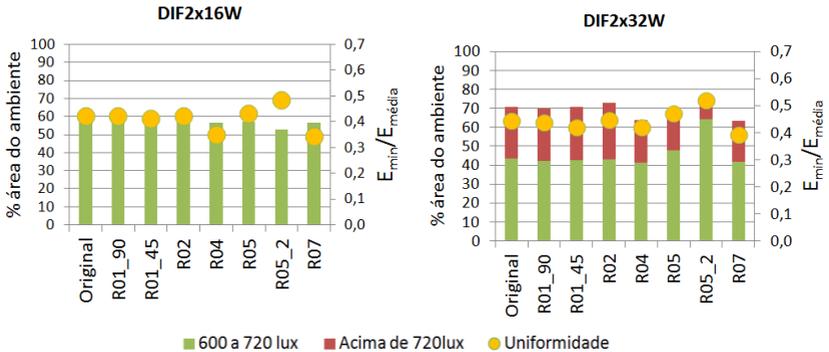
$E_{\text{média}} = 572 \text{ lux}$   $E_{\text{min}} = 219 \text{ lux}$   
 $E_{\text{máx}} = 684 \text{ lux}$   $U = 0.38$



**Figura 55:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 1x32W – M01

## Linha DIF

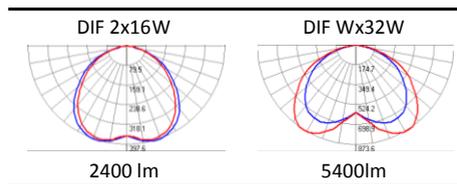
A linha difusora apresenta um perfil um pouco diferente das demais linhas. A análise dos gráficos da Figura 56 permite a identificação de um comportamento semelhante entre as reformulações propostas, sendo que a uniformidade é maior em R05 e R05\_2, o que acontece em todas as linhas de luminárias.



**Figura 56:** Gráfico de análise para luminárias da linha DIF

As CDLs para cada luminária são ilustradas na Tabela 16.

**Tabela 16:** Curvas de distribuição luminosa e fluxo luminoso total - linha DIF

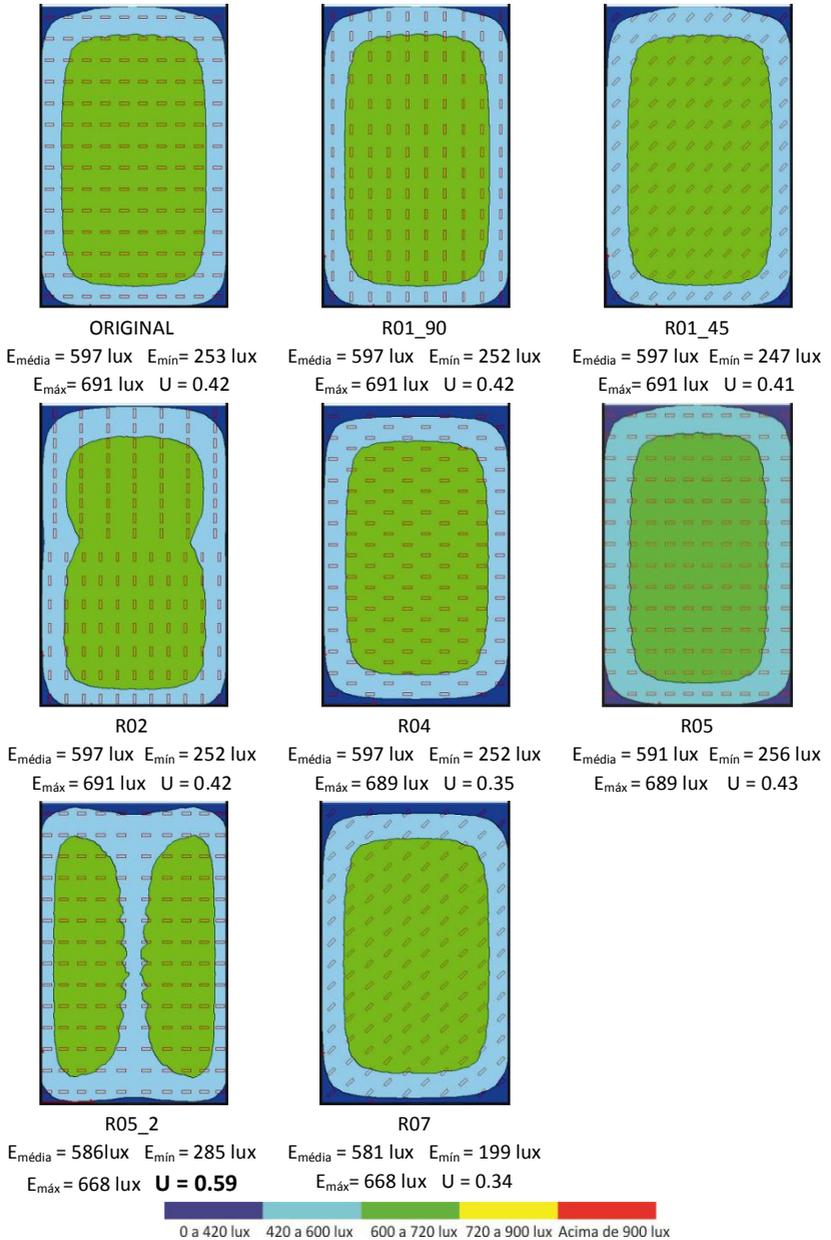


Para a luminária DIF2x16W, apesar de R05\_2 apresentar maior uniformidade (0,49), percebe-se que a distribuição da iluminação no intervalo 600 a 720 lux apresenta duas grandes áreas compreendidas neste intervalo, conforme pode ser visto na Figura 56. No entanto, os maiores níveis de iluminação, são encontrados nos projetos Original, R01\_90, R01\_45 e R02, todos com 61% da área do ambiente no intervalo 600 a 720 lux e uniformidade de 0,42. Quando se analisam estes números com os mapas de distribuição de iluminância da Figura 57, percebe-se que apesar de possuir basicamente os mesmos valores que os três primeiros projetos, R02 possui uma distribuição menos

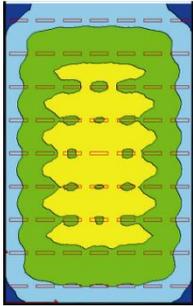
uniforme. A pouca influência da mudança de direção das luminárias pode ser explicada pela forma da CDL (Tabela 16), que possui curvas de intensidade que se sobrepõem quase totalmente nas duas direções, longitudinal e transversal, distribuindo o fluxo igualmente nestas direções.

Zonas excessivas concentradas no centro do ambiente são encontradas para todos os casos da luminária DIF2x32W, conforme pode ser visto na Tabela 32. A mudança no afastamento da R05\_2 interfere de maneira positiva tanto para a uniformidade (0,52) quanto para a otimização da distribuição da luz pela luminária. Destaca-se que para R05\_2, além da alta uniformidade, há um aumento da área no intervalo 600 a 720 lux (64%), conforme Figura 58.

Quando se analisa a relação entre a CDL (Tabela 16) e os mapas de zonas de iluminância (Figura 58) fica claro a influência da configuração mais aberta das curvas de intensidade e maior fluxo luminoso no espaçamento entre as luminárias DIF 2x32W. As modificações de espaçamento permitem uma melhor distribuição do fluxo luminoso emitido pela luminária, sendo que a concentração presente no centro do ambiente para os outros casos é melhor distribuída pelo espaço.

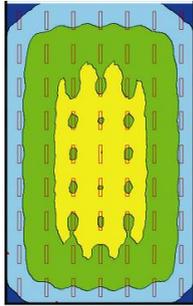


**Figura 57:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DIF 2x16W – M01



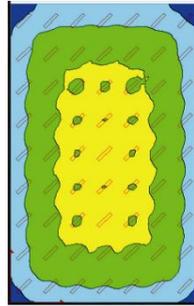
ORIGINAL

$E_{média} = 643 \text{ lux}$   $E_{min} = 286 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 765 \text{ lux}$   $U = 0.44$



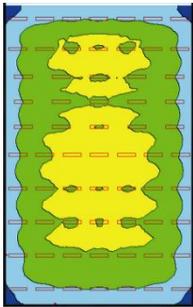
R01\_90

$E_{média} = 637 \text{ lux}$   $E_{min} = 279 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 753 \text{ lux}$   $U = 0.44$



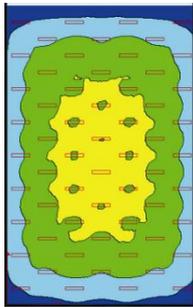
R01\_45

$E_{média} = 643 \text{ lux}$   $E_{min} = 270 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 755 \text{ lux}$   $U = 0.42$



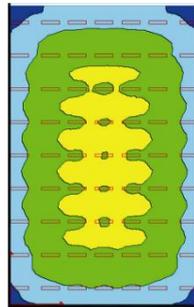
R02

$E_{média} = 652 \text{ lux}$   $E_{min} = 292 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 773 \text{ lux}$   $U = 0.45$



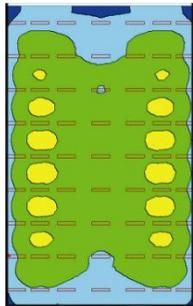
R04

$E_{média} = 619 \text{ lux}$   $E_{min} = 261 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 754 \text{ lux}$   $U = 0.42$



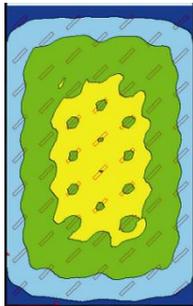
R05

$E_{média} = 635 \text{ lux}$   $E_{min} = 299 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 763 \text{ lux}$   $U = 0.47$



R05\_2

$E_{média} = 629 \text{ lux}$   $E_{min} = 328 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 750 \text{ lux}$   $U = 0.52$



R07

$E_{média} = 618 \text{ lux}$   $E_{min} = 243 \text{ lux}$   
 $E_{máx} = 754 \text{ lux}$   $U = 0.39$



**Figura 58:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DIF 2x32W – M01

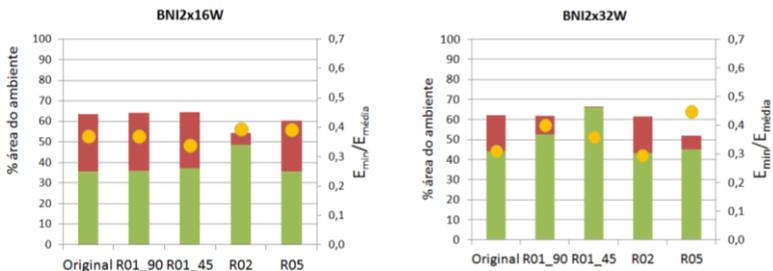
## 4.2.2 Modelo M02

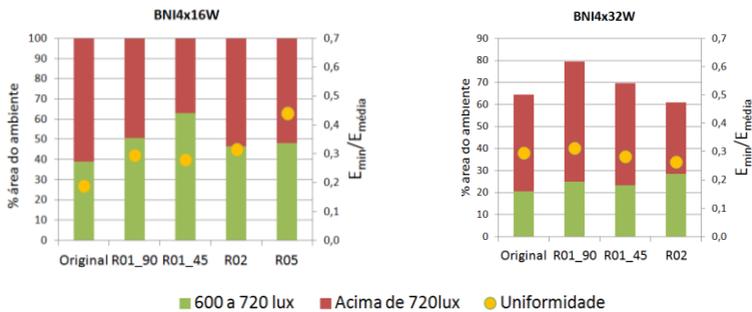
Para o modelo M02, por apresentar uma geometria mais complexa que M01, as configurações para a distribuição uniforme das luminárias se mostraram mais complicadas, devido à dificuldade em encontrar um distanciamento uniforme entre todas as luminárias. Como o critério adotado para o projeto Original implica em uma uniformidade também na distribuição das luminárias no teto, procura-se manter este critério para uma investigação do processo de projeto luminotécnico para este modelo de ambiente.

A seguir são apresentados os projetos construídos para cada linha de luminária, sendo que menos reformulações foram realizadas, em comparação ao modelo M01. Isto porque, do estudo do primeiro modelo, algumas reformulações foram suprimidas, para sintetizar o estudo, já que não se mostraram tão relevantes. Assim, as reformulações utilizadas em M02 foram as de orientação, R02 e em alguns casos R05.

### Linha BNI

A Figura 59 apresenta os gráficos para a análise da linha BNI. Diferentemente do que ocorre em M01, as maiores uniformidades variam entre as reformulações R02 e R05. Destaca-se que na maioria dos casos há zonas acima de 600 lux, com exceção da R01\_45 da luminária BNI 2X32W.



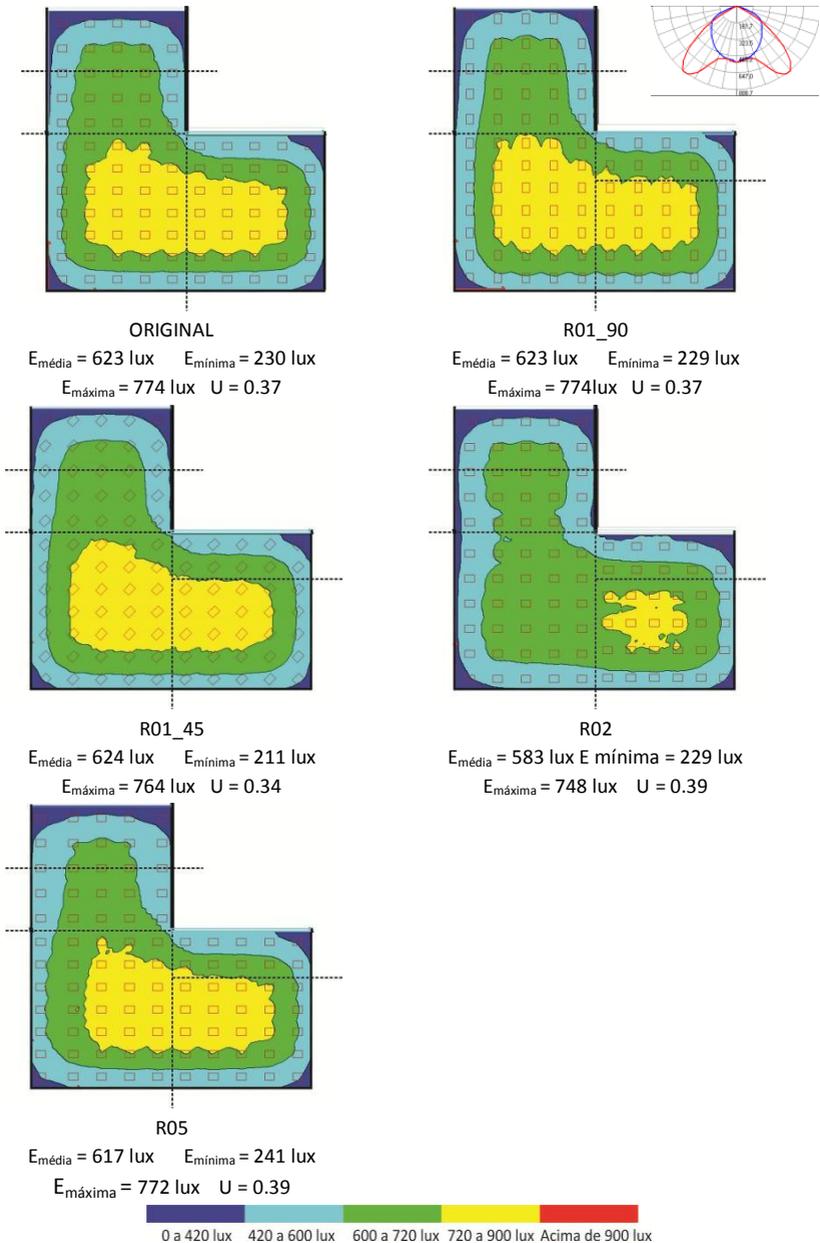


**Figura 59:** Gráfico de análise para luminárias da linha BNI

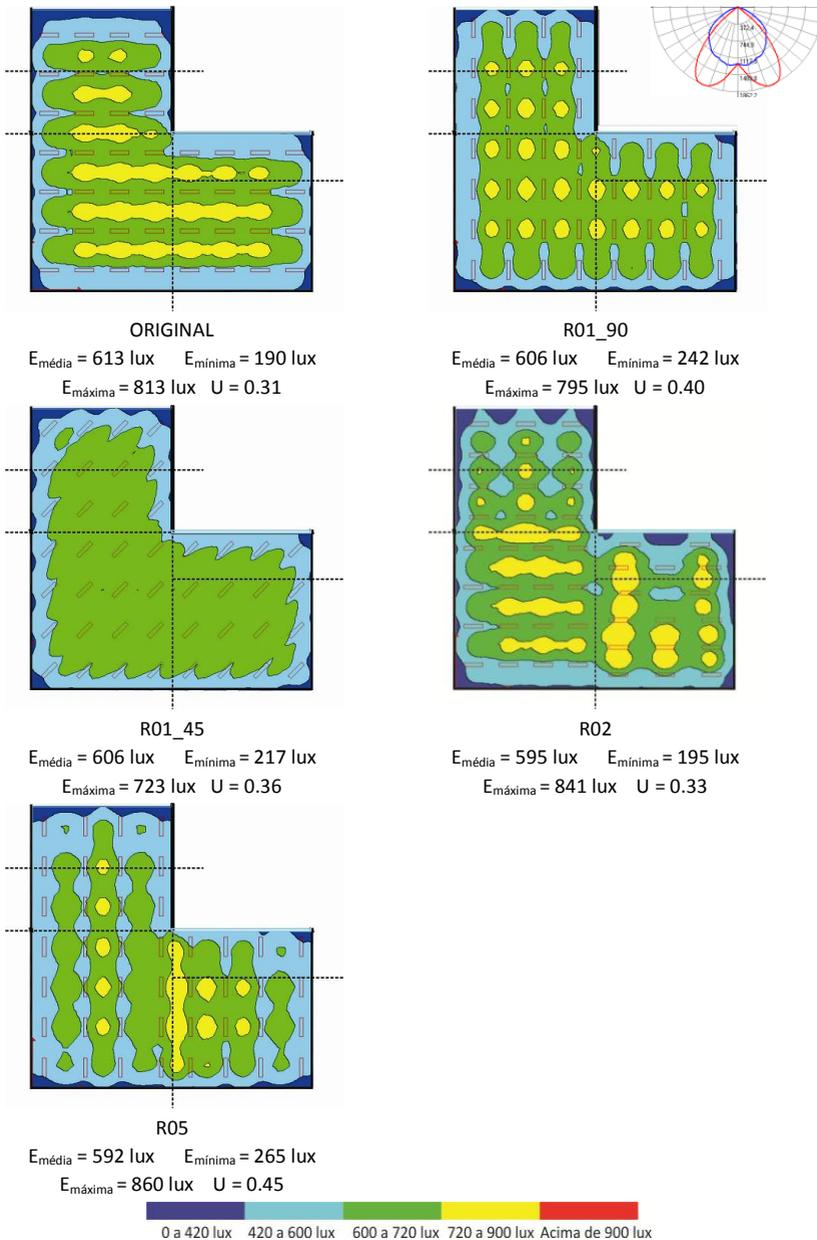
No caso da luminária 2x16W, as maiores uniformidades são encontradas em R02 e R05, atingindo 0,39. Dentre estas duas, R02 apresenta maior área no intervalo 600 a 720 lux - 48,5% - e menor área acima de 600 lux - 54%. A análise dos mapas de iluminância na Figura 60 mostra que todas as reformulações apresentam uma concentração de área excessiva, que varia de localização conforme a modificação proposta.

Assim como para o modelo M01, a luminária 2x32W apresenta a maior uniformidade em R05 (0,45). A análise do gráfico da Figura 59 e o mapa de iluminância da Figura 61 revelam que a R01\_45 possui um padrão de distribuição que elimina zonas excessivas e fornece maior área do ambiente na zona 600 a 720 lux (66%). No entanto, a maior uniformidade acontece em R05 (0,45), que pelas análises do mapa, possui uma distribuição menos homogênea que R01\_45. Para a luminária 4x16W, R05 apresenta a maior uniformidade (0,44) e também menor área com iluminâncias acima de 600 lux (56%). A maior área no intervalo 600 a 720 lux está na R01\_45 (62,9%), que, no entanto, apresenta menor uniformidade que R02 – 0,31.

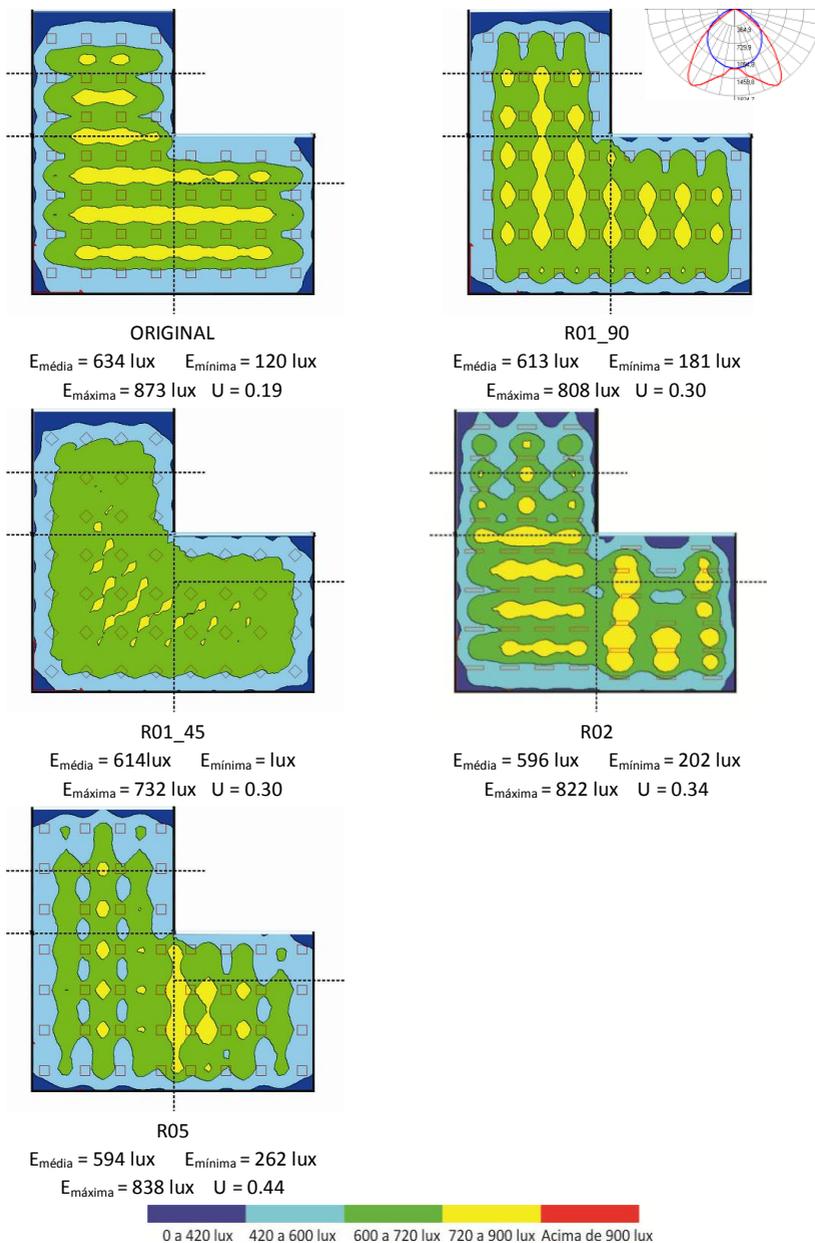
O gráfico da Figura 59 revela que há a presença de área excessiva em todas as reformulações para a luminária 4x32W. A maior uniformidade é encontrada em R01\_90 (0,31) e a menor em R02 (0,26). Quanto à análise de zonas, a maior área compreendida no intervalo 600 a 720 lux é em R02, com 28,5% da área total. Ressalta-se que este valor é muito baixo em comparação às demais luminárias da linha. Os mapas de distribuição de iluminâncias da Figura 63 mostra que a luminária com quatro lâmpadas apresenta fluxos luminosos concentrados em determinadas regiões do ambiente.



