

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS DE  
SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL POR  
MEIO DE MAPEAMENTO DIGITAL DE  
LUMINÂNCIAS DA ABÓBADA CELESTE E  
ENTORNO

TESE

Roberto Carlos Pereira

Florianópolis / 2009

AVALIAÇÃO DE FERRAMENTAS DE  
SIMULAÇÃO DE ILUMINAÇÃO NATURAL POR  
MEIO DE MAPEAMENTO DIGITAL DE  
LUMINÂNCIAS DA ABÓBADA CELESTE E  
ENTORNO

Tese  
Universidade Federal de Santa Catarina  
Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Área de concentração: Construção Civil

Orientador:  
Fernando O. R. Pereira (UFSC-ARQ)  
Co-orientador:  
Anderson Claro (UFSC-ARQ)

Florianópolis / 2009

## *Dedicatória*

A Deus, pai e companheiro.  
A minha esposa e filhos.  
A minha mãe, meu pai e meus irmãos.

## *Agradecimentos*

Este trabalho não seria possível sem a ajuda das pessoas e instituições abaixo relacionadas:

Aos professores do Colégio Técnico Industrial da Fundação Universidade do Rio Grande que viabilizaram o meu afastamento para o desenvolvimento do curso de Pós-Graduação, especialmente os professores Marcos, Bulla, Osvaldo e José Eli.

Ao professor Fernando Oscar Ruttkay Pereira pela orientação, apoio e estímulo sempre que solicitado.

Ao professor Anderson Claro pela ajuda e incentivo ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos amigos do Laboratório de Conforto Ambiental, especialmente, Raphaela, Marcus, Carolina, Veridiana, Evelise, Gianni, Juka, Beth e Carlos, pela constante companhia e sincera amizade.

Aos professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade de Santa Catarina.

A Fundação Universidade do Rio Grande pela liberação e apoio financeiro fornecido durante o curso.

A CAPES pela bolsa de estudos fornecida durante o período de março de 2005 a fevereiro de 2009;

Aos membros da banca examinadora.

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

P436m Pereira, Roberto C

Avaliação de ferramentas de simulação de iluminação natural através de mapeamento digital de luminâncias por meio de mapeamento digital de luminâncias da abóbada celeste e entorno. / Roberto Carlos Pereira. – Florianópolis: UFSC, 2009. 184p.

Orientador: Fernando Oscar Ruttkay Pereira

Co-orientador: Anderson Claro

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina.

1. Engenharia Civil. II. Título.

# LISTA DE FIGURAS

## Capítulo 1

<b>Figura 1.1</b>	Representação esquemática do procedimento metodológico da pesquisa.....	<b>08</b>
-------------------	---	-----------

## Capítulo 2

<b>Figura 2.1</b>	Propagação da iluminação natural.....	<b>12</b>
<b>Figura 2.2</b>	a) Distribuições de luminâncias para um céu limpo. b) Registro fotográfico de um céu limpo.....	<b>14</b>
<b>Figura 2.3</b>	Desenho ilustrativo dos parâmetros utilizados para a definição da posição do Sol e dos elementos do céu.....	<b>15</b>
<b>Figura 2.4</b>	a) Distribuições de luminâncias para um céu encoberto. b) Registro fotográfico de um céu encoberto.....	<b>16</b>
<b>Figura 2.5</b>	Desenho esquemático da distribuição de luminâncias para uma porção de área de céu.....	<b>19</b>
<b>Figura 2.6</b>	Representação do ângulo sólido.....	<b>19</b>
<b>Figura 2.7</b>	a) Componente Celeste (CC). b) Componente Refletida Externa (CRE). c) Componente Refletida Interna (CRI).....	<b>20</b>
<b>Figura 2.8</b>	Mapa de localização das estações de medição de iluminação natural e radiação solar da IDMP.....	<b>22</b>
<b>Figura 2.9</b>	a) Ilustração do aparato de medição utilizado para caracterizar a distribuição de luminâncias da abóbada celeste. b) Varredura da abóbada celeste em 145 partes.....	<b>23</b>
<b>Figura 2.10</b>	Ilustração do ambiente real de estudos com as seis posições de análise.....	<b>24</b>
<b>Figura 2.11</b>	Comportamento do erro relativo em relação ao posicionamento dos sensores.....	<b>25</b>

<b>Figura 2.12</b>	a) Identificação do ambiente real para avaliação da iluminação natural. b) Posição do ambiente real considerada para a simulação.....	<b>26</b>
<b>Figura 2.13</b>	Exemplo de câmera fotográfica digital IQCam da Lumetrix.....	<b>31</b>
<b>Figura 2.14</b>	Céu artificial tipo caixa de espelhos.....	<b>38</b>
<b>Figura 2.15</b>	Cenário de utilização das ferramentas de simulação de iluminação natural.....	<b>39</b>

## Capítulo 3

<b>Figura 3.1</b>	Representação esquemática da proposta metodológica em céu artificial.....	<b>49</b>
<b>Figura 3.2</b>	Representação esquemática da proposta metodológica para um ambiente de exposição real.....	<b>51</b>
<b>Figura 3.3</b>	Localização do prédio da Arquitetura no <i>campus</i> da UFSC.....	<b>52</b>
<b>Figura 3.4</b>	Localização do ambiente de estudos e o arranjo de suas janelas...	<b>52</b>
<b>Figura 3.5</b>	Vista panorâmica da abertura do ambiente real de estudos.....	<b>52</b>
<b>Figura 3.6</b>	Base de medição de iluminação natural, cobertura do prédio.....	<b>53</b>
<b>Figura 3.7</b>	a) <i>Layout</i> do ambiente de estudos. b) Disposição dos sensores fotoelétricos.....	<b>54</b>
<b>Figura 3.8</b>	a) Construção inicial. b) Detalhes construtivos da maquete (teto). c) Foto comparativa do ambiente real.....	<b>54</b>
<b>Figura 3.9</b>	a) Detalhe do posicionamento dos sensores no interior da maquete. b) Posicionamento da maquete para a medição fotométrica no céu artificial. c) Posicionamento da maquete para a medição fotométrica no céu + entorno.....	<b>55</b>
<b>Figura 3.10</b>	a) Modelo importado do CAD para o simulador computacional. b) Modelo computacional fracionado.....	<b>57</b>

<b>Figura 3.11</b>	Propriedades reflexivas dos materiais do modelo virtual.....	<b>57</b>
<b>Figura 3.12</b>	Câmera Digital IQC 300.....	<b>58</b>
<b>Figura 3.13</b>	Parâmetros de ajustes da IQCam.....	<b>59</b>
<b>Figura 3.14</b>	Parâmetros para ajuste e controle da imagem fotometrada pela IQCam.....	<b>59</b>
<b>Figura 3.15</b>	Resumo dos parâmetros de ajuste da imagem.....	<b>60</b>
<b>Figura 3.16</b>	a) Comando para recortar a imagem através de diferentes aberturas focais. b) Figura esquemática para representar as aberturas focais no recorte das imagens fotometradas.....	<b>60</b>
<b>Figura 3.17</b>	Disposição da IQC no céu artificial.....	<b>61</b>
<b>Figura 3.18</b>	a) IQC no céu artificial. b) <i>Layout</i> do ambiente.....	<b>62</b>
<b>Figura 3.19</b>	Imagem fotometrada pela IQC, caracterizando o mapa de luminâncias do céu artificial.....	<b>62</b>
<b>Figura 3.20</b>	Mapa em 3D de luminâncias do céu artificial.....	<b>63</b>
<b>Figura 3.21</b>	Representação esquemática do mapeamento da fonte de luz natural.....	<b>64</b>
<b>Figura 3.22</b>	Mapa de luminâncias de um céu real (13 mar. 2008,14h).....	<b>64</b>
<b>Figura 3.23</b>	Mapa de luminâncias de ½ céu+entorno (13 mar. 2008,14h).....	<b>65</b>
<b>Figura 3.24</b>	Ajustes da projeção e orientação da imagem fotometrada pela câmera IQC.....	<b>66</b>
<b>Figura 3.25</b>	Distribuição da luminância em um céu real (13 mar. 2008,14h). a) Abóbada celeste – plano de referência horizontal. b) Entorno – plano de referência vertical. c) Combinação em 3D dos dois planos.....	<b>67</b>
<b>Figura 3.26</b>	Fotocélula LICOR LI 210 SA.....	<b>68</b>
<b>Figura 3.27</b>	Luminancímetro LS-110.....	<b>68</b>