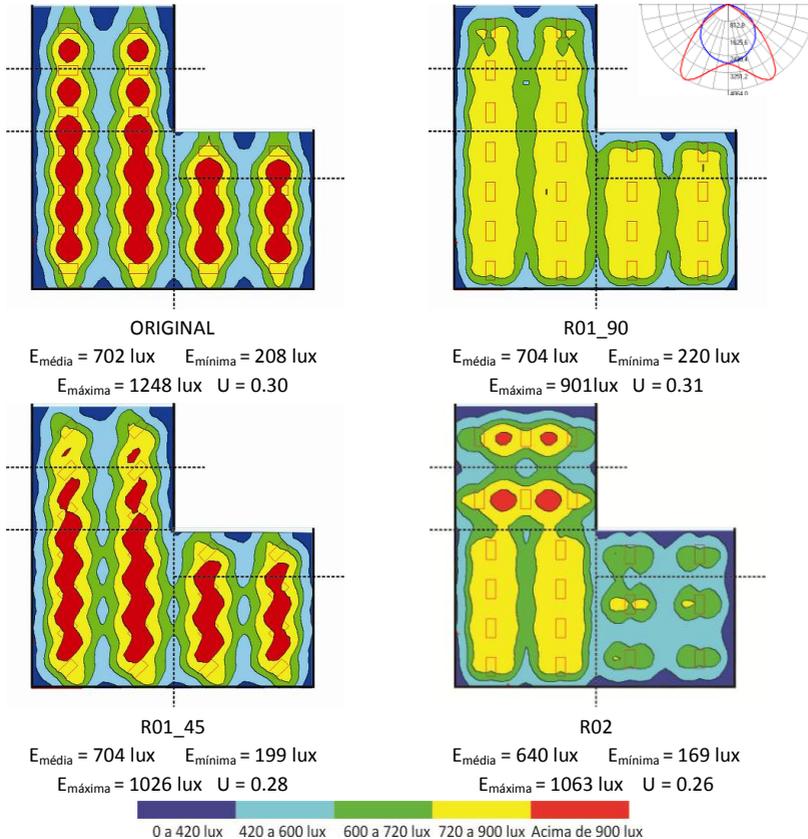
**Figura 60:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI 2x16W – M02



**Figura 61:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BN1 2x32W – M02



**Figura 62:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI 4x16W – M02



**Figura 63:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária BNI 4x32W – M02

A Figura 63 mostra que a rotação da luminária implica em distribuições bem diferenciadas em cada caso. Quando se rotaciona em 90 graus (R01\_90), por exemplo, observa-se que ocorre uma redução nas zonas excessivas. Este fato pode ser explicado pela CDL desta luminária, que apresenta maior intensidade no sentido transversal da luminária. Assim, em R01\_90, o maior distanciamento das luminárias implica em um melhor aproveitamento do fluxo luminoso emitido pela luminária. Já no sistema Original, observa-se a presença de zonas excessivas, já que a distância entre as luminárias no sentido transversal da CDL é menor, o que gera sobreposições do fluxo luminoso emitido por cada luminária, gerando zonas excessivas.

## Linha DBL

Os gráficos de análise para linha DBL são mostrados na Figura 64.

Apesar de possuir a mesma área com iluminâncias acima de 600 lux (62%) que o projeto Original e a R01\_45, o gráfico da Figura 64 revela que quando aplicada a R01\_90, a área do ambiente compreendida no intervalo de 600 a 720 lux, diminuiu, passando a 55%; A maior uniformidade é encontrada em R05 e em R02, com 0,39 e 0,38, respectivamente. Porém, estas duas reformulações são as que apresentam menor área nas zonas analisadas. A análise visual dos resultados mostra que apesar da maior uniformidade, R02 possui pior distribuição da iluminação do que R05 (Figura 65).

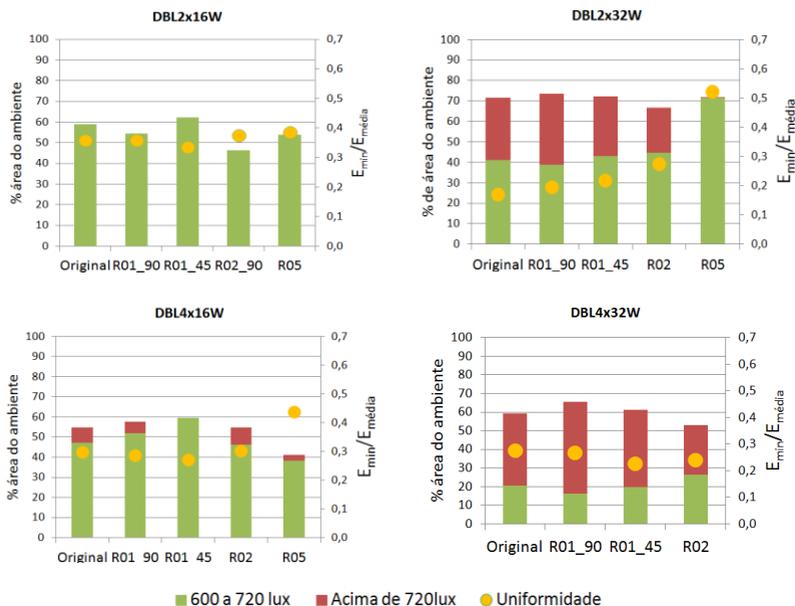


Figura 64: Gráfico de análise para luminárias da linha DBL

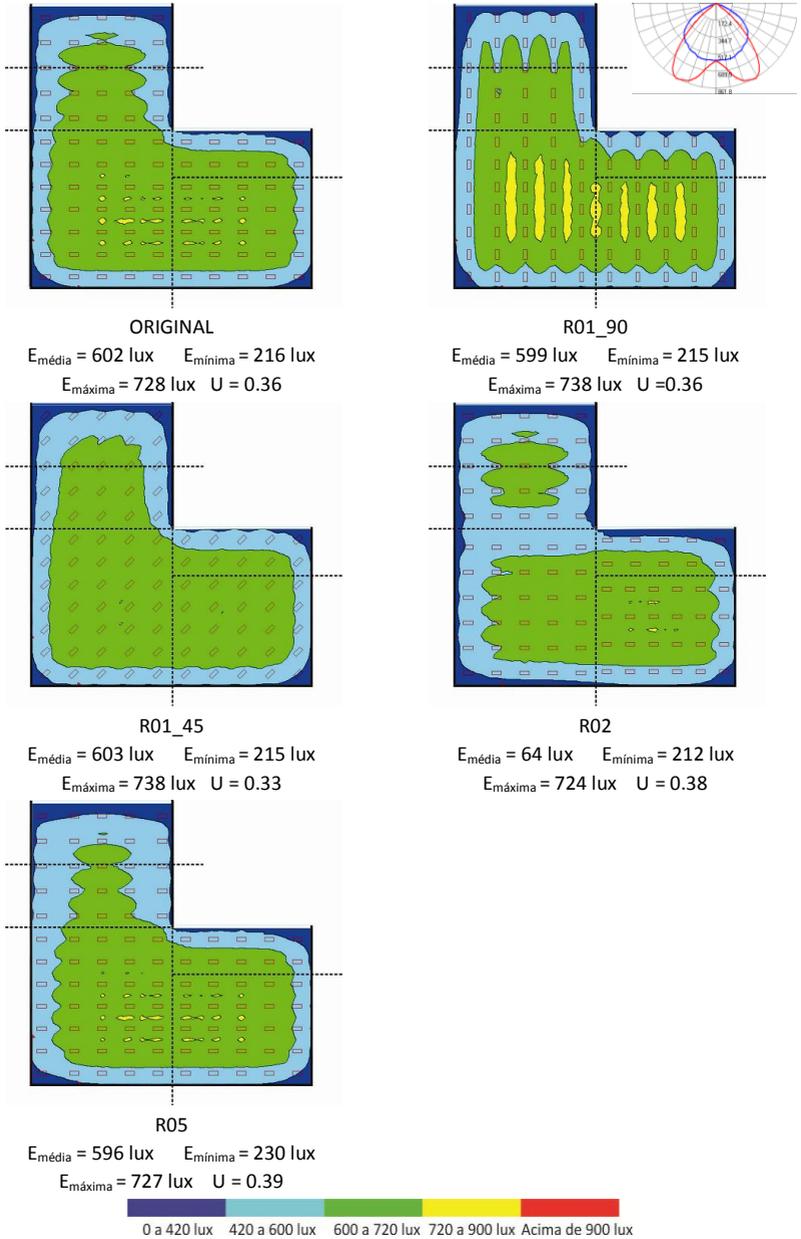
As zonas excessivas variam pouco para luminária 2X32W. Conforme Figura 64, apenas para R02 não há a presença de zonas excessivas, atingindo 72% da área do ambiente no intervalo de 600 a 720 lux. Esta reformulação também resulta na maior uniformidade – 0,52. Pelo gráfico, percebe-se que a uniformidade e as áreas

compreendidas no intervalo analisado são crescentes de acordo com as reformulações realizadas. A reformulação R02 apresenta resultados satisfatórios, com menor área excessiva (67%), maior área no intervalo (45%) e uniformidade de 0,27, maior que as demais reformulações, exceto para R05.

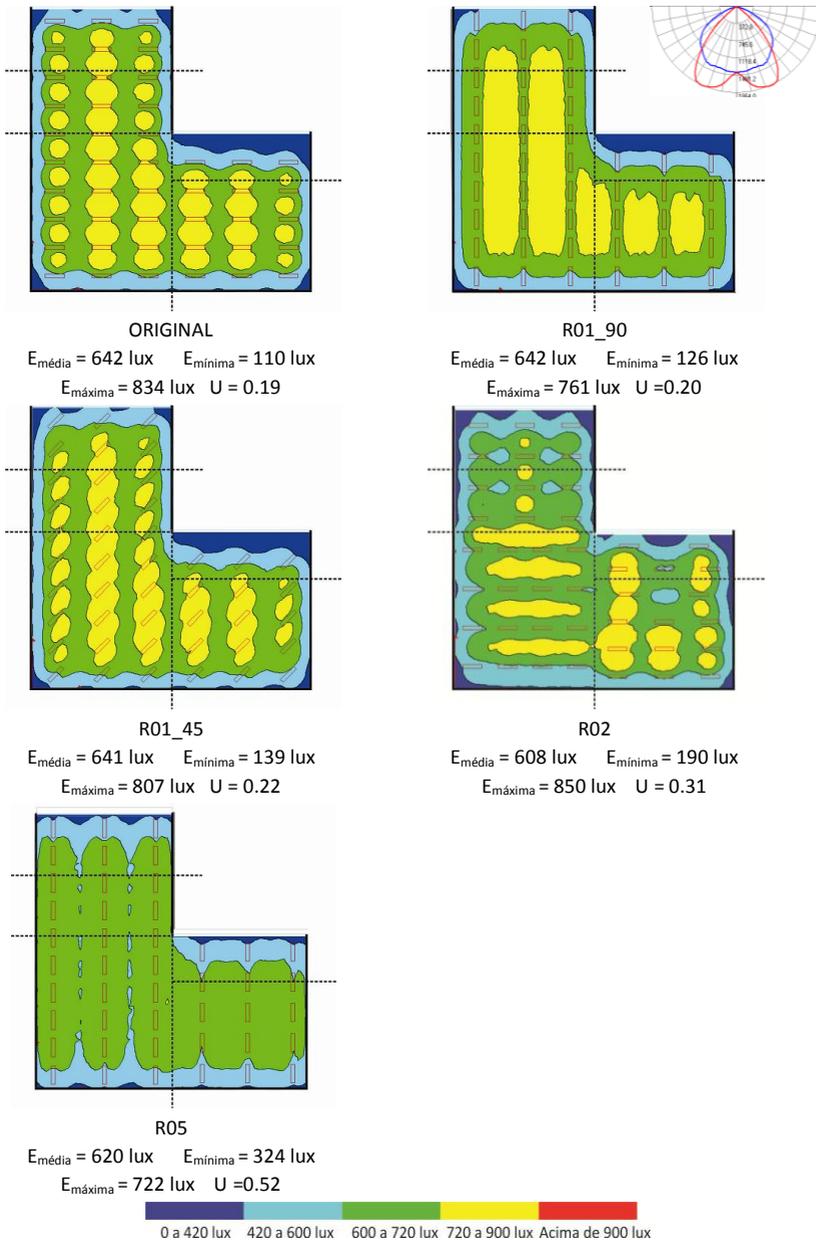
Para a luminária 4X16W, a maior uniformidade é atingida em R05 (0,44) e a menor em R01\_45 (0,27). Apesar de maior uniformidade, R05 tem 38% da área no intervalo, em contraste com 59% de R01\_45.

O gráfico da Figura 64 revela que há a presença de área excessiva em todas as reformulações para a luminária 4x32W, assim como constatado para a linha BNI. A maior uniformidade é encontrada em projeto Original (0,28) e a menor em R01\_45 (0,23). Quanto à análise de zonas, a maior área compreendida no intervalo 600 a 720 lux é em R02, com 26% da área total. Ressalta-se que este valor é muito baixo em comparação às demais luminárias da linha.

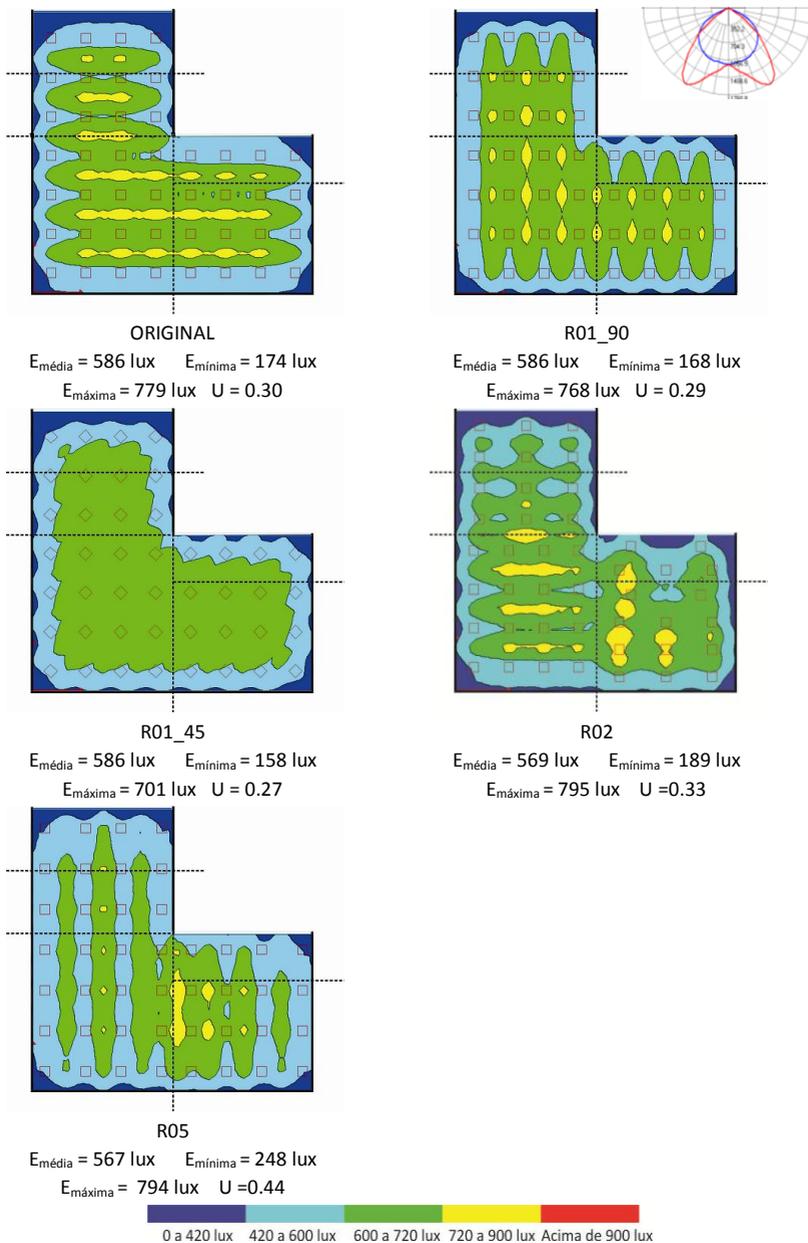
Os mapas de distribuição de iluminâncias da Figura 68 mostra que a luminária com quatro lâmpadas apresenta fluxos luminosos concentrados em determinadas regiões do ambiente. Assim como na linha BNI, a CDL desta luminária apresenta maior intensidade no sentido transversal. Por este motivo, a rotação da luminária em 90 graus (R01\_90) possibilita um melhor aproveitamento do fluxo luminoso no ambiente, uma vez que o espaçamento no sentido transversal é maior entre as luminárias. Já em R01\_45 e o sistema Original, o afastamento neste sentido é maior, aproximando as luminárias e gerando zonas com iluminação excessiva.



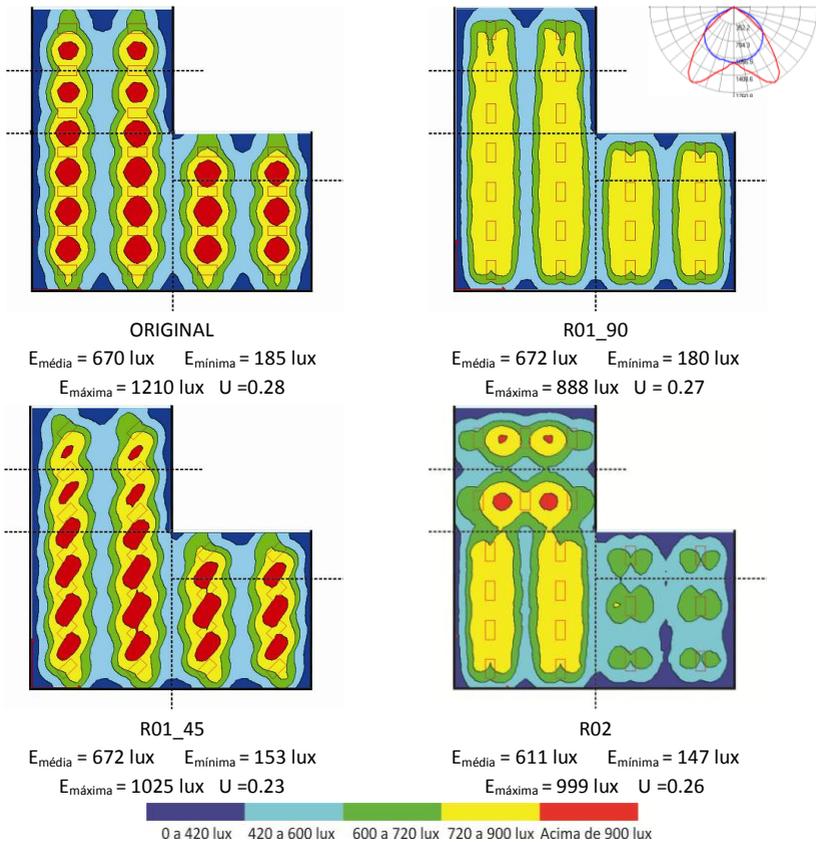
**Figura 65:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL 2x16W – M02



**Figura 66:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL 2x32W – M02



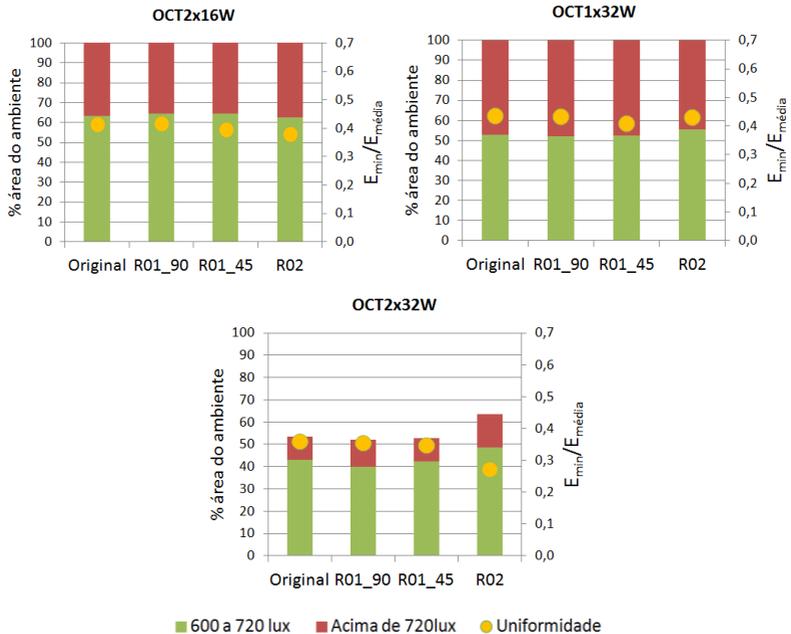
**Figura 67:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL 4x16W – M02



**Figura 68:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DBL 4x32W – M02

## Linha OCT

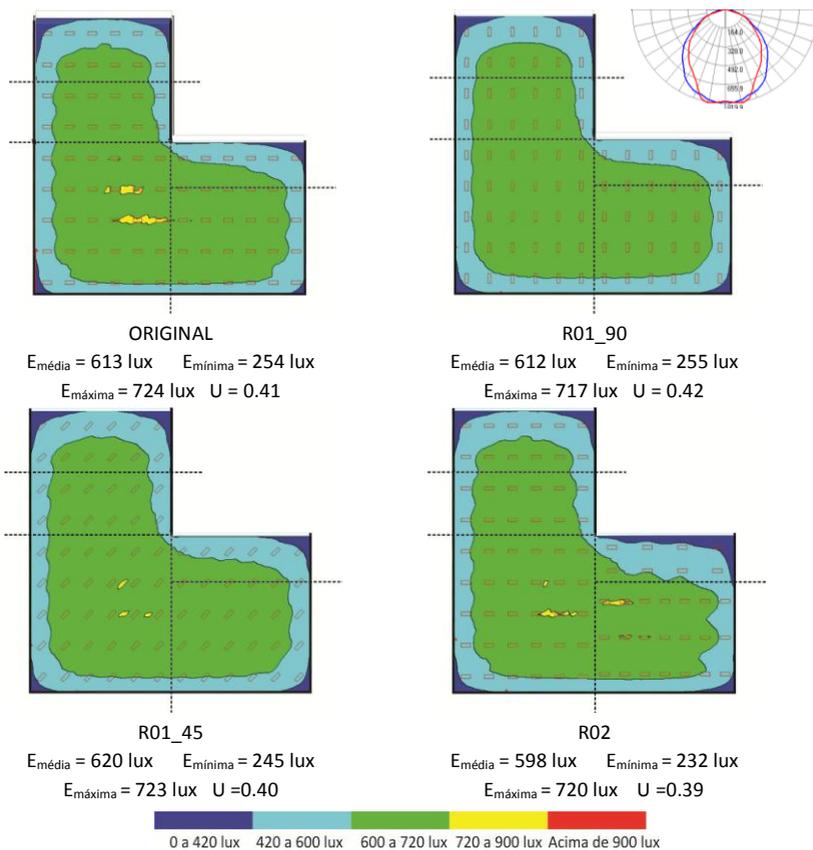
A observação dos gráficos da Figura 69 mostra que para esta linha as variações nos parâmetros são menores.