<b>Figura 3.28</b>	Data-Logger DL2e.....	<b>69</b>
<b>Figura 3.29</b>	Programa Ls2Win do Dataloger DI2e (fonte: Delta T).....	<b>69</b>

## Capítulo 4

<b>Figura 4.1</b>	Mapa de luminâncias fotometradas pela IQC em um céu artificial tipo caixa de espelhos.....	<b>75</b>
<b>Figura 4.2</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Posição de análise das iluminâncias. Fonte: Apolux.</li> <li>b) Ilustração do modelo de referência.....</li> </ul>	<b>76</b>
<b>Figura 4.3</b>	Configuração de tipo de céu encoberto. Fonte: Apolux.....	<b>76</b>
<b>Figura 4.4</b>	Distribuição de luminâncias em um céu artificial. Fonte: Apolux.....	<b>77</b>
<b>Figura 4.5</b>	Gráfico comparativo das iluminâncias no interior dos modelos.....	<b>78</b>
<b>Figura 4.6</b>	Erro relativo (%) entre os modelos em relação à iluminância da maquete.....	<b>80</b>
<b>Figura 4.7</b>	Representação esquemática para avaliar os planos de referência..	<b>82</b>
<b>Figura 4.8</b>	Modelo teórico para avaliação da contribuição luminosa do entorno.....	<b>83</b>
<b>Figura 4.9</b>	Imagem adquirida de um meio céu real e entorno em 28 nov. 2007, 09h40min.....	<b>87</b>
<b>Figura 4.10</b>	Imagem de um meio céu real + entorno em 13 mar. 2008, 14h.....	<b>87</b>
<b>Figura 4.11</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 2 fev. 2007, 10h</li> <li>b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 26 nov. 2007, 8h40min.....</li> </ul>	<b>88</b>
<b>Figura 4.12</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Imagem adquirida de um meio céu real e entorno em 28 nov. 2007, 09h40min.</li> <li>b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 1 dez. 2007, 17h15min.....</li> </ul>	<b>89</b>
<b>Figura 4.13</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 2 dez. 2007, 18h.</li> <li>b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 4 dez.</li> </ul>	

	2007, 14h00min.....	<b>89</b>
<b>Figura 4.14</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 13 mar. 2008, 14h.	
	b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 1 abr. 2008, 16h35min.....	<b>90</b>
<b>Figura 4.15</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 3 abr. 2008, 8h30min.	
	b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 3 abr. 2008, 9h.....	<b>90</b>
<b>Figura 4.16</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 3 abr. 2008, 9h30min.	
	b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 12h.....	<b>91</b>
<b>Figura 4.17</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 12h25min.	
	b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 12h40min.....	<b>91</b>
<b>Figura 4.18</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h.	
	b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h15min.....	<b>92</b>
<b>Figura 4.19</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h30min.	
	b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h40min.....	<b>92</b>
<b>Figura 4.20</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h50min.	
	b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h.....	<b>93</b>
<b>Figura 4.21</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h10min.	
	b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h20min.....	<b>93</b>

<b>Figura 4.22</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h30min.	
	b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h40min.....	<b>94</b>
<b>Figura 4.23</b>	a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 15h.	
	b) Imagem do apolux após a inserção do mapeamento digital de 12 abr. 2008, 15h.....	<b>94</b>
<b>Figura 4.24</b>	Comparação da iluminância: ambiente real x simulações na posição “parede esquerda”.....	<b>100</b>
<b>Figura 4.25</b>	Comparação da iluminância: ambiente real x simulações na posição “parede direita”.....	<b>100</b>
<b>Figura 4.26</b>	Comparação da iluminância: ambiente real x simulações na posição “janela”.....	<b>101</b>
<b>Figura 4.27</b>	Comparação da iluminância: ambiente real x simulações na posição “centro”.....	<b>101</b>
<b>Figura 4.28</b>	Comparação da iluminância - ambiente real x simulações na posição “porta”.....	<b>102</b>
<b>Figura 4.29</b>	Comportamento dos erros relativos na simulação computacional desenvolvida com o uso de maquete.....	<b>103</b>
<b>Figura 4.30</b>	Comportamento luminoso no ambiente real.....	<b>104</b>
<b>Figura 4.31</b>	Comportamento das discrepâncias entre o modelo físico e o ambiente real.....	<b>104</b>
<b>Figura 4.32</b>	Comportamento das discrepâncias entre a simulação computacional e o ambiente real.....	<b>105</b>
<b>Figura 4.33</b>	Freqüência de ocorrência dos erros relativos – ambiente real x modelo físico em escala reduzida.....	<b>103</b>
<b>Figura 4.34</b>	Freqüência de ocorrência dos erros relativos – ambiente real x Apolux.....	<b>106</b>
<b>Figura 4.35</b>	Comportamento dos erros relativos na simulação computacional desenvolvida pelo Apolux.....	<b>107</b>

# Apêndice A

<b>Figura A.1</b>	Calibrador 1800-02.....	<b>134</b>
<b>Figura A.2</b>	a) Composição de uma esfera integradora. b) Detalhe da esfera integradora c) Esfera Integradora do INEP.....	<b>135</b>
<b>Figura A.3</b>	A IQCam adaptada ao detector de fluxo da esfera integradora.....	<b>136</b>
<b>Figura A.4</b>	Posicionamento das coordenadas no plano vertical com aberturas focais em 180, 160, 150 e 90 graus.....	<b>138</b>
<b>Figura A.5</b>	Imagem digitalizada do ambiente real de estudos.....	<b>139</b>
<b>Figura A.6</b>	Representação da abertura focal e a projeção da imagem.....	<b>139</b>
<b>Figura A.7</b>	Imagem ampliada da parede norte e sul do céu artificial, identificando os pontos de referência.....	<b>140</b>
<b>Figura A.8</b>	Imagem fotométrica da parede da sala de estudos, contendo quatro pontos de referência.....	<b>142</b>
<b>Figura A.9</b>	Imagem fotométrica para avaliação dos valores de luminâncias – ponto no telhado.....	<b>143</b>
<b>Figura A.10</b>	Imagem fotométrica para avaliação dos valores de luminâncias – ponto no telhado.....	<b>143</b>
<b>Figura A.11</b>	Ilustração esquemática da correção dos valores de luminâncias medidas pela IQC.....	<b>144</b>
<b>Figura A.12</b>	Correção desenvolvida pelo APOLUX dos níveis de iluminâncias medidos pela IQC.....	<b>144</b>

# LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 2.1</b>	Panorama dos modelos de céu para caracterizar a distribuição de luminâncias.....	<b>17</b>
<b>Tabela 4.1</b>	Análise de iluminâncias para determinar os índices de reflexão usados na pesquisa.....	<b>74</b>
<b>Tabela 4.2</b>	Comparação entre os valores de iluminâncias.....	<b>78</b>
<b>Tabela 4.3</b>	Contribuição do entorno obtida através da simulação computacional.....	<b>84</b>
<b>Tabela 4.4</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e, em 12 abr. 2008, 15h00min.....	<b>86</b>
<b>Tabela 4.5</b>	Apresentação dos resultados de iluminâncias e do erro relativo.....	<b>95</b>
<b>Tabela 4.6</b>	Resultados dos procedimentos de validação dos programas Radiance e Apolux.....	<b>109</b>
<b>Tabela A1</b>	Avaliação da calibração do luminancímetro e da IQCam.....	<b>137</b>
<b>Tabela A2</b>	Resultados do procedimento experimental para avaliar o desempenho da IQC no céu artificial (medidas em $\text{cd}/\text{m}^2$ ).....	<b>141</b>
<b>Tabela A3</b>	Resultados do procedimento experimental para avaliar o desempenho da IQC na sala de estudo.....	<b>142</b>
<b>Tabela A4</b>	Resultados do procedimento experimental para avaliar a refletância das superfícies (%).....	<b>145</b>
<b>Tabela C1</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 de abr.2008, 14h40min.....	<b>150</b>
<b>Tabela C2</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 14h30min.....	<b>150</b>
<b>Tabela C3</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 14h20min.....	<b>151</b>
<b>Tabela C4</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema	<b>151</b>

	de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 14h10min.....	
<b>Tabela C5</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 14h00min.....	<b>152</b>
<b>Tabela C6</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 13h50min.....	<b>152</b>
<b>Tabela C7</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 13h40min.....	<b>153</b>
<b>Tabela C8</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 13h30min.....	<b>153</b>
<b>Tabela C9</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 13h15min.....	<b>154</b>
<b>Tabela C10</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 13h00min.....	<b>154</b>
<b>Tabela C11</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 2 abr. 2008, 12h40min.....	<b>155</b>
<b>Tabela C12</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 12h25min.....	<b>155</b>
<b>Tabela C13</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 12h00min. ....	<b>156</b>
<b>Tabela C14</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 3 abr. 2008, 09h30min. ....	<b>156</b>
<b>Tabela C15</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 3 abr. 2008, 09h00min. ....	<b>157</b>
<b>Tabela C16</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 3 abr. 2008, 08h30min. ....	<b>157</b>
<b>Tabela C17</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 1 abr. 2008, 16h35min. ....	<b>158</b>
<b>Tabela C18</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 13 mar. 2008, 14h00min. ....	<b>158</b>
<b>Tabela C19</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 4 dez. 2007, 14h00min. ....	<b>159</b>

<b>Tabela C20</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 2 dez. 2007, 18h00min. ....	<b>159</b>
<b>Tabela C21</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 1 dez. 2007, 17h15min. ....	<b>160</b>
<b>Tabela C22</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 28 nov. 2007, 09h40min. ....	<b>160</b>
<b>Tabela C23</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 26 nov. 2007, 08h40min. ....	<b>161</b>
<b>Tabela C24</b>	Tabela dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e em 2 fev. 2007, 10h00min. ....	<b>161</b>

# LISTA DE ABREVIATURAS

<b>BEN</b>	Balanço Energético Nacional
<b>BRE</b>	Building Research Establishment
<b>CC</b>	Componente Celeste
<b>CCD</b>	Sensor Charge-Coupled Device
<b>Centro</b>	Posição do sensor no centro dos modelos
<b>CRE</b>	Componente Refletida Externa
<b>CRI</b>	Componente Refletida Interna
<b>DL2e</b>	<i>Data-logger</i>
<b>E_AR</b>	Iluminâncias medidas no ambiente real
<b>E_CIE</b>	Iluminâncias simuladas por meio do céu encoberto padrão CIE
<b>E_IQC</b>	Iluminâncias simuladas por meio da luminância medida pela IQC
<b>E_M</b>	Iluminâncias medidas experimentalmente no modelo físico
<b>HDR</b>	High Dynamic Range
<b>IDMP</b>	International Daylight Measurement Programme
<b>IDMY</b>	<i>International Daylight Measurement Year</i>
<b>IQC</b>	Câmera digital IQCam Imaging Photometer – 300
<b>Janela</b>	Posição do sensor próximo da janela dos modelos
<b>LICOR</b>	Marca registrada de sensores fotométricos
<b>Ls2Win</b>	Programa computacional
<b>PD</b>	Posição do sensor na parede direita dos modelos
<b>PE</b>	Posição do sensor na parede esquerda dos modelos
<b>Porta</b>	Posição do sensor próximo da porta dos modelos



## RESUMO

Entre os métodos de maior potencial para a análise do fenômeno da iluminação natural no ambiente construído, encontram-se a simulação computacional e a medição em modelos em escala reduzida expostos a ambientes de teste (céu artificial e real). Atualmente existem dezenas de programas disponíveis no mercado, alguns disponibilizados gratuitamente, e diferentes propostas de céus artificiais. A complexidade do fenômeno físico associado à emissão e propagação da energia luminosa, somados à dificuldade inerente à caracterização fotométrica da fonte de luz natural, impõem limitações de operação tanto aos algoritmos matemáticos mais sofisticados, quanto aos procedimentos experimentais empregados nos ambientes de teste. O objetivo deste trabalho é desenvolver uma metodologia para avaliar o desempenho das ferramentas de simulação de iluminação natural. O desafio está em proporcionar condições para a caracterização precisa da fonte de luz natural, seja no ambiente virtual, seja no ambiente real. O emprego de mapeamento digital da distribuição de luminâncias do ambiente de exposição, utilizando uma câmera especializada, possibilitou gerar dados de entrada para simulação teórica, assim como, criar contexto para a comparação do comportamento da luz entre o modelo experimental e o teórico e possibilitar a verificação das discrepâncias e validação dos procedimentos de simulação. A metodologia empregada permitiu verificar a distribuição da iluminação natural no interior da sala de estudo, bem como, possibilitou avaliar o desempenho das ferramentas utilizadas ao longo do processo e validar uma ferramenta de simulação. O processo metodológico caracterizou adequadamente as condições de exposição à luz natural e o comportamento da iluminação no interior de um ambiente, mostrando grande potencial para o processo de avaliação/validação de ferramentas de simulação de iluminação natural.

**Palavras-chaves:** ferramentas de simulação da iluminação natural, mapeamento digital de luminâncias, método de avaliação/validação.

## ABSTRACT

Among the methods with major potential for daylighting performance analysis in the built environment there are computer simulation and experimental procedures with physical scale models exposed to controlled test environments (real and artificial skies). Currently, there are dozens of computer codes commercially available, some of them are free, and different arrangements of artificial skies. The complexity of the physical phenomena associated to the emission and propagation of light, plus the inherent difficulty to characterize the daylight sources photometry imposes operational limitations to the more sophisticated mathematical algorithms, as well as to experimental procedures used in test environments. The objective is to develop a methodology for evaluating the performance of daylighting simulation tools. The main challenge is to provide conditions for the precise characterization of the daylight source, either in the virtual environment or in the real one. A luminance distribution digital mapping, using a specialized camera, was proposed in order to generate reliable data for theoretical simulation, allowed the daylight behavior comparisons between experimental and theoretical results, error analysis, and simulation procedures validation. The methodology allowed, through the luminance digital mapping, to evaluate the performance of daylight simulation tools. The developed method allowed to adequately characterize daylight availability conditions and its behavior inside a room, showing the potential of the evaluation/validation process for daylighting simulation tools.

**Keywords:** daylight simulation tools, luminance digital mapping, evaluation/validation method.

# SUMÁRIO

Listas de figuras -----	<i>iv</i>
Listas de tabelas -----	<i>xi</i>
Listas de abreviaturas-----	<i>xiv</i>
Resumo -----	<i>xv</i>
Abstract -----	<i>xvi</i>
<b>1 Introdução -----</b>	<b>01</b>
1.1 Justificativas e questionamentos-----	<b>02</b>
1.2 Objetivos -----	<b>07</b>
1.2.1 Objetivo geral-----	<b>07</b>
1.2.2 Objetivos específicos-----	<b>07</b>
1.3 Procedimento metodológico da pesquisa-----	<b>08</b>
1.4 Estrutura da tese -----	<b>09</b>
<b>2. A avaliação das ferramentas de simulação da iluminação natural – Estado da arte-----</b>	<b>10</b>
2.1 O estudo da distribuição da iluminação natural -----	<b>11</b>
2.1.1 Determinação da iluminação natural a partir da distribuição de luminâncias da abóbada celeste-----	<b>12</b>
2.1.1.1 Características da distribuição de luminâncias para céu claro-----	<b>13</b>
2.1.1.2 Características da distribuição de luminâncias para céu encoberto-----	<b>15</b>
2.1.2 Níveis de iluminação em superfícies expostas à abóbada celeste -----	<b>18</b>
2.2 Determinação do comportamento da iluminação natural a partir de medições em tempo real-----	<b>21</b>
2.3 Avaliação dos procedimentos de validação de programas de simulação de iluminação natural -----	<b>25</b>
2.4 Mapeamento digital para avaliação da Iluminação natural -----	<b>30</b>
2.4.1 Fotometria digital -----	<b>30</b>
2.4.2 Imagens de alta faixa dinâmica -----	<b>32</b>
2.5 Ferramentas de simulação de iluminação natural -----	<b>33</b>
2.5.1 Ferramentas de simulação de iluminação natural simplificadas----	<b>34</b>
2.5.2 Ferramentas de simulação computadorizadas-----	<b>34</b>
2.5.3 Modelos físicos em escala reduzida submetidos em ambientes de exposição real e teórico -----	<b>35</b>
2.5.4 O céu artificial retangular do tipo caixa de espelhos -----	<b>37</b>
2.6 Considerações a respeito da utilização de ferramentas de simulação	