**Figura 69:** Gráfico de análise para luminárias da linha OCT

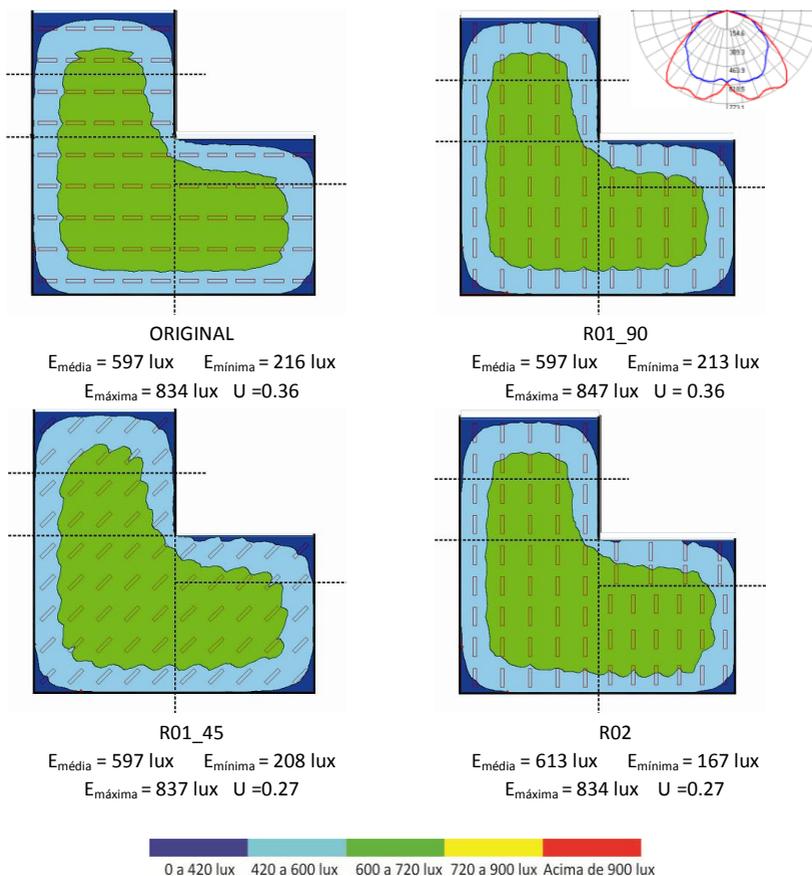
A luminária 2X16W apresenta as menores variações nos dois parâmetros, sendo que não há zonas excessivas nas reformulações apresentadas, exceto para o sistema Original, que contém 1% da área com iluminação excessiva. Pela forma da CDL, que possui curvas de intensidade semelhantes para duas orientações, percebe-se pouca influência na mudança de orientação das luminárias. O valor constante de 65% da área compreendida no intervalo 600 a 720 lux cai para 62% em R02. Percebe-se pelo gráfico da Figura 69 que a uniformidade cai de acordo com as modificações realizadas, atingindo o menor valor em R02 - 0,38 e maior valor em R01\_90 – 0,42. No entanto, quando se analisam os mapas de distribuição luminosa da Figura 70, verifica-se que estas diferenças de valores, que são muito pequenas, não exercem

grande influência no modo com a luz é distribuída no plano de trabalho.



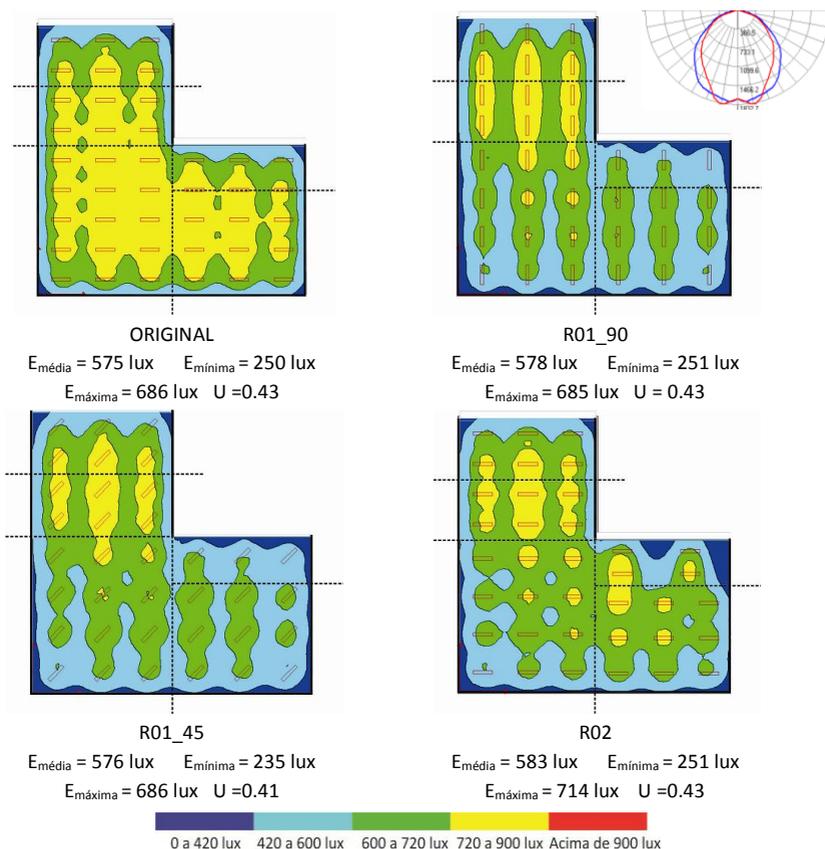
**Figura 70:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 2x16W – M02

Para a luminária 1x32W, também são pequenas as mudanças nos valores resultantes das reformulações. A uniformidade varia pouco, sendo constante para o sistema Original, R01\_90 e R02 -0,43 - e 0,41 para R01\_45. Quanto à área compreendida no intervalo 600 a 720 lux, R02 apresenta 55%, o maior valor encontrado, enquanto as demais soluções variam de 52 a 53%. Analisando a CDL, juntamente com os mapas de distribuição luminosa da Figura 71, verifica-se que apesar de apresentar grande diferença entre as duas curvas de intensidade, a distribuição da iluminação no plano de trabalho possui pouca variação.



**Figura 71:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 1x32W – M02

Já para a luminária 2x32W, todas as reformulações apresentam área excessivas. O maior fluxo luminoso e o fecho mais concentrado da CDL fazem com que o fluxo emitido fique concentrado em determinadas áreas. Conforme Figura 72, as uniformidades para os três primeiros projetos são de 0,36 para os sistemas Original e R01\_90, atingindo 0,35 para R01\_45 e 0,27 para R02, o menor valor. Apesar de menor uniformidade, R02 apresenta maior área no intervalo 600 a 720lux (49%) e maior área com iluminância acima de 600 lux (64%).



**Figura 72:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária OCT 2x32W – M02

## Linha DIF

A análise dos gráficos da Figura 73 permitem algumas considerações. Para a luminária DIF 2x16W não há variações significativas tanto na uniformidade quanto na análise de zonas. Os valores de uniformidade variam de 0,42 a 0,43, sendo que as zonas compreendidas em cada intervalo analisados se sobrepõem e se mantêm constantes. Os mapas de zonas luminosas da Figura 74 mostram que não há variações significativas nos padrões de distribuição da iluminação no plano de trabalho.

Já para 2X32W percebe-se a existência de zonas excessivas para todos os projetos. Quando as luminárias são rotacionadas em 90 graus, há um grande aumento da zona excessiva, assim como a redução do intervalo 600 a 720 lux. Neste caso, o valor de uniformidade aumenta, atingindo 0,45. A Figura 75 mostra a localização das zonas excessivas em cada proposta: no sistema original e em R01\_45, grande parte da zona excessiva se localiza na Zona 2.1; em R01\_90, a concentração ocorre em todo o ambiente; já em R02, a concentração ocorre em Z3. Esta constatação é interessante já que, para a definição da melhor solução, uma proposta como R02 parece ser mais vantajosa em termos de qualidade de iluminação, uma vez que pode amenizar o chamado “efeito caverna”, pela presença de maiores iluminâncias na zona que recebe menor contribuição da iluminação natural (Z3). No entanto, tal consideração pode ter efeitos negativos quanto ao consumo energético, devido à presença de maior número de luminárias na zona 3 e também o fato de que o sistema ficará ligado por mais tempo, o que resulta em maior consumo de energia.

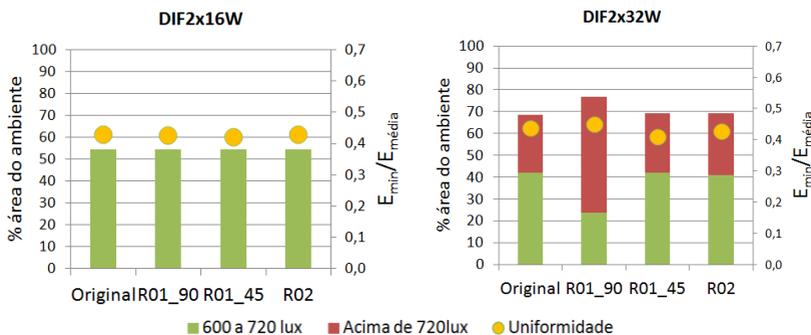
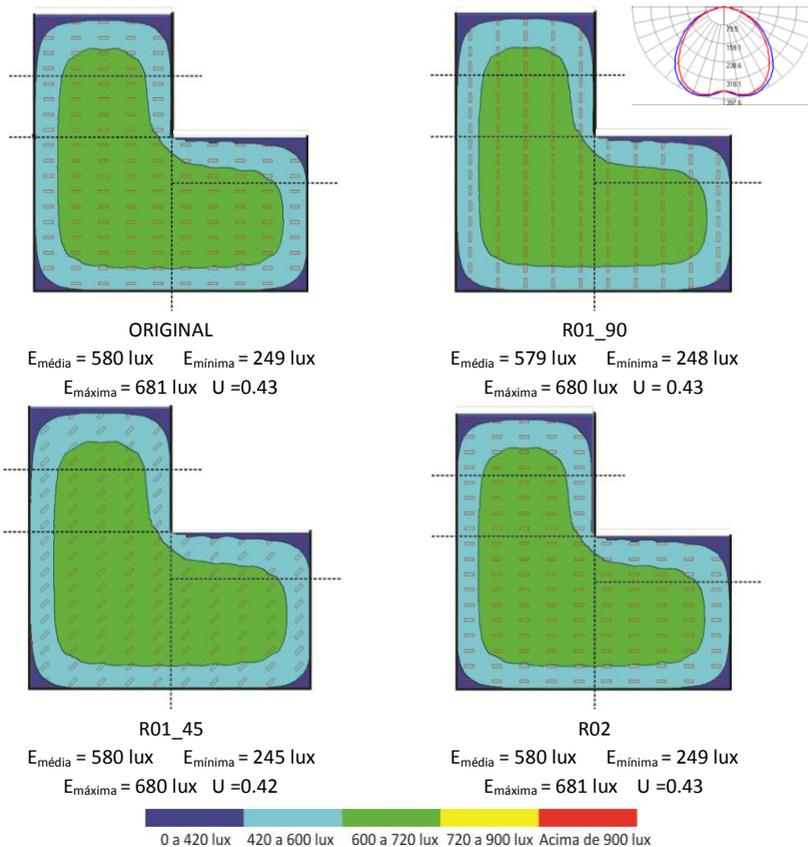
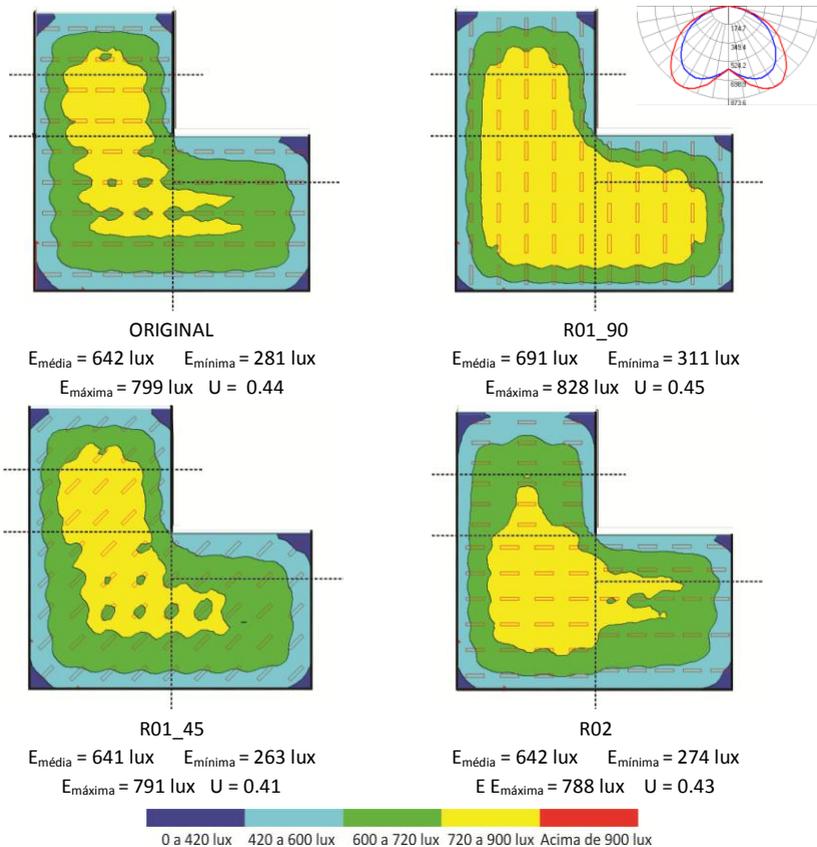


Figura 73: Gráfico de análise para luminárias da linha DIF



**Figura 74:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DIF 2x16W – M02



**Figura 75:** Mapas de distribuição de iluminâncias por zonas para a luminária DIF 2x32W – M02

### 4.2.3 Seleção dos projetos

Diante das análises apresentadas anteriormente para cada linha de luminária, procurou-se selecionar as melhores soluções entre todos os projetos propostos.

Os resultados obtidos com os diferentes projetos selecionados para o modelo M01 permitiram identificar uma tendência na relação entre a uniformidade e o espaçamento entre as luminárias: quanto maior o espaçamento, maior a uniformidade. Esta tendência pode ser observada na Tabela 17, onde os projetos com maior uniformidade são os que tiveram modificações de afastamento entre as luminárias. Porém, observando-se as maiores áreas do ambiente compreendidas no intervalo de 600 a 720 lux, percebe-se que as maiores uniformidades não correspondem aos melhores níveis de iluminação.

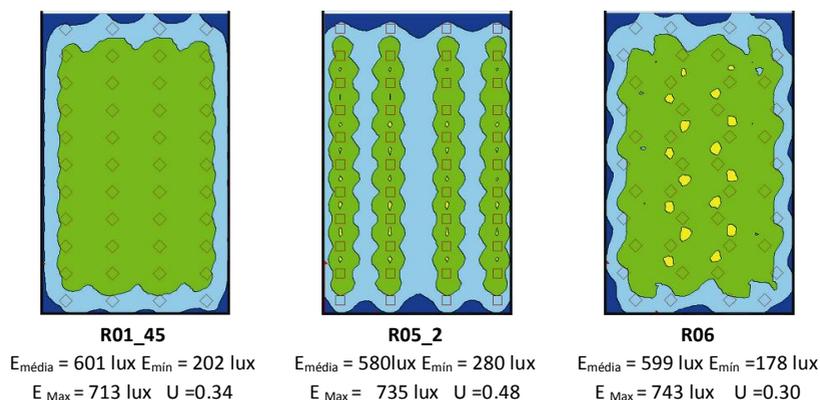
A Tabela 17 mostra os projetos selecionados em cada luminária que obtiveram os maiores valores de área compreendida no intervalo considerado de 600 a 720 lux. Os valores selecionados são sempre muito próximos, com diferença máxima de 5%. Consta-se que a maioria dos projetos que atendem à análise de zonas difere dos que possuem a maior uniformidade. Somente para três luminárias – BNI2x32W, DBL 2x32W E DIF 2x32 - a maior uniformidade coincide com a maior área naquele intervalo de iluminância (R05\_2). Assim, neste momento, define-se que a escolha entre a melhor solução é baseada no atendimento à análise de zonas.

**Tabela 17:** Projetos selecionados com as melhores soluções por parâmetro analisado – M01

		<b>Maior U</b>	<b>Maior área (600 a 720 lux)</b>			<b>Melhor distribuição</b>
BNI	2x16w	R05_2	R01_90	R01_45	Original	<b>R01_90</b>
	2x32w	<b>R05_2</b>	<b>R05_2</b>			<b>R05_2</b>
	4x16w	R05_2	R01_45	R06		<b>R01_45</b>
	4x32w	R05_2	R2	R3		<b>R2</b>
DBL	2x16w	R05_2	R01_90	R2		<b>R2</b>
	2x32w	<b>R05_2</b>	<b>R05_2</b>			<b>R05_2</b>
	4x16w	R05_2	R01_45	R06		<b>R01_45</b>
	4x32w	R05	R2	R3		<b>R2</b>
OCT	2x16W	R05_2	R01_90	R01_45	R05_2	<b>R01_90</b>
	2x32W	R05	R2	R3		<b>R3</b>
	1x32W	R05_2	R2	R4		<b>R2</b>
DIF	2x16W	R05_2	R01_90	R01_45	R02	<b>R01_90</b>
	2x32W	<b>R05_2</b>	<b>R05_2</b>			<b>R05_2</b>

Aqui se percebe a dificuldade do projetista na definição da qualidade do projeto. Fica-se na dúvida sobre a escolha do melhor parâmetro, e apenas valores numéricos não permitem uma avaliação completa do sistema. Diante desta dificuldade, como proposta de complementação às análises, os projetos selecionados são avaliados também em relação à distribuição da iluminação no plano de trabalho, através dos mapas de zonas luminosas. Esta análise permite a visualização de como a luz está sempre distribuída no plano de trabalho, possibilitando a observação da maior uniformidade de distribuição dentre os projetos selecionados.

A Figura 76 mostra o procedimento adotado para a luminária BNI 4x16W. Sobre as soluções selecionadas na Tabela 17 foi realizada a análise conjunta de todos os parâmetros. A observação das tabelas mostra que a reformulação R05\_2 apresenta maior uniformidade, porém com uma distribuição menos homogênea do intervalo 600 a 720 lux e menor área – 45.7%. Já R01\_45, apesar de menor uniformidade, distribui melhor a iluminação proveniente da luminária e possui 63.7% da área compreendida no intervalo analisado, assim como R06, que apresenta 61.6%. Nesta, há a presença de algumas zonas com iluminação excessiva. Sendo assim, o melhor projeto escolhido, que alia maior área na zona e melhor distribuição, é R01\_45. Este procedimento foi repetido para cada linha de luminária, nos dois modelos analisados.

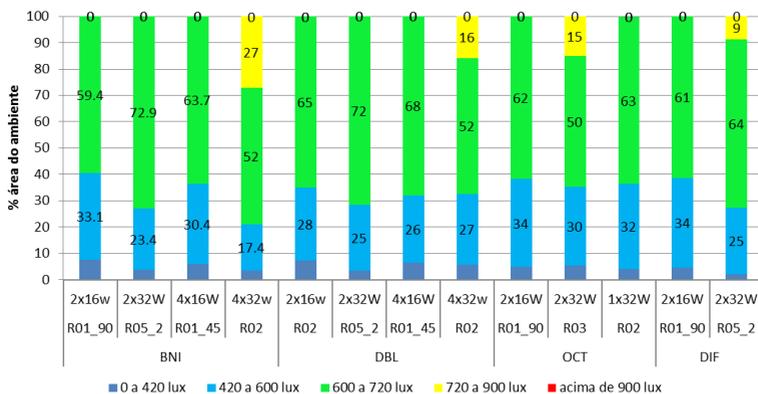


**Figura 76:** Exemplo de seleção do melhor projeto para luminária BNI 4x16W – M01

Os resultados das análises de seleção das soluções que tiveram melhor desempenho são apresentados na Figura 77. Os valores obtidos

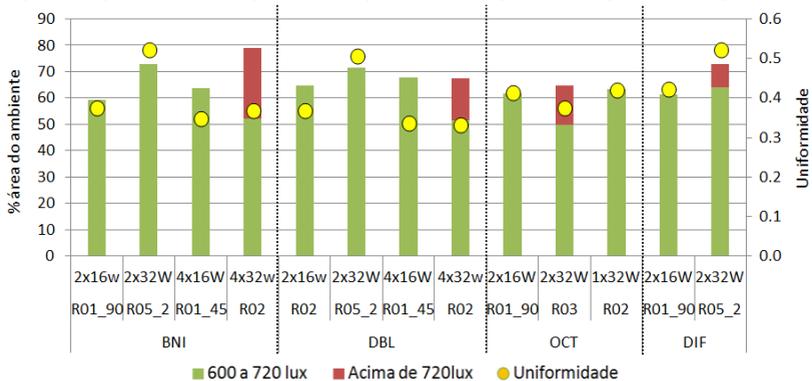
para cada intervalo de iluminâncias são plotados em um gráfico comparativo de análise de zonas de iluminação artificial entre as melhores soluções de cada luminária. Apesar de cada solução ser indicada como a melhor para cada luminária, percebe-se que a disposição dos sistemas propostos e as especificações do tipo de luminárias empregadas implicam em diferenças significativas na forma como a luz está sendo distribuída para cada projeto.

Importante ressaltar que a maioria dos projetos possui área menor que 68% do ambiente para o intervalo analisado, exceto para as luminárias BNI 2x32W E DBL 2x32W. A luminária da linha BNI 2X32W, na R05, apresenta maior área compreendida no intervalo 600 a 720 lux – 72,9%, em contraste com 50% encontrado para luminária OCT 2x32W. Apesar da indicação de melhores soluções, os projetos compostos pelas luminárias BNI4x32W, DBL 4x32W, OCT 2x32W e DIF 2x32W apresentam zonas excessivas. Assim, a escolha do tipo da luminária é fundamental para a definição da qualidade do projeto.



**Figura 77:** Gráfico comparativo de atendimento às zonas entre as melhores soluções para M01

A Figura 78 ilustra os resultados finais para as melhores soluções, relacionando o parâmetro da uniformidade com o atendimento à análise de zonas. A barra verde representada no gráfico se refere aos valores de uniformidade; já as barras azuis e vermelhas indicam as porcentagens de área compreendidas no intervalo 600 a 720lux e acima de 600 lux, respectivamente.

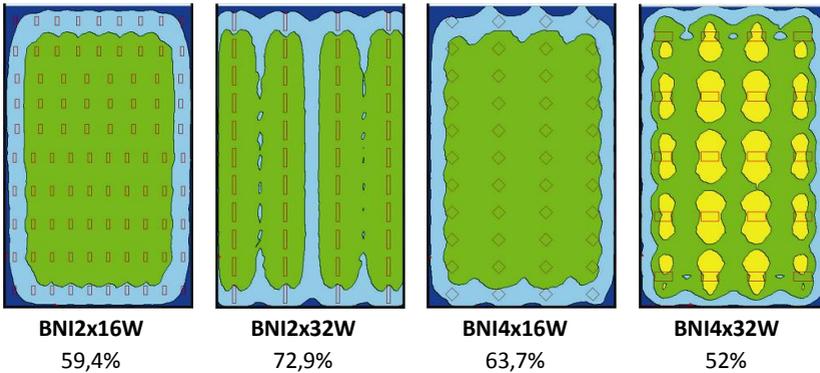


**Figura 78:** Gráfico comparativo entre as melhores soluções para M01

Analisando os gráficos das Figuras 77 e 78 é possível a identificação de algumas tendências. Para as linhas BNI e DBL verifica-se uma mesma tendência entre as luminárias com mesmo número de lâmpadas e mesma potência. As luminárias 2X32W são as que apresentam a maior uniformidade e maior porcentagem de área sem zonas excessivas, conforme já constatado anteriormente. No entanto esta constatação não é válida para todas as soluções. As luminárias 2X16W e 4X16W variam nos valores de porcentagem de área, sem zonas excessivas, assim como nos valores de uniformidade entre uma linha e outra. A luminária DIF 2X32W também apresenta alta uniformidade, porém com excesso de iluminação. A maior diferença entre as zonas analisadas ocorre nas luminárias 4X32W.

É interessante mencionar a significativa diferença entre os projetos elaborados com luminárias distintas em uma mesma linha, assim como entre luminárias de diferentes linhas. A Figura 79 exemplifica esta condição, mostrando como há grande variação na distribuição da iluminação entre os sistemas para uma mesma linha de luminária. Estes resultados consideram a melhor distribuição no plano de trabalho, já que todas as soluções apresentadas nos gráficos foram as que obtiveram melhor resultados na primeira etapa das análises. A utilização de luminárias de duas lâmpadas de 32W possibilita maior área compreendida no intervalo de 600 a 729 lux, superior às demais luminárias da linha, como pode ser observado na Figura 78. Essas diferenças são ressaltadas nos gráficos anteriores, onde pode-se

perceber a presença de padrões distintos para os parâmetros analisados.



**Figura 79:** Projetos selecionados com as melhores soluções e % de área compreendida no intervalo de 600 a 720 lux – M01

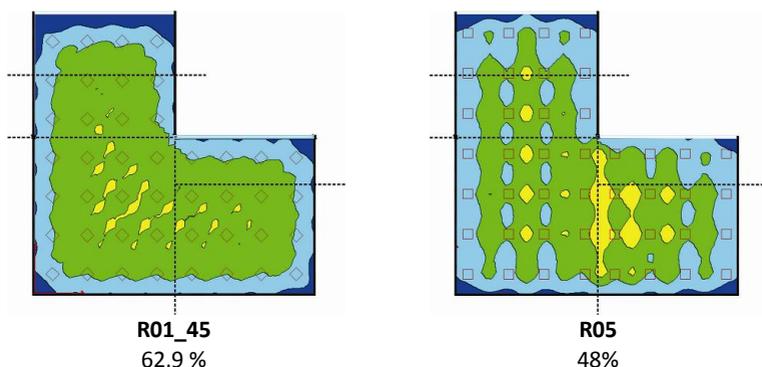
O procedimento realizado para a definição da melhor solução para M01 foi aplicado sobre os projetos de M02. A Tabela 18 apresenta a seleção dos projetos nos critérios de maior uniformidade, maior área compreendida (600 a 720 lux) e melhor distribuição da iluminação no plano de trabalho. Para este ambiente, percebe-se que há uma maior variedade entre as soluções que apresentam melhores desempenhos.

**Tabela 18:** Projetos selecionados com as melhores soluções por parâmetro analisado – M02

		Maior U		Maior área (600 a 720 lux)		Melhor distribuição	
BNI	<b>2x16w</b>	R02	R05	R02		R01_90	R02
	<b>2x32w</b>	R05		R01_45		R01_45	
	<b>4x16w</b>	R05		R01_45		R01_45	
	<b>4x32w</b>	R01_90		R02		R01_90	
DBL	<b>2x16w</b>	R02	R05	R01_45		R01_45	
	<b>2x32w</b>	R05		R05		R05	
	<b>4x16w</b>	R05		R01_45		R01_45	
	<b>4x32w</b>	Original		Original	R01_45	R01_90	
OCT	<b>2x16W</b>	R01_90		R01_90		R01_90	
	<b>2x32W</b>	Original	R01_90	R02		R02	
	<b>1x32W</b>	Original	R01_90	R02		R02	
DIF	<b>2x16W</b>	Todos		Todos		R02	
	<b>2x32W</b>	R01_90		Original	R01_45	R02	

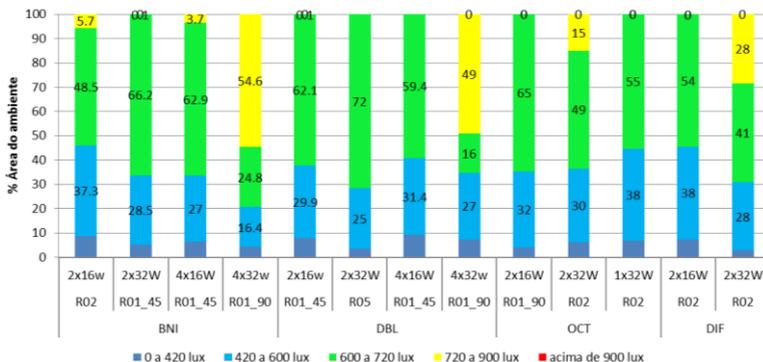
Para o sistema DIF 2x16W, os projetos apresentam valores iguais de uniformidade e maior área. A distribuição da iluminação através dos mapas de zonas também não apresentou diferenças significativas, assim como o número de luminárias em cada zona se manteve constante. Diante destas condições, foi selecionado o projeto R02 para a análise da segunda etapa.

Como exemplo de seleção para o modelo M02, a Figura 80 mostra os projetos que resultaram na maior uniformidade (R05) e maior área do ambiente no intervalo analisado (62,9%), retirados da seleção apresentada na tabela anterior. As duas imagens possibilitam visualizar claramente que a seleção do melhor projeto se dá através do parâmetro de análise de zonas, pela melhor distribuição da iluminação no plano de trabalho resultante da reformulação R01\_45. O mesmo princípio de raciocínio para a seleção foi repetido para os demais projetos selecionados na Tabela 18.



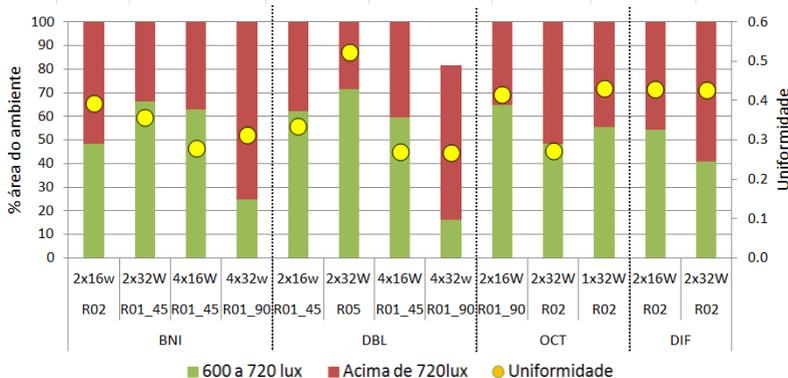
**Figura 80:** Exemplo de seleção do melhor projeto para luminária e % de área compreendida no intervalo de 600 a 720 lux - BNI 4x16W – M02

A Figura 81 apresenta a comparação de análise de zonas de iluminação artificial para as melhores soluções. Constata-se que há diferenças entre as selecionadas para M01. Percebe-se que as soluções para cada luminária, em cada linha, com mesma potência e número de lâmpadas, diferem bastante quanto às porcentagens de área em cada zona. Observando o gráfico verifica-se que a máxima área atingida pertence à luminária DBL 2x32W (72%), o que também ocorre em M01.



**Figura 81:** Gráfico comparativo de atendimento às zonas entre as melhores soluções para M02

Quando se relaciona a uniformidade, verifica-se que o comportamento é bem variável. Assim como para M01, as diferenças são visíveis para as luminárias dentro de uma mesma linha, e neste ambiente, são mais discrepantes entre as diferentes linhas analisadas que o primeiro modelo, conforme o gráfico comparativo da Figura 82.

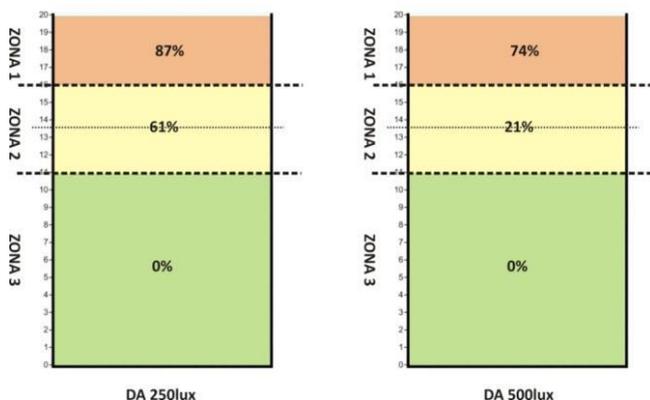


**Figura 82:** Gráfico comparativo entre as melhores soluções para M02

Diante do exposto nos itens anteriores pode-se inferir que a variedade encontrada para os parâmetros representados nos gráficos acima revela a importância da escolha da luminária para a qualidade da iluminação, principalmente em relação aos níveis alcançados no plano de trabalho. No entanto, é fundamental uma complementação das análises através da verificação do consumo de energia requerido para cada sistema, que será analisado a seguir.

### 4.3 AVALIAÇÃO DE CONSUMO – 2ª ETAPA

A segunda etapa avalia os sistemas selecionados na primeira etapa em relação ao consumo de energia. Para isso, é determinado o tempo de utilização do sistema instalado através das médias dos valores de DA para iluminâncias de referência de 250 lux e 500 lux, para cada zona. A Figura 83 mostra os resultados das médias de DA para o Modelo M01.



**Figura 83:** Médias dos valores de Daylight Autonomy (DA) para cada zona – M01

A Tabela 19 demonstra o procedimento do cálculo do tempo de utilização do sistema de iluminação artificial para cada situação, em cada zona: **Situação 1** – meio circuito ativo; **Situação 2** - sistema totalmente ativo.

**Tabela 19:** Procedimento de determinação do tempo de utilização– M01

Zona	DA 500	DA 250	Situação 1 (250<DA< 500)	Situação 2(DA< 250)
<b>Z1</b>	74%	87%	13% (87%-74%)	13% (100%-87%)
<b>Z2</b>	21%	61%	40% (61%-21%)	39% (100%-61%)
<b>Z3</b>	0%	1%*	-	100%

De acordo com a Figura 83 e a Tabela 19, a estimativa de consumo energético para o modelo M\_01 parte do princípio de que na Zona 1, como a média de DA500 é 74%, o sistema estará desligado 74% do tempo ao longo do ano, e ligado 26% (100-74%). Para a situação 1, em 13% do ano o sistema poderá funcionar em meio circuito. Na Situação 2, coincidentemente em 13% do ano o sistema deverá

funcionar totalmente ligado, já que a média de DA 250 lux para esta zona é 87%. Já para a Zona 2, em 40% do tempo poderá ser utilizado meio circuito e em 39% do tempo o sistema será totalmente ligado. Para a Zona 3, 100% do tempo, uma vez que a média de DA para esta zona é zero.

Assim, os cálculos de consumo para cada zona ocorrem de acordo com as Equações 14, 15 e 16:

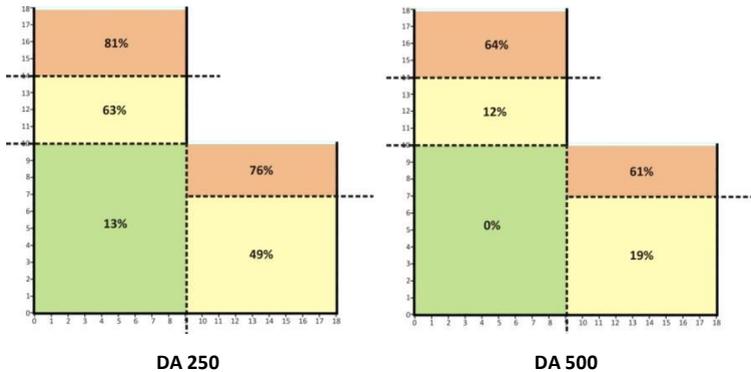
**Consumo da Zona 1** =  $Pz1 * (13\% * T_u) + \frac{Pz1}{2} * (13\% * T_u)$  **Equação 14**

**Consumo da Zona 2** =  $Pz2 * (39\% * T_u) + \frac{Pz2}{2} * (40\% * T_u)$  **Equação 15**

**Consumo da Zona 3** =  $Pz3 * (100\% * T_u)$  **Equação 16**

$T_u$  é equivalente ao tempo de ocupação do espaço durante o ano  
 $Pz$  é equivalente à potência instalada na zona equivalente.

Para o modelo M02, as médias dos valores de DA para cada zona são apresentadas na Figura 84.



**Figura 84:** Médias dos valores de Daylight Autonomy (DA) para cada zona – M02

O procedimento de cálculo do tempo de utilização de cada zona é demonstrado na Tabela 20. Para Zona 1, o sistema estará ligado totalmente 19% do tempo e, em 17% do tempo, poderá ser utilizado meio circuito, ao longo do ano. Para a Zona 2, em 51% tempo poderá ser utilizado meio circuito e em 37% do tempo o sistema deverá ser totalmente ligado. Para Zona 3, em 87% do tempo será necessário o

uso do sistema total ativo e em 13% meio circuito. A mesma análise ocorre para as demais zonas.

**Tabela 20:** Procedimento de determinação do tempo de utilização – M02

Zona	DA 500	DA 250	Situação 1 (250<DA<500)	Situação 2 (DA<250)
<b>Z1</b>	64%	81%	17% (81%-64%)	19% (100%-81%)
<b>Z1.1</b>	61%	76%	15% (76%-61%)	24% (100%-76%)
<b>Z2</b>	12%	63%	51% (63%-12%)	37% (100%-63%)
<b>Z2.1</b>	19%	49%	30% (49%-19%)	51% (100%-49%)
<b>Z3</b>	0%	13%	13% (13%-0%)	87% (100%-13%)

Para o cálculo do consumo final, são somados os consumos de Pz1 e Pz1.1, assim como de Pz2 e Pz2.1. Assim, para o modelo M02, os cálculos de consumo são dados pelas equações abaixo:

$$\text{Consumo da Zona 1} = Pz1 * (19\% * T_u) + Pz1.1 * (24\% * T_u) + \frac{Pz1}{2} * (17\% * T_u) + \frac{Pz1.1}{2} * (15\% * T_u) \quad \text{Equação 17}$$

$$\text{Consumo da Zona 2} = Pz2 * (37\% * T_u) + Pz2.1 * (51\% * T_u) + \frac{Pz2}{2} * (51\% * T_u) + \frac{Pz2.1}{2} * (30\% * T_u) \quad \text{Equação 18}$$

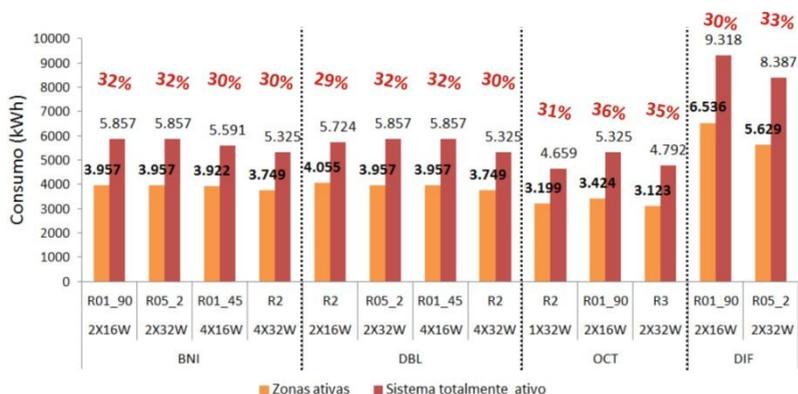
$$\text{Consumo da Zona 3} = Pz3 * (87\% * T_u) + \frac{Pz3}{2} * (13\% * T_u) \quad \text{Equação 19}$$

Aplicando-se as Equações descritas acima para cada linha de luminária em cada modelo de ambiente, são obtidos os gráficos de estimativa de consumo de energia. A Figura 85 apresenta os resultados de consumo final para as melhores soluções obtidas para cada luminária, para o modelo M01, assim como as reduções de consumo para cada reformulação (%).

Constata-se que os sistemas que mais consomem energia são os que possuem luminárias difusoras, da linha DIF, atingindo 5629 kWh para o sistema de zoneamento e 8387 kWh sem zoneamento para a luminária DIF 2X32W (redução de 33% entre o sistema totalmente ativo e zonas ativas); e 6536 kWh e 9318 kWh para DIF 2x16W (redução de 30%), respectivamente. Ressalta-se que estas luminárias não são as que apresentam maior área compreendida no intervalo 600 a 720 lux. Conforme visto, a maior área está presente em BNI 2x32W (72,9%). Para esta luminária, os consumos são de 3957 kWh para o sistema de

zoneamento e 5857 kWh (redução de 32%) sem o sistema, valores parecidos aos encontrados para as luminárias BNI 4x16W, DBL 2x32W e DBL4x16W.

Importante ressaltar que a média de redução para os consumos de todas as luminárias foi de 32%, sendo que as reduções variam entre 29 e 36%, para todas as luminárias. No entanto, no caso da linha DIF, por exemplo, para se reduzir as luminâncias (o que é uma função do elemento difusor), as potências das lâmpadas devem ser maiores para se atingir o fluxo luminoso total necessário para atender ao nível de iluminância requerido, consumindo mais energia que as demais.



**Figura 85:** Estimativa de consumo para cada melhor solução, por circuito de acionamento – M01

A Figura 85 mostra que os consumos variam pouco dentro de cada linha. A variação máxima entre as quatro soluções apresentadas de cada linha de luminária, atinge 5% para a linha BNI, 8% para linha DBL, 10% para linha OCT e 16% para a linha DIF. Apesar de pouca variação nos consumos, as análises da primeira etapa mostram que os modelos com luminárias de duas lâmpadas de 32W contém mais área do ambiente no intervalo considerado. O menor consumo é verificado na luminária OCT 1x32W, resultando em 3123 kWh no sistema de acionamento por zonas de iluminação e 4792 kWh sem o sistema.

A Tabela 21 mostra a quantidade de luminárias e a potência instalada em cada zona para a linha BNI. Verifica-se que a pequena diferença entre os consumos é resultado da aproximação dos valores de potência instalada resultantes para cada zona de iluminação natural.

O mesmo ocorre para as demais linhas em que o consumo possui pouca variação. As demais tabelas são apresentadas no **APÊNDICE F**.

**Tabela 21:** Potência instalada e número de luminárias por zona – BNI

		Z1	Z2	Z3
<b>BNI 2X16W</b>	Potência instalada (kW)	0.51	0.77	1.54
	Qtidade	16	24	48
<b>BNI 2X32W</b>	Potência instalada (kW)	0.51	0.77	1.54
	Qtidade	8	12	24
<b>BNI 4X16W</b>	Potência instalada (kW)	0.38	0.77	1.54
	Qtidade I	6	12	24
<b>BNI 4X32W</b>	Potência instalada (kW)	0.51	0.51	1.54
	Qtidade	4	4	12

Para os projetos que tiveram modificações no número de luminárias nas soluções selecionadas na primeira etapa da análise, foram calculados os consumos em relação ao projeto Original, procurando verificar se há diferenças expressivas entre os consumos para os dois sistemas, conforme Tabela 22. O **Consumo 1** se refere ao sistema de acionamento de acordo com as zonas de iluminação natural; o **Consumo 2** ao sistema totalmente ativo.