de iluminação natural -----	38
<b>2.7</b> Validação das ferramentas de simulação de iluminação natural -----	<b>40</b>
<b>2.8</b> Parâmetros descritivos para análise dos sistemas de medição-----	<b>44</b>
<b>2.9</b> Conclusão-----	<b>45</b>
<b>3. Método de trabalho proposto -----</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b> Introdução -----	<b>48</b>
<b>3.2</b> Proposta para um céu artificial de tipo caixa de espelhos -----	<b>48</b>
<b>3.3</b> Proposta para um ambiente de exposição real-----	<b>50</b>
<b>3.4</b> Características dos modelos-----	<b>51</b>
<b>3.4.1</b> Ambiente real -----	<b>51</b>
<b>3.4.2</b> Modelo físico em escala reduzida-----	<b>54</b>
<b>3.4.3</b> Modelo digital-----	<b>56</b>
<b>3.5</b> O mapeamento digital de luminâncias -----	<b>57</b>
<b>3.5.1</b> Mapeamento digital no céu artificial de tipo caixa de espelhos-----	<b>61</b>
<b>3.5.2</b> Mapeamento digital da fonte de luz natural -----	<b>63</b>
<b>3.6</b> O programa submetido ao processo de avaliação e a simulação computacional-----	<b>65</b>
<b>3.7</b> Características da instrumentação utilizada no procedimento metodológico -----	<b>67</b>
<b>3.7.1</b> Sensores fotométricos-----	<b>67</b>
<b>3.7.2</b> Luminancímetro-----	<b>68</b>
<b>3.7.3</b> Sistema de aquisição de dados -----	<b>69</b>
<b>3.8</b> Considerações finais -----	<b>70</b>
<b>4. Avaliação dos Resultados - o desempenho de ferramentas de simulação da iluminação natural-----</b>	<b>72</b>
<b>4.1</b> Determinação das reflexões superficiais dos modelos-----	<b>73</b>
<b>4.2</b> Procedimento metodológico aplicado no céu artificial tipo caixa de espelhos - apresentação e análise dos dados-----	<b>75</b>
<b>4.3</b> Caracterização da contribuição efetiva do entorno-----	<b>81</b>
<b>4.4</b> Procedimento metodológico aplicado no ambiente de exposição real----	<b>85</b>
<b>4.4.1</b> Apresentação dos dados – mapeamento digital de luminâncias ---	<b>85</b>
<b>4.4.2</b> Apresentação dos dados – iluminâncias internas -----	<b>95</b>
<b>4.4.3</b> Análise dos resultados-----	<b>99</b>
<b>4.4.4</b> Validação da ferramenta de simulação computacional-----	<b>108</b>
<b>4.5</b> Considerações finais-----	<b>110</b>
<b>5. Conclusões -----</b>	<b>113</b>
<b>5.1</b> Introdução -----	<b>113</b>
<b>5.2</b> O mapeamento digital de luminâncias -----	<b>113</b>

5.3 Estudos realizados com as luminâncias medidas no céu artificial-----	114
5.4 A contribuição do entorno nas aberturas laterais-----	115
5.5 Estudos realizados com as luminâncias medidas no céu real -----	116
5.5.1 O desempenho do modelo físico em escala reduzida-----	116
5.5.2 O desempenho da ferramenta computacional – validação do Apolux-----	117
5.6 Limitações da pesquisa-----	118
5.7 Considerações finais -----	119
5.8 Sugestões e encaminhamentos para trabalhos futuros-----	119
<b>Referências Bibliográficas-----</b>	<b>121</b>
<b>Apêndice A – Calibração e verificação dos equipamentos de medição -----</b>	<b>134</b>
A1 Calibração e verificação dos equipamentos de medição -----	134
A.1.1 Calibração dos sensores LICOR -----	134
A.1.2 Verificação das medidas de luminâncias utilizando uma esfera integradora -----	135
A2 Verificação do mapeamento digital obtido pelas imagens da Câmera IQC-----	138
A.2.1 Avaliação do sistema de projeção-----	138
A.2.2 Procedimento experimental de monitoramento de luminâncias medidas pela IQC em diferentes ambientes de exposição -----	140
A3 Verificação das refletâncias dos materiais utilizados na pesquisa -----	144
<b>Apêndice B – Cálculo do erro global-----</b>	<b>146</b>
<b>Apêndice C – Tabelas de resultados-----</b>	<b>150</b>
<b>Apêndice D – Disco compacto contendo a base de dados----</b>	<b>162</b>

## **1. Introdução**

Este capítulo de introdução, em primeiro lugar, contextualiza o problema que motivou o trabalho de pesquisa, justificando sua relevância, bem como as correntes de pensamento e os possíveis caminhos para sua solução, além dos objetivos considerados (geral e específicos) e do procedimento metodológico da pesquisa e, finalmente, a estrutura geral do trabalho.

### **1.1. Justificativa e questionamentos**

Desde o final do século XX, a Organização das Nações Unidas (ONU) tem intensificado a orientação para os países voltarem suas ações à redução do aquecimento global e à preservação ambiental. Nações desenvolvidas, como Estados Unidos, Japão, Alemanha, Canadá, entre outras, por terem suas reservas dependentes de combustíveis fósseis, estão entre as que mais investem no desenvolvimento de tecnologias ambientalmente responsáveis. A proposta baseia-se na substituição de sistemas ineficientes e poluidores do meio ambiente, por sistemas que utilizam fontes naturais renováveis, como a energia solar, energia eólica e a iluminação natural. É consensual que novas tecnologias de geração de energia podem reduzir os riscos de colapsos energéticos, como, por exemplo, o episódio denominado “apagão” que ocorreu no Brasil em 2001, e nos Estados Unidos em 2003 (JANNUZZI, 2005).

No Brasil, o consumo de energia elétrica nas edificações, compreendendo os setores residencial, comercial e público, é de aproximadamente 47% do total, conforme mostrado pelo Balanço Energético Nacional (BEN) de 2007, sendo que 70% da energia consumida nesses três setores é para os sistemas de iluminação artificial e ar condicionado. Desta forma, a iluminação natural destaca-se como uma das estratégias de grande potencial para a economia de energia.

Conforme relatam Howlett, Heschong e Mchugh (2007), desde a última década, houve um significativo aumento de projetos que viabilizaram os recursos alternativos de energia, incluindo a adequação da iluminação natural em substituição à artificial e o seu aproveitamento como condição de conforto visual para os usuários. Nos últimos cinco anos, os projetos de aproveitamento da luz natural tornaram-se um valioso meio para

valorizar o espaço, principalmente em áreas normalmente iluminadas artificialmente, tais como hotéis, *shoppings*, museus, entre outros.

Em relação à qualidade da iluminação e ao consumo de energia elétrica, deve-se considerar que o aproveitamento da luz natural disponível está relacionado com o comportamento luminoso da abóbada celeste e do entorno da edificação. Ambos são fontes de luz essenciais para a avaliação final do projeto de interiores (SPASOJEVIAC; MAHDAVI, 2005).

A descrição do fenômeno da luz natural é complexa, pois ela muda com a hora do dia, com as estações do ano, com as nuvens e com o microclima. Ao avaliá-la, é preciso considerar a localização geográfica, pois ela se altera relativamente à latitude e à orientação. Com relação ao entorno, outros elementos acentuam seu comportamento, como área construída, tamanho e altura das edificações vizinhas, orientação das fachadas, bem como o controle solar e as características de transmissividade dos materiais. Para amenizar o problema, as ferramentas de simulação acabam tornando-se indispensáveis para a representação do comportamento do fenômeno; todavia, o seu grau de confiabilidade é discutível.

Segundo Larson (1998), Geebelen e Neuckermans (2003), e Maamari et al. (2003), a simulação da iluminação natural é realizada através de dois métodos básicos. O primeiro, e mais antigo, consiste na avaliação experimental de modelos físicos em escala reduzida. Representa o comportamento luminoso do ambiente real através de sua geometria, das propriedades reflexivas e transmissivas das superfícies. O segundo é caracterizado pela simulação computacional. Esse método utiliza modelos matemáticos e interpolações, empregando a computação gráfica para a sua resolução, e, portanto, estima a fonte sob condições médias de disponibilidade de luz.

Em relação aos modelos físicos em escalas reduzidas, Thanachareonkit, Andersen e Scartezzini (2005) descrevem que esses são utilizados para a predição e avaliação da iluminação natural. Esses modelos são normalmente expostos a ambientes controlados de iluminação (céu artificial) e, de uma maneira aproximada, podem ser utilizados para verificar o comportamento da distribuição dos níveis de luminância e iluminância, principalmente durante as fases preliminares de elaboração do projeto. A configuração do modelo físico em escala permite registros fotográficos e

avaliação fotométrica; no entanto, a imprecisão na geometria de construção, no detalhamento das aberturas e no acabamento das superfícies pode causar erros que comprometem os resultados gerados pela simulação. A principal variável que diferencia o seu desempenho luminoso com a realidade é individualizada pela propagação da iluminação interior, pois está relacionada com as características dos materiais quanto a sua reflexão e transmitância, distribuição do fluxo luminoso e inter-reflexões.

A simulação computacional descreve o fenômeno a partir da integração da visibilidade da abóbada celeste, subdividida em várias parcelas. Através de iterações sucessivas, a energia luminosa é calculada em função da inter-reflexão e transmissão da luz. A presença do Sol é individualizada como uma fonte pontual. A obtenção dos resultados está relacionada aos conhecimentos físicos e ópticos que definem o estado da abóbada e do Sol (MARDALJEVIC, 2006). Normalmente, a simulação utiliza modelos padronizados de céu, com a finalidade de reduzir a variabilidade luminosa do fenômeno. As equações padronizadas pelos comitês e institutos científicos (CIE, IESNA, ABNT) e usadas para descrever o comportamento luminoso da fonte consideram as variáveis físicas e climatológicas (condições do ar, turvamento sob céu sem nuvens, abóbada de cálculo limpa ou encoberto, parâmetros temporais em relação ao período do ano, orientação, entre outros). Mardaljevic (1995), Reinhart e Andersen (2006) relatam que uma ferramenta de simulação deve permitir o estudo da distribuição da luz a partir de geometrias que representem a realidade arquitetônica, bem como simular as propriedades dos materiais quanto à reflexão e transmissão da luz.

Comparando os dois métodos de simulação de iluminação natural, Reinhart e Fitz (2006), através de um estudo, mostram que a simulação computacional tem-se tornado a ferramenta de trabalho preferencial de muitos profissionais. Ela é rápida, acelera a tomada de decisões nas diferentes etapas dos projetos, apresenta um razoável custo-benefício e, unida a aplicativos gráficos, permite descrever geometrias complexas; porém, sua limitação, assim como ocorre na simulação através de modelos físicos, está no afastamento entre os resultados simulados e os resultados reais. Particularizando a simulação computacional, cabe considerar a dificuldade da construção digital dos cenários, especialmente pela imprecisão do modelo, assim como as limitações dos algoritmos matemáticos que descrevem o fenômeno natural (traçado



do raio<sup>1</sup> e radiosidade<sup>2</sup>), e fundamentalmente, a imprecisão na caracterização da fonte luminosa direta (céu e Sol), a fonte indireta (exterior) e as inter-reflexões do modelo.

Muitos esforços têm sido canalizados para o estabelecimento de procedimentos de validação das ferramentas de simulação. A Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) publicou a CIE n. 171/2006 para o teste de desempenho de programas de simulação computacional de iluminação. Anteriormente a esse estudo, Maamari (2000) relatou que grande parte dos procedimentos de validação é realizada por comparação entre as ferramentas. Este método identifica se um determinado programa apresenta uma maior ou menor precisão na caracterização do fenômeno físico que descreve a propagação da luz. Neste caso, os modelos de céu utilizados nos procedimento de simulação são padronizados pela CIE e não levam em consideração a reflexão do entorno edificado. Os programas Adeline e Lightscape, observados em Roy (2000), Lumem Micro e Troplux, observados em Cabús (2005), assim como Relux e Lightscape, observados em Maamari et al. (2006), já foram testados comparativamente entre si.

Os procedimentos de validação dos programas Radiance Lighting Simulation System e do Troplux,<sup>3</sup> propostos respectivamente por Mardaljevic (2000) e Cabús (2005-b) foram experimentais. No lugar de caracterizar a abóbada celeste através de modelos padronizados, tal qual a validação comparativa, utilizou-se a base de dados do BRE-IDMP.<sup>4</sup>

Sintetizando a proposta de validação experimental do Radiance, observa-se que o comportamento luminoso da abóbada celeste, registrado pela distribuição de luminâncias, foi inserido no simulador computacional. Diversas simulações foram desenvolvidas, tendo como modelo o ambiente monitorado no BRE. A análise consistiu

---

<sup>1</sup> Contexto teórico da computação que analisa o percurso de uma partícula luminosa, de sua emissão até sua absorção, ou vice-versa, sendo aplicada com êxito na análise dos fenômenos especulares e trocas luminosas.

<sup>2</sup> O método da radiosidade analisa as trocas de energia luminosa entre superfícies que distribuem a luz refletida igualmente em todas as direções.

<sup>3</sup> Troplux é um programa que se propõe a simular o desempenho da iluminação natural para as características climáticas e arquitetônicas das regiões tropicais. Foi desenvolvido pelo professor, doutor em Arquitetura, Ricardo Cabús, da Universidade Federal de Alagoas – Brasil.

<sup>4</sup> O International Daylight Measurement Programme (IDMP) é um programa internacional criado para implementar mundialmente as estações de medição de iluminação natural. O Building Research Establishment (BRE) é um Instituto que montou a estação IDMP e monitorou os dados que caracterizaram o comportamento luminoso da abóbada celeste.

na comparação dos níveis de iluminâncias obtidos com os valores verificados experimentalmente no ambiente real, porém sem avaliar as obstruções relativas ao entorno edificado.

A necessidade de determinar a influência da reflexão do entorno no ambiente construído não é recente. Vários autores a elegem como uma importante fonte de luz natural, principalmente em regiões onde o Sol está freqüentemente desobstruído. Citando os autores contemporâneos, pode-se fazer referência a Cabús (2002). Esse autor aponta que a contribuição da luz refletida no solo para a iluminação natural no ambiente interno pode variar de 10% a 40%, com os valores mais altos ocorrendo quando há luz solar direta no piso. Brandão e Alucci (2005) relatam em seus estudos que a influência da obstrução do entorno no consumo de energia com iluminação artificial pode ser significativa, chegando a 31% do consumo total. Leder (2007) obteve, utilizando medições *in loco* em ambientes urbanos, um coeficiente de reflexão médio para o recorte urbano de 44%, indicando que os valores de 20% inicialmente propostos em modelos simplificados, podem estar subestimando a contribuição do entorno.

Desta maneira, verifica-se que os procedimentos metodológicos necessários para estabelecer um grau de confiança na resposta dos simuladores carecem de uma criteriosa descrição da fonte de luz natural e, por este motivo, tem gerado muitas pesquisas no meio científico, surgindo assim a pergunta: Como resolver as limitações encontradas pelos métodos de “avaliação” e “validação” de simuladores de iluminação natural?