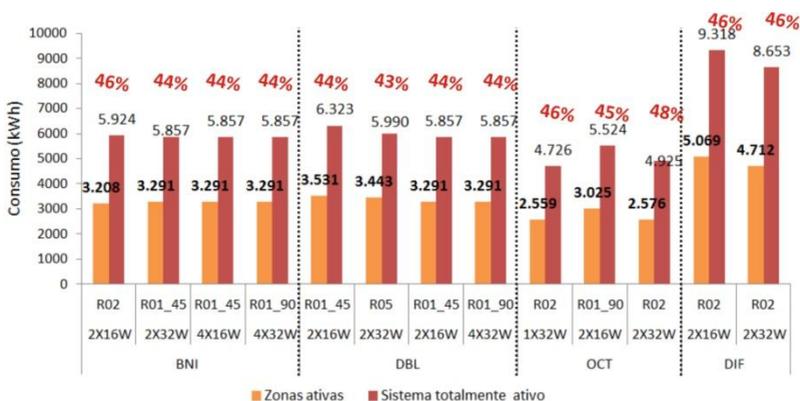
**Tabela 22:** Diferença entre consumo (kWh) do sistema totalmente ativo X zonas ativas: Projeto Original e reformulações selecionadas – M01

Luminárias	BNI		DBL				OCT	
	4X32W		2X16W		4X32W		2x32W	
Reformulação	Original	R2	Original	R2	Original	R2	Original	R3
<b>Consumo 1 (kWh)</b>	4164	3748	4321	4055	4164	3749	3424	3123
<b>Consumo 2 (kWh)</b>	6390	5325	5990	5724	6390	5325	5325	4792
<b>Redução (%)</b>	-35%	-30%	-28%	-29%	-35%	-30%	-36%	-35%

Observa-se que a redução de consumo entre o mesmo sistema, nas duas situações de acionamento, varia pouco entre os dois projetos, sendo que o projeto Original proporciona reduções maiores em alguns casos. As médias das reduções de consumo entre o sistema Original e as reformulações foram de 10% para o consumo 2 e 14% para o consumo 1. Assim, as reformulações propostas geraram maiores economias em todos os casos. Para a luminária BNI 4x32W, por exemplo, a redução do consumo entre as duas soluções ( sistema

Original e R2) atinge 20% para o sistema totalmente ativo e 11% para o sistema acionado com as zonas de iluminação natural.

Os dados de consumo obtidos para os sistemas selecionados para o modelo M02 são representados na Figura 86. Os valores de consumo obtidos com iluminação artificial são semelhantes para as luminárias dentro de cada linha analisada, exceto para a linha OCT. A média de redução para os consumos de todas as luminárias foi de 46%, sendo que as reduções variam entre 44% e 48%, superiores ao M01.



**Figura 86:** Estimativa de consumo para cada melhor solução, por circuito de acionamento – M02

Na linha BNI, com exceção da luminária 2X16W, os consumos foram os mesmos para as demais luminárias, devido à mesma potência instalada por zona, conforme pode ser verificado na Tabela 23. Apesar de não possuírem a mesma quantidade de luminárias em cada zona, a potência instalada é a mesma. As tabelas para as demais luminárias podem ser verificadas no **APÊNDICE F**.

**Tabela 23:** Potência instala e número de luminárias por zona – BNI

		Z1	Z1.1	Z2	Z2.2	Z3	Total
<b>BNI 2X16W</b>	Potência instalada (kW)	0.32	0.32	0.48	0.768	0.96	
	Qtidade	10	10	15	24	30	89
<b>BNI 2X32W</b>	Potência instalada (kW)	<b>0.256</b>	<b>0.256</b>	<b>0.512</b>	<b>0.768</b>	<b>1.024</b>	
	Qtidade	4	4	8	12	16	44
<b>BNI 4X16W</b>	Potência instalada (kW)	<b>0.256</b>	<b>0.256</b>	<b>0.512</b>	<b>0.768</b>	<b>1.024</b>	
	Qtidade	<b>4</b>	<b>4</b>	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	44
<b>BNI 4X32W</b>	Potência instalada (kW)	<b>0.256</b>	<b>0.256</b>	<b>0.512</b>	<b>0.768</b>	<b>1.024</b>	
	Qtidade	2	2	4	6	8	22

A comparação entre o consumo resultante para o projeto Original e os projetos que tiveram modificações no número de luminárias nas soluções selecionadas na primeira etapa da análise é apresentada na Tabela 24. Quando se analisam as reduções de consumo entre as mesmas luminárias, constata-se novamente que as reduções possuem pequenas diferenças, chegando a no máximo 3%, conforme pode ser visto na Tabela 24. As reformulações R02, além de possuírem menor quantidade de luminárias nas zonas, foram aquelas que apresentaram melhor desempenho na primeira etapa. As médias das reduções de consumo entre o sistema Original e as reformulações foram de 5% para o sistema totalmente ativo e 8% para os sistemas de acionamento através das zonas de iluminação natural.

**Tabela 24:** Diferença entre consumo (kWh) do sistema totalmente ativo X zonas ativas: Projeto Original e reformulações selecionadas – M02

Luminária	BNI 2X16W		OCT 2X32W		OCT 1X32W		DIF 2x32W	
	Orig.	R02	Orig.	R02	Orig.	R02	Orig.	R02
Consumo 1 (kWh)	3531	3208	3095	2576	2579	2559	4712	4725
Consumo 2 (kWh)	6323	5923	5591	4925	4659	4726	8653	8653
Redução (%)	-44%	-46%	-45%	-48%	-45%	-46%	-46%	-45%

As reduções de consumo em M02 foram superiores em relação ao modelo M01, o que pode ser explicado pela profundidade do ambiente. Como M01 possui grande profundidade e apenas uma janela na fachada norte, os níveis alcançados pela iluminação natural são menores no fundo do ambiente. Já em M02, a presença de duas aberturas nesta fachada proporciona maiores níveis de iluminação no interior do ambiente, aumentando a área das zonas 1 e 2, e reduzindo a área da zona 3, responsável pelos maiores consumos de energia, já que necessita o uso da iluminação artificial por mais tempo ao longo do ano. Isso resulta em uma maior redução nos consumos de energia para este modelo.

## **5. CONCLUSÕES**

Este capítulo apresenta as conclusões, geradas a partir dos resultados obtidos, as limitações encontradas no desenvolvimento do estudo e as sugestões para pesquisas futuras.

### **5.1 INTRODUÇÃO**

Este trabalho apresentou uma análise de diferentes projetos luminotécnicos em ambientes genéricos considerando a disponibilidade de iluminação natural. Visou à orientação da escolha do sistema de iluminação mais eficiente considerando aspectos de qualidade - como níveis de iluminância e uniformidade - e econômicos, buscando identificar a influência de parâmetros como tipo de luminária, orientação e distribuição na concepção de diferentes projetos luminotécnicos e no consumo de energia.

A elaboração de um projeto de iluminação implica nas considerações de diversos aspectos, como os diferentes tipos de lâmpadas e luminárias disponíveis no mercado e também as condições da aplicação, incluindo o tipo e o grau de precisão da atividade a ser desenvolvida no ambiente, os usuários, os níveis de iluminação adequados e também a função estética do projeto. Todos esses aspectos devem ser relacionados com aspectos econômicos, como o consumo de energia e os demais custos provenientes da instalação.

A revisão bibliográfica foi fundamental para a maior compreensão dos vários aspectos envolvidos no projeto de iluminação, assim como o conhecimento, por parte da autora, atuando como projetista, do comportamento e características de algumas luminárias. Apresentou também alguns métodos de cálculo de projeto de iluminação, evidenciando o Método dos Lúmens como o mais utilizado por projetistas envolvidos no projeto de iluminação, seja pela facilidade de cálculo, comum para vários ambientes, ou pela geração rápida dos resultados. No entanto, a revisão também apontou diversos problemas relacionados à aplicação do método, como concentrações de iluminação em determinados pontos do ambiente e uma distribuição não uniforme da iluminação. Sendo assim, neste estudo, através da metodologia adotada, foi possível investigar mais a fundo o processo

de projeto de sistemas de iluminação, considerando a integração entre a iluminação artificial e natural para a concepção de projetos luminotécnicos.

Foram realizadas 111 simulações de iluminação artificial para M01 e 58 para M02, totalizando 169 simulações. Estas simulações compreenderam reformulações realizadas sobre o projeto Original, buscando verificar a influência das modificações propostas quanto à distribuição da iluminação no espaço e ao consumo de energia. Como resultado, todos os projetos considerados como melhores soluções na primeira etapa das análises diferem dos projetos concebidos pelos critérios identificados nas referências, caracterizados no projeto Original. As duas etapas de avaliação dos projetos simulados apresentaram os resultados de maneira individual para cada modelo de ambiente. A partir dos resultados obtidos com as simulações realizadas para os dois modelos é possível identificar alguns aspectos que merecem ser destacados.

### **5.1.1 Considerações quanto à Metodologia**

A metodologia proposta utilizou dois modelos de ambiente com diferentes geometrias para a elaboração dos projetos luminotécnicos e avaliação do aproveitamento da iluminação natural. Através das simulações com o programa *Daysim* foram obtidas as disponibilidades de iluminação natural para os dois modelos em análise, o que permitiu a definição de um método para o cálculo do consumo do sistema de iluminação artificial. Foram utilizados valores de Autonomia da luz natural (DA) de 250 e 500 lux, para a caracterização do sistema de controle de três passos.

A adoção do Método dos Lúmens constituiu um bom ponto de partida para a definição dos projetos luminotécnicos. Para a elaboração dos projetos foram selecionadas diferentes luminárias, de um único fabricante – *LightGroup*. Como se trabalhou com apenas um fabricante, não foram analisados projetos com equipamentos similares de outras marcas. Embora não pertença ao método definir a distribuição das luminárias (porém, recomenda-se que seja o mais uniforme possível), a partir do cálculo do fluxo luminoso foi possível determinar uma estimativa da quantidade de luminárias necessárias para atingir um

nível de iluminância alvo. Esta primeira estimativa serviu de base para as soluções de projetos propostas.

A partir de um projeto original definido de acordo com algumas recomendações que regem a prática de projeto mais comumente utilizada por profissionais afins, foram propostas, em cada modelo, soluções de projeto através de sete reformulações provenientes de aspectos que se julgaram como possíveis de serem investigados para uma melhor concepção do projeto. Dentre estas reformulações, comparações foram realizadas entre cada solução, o que permitiu identificar a melhor solução para cada caso.

Para realizar as avaliações entre os projetos elaborados, foi utilizado um **método analítico**, complementado por um **método gráfico**. O método analítico permitiu, na primeira etapa das análises, a quantificação da área do ambiente compreendida em cada zona de iluminação natural, assim como um valor para a uniformidade de distribuição da iluminação. Na segunda etapa, cálculos foram realizados para a obtenção do consumo referente a cada instalação. Já o procedimento gráfico possibilitou a visualização destes dados na forma de gráficos e mapas de zonas luminosas, como complemento às análises. Assim, os dois métodos, de forma integrada, ofereceram informações para a caracterização das melhores soluções para cada luminária utilizada.

### **5.1.2 Conclusões quanto aos critérios de avaliação**

Através da metodologia procurou-se apontar o melhor sistema de iluminação para cada luminária, em cada uma das quatro linhas analisadas. No entanto, muitas vezes a definição de “melhor” se mostrou complexa, levando em conta fatores singulares. Os parâmetros baseados em valores numéricos utilizados para a avaliação – uniformidade e análise de zonas –, comumente utilizados pelos projetistas para a estimativa dos projetos de iluminação, implicaram em dificuldades nas avaliações. A definição do melhor projeto se deu pela observação dos mapas de distribuição luminosa, uma vez que se constatou que os maiores valores de uniformidade muitas vezes não

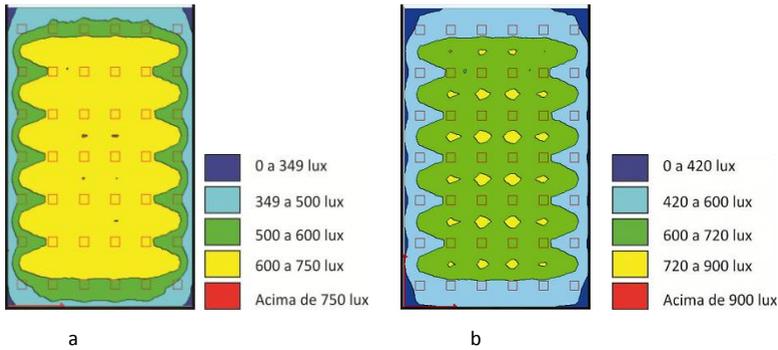
correspondiam aos que possuem maiores percentagens de área do ambiente compreendida na zona considerada de 600 a 720 lux.

Quanto à **uniformidade**, constatou-se que em geral, os projetos elaborados de acordo com as recomendações sugeridas pela prática atual não garantem níveis adequados de uniformidade da iluminação. Apenas dois projetos, selecionados entre as melhores soluções para o modelo M01 apresentam níveis acima de 0,5 – BNI 2x32W (0,52) e DBL 2x32W (0,51) - e para M02 apenas para luminária DBL 2x32W (0,52). Importante ressaltar que estes foram os projetos que tiveram modificações de afastamento entre as luminárias (R05 e R05\_2), sendo que para todos os casos analisados, os projetos com maiores uniformidades foram aqueles que apresentaram maior iluminância mínima. Esse aumento no valor da iluminância mínima aumenta o valor da uniformidade devido à própria formulação matemática. Se houver algum ponto do ambiente com um valor de iluminância baixo, o valor de uniformidade tende a diminuir.

Ressalta-se ainda que para se atingir os valores de uniformidade para todo o ambiente, recomendados pela bibliografia, são necessárias distribuições de luminárias com um comportamento aleatório, como as apontadas na revisão bibliográfica deste trabalho. No entanto, estas distribuições aleatórias inviabilizam o processo de projeto, sendo necessário o uso de ferramentas e programas computacionais avançados. Sendo assim, este parâmetro se torna mais válido para o posto de trabalho, área onde a atividade visual ocorre efetivamente, já que é muito difícil se alcançar um índice acima de 0,5 para todo o ambiente.

Quanto à **análise de zonas**, o fato de se utilizar o Fator de utilização (Fd) equivalente a 1 para os cálculos através do Método dos Lúmens fez com que os projetos não apresentassem zonas excessivas, já que a adoção do fator igual a 1 aumenta a iluminância inicial de 500 lux em 20% e a análise de zonas tem como base uma iluminância de 600 lux. Conforme foi relatado na revisão bibliográfica, uma das maiores reclamações a respeito do Método dos Lúmens diz respeito ao excesso de iluminação gerado. Aqui percebe-se que este excesso de iluminação diz respeito exatamente à consideração do Fator de depreciação. Se os projetos tivessem sido elaborados com um fator igual a 0,8 e iluminância alvo de 500 lux (o que resulta em um mesmo número de luminárias) e a análise de zonas para 500 lux, apontariam

grandes áreas excessivas de iluminação, conforme Figura 87. Assim, a adoção destes parâmetros permitiria a maior variação no número de luminárias, diferentemente da base adotada neste trabalho.



**Figura 87:** Diferença entre projetos com diferentes análises de zonas (a) Projeto com análise para 500 lux. (b) projeto com análise para 600 lux

A análise dos resultados apresentada no capítulo anterior revelou que há uma grande variação entre as luminárias quanto aos valores dos parâmetros analisados. Observou-se que vários projetos, que resultaram em maiores áreas compreendidas nas zonas, possuíam menor uniformidade, e vice-versa. Ou seja, estes dois parâmetros não estão necessariamente correlacionados.

Diante destas constatações, observa-se que estes dados são valores numéricos, resultantes de formulações matemáticas, como no caso da uniformidade, ou do cálculo de áreas, como nas análises de zonas. Tais dados podem levar a uma análise equivocada do sistema, mascarando situações apontadas como melhores pelos dados numéricos. Foi necessária a visualização dos mapas de distribuição luminosa para que o projeto fosse avaliado na sua totalidade. Conclui-se então que a avaliação baseada em apenas um parâmetro não permitiu a definição da qualidade do projeto.

As **reformulações** realizadas possibilitaram investigar aspectos referentes às modificações de orientação, afastamentos e distribuição das luminárias. Os sistemas simulados mostraram grande variação nos resultados obtidos, revelando que uma mesma metodologia de projeto – considerações de afastamento entre as luminárias, distribuição e orientação - não deve ser utilizada para todos os tipos de luminárias e ambientes. Foi possível verificar que as luminárias se comportam de

maneira distinta em relação às modificações propostas. Os resultados das reformulações confirmaram que uma uniformidade na distribuição das luminárias não implica necessariamente em uma uniformidade da iluminação, conforme já constatado em estudos anteriores.

Percebeu-se que as menores luminárias, compostas por duas lâmpadas de 16W, foram menos afetadas pelas mudanças de posicionamento. Já luminárias de duas lâmpadas de 32W e de quatro lâmpadas de 16W foram as que mais sofreram com mudanças tanto de orientação como de afastamentos. Constatou-se também que as luminárias com quatro lâmpadas de 32W configuraram as piores soluções, exibindo concentrações de iluminação excessiva em determinadas regiões próximas às luminárias. Todas estas considerações sobre as luminárias estão diretamente relacionadas com as curvas de distribuição luminosa apresentadas, que revelam a maneira como cada uma distribui a luz.

Assim, através dos resultados foi possível observar que as luminárias que apresentam fachos mais fechados, com um direcionamento maior do fluxo para baixo, como os casos das luminárias OCT2x16W e OCT 2x32W precisam de um afastamento menor entre si para fornecer uma distribuição mais uniforme no plano de trabalho. Já a luminária DIF 2x32W necessitou de maior distanciamento que as demais. Sendo assim, conclui-se que a diferença entre os padrões de distribuição luminosa de cada luminária indica que não se pode adotar apenas um limite de espaçamento para todos os modelos.

Para as soluções nas quais foi possível a redução do número de luminárias através da reformulação R03 (desconsideração do critério de afastamento máxima entre as luminárias de 1,5 vezes a altura entre o plano de trabalho e altura de montagem) e também em R02 (distribuição das luminárias de acordo com a iluminação natural), houve uma melhora nos projetos em relação à presença de zonas excessivas. Nas demais soluções, onde esta redução não foi possível, o próprio projeto já se enquadrava no critério de espaçamento adotado (1,5h). Sendo assim, percebeu-se que os critérios de afastamento utilizados não foram válidos para todas as luminárias, uma vez que os resultados das reformulações que desconsideraram estes critérios foram os melhores dentre todas as soluções.

Conforme já dito anteriormente, as reformulações em que os afastamentos foram alterados implicaram em maiores níveis de uniformidade no ambiente. Verificou-se que a reformulação que considera o zoneamento da iluminação natural para a distribuição das luminárias – R02- não demonstrou muita influência na distribuição da iluminação. Além disso, diferenças são notáveis quando se utilizam luminárias de linhas diferentes na forma como elas distribuem a iluminação no ambiente, otimizando ou desfavorecendo a distribuição da iluminação. Os resultados permitiram visualizar melhor que as escolhas tanto dos equipamentos, quanto da distribuição das luminárias são fundamentais para a qualidade do projeto.

Na prática geral, uma das primeiras especificações para a concepção do projeto é a iluminância especificada na norma, seguida dos aspectos relacionados ao *design* da instalação, ou ainda de acordo com as necessidades do espaço e até mesmo do cliente. A distribuição das luminárias neste trabalho desconsiderou alguns aspectos que poderiam influenciar a disposição das mesmas em outros ambientes, como a modulação do forro, a orientação das luminárias de acordo com as curvas de luminância para evitar o ofuscamento, dentre outros fatores. Estes fatores, apesar de não considerados na abordagem deste trabalho, são de extrema importância na definição dos projetos, e devem ser considerados na sua concepção, de acordo com as necessidades de cada caso.

### **5.1.3 Conclusões quanto ao aproveitamento da iluminação natural**

Para que se obtenha economia de energia através da redução da utilização dos sistemas de iluminação artificial é necessário que a iluminação natural forneça níveis adequados de iluminância grande parte do tempo e em grande área do ambiente. Os resultados quanto ao consumo de energia, observados na seção anterior, onde foram apresentados os procedimentos de cálculo de consumo com base na medida dinâmica da luz natural – DA -, obtidos com as simulações de iluminação natural pelo *Daysim*, possibilitaram constatar o potencial de economia em iluminação de cada sistema através da disponibilidade da luz natural.

Apesar de o zoneamento não influenciar significativamente no que diz respeito às análises de qualidade da iluminação, nas análises de consumo constata-se que este está diretamente relacionado com a profundidade do ambiente, conforme já constatado em estudo anterior (DIDONÉ, 2009). Isso pode ser observado quando se comparam os dois modelos analisados neste trabalho. Para o modelo M01, que possui grande profundidade (20m) a média de redução dos consumos foi de 32%. Já para M02, esta média sobe para 46%.

Verificou-se que há pouca variação no consumo entre as luminárias de uma mesma linha e também entre as linhas de luminárias com aletas – BNI e DBL. Apesar da redução de consumo variar pouco, a utilização de luminárias com duas lâmpadas necessitou de um número maior de luminárias, de forma que houve uma melhor distribuição dos níveis de iluminância no ambiente.

Para as reformulações que consideraram a distribuição das luminárias de acordo com as zonas de iluminação natural - R02 - apesar de não sofrerem muita influência na distribuição da iluminação, verificou-se que em relação ao consumo de energia, as soluções que consideraram as zonas de iluminação natural para a distribuição das luminárias resultaram em menores consumos, com reduções de até 20% em relação ao projeto Original. Assim, são necessários mais estudos que analisem a distribuição das luminárias de acordo com este critério.

Importante ressaltar que o dimensionamento dos brises, as dimensões dos ambientes e das janelas têm influência direta na admissão da iluminação natural no interior dos ambientes. Caso fossem utilizadas diferentes configurações, as disponibilidades de luz natural seriam alteradas, e conseqüentemente as análises de consumo de energia.

#### **5.1.4 Considerações sobre o processo de criação do projetista**

O caminho percorrido na metodologia deste trabalho, para a elaboração e avaliação dos projetos, incluiu conceitos novos, que não fazem parte da prática projetual mais difundida atualmente. A sistematização desses conceitos, integrando a iluminação natural e a

artificial é uma abordagem nova, que requer o conhecimento dos elementos que compõem os dois sistemas.