Conforme relatam Spasojeviac e Mahdavi (2005), para minimizar as diferenças entre o comportamento da simulação computacional e o comportamento real da iluminação em interiores, é imprescindível a caracterização precisa da fonte. A fotometria digital com câmeras fotográficas dotadas com sensores CCD<sup>5</sup> vem se destacando no levantamento da distribuição da luz no espaço, principalmente para descrever as qualidades físicas e técnicas da iluminação do ambiente construído. Sua resposta expõe uma condição instantânea da cena, possibilitando a obtenção completa

---

<sup>5</sup> O sensor Charge-Coupled Device (CCD) é um dispositivo eletrônico de carga elétrica acoplada em um semicondutor e tem a propriedade de transferir, unir e condensar os pontos sensíveis à luz.

e precisa da distribuição de luminâncias da abóbada e da reflexão externa pelo entorno.

Como resultado, espera-se que o emprego da fotometria digital permita estudar, com significativa precisão, a relação do comportamento dos níveis de iluminação natural presentes em ambientes internos a partir dos níveis externos de iluminação, e validar os simuladores de iluminação natural. A fotometria digital reduz a complexidade da determinação da propagação da luz natural, as limitações do processo de mapeamento da abóbada celeste e o entorno das edificações.

Acredita-se que a análise de técnicas de avaliação para os modelos físicos e o emprego de algoritmos matemáticos, respaldados por uma validação experimental, possam tornar as ferramentas confiáveis e incentivar a utilização da iluminação natural nos projetos de edificações.

## **1.2. Objetivos**

### **1.2.1. Objetivo geral**

Desenvolver um método para avaliar o desempenho de ferramentas de simulação de iluminação natural através do mapeamento digital de luminâncias caracterizadas pelo céu e exterior.

### **1.2.2. Objetivos específicos**

- Desenvolver um método, utilizando os recursos de mapeamento digital de luminâncias e a simulação computacional, para caracterizar as fontes de luz natural.
- Criar procedimento para verificar a contribuição do entorno (medido em céu real) da edificação, a fim de determinar a influência dos elementos de reflexão exteriores nos processos de simulação.
- Verificar a distribuição da iluminação simulada através de procedimento teórico (simulador computacional e/ou modelo físico) a partir de medições de iluminâncias em um procedimento experimental.
- Determinar os pontos de divergências entre os procedimentos (teóricos e experimentais) para avaliar o desempenho das ferramentas de simulação de luz natural.

- Validar o programa de simulação computacional submetido ao método proposto, tomando-se como referência os estudos de Mardaljevic (2000).

### 1.3. Procedimento do método aplicado na pesquisa

O trabalho proposto permite descrever o mapeamento de luminâncias da abóbada celeste e do entorno. Isto é realizado através de uma câmera fotográfica digital com sensores CCD. Seu registro serve como dado de entrada para a simulação computacional. O desempenho dos simuladores é examinado através das discrepâncias entre as distribuições de iluminâncias simuladas através de procedimento teórico (simulação computacional e maquete) e as medidas verificadas experimentalmente em um ambiente real (referência). O método permite validar aqueles programas de simulação computacional capazes de descrever com precisão a distribuição de luminâncias e produzir uma base de dados adequada à representação de fontes superficiais para a simulação computacional. A figura 1.1 ilustra de maneira esquemática a proposta de trabalho.

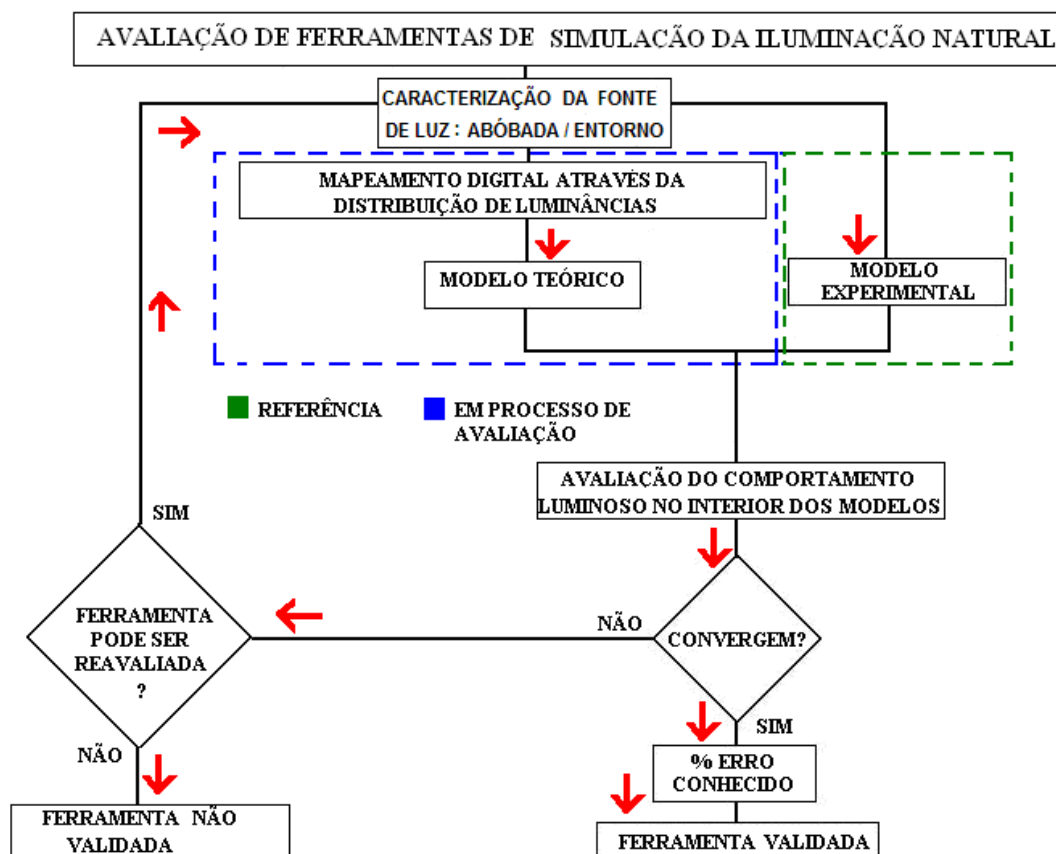


Figura 1.1 – Representação esquemática do procedimento metodológico da pesquisa.

## 1.4. Estrutura da tese

Para o cumprimento das metas, esta proposta de trabalho foi dividida em cinco capítulos, além das referências e apêndices. Os capítulos são descritos da seguinte maneira:

O primeiro aborda, em linhas gerais, o problema que motivou este trabalho, apresentando a justificativa, os objetivos (geral e específicos), os resultados esperados e a estrutura da tese.

O segundo capítulo apresenta a revisão bibliográfica desenvolvida para esclarecer os assuntos relativos às ferramentas de simulação. Nessa seção, destacam-se as propostas para avaliar o comportamento da iluminação do ambiente interno quando iluminado sob luz natural.

A partir da utilização de uma câmera fotográfica com sensor CCD, é descrito no terceiro capítulo o mapeamento digital da distribuição de luminâncias do ambiente de exposição. Essa análise permite gerar dados de entrada para a simulação teórica, criar contexto para a comparação do comportamento da luz entre o procedimento experimental e o teórico, bem como validar a ferramenta de simulação computacional.

O quarto capítulo retrata as divergências observadas após as comparações entre os procedimentos, permitindo avaliar o desempenho das ferramentas de simulação de iluminação natural.

O último capítulo descreve as principais conclusões sobre o desenvolvimento do trabalho, particularizando as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

## **2.0 A avaliação das ferramentas de simulação da iluminação natural – Estado da arte**

Este capítulo apresenta, inicialmente, uma abordagem geral sobre a disponibilidade da iluminação natural, salientando a descrição da distribuição luminosa da abóbada celeste e da reflexão no ambiente externo. Num segundo momento, é vista a aplicação das técnicas utilizadas para o mapeamento digital de luminâncias. Em uma terceira etapa, são identificadas as características das ferramentas de simulação na utilização em projetos de interiores. O penúltimo assunto dispõe sobre os critérios de confiabilidade das ferramentas de simulação, caracterizando as dificuldades e preferências inerentes aos engenheiros, arquitetos e pesquisadores da área de iluminação natural, bem como a preocupação do meio científico quanto à validade na utilização de programas computacionais no processo de simulação. O último assunto trata dos parâmetros descritivos utilizados no procedimento de validação, levando em consideração as incertezas e os erros ocorridos no processo de medição.

Em síntese, será feita uma revisão da literatura científica para estabelecer uma compreensão nos dois aspectos a serem abordados neste trabalho de tese, que são:

- A caracterização precisa do comportamento luminoso ou radiante da abóbada celeste e a verificação da contribuição da reflexão externa a partir do mapeamento digital de luminâncias.
- A avaliação das ferramentas de simulação de iluminação natural em interiores para validar seu desempenho mediante um processo metodológico.

### **2.1. O estudo da distribuição da iluminação natural**

A principal fonte da luz natural é o Sol. A iluminação proveniente dessa fonte propaga-se pela atmosfera através do ar, vapor d'água e poeira, caracterizando o céu como uma fonte geradora de luz (figura 2.1).

A iluminação produzida pelo céu depende de sua luminância. Ela varia de acordo com uma série de parâmetros meteorológicos, sazonais e geométricos, caracterizando uma complexa especificação, pois sua distribuição muda a partir de

pequenas variações de tempo. É através da difusão/reflexão entre nuvens e superfícies que a luz se dirige às aberturas e ilumina o interior das edificações (TREGENZA, 1993; ISO, 2003). Por essa razão, é necessário caracterizar a distribuição de luminâncias da abóbada celeste a partir de céus padronizados – chamados por modelos ou padrões de céu. Eles são usados para a maioria das aplicações de simulação de luz natural em interiores (PERRAUDEAU, 1988; MARDALJEVIC, 2006).

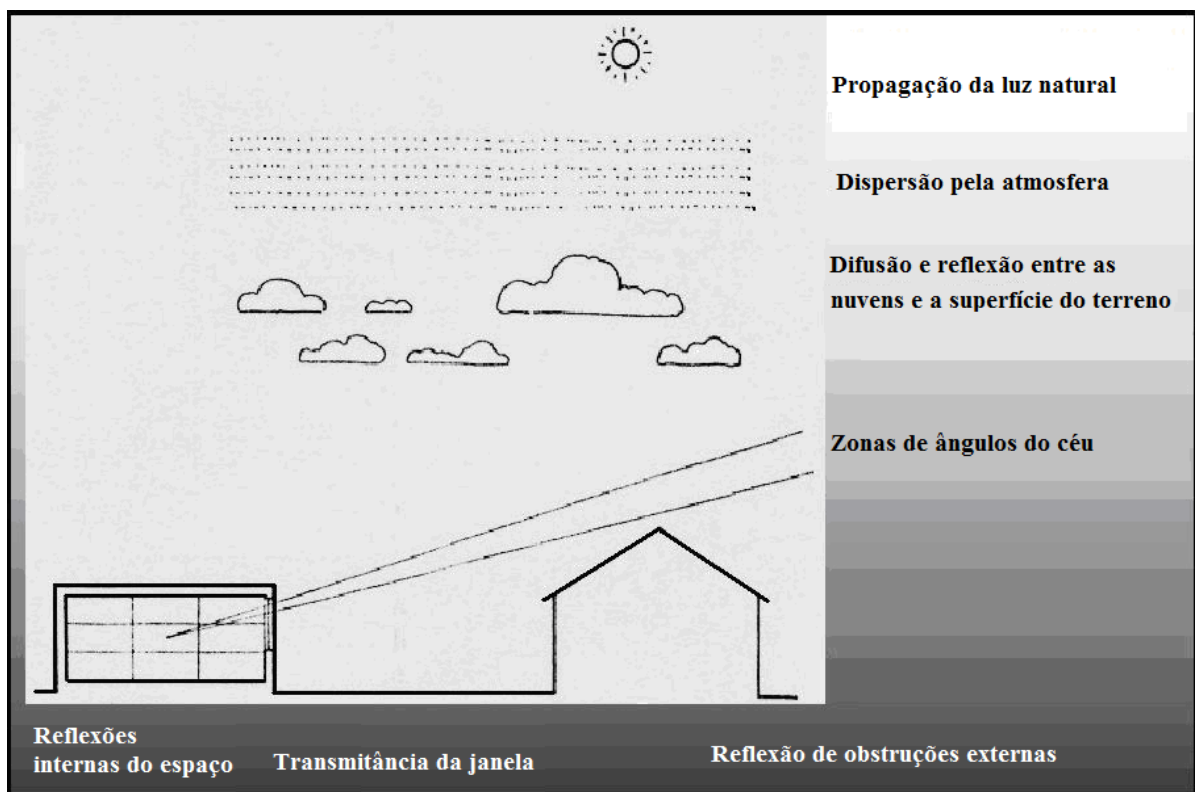


Figura 2.1 – Propagação da iluminação natural.

Fonte: Adaptado de Tregenza, 1993.

### 2.1.1. Determinação da iluminação natural a partir da distribuição de luminâncias da abóbada celeste

Caracterizar o céu por simulação é equivalente a definir uma fonte luminosa superficial através da fotometria. Geometricamente, o céu é simples de descrever: sempre tem uma aparência relacionada à sua distribuição espacial de emissão de luz. Porém, o padrão de luminâncias é de difícil caracterização, principalmente quando as nuvens estão presentes, pois passam a mudar significativamente com o tempo (PEREZ; MICHALSKY; SEALS, 1992; FONTOYNONT, 1999; ANDERSEN, 2004; MARDALJEVIC, 2006).

Devido à complexidade de se determinar o comportamento dinâmico da luminância da abóbada celeste para céus intermediários, normalmente os projetos que avaliam a iluminação natural em interiores consideram somente os modelos de céu claro e de céu encoberto. As características de sua distribuição serão apresentadas a seguir.

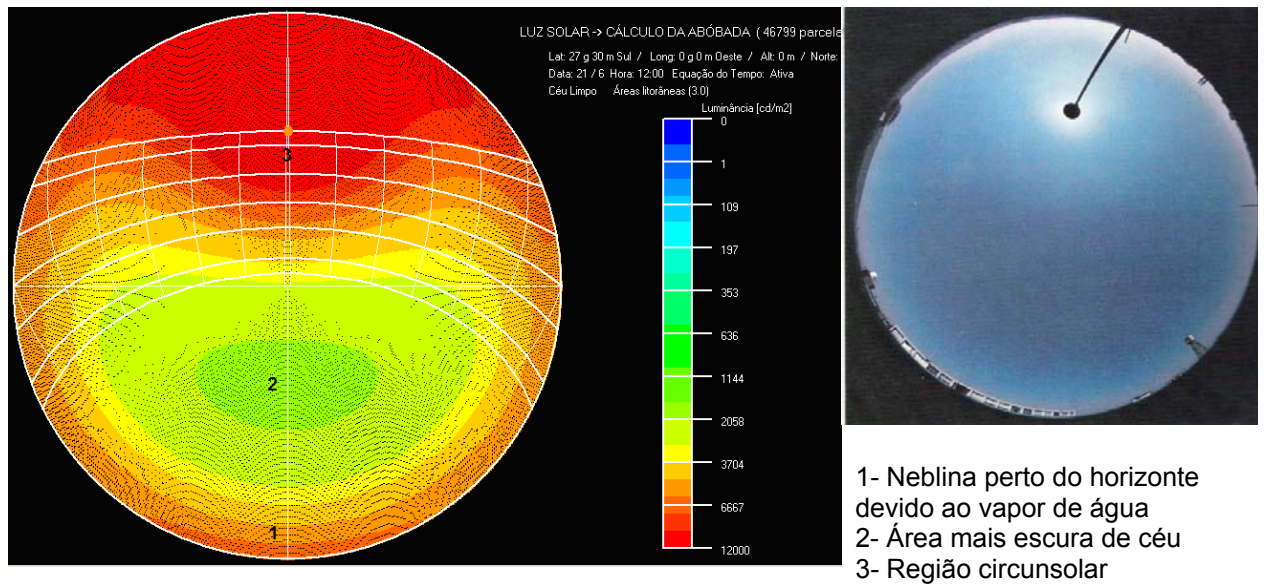
#### 2.1.1.1. Características da distribuição de luminâncias para céu claro

O modelo de distribuição de luminâncias de um céu claro é determinado pela luz do Sol dispersa pela atmosfera. Esse tipo de céu caracteriza-se pela inexistência de nuvens, em que as reduzidas dimensões das partículas de água fazem com que apenas os comprimentos de onda da porção azul do espectro espalhem-se em todas as direções.