Neste sentido, o levantamento dos estudos e temas para compor a revisão bibliográfica foi fundamental para a compreensão e conhecimento da autora, servindo como base para o desenvolvimento do trabalho. Como resultado, diagnosticou-se um amadurecimento da autora em relação ao processo de projeto, de forma que se adquiriu uma certa sensibilidade em relação aos aspectos envolvidos nas etapas realizadas.

Exemplos desta sensibilidade foram expostos nas conclusões acima. A constante proximidade com informações sobre os equipamentos de iluminação, através do contato direto com o fabricante e consultas aos catálogos, trouxeram à autora um conhecimento muito melhor do comportamento das luminárias, assim como de todo o processo de projeto. Exemplo disto é a redução da quantidade de simulações no modelo M02. A partir do que foi diagnosticado no primeiro modelo, e conhecendo-se melhor o comportamento das luminárias em relação à distribuição da luz, foram propostas as modificações que se julgaram mais interessantes.

A utilização do método dos lúmens como princípio para o lançamento dos projetos facilitou o processo de projeto. Apesar de ser um método muito apontado em pesquisas pelas suas falhas, concluiu-se que estas não estão no método, mas sim nas recomendações adotadas para a distribuição das luminárias, recorrentes da prática de iluminação uniforme, que não possuem ligação alguma com o método de cálculo. Diante desta constatação, percebe-se a importância de estudos que investiguem mais a fundo como utilizar o método a favor do projeto de iluminação, tal como foi relatado neste trabalho.

Finalmente, referente às variáveis utilizadas para a avaliação dos projetos, pode-se inferir que são necessárias mais investigações acerca dos aspectos definidores do melhor projeto. Uma análise baseada somente nos parâmetros adotados não permitiu esta definição, visto que é necessária a consideração de diversos fatores que não foram considerados nesta análise. A partir dos resultados obtidos e das análises efetuadas, inferiu-se que a escolha das luminárias é decisiva quanto à qualidade e à eficiência do projeto de iluminação, sendo essencial o conhecimento das suas características por parte do projetista envolvido no processo.

## 5.2 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A seguir são listadas algumas limitações encontradas na realização do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

### 5.2.1 Limitações na realização do trabalho

Algumas limitações foram encontradas durante o desenvolvimento deste trabalho.

- As propostas de projetos luminotécnicos utilizaram apenas um modelo de luminária;

- A análise do consumo de energia foi simplificada, visto que se utilizou apenas o controle de três passos. A utilização de outros tipos de controle, como sensores e *dimmer* poderiam gerar maiores economias de energia para os modelos, num estudo mais longo;

### 5.2.2 Sugestões para trabalhos futuros

A partir desta pesquisa sugerem-se opções de estudos que podem complementar e também dar continuidade às análises apresentadas:

- Utilização de ambientes com diferentes geometrias e aberturas para a análise da influência do zoneamento da iluminação natural;

- Realização de reformulações dos projetos de iluminação artificial modificando as posições das luminárias, desconsiderando o critério de distribuição uniforme;

- Aprofundamento da metodologia de definição das zonas de iluminação natural;

- Investigação de critérios para a definição dos sistemas de iluminação artificial a partir do zoneamento da iluminação natural;

- Investigação da utilização de diferentes tipos de luminária e sua influência em cada zona de iluminação natural;

- Elaboração de projetos luminotécnicos utilizando a tecnologia LED.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5413 – Iluminância de interiores**. Rio de Janeiro: 1992. 13 p.

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5461/TB-23 – Iluminação – Terminologia**. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

AKASHI, Y.; BOYCE, P. R. (2006): **A field study of illuminance reduction**. *Energy and buildings* 38 588-599.

ALBUQUERQUE, A. T. **Uma metodologia para otimização do projeto de iluminação artificial aplicando recozimento** - Manaus: UFAM, 2007. 82 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) — Universidade Federal do Amazonas, 2007.

AMORIM, C. N. D. **Iluminação Natural e Eficiência Energética – Parte I. Estratégias de Projeto para uma Arquitetura Sustentável**. Brasília, Nov. 2002a. Disponível em: [http://www.unb.br/fau/posgraduação/cadernos\\_eletronicos/ediçao2002.htm](http://www.unb.br/fau/posgraduação/cadernos_eletronicos/ediçao2002.htm). Acesso em: 20 Nov. 2010.

ASHRAE, AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS. **Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings**. ASHRAE Standard 90.1–1989. American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2007.

BAKER, N.; STEEMERS, K. (2002): **Daylight Design of Buildings**. London, James&James.

BENYA, J.; HESCHONG, L.; MCGOWAN T.; MILLER, N.; RUBINSTEIN, F. (2001): **Advanced Lighting Guidelines**. New Buildings Institute, Inc. (NBI).

BOYCE, P. R.; EKLIND N. H.; SIMPSON, S. N. (2000): **Individual lighting control: Task performance, mood, and illuminance**. *J. Illuminating Eng. Soc.* 29: 131142.

BOYCE, P. R.; VEICHT, J. A.; NEWSHAM, G. R.; JONES, C. C.; HEERWAGEM, J.; MYER, M. (2006a): **Occupant use of switching and dimming controls in offices**. *Lighting Research & Technology*; 38: 358–378.

BOYCE, P. R.; VEICHT, J. A.; NEWSHAM, G. R.; JONES, C. C.; HEERWAGEM, J.; MYER, M. (2006b): **Lighting quality and office work: Two field**

**simulation experiments.** *Lighting Research and Technology*, v. 38, no. 3, Sept. 2006b, pp. 191-223

BOYCE, P., RAYNHAM, P. **The SLL Lighting Handbook.** The Society of Light and Lighting. 2009.

BOYCE, P. **Editorial: Better lighting for less energy.** *Lighting Res. Technology*. 2011; 43: 141

CABÚS, R. C. (2002) **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil.** (PhD). Architecture, University of Sheffield, Sheffield, 288 p.

CARVALHO, C. R. **Avaliação do Programa APOLUX Segundo Protocolos do Relatório CIE 171:2006 Referentes à Iluminação Natural.** Florianópolis, 26 de novembro de 2009, 149 p. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, UFSC, 2009.

CASSOL, F. **Aplicação da análise inversa via otimização extrema generalizada em projetos de iluminação.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Dissertação (Escola de Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. 2009.

CASSOL, F.; SCHNEIDER, P. S.; FRANCA, F. H. R.; NETO, A.J.S. (2011): **Multi-objective optimization as a new approach to illumination design of interior spaces.** *Building and Environment*, Volume 46, Issue 2, February 2011, Pages 331-338.

CATON, N. (2007): **Task-ambient lighting: a sustainable design method investigation.** Master of science. Department of Architectural Engineering and Construction Science College of Engineering. Manhattan, Kansas.

CEN- EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 12464-1: Lighting of work places Part 1: Indoor work places.** 2002

CIE STANDARD – COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE (2006). Technical Report. CIE 171:2006 **“Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs”.** France, 2006.

CLARO, A. **“Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade Aplicado à Iluminação Natural.”** Florianópolis. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFSC, 1998.

CHRISTAKOU, E. D. **A Simulação Computacional da Luz Natural Aplicada ao Projeto de Arquitetura**. 2004. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

CUNHA, A. V. L. **Avaliação do Programa APOLUX segundo os Protocolos de modelos de Céu do Relatório CIE 171:2006**. 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - UFSC, Florianópolis, 2011.

CUTTLE, C.(2010): **Towards the third stage of the lighting profession**. *Lighting Res. Technology*; 42: 73–93.

DIDONÉ, E. **A influência da luz natural na avaliação da eficiência energética de edifícios contemporâneos de escritórios em Florianópolis/SC**. 2009. 174 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - UFSC, Florianópolis, 2009.

ELETROBRÁS. **Manual de iluminação eficiente**. Procel: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. 1ª Ed. 2002.

ENERGY DESIGN RESOURCES. **“Design Brief – Lighting.”** *Design Briefs*. 5 February, 2007. Disponível em: <http://www.energydesignresources.com/resource/22>.

ESCUYER, S.; FONTOYNONT, M. (2001): **Lighting controls: a field study of office worker’s reactions**. *Research and Technology*, 33 (2), pp. 77-96.

FERREIRA, R.; FONTES, G.; RAMOS, G.; LAMBERTS, R. (2010): **Análise comparativa entre o RTQC e a Ashrae 90.1 para avaliação da eficiência energética de sistemas de iluminação**. Entac.

FIUZA, J. M. **A influência de elementos de proteção solar horizontais aplicados a aberturas laterais na admissão e distribuição da luz natural**. 2008. 183 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - UFSC, Florianópolis, 2008.

FOTIOS, S. A.; CHEAL, C. **Predicting Lamp Spectrum Effects At Mesopic Levels. Part 2: Preferred Appearance and Visual Acuity** (2011). *Lighting Research & Technology*; 43(2); 159-172.

GANSLANDT, R.; HOFMANN, H. **Handbook Of Interior Lighting Design**. ERCO Leuchten GmbH, Lüdenscheid Friedr. Vieweg & Sohn Verlagsgesellschaft mbH, Braunschweig/Wiesbaden1. Edition 1992.

GALASIU, A. D.; NEWSHAM, G. R.; SAVAGAU, C.; SANDER, D. M. (2007): **Energy saving lighting control systems for open-plan offices: a field study.** *Leukos*, v. 4, no. 1, July 2007, pp. 7-29.

GALASIU, A. D.; NEWSHAM, G. R. (2009): **Energy savings due to occupancy sensors and personal controls: A pilot field study.** In: *Lux Europa 2009, 11th European Lighting Conference: 745-752.* Istanbul.

GHISI, E. **Desenvolvimento de uma metodologia para retrofit em sistemas de iluminação: Estudo de caso na Universidade Federal de Santa Catarina.** 1997. 246 p. Dissertação (Mestrado de Engenharia Civil). Curso de pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Santa Catarina, 1997.

GHISI, E.; LAMBERTS, R. **Influência das características reflexivas da luminária e da refletância das paredes na potência instalada em sistemas de iluminação.** In: ENTAC 98. Florianópolis, 1998.

GHISI, E.; TINKER, J. A. (2006): **Evaluating the potential for energy savings on lighting by integrating fibre optics in buildings.** *Building and Environment.* v.41, p. 1611-1621.

GUGEL, E. C; WESTPHAL, F. C. (2006): **Estudo comparativo entre sistemas de iluminação.** Relatório de pesquisa. 2006.

GODOY, P. **Iluminação de escritórios: Uma nova abordagem.** Lume arquitetura. Ed. 13. Pg. 64-68. **Abril/Maio 2005.**

GÓVEN, T. **Energy Savings Through Improved Lighting Design and Engineering.** RIGHT LIGHT 4, 1997. VOLUME 1.

HADWAN, M.K.; CARTER, D. J. (2006): **Light loss in complex heavily obstructed interiors: influence of obstruction density, obstruction height and luminaire type.** *Lighting Res. Technology.* 38,1 pp. 53\_/72

IES. Illuminating Engineering Society of North America. **IES Lighting Handbook - References and Applications**, 9th edition, New York, IESNA, 2000.

IHM, P.; NEMRI, A.; KRARTI, M. (2009): **Estimation of lighting energy savings from daylighting.** *Building and Environment.* v.44, p. 509-514.

ITAIM. **Catálogo geral e de produtos.** (2008). São Paulo. Disponível em : [www.Itaim.ind.br](http://www.Itaim.ind.br). Acesso em 12 de julho de 2011.

IWASHITA, J. **Eficiência energética em sistemas de iluminação de interiores: análise de luminárias comerciais.** Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas. São Paulo, 2004.

IWASHITA, J.; SAIDEL, M. A. (2005): **Avaliação da eficiência energética de sistemas de iluminação interior: parâmetros para uma abordagem uniforme visando a lei de eficiência energética.** SNPTEE.

JENNINGS, J. D.; COLAK, N.; RUBISTEIN, F.M. (2002): **Occupancy and time-based lighting controls in open offices.** *Journal of the Illuminating Engineering Society.* New York, v.32, n.2, p. 86-100.

KREMER, A. **A influência de elementos de obstrução solar no nível e na distribuição interna de iluminação natural em escolas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina. 2002.

LAM, W. M. C. **Sunlight as a formiguer for architecture.** New York, EUA: Van Nostrand Reinhold Company, 1986.

LIGHTGROUP. **Catálogo geral.** Disponível em: [www.lightgroup.com.br](http://www.lightgroup.com.br).

LIMA, R. C.; BATISTA, J. O. **Iluminação interna em uma loja de auto-serviço: estudo da integração entre sistemas artificiais e a luz natural.** Anais do XI Encontro nacional de Conforto no Ambiente Construído. Rio de Janeiro, agosto de 2011.

LIMA, R. V. dos S. 2007. **A influência de decisões arquitetônicas na eficiência energética** do Campus/UFRN. Dissertação (Mestrado em Arquitetura). Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

LITG. (s.d.) **Lighting with Artificial Light.** Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin. Disponível em: [www.litg.de](http://www.litg.de). Acesso em 15 de maio de 2011.

LOE, D. L. **Quantifying lighting energy efficiency: a discussion document.**(2003): *Lighting Research & Technology*: 35, 319–329.

LOE, D. L. **Energy efficiency in lighting – considerations and possibilities.** *Lighting Research and Technology.* 2009; 41: 209–218

LOPES, A. C. S. **Proposta de Adequação do Sistema Artificial Suplementar ao Sistema de Iluminação Natural em Sala de Aula Padrão.** 2006. Dissertação (Mestrado em Arquitetura) - Universidade Federal de Santa Catarina.

MAAMARI, F.; FONTOYNONT, M.; ADRA, N. (2006): **Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs.** *Energy and Buildings* 38.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais.** 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC S/A, 2007. 914p.

MARDALJEVIC, J.; HESCHONG L.; LEE, E. **Daylight metrics and energy savings.**(2009) *Lighting Research and Technology*; 41(3):261 e 83.

MARINOSKI, D. L.; MORETTI, R. S.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R. (2001): **Desenvolvimento de uma metodologia para interpolação de valores de intensidade luminosa aplicada ao cálculo da iluminância através do Método Ponto-a-ponto.** In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 6., 2001, São Pedro. Anais... São Paulo: ANTAC, 2001. CD-ROM.

MING-CHIN, Ho et al. (2008): **Optimal sun-shading design for enhanced daylight illumination of subtropical classroom.** *Energy And Buildings*, n. 40, p.1844-1855.

MINISTÉRIO DAS MINAS E ENERGIA. **Balço Energético Nacional, 2010.** Disponível em: <<https://ben.epe.gov.br/>> Acesso em: 10 de fevereiro de 2011.

MOORE, F. **Environment Control Systems: Heating Cooling Lighting.** New York: McGraw-Hill, Inc., 1993.

MOORE, F. **Concepts and Practice of Architectural Daylighting.** Van Nostrand Reinhold, NY. 1991.

MOORE, T.; CARTER, D. J.; SLATER, A. I. (2004): **A study of opinion in offices with and without user controlled lighting.** *Lighting Research and Technology*, 36 (2), 131-146.

MORAES, L. N. CLARO, A. (2011): **Avaliação do programa LightTool segundo protocolos do Relatório Técnico CIE 171:2006.** Anais do XI Encontro nacional de Conforto no Ambiente Construído. Rio de Janeiro, agosto de 2011.

MORAES, L. N.; PEREIRA, F. O. R. (2011): **Um Método Simplificado para Avaliação do Desempenho Dinâmico da Iluminação Natural.** Anais do XI Encontro nacional de Conforto no Ambiente Construído. Rio de Janeiro, agosto de 2011.

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. **Useful daylight illuminance: a new paradigm to access daylight in buildings.** *Lighting Research & Technology* 2005;37(1):41- 59

NABIL, A.; MARDALJEVIC, J. **Useful daylight illuminances: a replacement for daylight factors.** *Energy and Buildings*, 2006;38(7):95 -130

NEWSHAM, G.; SANDER, D. M. (2003) **The Effect of office design on workstation lighting: a simulation study.** *Journal of the Illuminating Engineering Society*, Summer, pp. 52-73

NEWSHAM, G.; VEITCH, J. A. **Energy-Efficient Lighting Options: Predicted Savings and Occupant Impressions of Lighting Quality.** *CLIMA 2000 Conference*, Brussels, Belgium, 1997.

NEWSHAM, G.; VEITCH, J. A.; ARSENAULT, C.; DUVAL, C. (2004): **Lighting for VDT workstations 2: effect of control on task performance, and chosen photometric conditions.** *IRC Research Report RR-166.* Ottawa, ON, Canada: National Research Council.

NEWSHAM, G. R.; VEITCH, J. A.(2006): **Individual Control can be Energy Efficient.** NRCC-42863 Disponível em : <http://www.nrc-cnrc.gc.ca/obj/irc/doc/pubs/nrcc42863res.php>. Acesso em agosto de 2010.

NEWSHAM, G. R.; MANCINI, S. **The Potential for demand-responsive lighting in non-daylit offices .** *LEUKOS*, v. 3, no. 2, Outubro,2006. 105-120.

NEWSHAM, G.; ARIES, S.; MANCINI, G. F. (2008): **Individual control of electric lighting in a daylit space.** *Lighting Research and Technology*, 40(1): p. 25-41.

OSRAM, 2008. **Manual Luminotécnico Prático.**

PHILIPS (1981). **Manual de iluminação Philips.** Terceira edição. 319p.

REINHART, C. F.; WALKENHORST, O. (2001) **Dynamic radiance-based daylight simulations for a full-scale test office with outer venetian blinds.** *Energy & Buildings*.

REINHART, C. F.; FITZ, A. (2006): **Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design.** *Energy and Buildings*, (38):824-835.

REINHART, C. F.; MARDALJEVIC, J.; ROGERS, Z. (2006) **Dynamic daylight performance metrics for sustainable building design.** *Leukos*, Canada, v. 3, n. 1.

REINHART C. F.; WEISSMAN, D. A. (2012) **The daylight area e Correlating architectural student assessments with current and emerging daylight availability metrics.** *Building and Environment.* 155 -164.

RIBEIRO, N. F.; CARLO, J. C. (2011): **Estudo do potencial da classificação de níveis de eficiência de projetos luminotécnicos pelo programa brasileiro de etiquetagem.** Anais do XI Encontro nacional de Conforto no Ambiente Construído. Rio de Janeiro, agosto de 2011.

ROBBINS. C. L. **Daylighting, Design and Analysis.** Van Nostrand Reinhold Company Inc. New York, 1986.

ROISIN, B.; BODART, M.; DENEYER, A.; D'HERDT, P. (2008) **Lighting energy savings in offices using different control systems and their real consumption.** *Energy and Buildings.* v. 40, p. 514-523.

RYCKAERT, W.; LOOTENS, C.; GELDOF, J.; HANSELAER, P. (2010): **Criteria for energy efficient lighting in buildings.** *Energy & Buildings.* 42(3):341-347.

SABRY, H. M. K.; FAGGAL, A. A. E. (2005): **Integration of electric of electric lighting system in a daylight – building.** In: *PLEA2005 - The 22nd Conference on Passive and Low Energy Architecture.* Beirut, Lebanon, 13-16.

SHAILESH, K. R.; RAIKAR, T. S. (2010): **Application of RELUX Software in Simulation and Analysis of Energy Efficient Lighting Scheme.** International Journal of Computer Applications. Volume 9– No.7. pp. 24-35

SHIGA, A.; PEGOLLO, C. A. G; SENE, D. F.; SAKAKIBARA, E.; SANSONE, R.; CAMPOS, V. A. (2008): **Estudo prático da eficiência energética em sistemas de iluminação: um estudo feito na Universidade São Judas Tadeu.** Abr./Mai./Jun./ 2008. Ano XV, n57, 157-162.

SHIKDER, S.; MOURSHED, M.; PRICE, A. (2010): **Luminaire position optimisation using radiance based simulation: a test case of a senior living room.** In *Computing in Civil and Building Engineering, Proceedings of the International Conference*, W. TIZANI (Editor), 30 June-2 July, Nottingham, UK, , Paper 190, p. 379.

SOUZA, M. B. **Potencialidade de aproveitamento da luz natural através da utilização de sistemas automáticos de controle para economia de energia elétrica.** 2003. 208p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina.

SOUZA, R. V. G. **Desenvolvimento de modelos matemáticos empíricos para a descrição dos fenômenos de iluminação natural externa e interna.**

2004. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2004.

TEIXEIRA, W. (s. d.): **Recomendações para dimensionamento pelo método dos lúmens**. Série engenharia da iluminação. Disponível em: [www.lightgroup.com.br](http://www.lightgroup.com.br)

TOLEDO, B. G. **Integração de iluminação natural e artificial : métodos e guia prático para projeto luminotécnico** . 2008. 174 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Brasília, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, 2008.

USGBC. LEED-NC **Leadership in energy and environmental design. Version 2.2**. Available from: [www.usgbc.org/LEED/](http://www.usgbc.org/LEED/); 2009.

WAGGONER, E. N.; DUPUY,R.; GODFREY, M. **Daylighting as a personal energizer. Lighting Design and Application LD+A**, Vol.41, N 07, p. 30-32, Julho, 2011.

WARREN, W. L. **Form, function and Fixes.LD+A**, *Lighting Design and Application*. Pp. 12-13. June, 2011.

WWF-Brasil. **Agenda elétrica sustentável 2020: estudo de cenários para um setor elétrico brasileiro eficiente, seguro e competitivo**. Brasília, 2006, 80 p. v.12.

YAMAKAWA, K.; WATABE, K.; INANUMA, M.; SAKATA, K.; TAKEDA, H. (2000): **A study on the practical use of a task and ambient lighting system in an office**. *Journal of Light & Visual Environment*, 24 (2), pp. 15-18.

Site da ferramenta de simulação de iluminação:  
[http://sts.bwk.tue.nl/artificial\\_light/](http://sts.bwk.tue.nl/artificial_light/).

## APÊNDICE A- Planilhas de cálculo – Método dos Lúmens – Modelo M01

Modelo da luminária **BNI 3312 2X16W**

		Comprimento - 0.619m	Altura -0.072 m	Largura - 0.304m	
Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20	
	Largura	L	m	12.5	
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250	
	Pé direito	H	m	3	
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75	
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072	
	Pé direito útil	h = H - Hplano - h pend	m	2.178	
	Índice do recinto			3.5	
	Fator de depreciação	Fd		1	
		Iluminância alvo	Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200	
	Lâmpadas por luminária	z		2	
	Fator de utilização	Fu		0.72	
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		173.6	
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		86.8	
		Fluxo luminoso desejado	$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	208333
Consumo	Potência total luminária		W	32	
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.8	
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	11.1	

Modelo da luminária **BNI 3312 2X32W**

		Comprimento - 1.315m	Altura - 0.072m	Largura - 0.247m	
Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20	
	Largura	L	m	12.5	
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250	
	Pé direito	H	m	3	
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75	
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072	
	Pé direito útil	h = H - Hplano - h pend	m	2.2	
	Índice do recinto			3.5	
	Fator de depreciação	Fd		1	
		Iluminância alvo	Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2600	
	Lâmpadas por luminária	z		2	
	Fluxo total da luminária	$\Phi t$		5200	
	Fator de utilização	Fu		0.67	
	Quantidades de luminárias	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi t$		43.1	
		Fluxo luminoso desejado	$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	223881
Consumo	Potência total luminária		W	64	
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.8	
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	11.0	

Modelo da luminária **BNI 3312 4X16W**

		Comprimento - 0.693m	Altura - 0.072m	Largura - 0.617m
Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	h = H - Hplano - h pend	m	2.2
	Índice do recinto			3.5
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		4
	Fluxo total da luminária	$\Phi t$		4800
	Fator de utilização	Fu		0.75
	Quantidades de luminárias	$n = A.E/Fu. Fd.\Phi t$		41.7
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu. Fd$	lm	200000
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	2.7
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	10.7

Modelo da luminária **BNI 3312 4X32W**

		Comprimento - 1.24m	Altura - 0.072m	Largura - 0.617m
Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	h = H - Hplano - h pend	m	2.178
	Índice do recinto			3.53
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		4
	Fator de utilização	Fu		0.7
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu. Fd.\Phi$		79.37
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		19.84
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu. Fd$	lm	214286
Consumo	Potência total luminária		W	128
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	2.54
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	10.16

Modelo da luminária **DBL3391 2X16W**

Comprimento - 0.693m

Altura - 0.072m

Largura - 0.247m

Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.18
	Índice do recinto			3.53
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.7
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu.Fd.\Phi$		178.57
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		89.29
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu.Fd$	lm	214286
Consumo	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	2.86
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	11.43

Modelo da luminária **DBL3391 2X32W**

Comprimento - 1.315m

Altura - 0.072m

Largura - 0.247m

Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.18
	Índice do recinto			3.53
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.64
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu.Fd.\Phi$		86.81
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		43.40
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu.Fd$	lm	234375
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	2.78
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	11.11

Modelo da luminária **DBL3391 4X16W**

		Comprimento - 0.693m	Altura - 0.072m	Largura - 0.617m
Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{plano} - h_{pend}$	m	2.18
	Índice do recinto			3.53
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		4
	Fator de utilização	Fu		0.73
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		171.23
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		42.81
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	205479
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.74
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	10.96

Modelo da luminária **DBL2391 4X32W**

		Comprimento - 1.24m	Altura - 0.072m	Largura - 0.617m
Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{plano} - h_{pend}$	m	2.18
	Índice do recinto			3.53
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		4
	Fator de utilização	Fu		0.73
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		76.10
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		19.03
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	205479
Consumo	Potência total luminária		W	128
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.44
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	9.74

Modelo da luminária **OCT1369 2x16W**

Comprimento - 0.669m

Altura - 0.057m

Largura - 0.225m

Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.057
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.19
	Índice do recinto			3.51
	Fator de depreciação	Fd		1
	Iluminância alvo	Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.79
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		158.23
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		79.11
	Fluxo luminoso desejado	$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	189873
Consumo	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.53
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	10.13

Modelo da luminária **OCT1369 2x32W**

Comprimento - 1.290m

Altura - 0.057m

Largura - 0.225m

Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.057
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.19
	Índice do recinto			3.51
	Fator de depreciação	Fd		1
	Iluminância alvo	Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.79
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		70.32
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		35.16
	Fluxo luminoso desejado	$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	189873
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.25
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	9.00

Modelo da luminária **OCT1369 1x32W**

		Comprimento - 1.290m	Altura - 0.057m	Largura - 0.225m
Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.057
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.19
	Índice do recinto			3.51
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		1
	Fator de utilização	Fu		0.79
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		70.32
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		70.32
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	189873
Consumo	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.25
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	9.00

Modelo da luminária **DIF2351 2x16W**

		Comprimento - 0.612m	Altura - 0.072m	Largura - 0.172m
Descrição do ambiente	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.18
	Índice do recinto			3.53
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.45
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		277.78
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		138.89
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	333333
Consumo	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	4.44
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	17.78

Modelo da luminária **DIF2351 2x32W**

Comprimento - 1.24m

Altura - 0.072m

Largura - 0.203m

<b>Descrição do ambiente</b>	Comprimento	C	m	20
	Largura	L	m	12.5
	Área	C.L	m <sup>2</sup>	250
	Pé direito	H	m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{plano} - h_{pend}$	m	2.18
	Índice do recinto			3.53
	Fator de depreciação	Fd		1
	Iluminância alvo	Em	lux	600
<b>Sistema de iluminação</b>	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.45
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		123.46
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		61.73
	Fluxo luminoso desejado	$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	333333
<b>Consumo</b>	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	1.98
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	7.90

## APÊNDICE B- Planilhas de cálculo – Método dos Lúmens – Modelo M02

### Modelo da luminária BNI 3312 2X16W

Comprimento - 0.619m

Altura -0.072 m

Largura - 0.304m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.7
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu . Fd.\Phi$		180
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		90
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu . Fd$	lm	216000
Consumo	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	2.88
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	11.4

### Modelo da luminária BNI 3312 2X32W

Comprimento - 1.315m

Altura - 0.072m

Largura - 0.247m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2600
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.67
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu . Fd.\Phi$		86.80
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		43.40
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu . Fd$	lm	225672
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	2.78
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	11

Modelo da luminária **BNI 3312 4X16W**

Comprimento - 0.693m

Altura - 0.072m

Largura - 0.617m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.82
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		4
	Fator de utilização	Fu		0.73
	Quantidade de lâmpadas	$n = A \cdot E / Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		172.6
	Quantidades de luminárias	$N = n / z$		43.15
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A \cdot E / Fu \cdot Fd$	lm	207123
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W / 1000$	kW	2.76
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000 / A$	W/m <sup>2</sup>	10.96

Modelo da luminária **BNI 3312 4X32W**

Comprimento - 1.24m

Altura - 0.072m

Largura - 0.617m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		4
	Fator de utilização	Fu		0.7
	Quantidade de lâmpadas	$n = A \cdot E / Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		80
	Quantidades de luminárias	$N = n / z$		20
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A \cdot E / Fu \cdot Fd$	lm	216000
Consumo	Potência total luminária		W	128
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W / 1000$	kW	2.56
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000 / A$	W/m <sup>2</sup>	10.2

Modelo da luminária **DBL3391 2X16W**

Comprimento - 0.693m

Altura - 0.072m

Largura - 0.247m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.7
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		180
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		90
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	216000
Consumo	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.88
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	11.43

Modelo da luminária **DBL3391 2X32W**

Comprimento - 1.315m

Altura - 0.072m

Largura - 0.247m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.18
	Área de paredes			156.82
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.63
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		88.89
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		44.4
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	240000
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.8
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	11.3

Modelo da luminária **DBL3391 4X16W**

Comprimento - 0.693m

Altura - 0.072m

Largura - 0.617m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		4
	Fator de utilização	Fu		0.73
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu.Fd.\Phi$		172.6
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		43.2
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu.Fd$	lm	207123
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	2.8
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	11.0

Modelo da luminária **DBL2391 4X32W**

Comprimento - 1.24m

Altura - 0.072m

Largura - 0.617m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		4
	Fator de utilização	Fu		0.72
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu.Fd.\Phi$		77.8
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		19.4
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu.Fd$	lm	210000
Consumo	Potência total luminária		W	128
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	2.49
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	9.88

Modelo da luminária **OCT1369 2x16W**

Comprimento - 0.669m

Altura - 0.057m

Largura - 0.225m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.78
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		161.5
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		80.8
	Fluxo luminoso desejado	$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	193846
Consumo	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.58
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	10.26

Modelo da luminária **OCT1369 2x32W**

Comprimento - 1.290m

Altura - 0.057m

Largura - 0.225m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.79
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu \cdot Fd \cdot \Phi$		70.9
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		35.4
	Fluxo luminoso desejado	$\Phi = A.E/Fu \cdot Fd$	lm	191392
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n \cdot W/1000$	kW	2.27
	Densidade de potência	$D = Pt \cdot 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	9.00

Modelo da luminária **OCT1369 1x32W**

Comprimento - 1.290m

Altura - 0.057m

Largura - 0.225m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		1
	Fator de utilização	Fu		0.79
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu.Fd.\Phi$		70.9
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		70.9
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu.Fd$	lm	191392
Consumo	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	2.3
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	9.0

Modelo da luminária **DIF2351 2x16W**

Comprimento - 0.612m

Altura - 0.072m

Largura - 0.172m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{\text{plano}} - h_{\text{pend}}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo		Em	lux	600
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	1200
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.45
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu.Fd.\Phi$		280
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		140
Fluxo luminoso desejado		$\Phi = A.E/Fu.Fd$	lm	336000
Consumo	Potência total luminária		W	32
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	4.5
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	17.8

Modelo da luminária **DIF2351 2x32W**

Comprimento - 1.24m

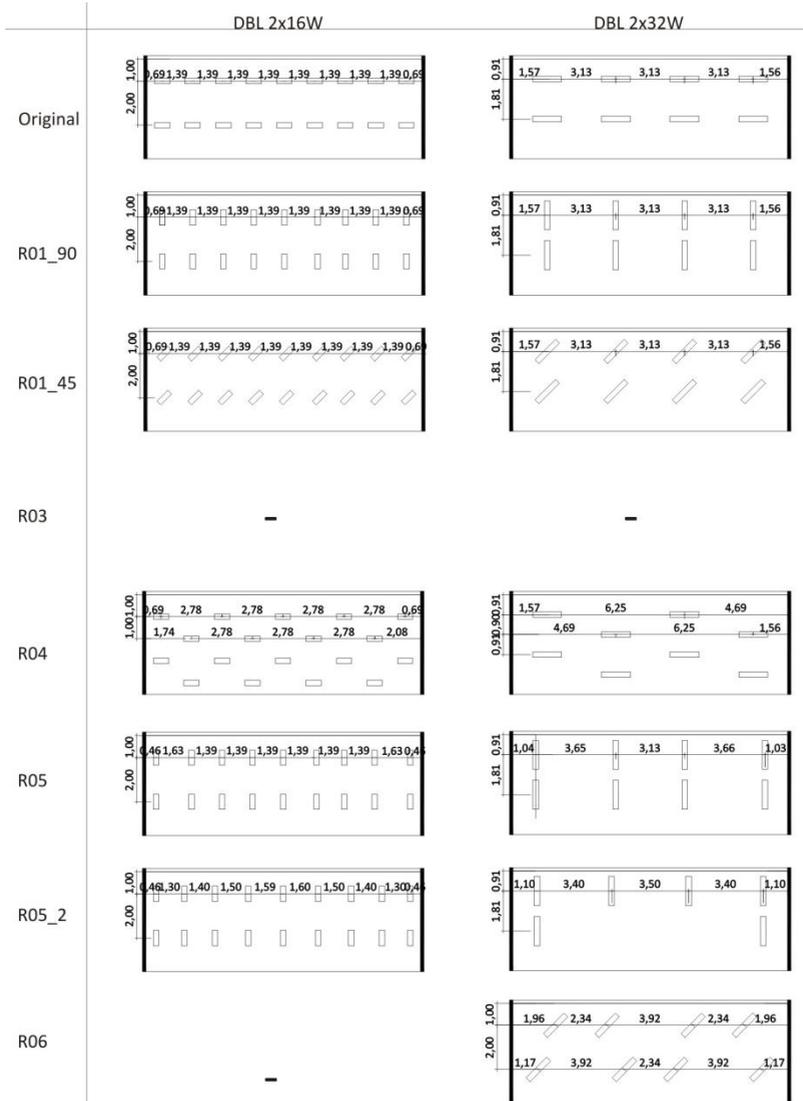
Altura - 0.072m

Largura - 0.203m

Descrição do ambiente	Área do teto		m <sup>2</sup>	252
	Área do plano de trabalho		m <sup>2</sup>	252
	Perímetro paredes		m <sup>2</sup>	72
	Pé direito		m	3
	Altura plano de trabalho	hpl	m	0.75
	Altura luminárias	Hlum	m	0.072
	Pé direito útil	$h = H - H_{plano} - h_{pend}$	m	2.178
	Área de paredes			156.8
	Índice do recinto			3.2
	Fator de depreciação	Fd		1
Iluminância alvo	Em	lux	600	
Sistema de iluminação	Fluxo luminoso da lâmpada	$\Phi$	lm	2700
	Lâmpadas por luminária	z		2
	Fator de utilização	Fu		0.45
	Quantidade de lâmpadas	$n = A.E/Fu.Fd.\Phi$		124.4
	Quantidades de luminárias	$N = n/z$		62.2
	Fluxo luminoso desejado	$\Phi = A.E/Fu.Fd$	lm	336000
Consumo	Potência total luminária		W	64
	Potência total instalada	$Pt = n . W/1000$	kW	4.0
	Densidade de potência	$D = Pt . 1000/A$	W/m <sup>2</sup>	15.8

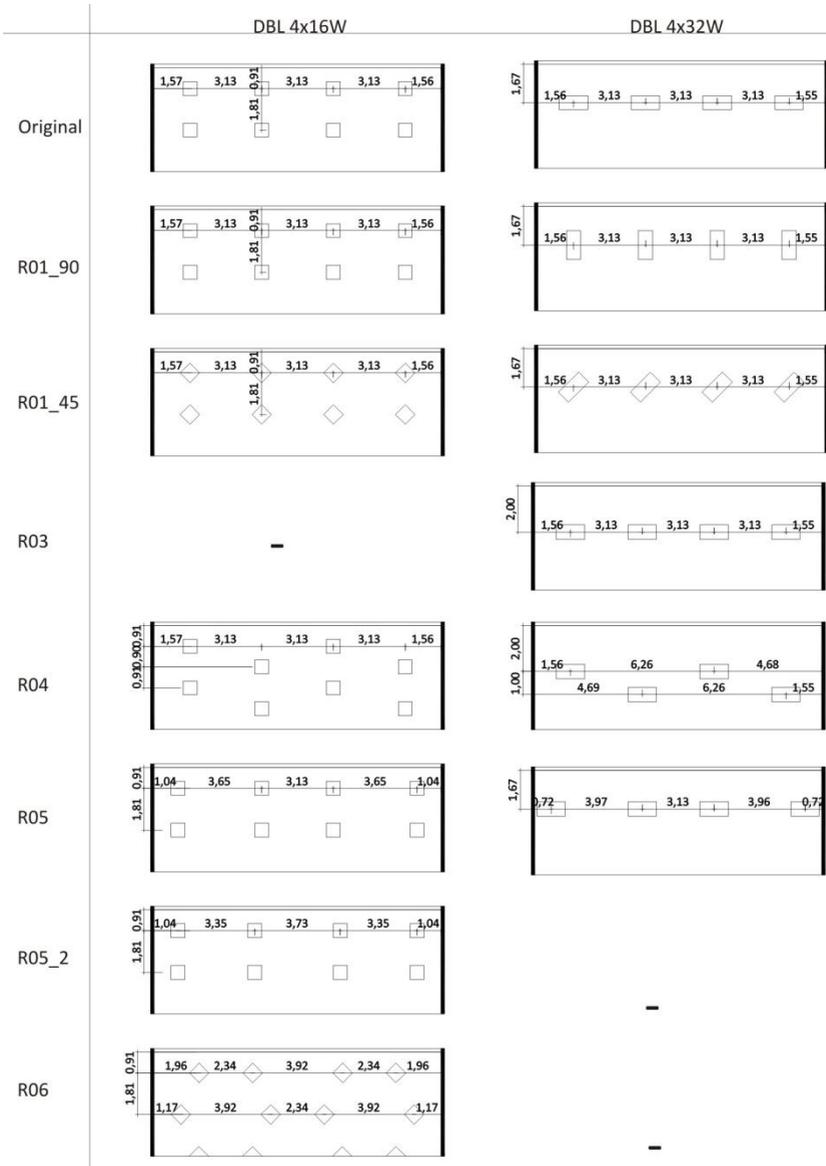
## APÊNDICE C- Reformulações para o Modelo M01

### Modelos DBL 2X16W e DBL 2X32W<sup>10</sup>



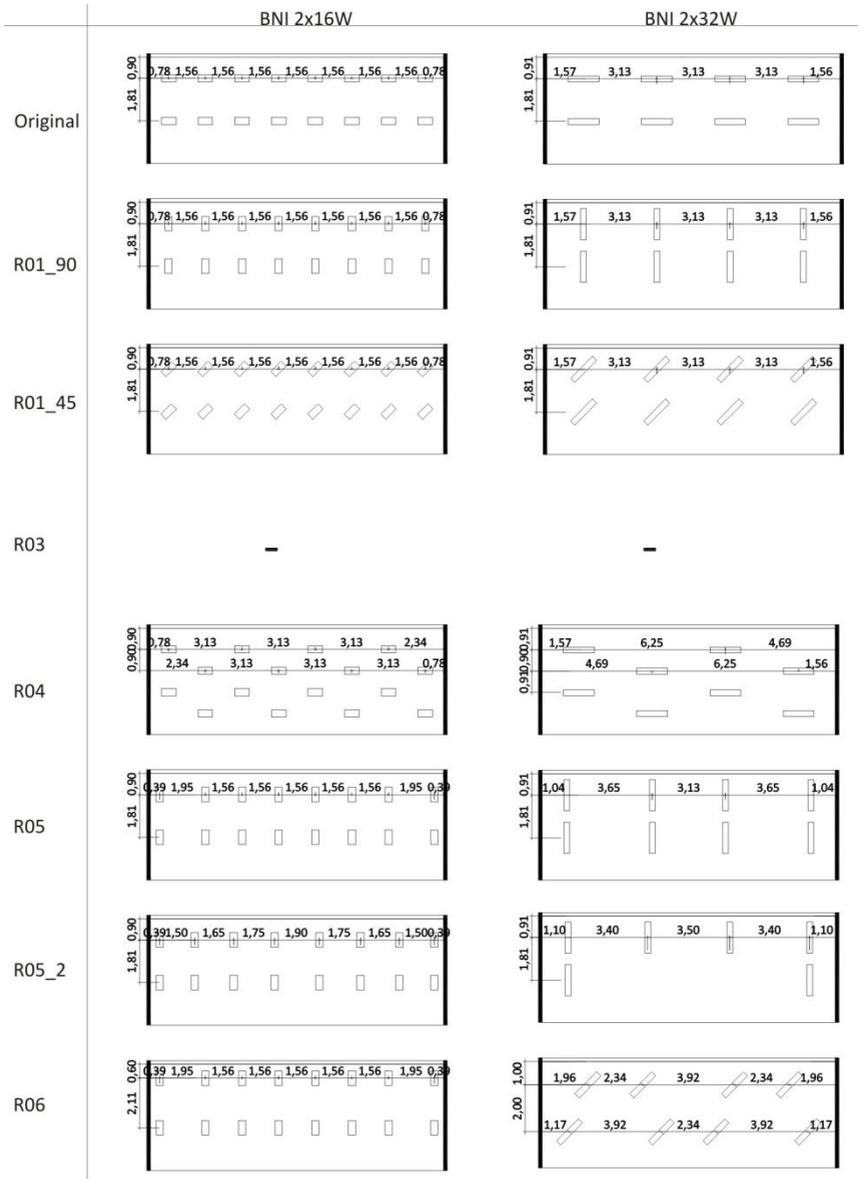
<sup>10</sup> As reformulações R02 e R07 foram realizadas para todos os modelos, mas não são mostradas neste apêndice.

## Modelos DBL 4X16W e DBL 4X32W<sup>11</sup>



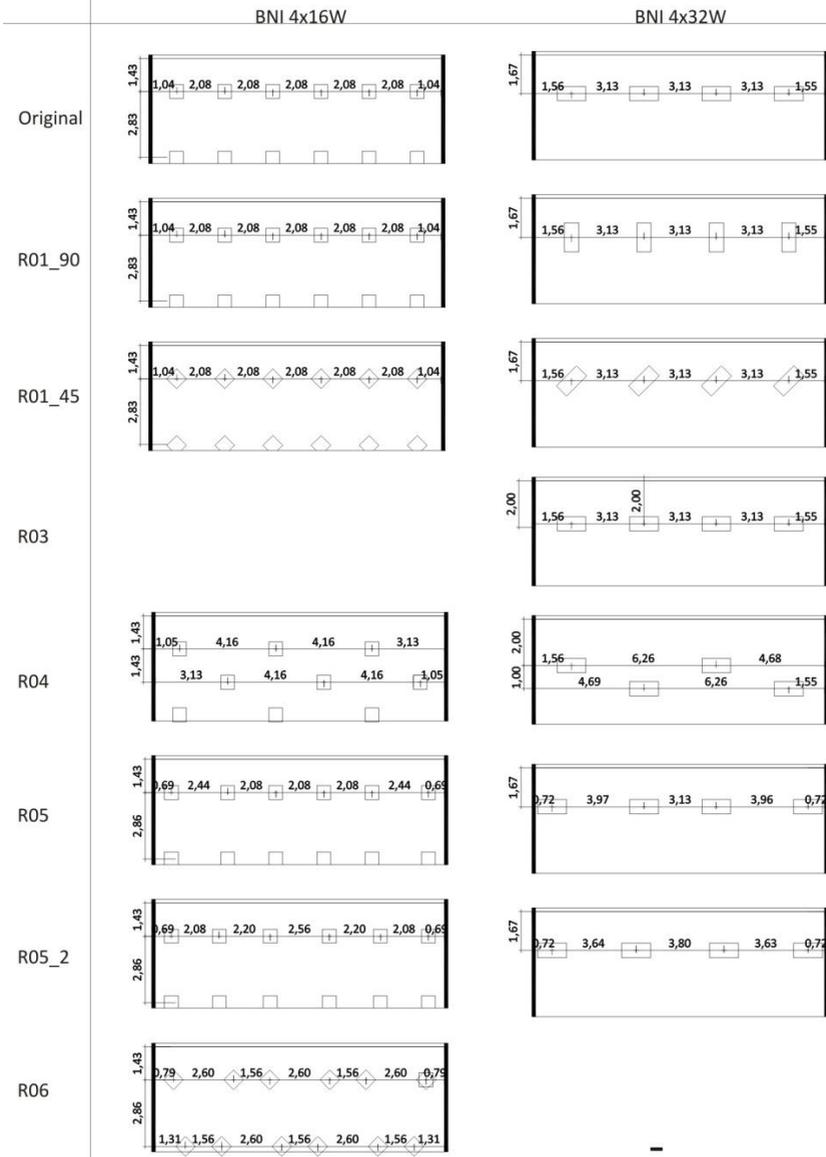
<sup>11</sup> As reformulações R02 e R07 foram realizadas para todos os modelos, mas não são mostradas neste apêndice.

## Modelos BNI 2X16W e BNI 2X32W<sup>12</sup>



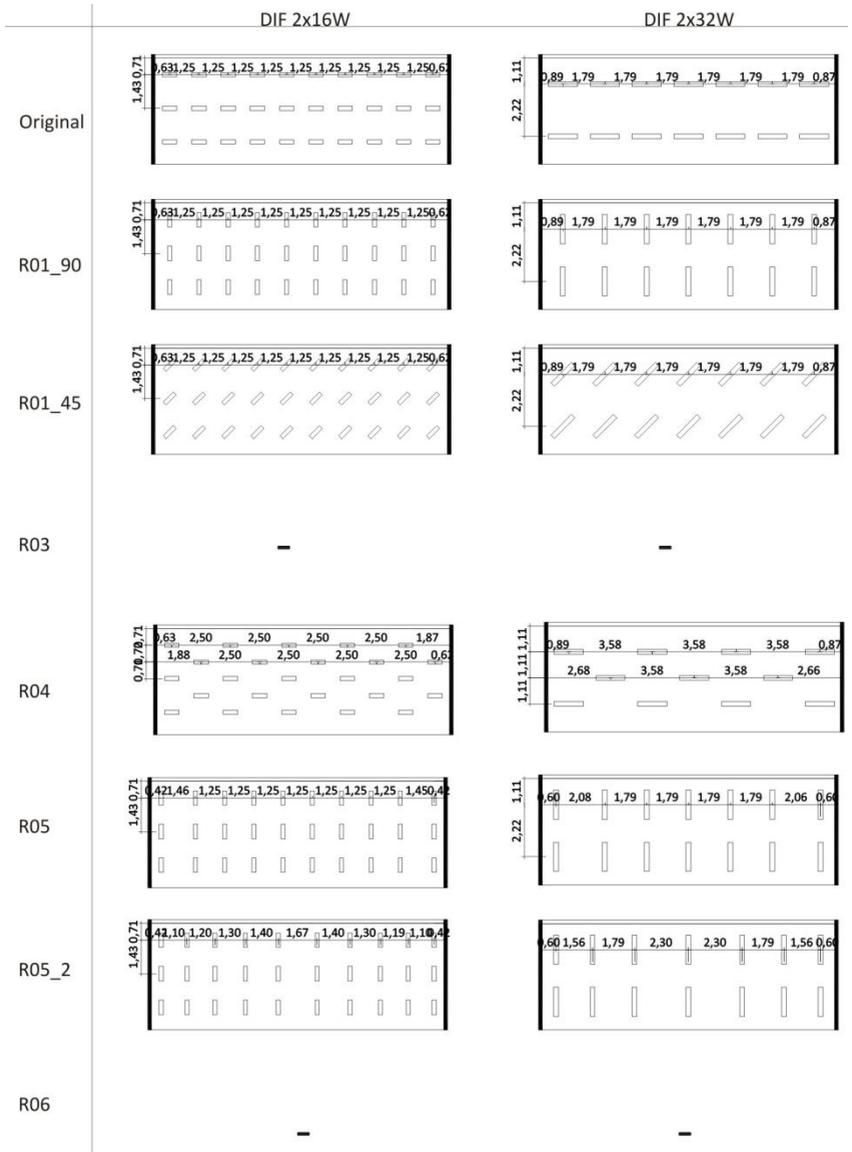
<sup>12</sup> As reformulações R02 e R07 foram realizadas para todos os modelos, mas não são mostradas neste apêndice.

### Modelos BNI 4X16W e BNI 4X32W<sup>13</sup>



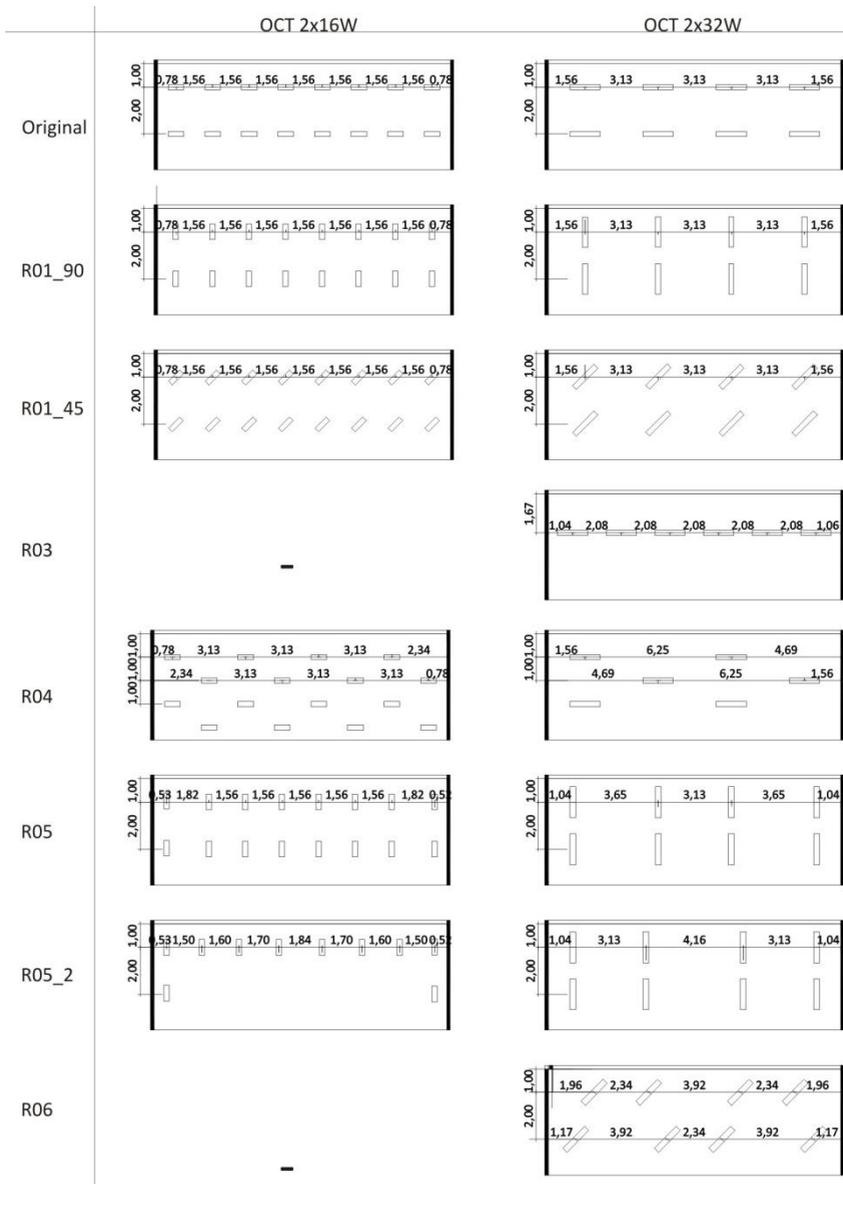
<sup>13</sup> As reformulações R02 e R07 foram realizadas para todos os modelos, mas não são mostradas neste apêndice.

## Modelos DIF 2X16W e DIF 2X32W<sup>14</sup>



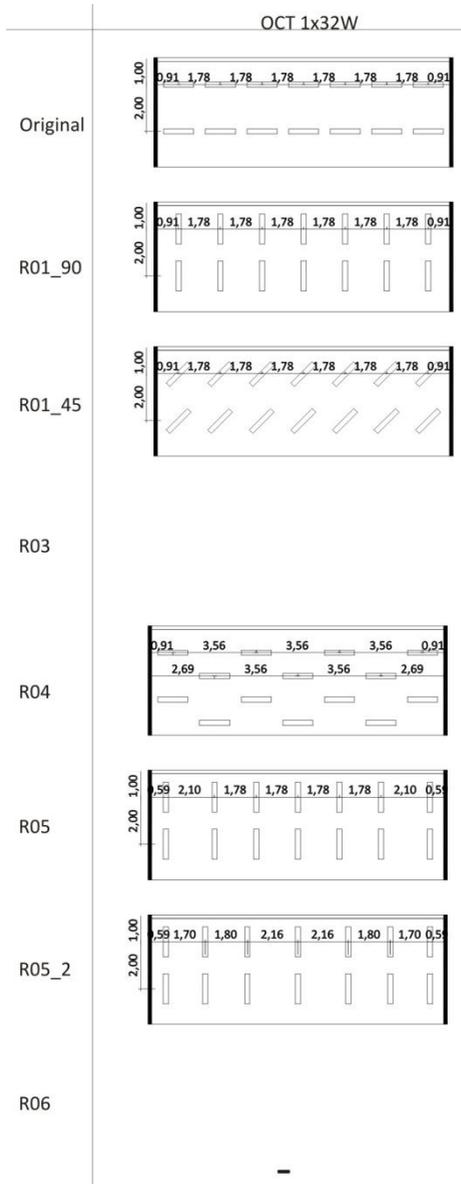
<sup>14</sup> As reformulações R02 e R07 foram realizadas para todos os modelos, mas não são mostradas neste apêndice.

## Modelos OCT 2X16W e OCT 2X32W<sup>15</sup>



<sup>15</sup> As reformulações R02 e R07 foram realizadas para todos os modelos, mas não são mostradas neste apêndice.

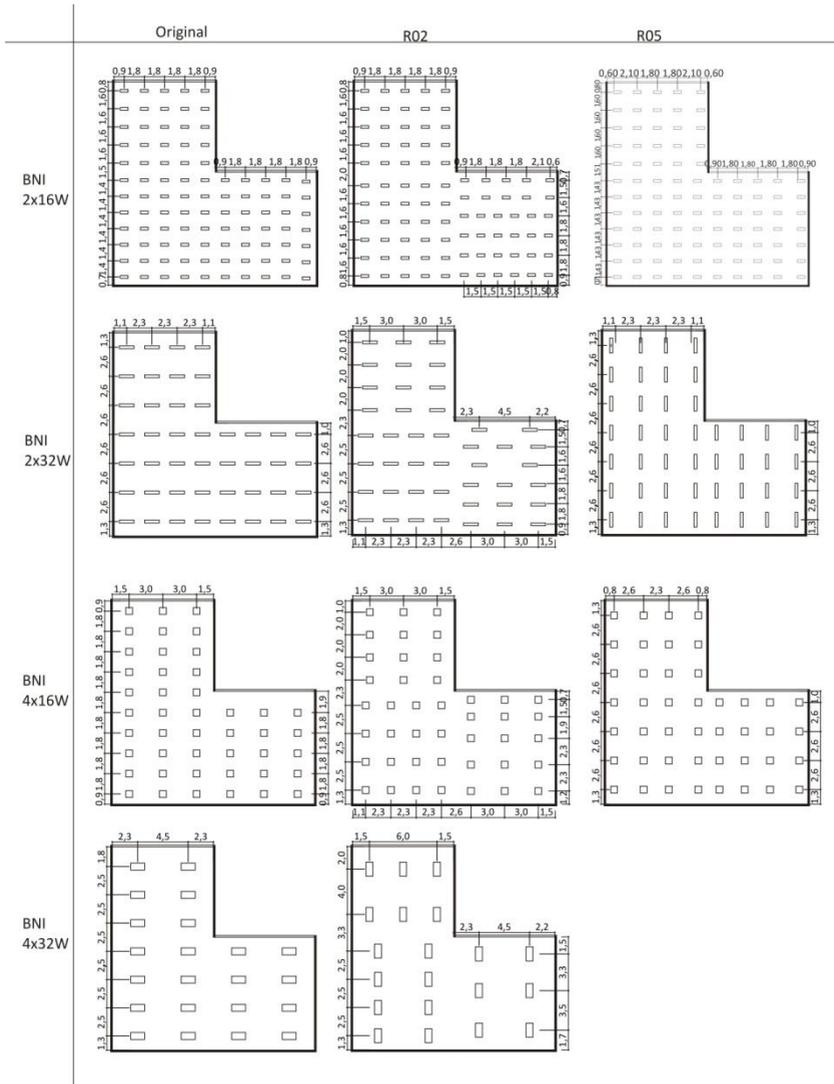
## Modelo OCT 1X32W<sup>16</sup>



<sup>16</sup> As reformulações R02 e R07 foram realizadas para todos os modelos, mas não são mostradas neste apêndice.

## APÊNDICE D- Reformulações para o Modelo M02

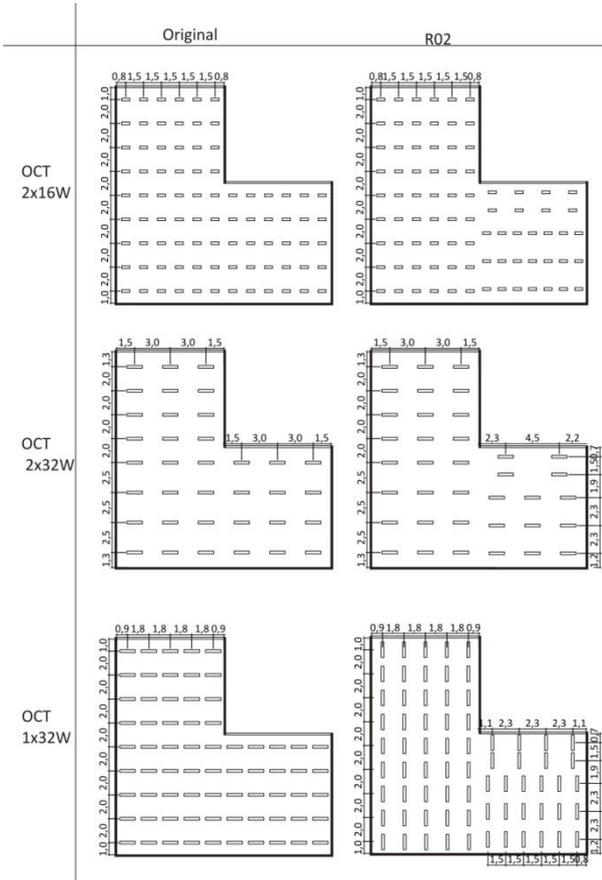
### Linha BNI<sup>17</sup>



<sup>17</sup> As reformulações R01\_90 e R01\_45 foram realizadas para todos os modelos, mas não são mostradas neste apêndice.



## Linha OCT<sup>19</sup>



<sup>19</sup> As reformulações R01\_90 e R01\_45 foram realizadas para todos os modelos, mas não são mostradas neste apêndice.



## APÊNDICE E – Planilhas de cálculo do fluxo luminoso por zona

### Modelo M01

Área total(m <sup>2</sup> )	A zona 1 (m <sup>2</sup> )	A zona 2 (m <sup>2</sup> )	A zona 3 (m <sup>2</sup> )
250	50	62.5	137.5
% Área	20	25	55

	Qtde luminárias	Fluxo luminoso desejado (lm)	Fluxo luminoso (lm)		
			Z1	Z2	Z3
BNI 2x16w	88	208333	41667	52083	114583
BNI 2x32w	44	223881	44776	55970	123135
BNI 4x16w	42	200000	40000	50000	110000
BNI 4x32w	20	214286	42857	53572	117857
DBL 2x16w	90	214286	42857	53572	117857
DBL 2x32w	44	234375	46875	58594	128906
DBL 4x16w	44	205479	41096	51370	113013
DBL 4x32w	20	205479	41096	51370	113013
OCT 2x16w	80	189873	37975	47468	104430
OCT 2x32w	36	189873	37975	47468	104430
OCT 1x32w	71	189873	37975	47468	104430
DIF 2x32W	63	333333	66667	83333	183333
DIF 2x16W	140	333333	66667	83333	183333

#### Quantidade de luminárias por zona

	Z1	Z2	Z3
BNI 2x16w	18	21	48
BNI 2x32w	9	11	24
BNI 4x16w	8	11	23
BNI 4x32w	4	5	11
DBL 2x16w	18	23	50
DBL 2x32w	9	11	24
DBL 4x16w	9	11	24
DBL 4x32w	4	5	11
OCT 2x16w	16	20	44
OCT 2x32w	7	9	20
OCT 1x32w	14	18	39
DIF 2x32W	13	16	35
DIF 2x16W	28	35	77

**Modelo M02**

Área total(m <sup>2</sup> )	A zona 1 (m <sup>2</sup> )	A zona 1.1 (m <sup>2</sup> )	A zona 2 (m <sup>2</sup> )	A zona 2.1 (m <sup>2</sup> )	A zona 3 (m <sup>2</sup> )		
252	36	27	36	63	90		
% Área	14	11	14	25	36	100	
Fluxo luminoso (lm)							
	Qtidade	Fluxo luminoso (lm)	Z1	Z1.1	Z2	Z2.1	Z3
<b>BNI 2x16w</b>	90	216000	30857	23143	30857	54000	77143
<b>BNI 2x32w</b>	44	225672	32239	24179	32239	56418	80597
<b>BNI 4x16w</b>	44	207123	29589	22192	29589	51781	73973
<b>BNI 4x32w</b>	20	216000	30857	23143	30857	54000	77143
<b>DBL 2x16w</b>	90	216000	30857	23143	30857	54000	77143
<b>DBL 2x32w</b>	45	240000	34286	25714	34286	60000	85714
<b>DBL 4x16w</b>	44	207123	29589	22192	29589	51781	73973
<b>DBL 4x32w</b>	20	210000	30000	22500	30000	52500	75000
<b>OCT 2x16w</b>	81	193846	27692	20769	27692	48462	69231
<b>OCT 2x32w</b>	36	191392	27342	20506	27342	47848	68354
<b>OCT 1x32w</b>	70	191392	27342	20506	27342	47848	68354
<b>DIF 2x32W</b>	63	336000	48000	36000	48000	84000	120000
<b>DIF 2x16W</b>	140	336000	48000	36000	48000	84000	120000
Qtidade de luminárias							
			Z1	Z1.1	Z2	Z2.1	Z3
<b>BNI 2x16w</b>			13	10	13	23	32
<b>BNI 2x32w</b>			6	5	6	11	16
<b>BNI 4x16w</b>			6	5	6	11	16
<b>BNI 4x32w</b>			3	2	3	5	7
<b>DBL 2x16w</b>			13	10	13	23	32
<b>DBL 2x32w</b>			6	5	6	11	16
<b>DBL 4x16w</b>			6	5	6	11	16
<b>DBL 4x32w</b>			3	2	3	5	7
<b>OCT 2x16w</b>			12	9	12	20	29
<b>OCT 2x32w</b>			5	4	5	9	13
<b>OCT 1x32w</b>			10	8	10	18	25
<b>DIF 2x32W</b>			9	7	9	16	23
<b>DIF 2x16W</b>			20	15	20	35	50

## APÊNDICE F- Potência instalada e quantidade de luminárias por zona

### Modelo M01

		Potência instalada por zona ativa (kW)			TOTAL
		Z1	Z2	Z3	
BNI	<b>2x16w</b>	0.51	0.77	1.54	
	<i>Qtidade luminárias</i>	16	24	48	88
	<b>2x32w</b>	0.51	0.77	1.54	
	<i>Qtidade luminárias</i>	8	12	24	44
	<b>4x16w</b>	0.38	0.77	1.54	
	<i>Qtidade luminárias</i>	6	12	24	42
	<b>4x32w</b>	0.51	0.51	1.54	
	<i>Qtidade luminárias</i>	4	4	12	20
DBL	<b>2x16w</b>	0.384	0.768	1.6	
	<i>Qtidade luminárias</i>	12	24	50	86
	<b>2x32w</b>	0.51	0.77	1.54	
	<i>Qtidade luminárias</i>	8	12	24	44
	<b>4x16w</b>	0.51	0.77	1.54	
	<i>Qtidade luminárias</i>	8	12	24	44
	<b>4x32w</b>	0.51	1.02	1.54	
	<i>Qtidade luminárias</i>	4	8	12	24
OCT	<b>2x16w</b>	0.51	0.77	1.28	
	<i>Qtidade luminárias</i>	16	24	40	80
	<b>2x32w</b>	0.51	0.51	1.54	
	<i>Qtidade luminárias</i>	8	8	24	40
	<b>1x32w</b>	0.45	0.45	1.34	
	<i>Qtidade luminárias</i>	14	14	42	70
DIF	<b>2x16w</b>	0.64	1.28	2.56	
	<i>Qtidade luminárias</i>	20	40	80	140
	<b>2x32w</b>	0.90	0.90	2.24	
	<i>Qtidade luminárias</i>	14	14	35	63

### Modelo M02

		Potência instalada por zona ativa (kW)					
		Z1	Z1.1	Z2	Z2.2	Z3	TOTAL
BNI	<b>2x16w</b>	0.32	0.32	0.48	0.77	0.96	
	<i>Qtdade luminárias</i>	10	10	15	24	30	89
	<b>2x32w</b>	0.26	0.26	0.51	0.77	1.02	
	<i>Qtdade luminárias</i>	4	4	8	12	16	44
	<b>4x16w</b>	0.26	0.26	0.51	0.77	1.02	
	<i>Qtdade luminárias</i>	4	4	8	12	16	44
	<b>4x32w</b>	0.26	0.26	0.51	0.768	1.02	
	<i>Qtdade luminárias</i>	2	2	4	6	8	22
DBL	<b>2x16w</b>	0.32	0.32	0.48	0.8	1.12	
	<i>Qtdade luminárias</i>	10	10	15	25	35	95
	<b>2x32w</b>	0.38	0.19	0.38	0.768	1.15	
	<i>Qtdade luminárias</i>	6	3	6	12	18	45
	<b>4x16w</b>	0.256	0.256	0.512	0.768	1.024	
	<i>Qtdade luminárias</i>	4.00	4.00	8.00	12	16.00	44
	<b>4x32w</b>	0.26	0.26	0.51	0.768	1.02	
	<i>Qtdade luminárias</i>	2	2	4	6	8	22
OCT	<b>2x16w</b>	0.38	0.26	0.38	0.672	0.96	
	<i>Qtdade luminárias</i>	12	8	12	21	30	83
	<b>2x32w</b>	0.38	0.26	0.38	0.576	0.77	
	<i>Qtdade luminárias</i>	6	4	6	9	12	37
	<b>1x32w</b>	0.32	0.26	0.32	0.576	0.80	
	<i>Qtdade luminárias</i>	10	8	10	18	25	71
DIF	<b>2x16w</b>	0.64	0.48	0.64	1.12	1.60	
	<i>Qtdade luminárias</i>	20	15	20	35	50	140
	<b>2x32w</b>	0.64	0.51	0.64	0.768	1.60	
	<i>Qtdade luminárias</i>	10	8	10	12	25	65