Nessas condições, o céu apresenta sua porção mais escura a  $90^\circ$  do Sol e sua parte mais brilhante ao redor deste, conforme indicado na figura 2.2. O céu tende a ser mais brilhante nas regiões próximas à linha do horizonte. A luminância de qualquer ponto da abóbada celeste é correlacionada com a luminância do zênite, em função da posição do ponto considerado, com relação ao zênite e ao Sol (figura 2.3). A mutação da coloração azul do céu relaciona-se com a quantidade de poluentes na atmosfera. O dióxido de nitrogênio confere uma cor amarela para a atmosfera e isso pode ser constatado ao olharmos para uma área urbana vizinha à zona rural. O vapor de água traz um equilíbrio e, na ausência de poluição, a coloração observada tende para um azul claro. (LYNES, 1968; CIE, 1996; ISO 2003).

Céus claros, semelhantes ao padrão da Commission Internationale de L'Eclairage – CIE, são mais frequentes em regiões montanhosas, áreas rurais não poluídas ou durante as estações de inverno. Também aparecem após a ocorrência de chuvas, pois a poluição e a umidade são reduzidas na atmosfera. Tais condições são raramente encontradas na vizinhança de cidades, em zonas industriais ou sob inversões climáticas, e em áreas com alto índice de poeira ou poluição no ar (KITTLER, 1994).





(a) Distribuições de luminâncias para um céu limpo (APOLUX, 2007).  
 (b) Registro fotográfico de um céu limpo.

De acordo com Lynes (1968) e dados da CIE (1996), a luminância de um determinado elemento de céu, visto da Terra, dependerá:

- da altitude do elemento acima do horizonte;
- do ângulo zenital do Sol (altura solar);
- do ângulo de incidência no plano horizontal, entre o ponto central do elemento e o centro do Sol;
- do fator de turvamento da atmosfera do local.

A equação 2.1, adotada pela CIE desde 1968, tem como definição uma distribuição padrão de céu claro, caracterizado da seguinte maneira (figura 2.3):

$$L_p / L_z = \frac{(1 - e^{-0,32 / \sin \gamma_s}) (0,91 + 10e^{-3\chi} + 0,45 \cos^2 \chi)}{0,274(0,91 + 10e^{-3\chi} + 0,45 \cos^2 Z_s)} \quad [\text{Equação 2.1}]$$

onde:

$L_p$  – luminância de um ponto P, situado na abóbada celeste de elevação  $\gamma$ , em  $[\text{cd}/\text{m}^2]$ ;

$L_z$  – luminância do zênite em  $[\text{cd}/\text{m}^2]$ ;

$Z_s$  - ângulo entre o zênite e o Sol [graus];

$\chi$  – ângulo compreendido entre o ponto P e o Sol [graus];

$\gamma_s^1$  - elevação solar a partir do horizonte [graus].

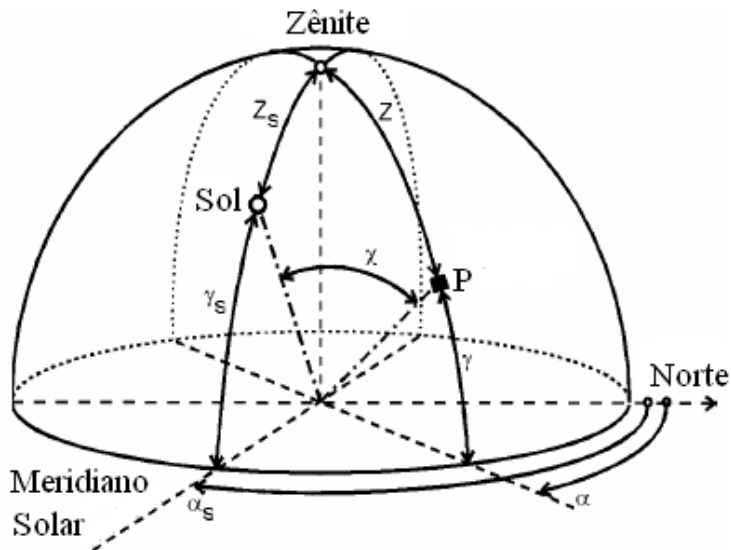


Figura 2.3 – Desenho ilustrativo dos parâmetros utilizados para a definição da posição do Sol e dos elementos do céu.

Fonte: ABNT (2003-b); CIE (1996); Darula e Kittler (2002).

#### 2.1.1.2. Características da distribuição de luminâncias para céu encoberto

Os dias com céu encoberto são caracterizados pela ausência de luz solar diretamente do Sol. A luz do céu é tão uniformemente difundida, que o padrão de luminância do céu é visualmente simétrico em relação ao zênite.

Esse tipo de céu resulta da refração/reflexão da luz direta do Sol (em todos os comprimentos de onda espectrais) em grandes partículas de água suspensas na atmosfera. O resultado é uma abóbada celeste cinza-claro, com porção zenital apresentando uma luminância aproximadamente três vezes maior que a porção próxima à linha do horizonte, conforme indicado na figura 2.4 (LYNES, 1968; CIE, 1996; ISO, 2003).

<sup>1</sup> É a distância angular do hemisfério em um ponto do céu ou do Sol medida em um plano perpendicular ao plano horizontal que passa pelo ponto e o zênite. Mede-se positivamente em graus a partir do plano horizontal ao zênite (CIE, 2002).

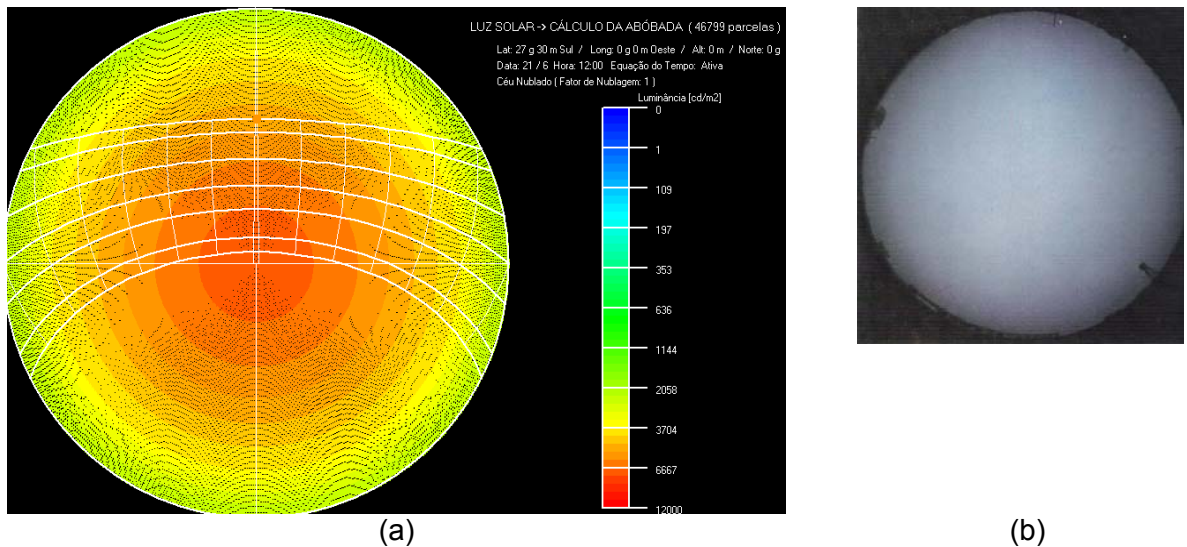


Figura 2. 4 – a) Distribuições de luminâncias para um céu encoberto, (APOLUX, 2007).  
 b) Registro fotográfico de um céu encoberto.

O modelo da Commission Internationale de L'Eclairage (CIE, 1996), proposto por Moon e Spencer em 1942, é adotado desde 1955 e matematicamente expresso pela equação 2.2:

$$\frac{L_p}{L_z} = \frac{(1 + 2 \operatorname{sen} \gamma)}{3} \quad \text{[Equação 2.2]}$$

onde:

$L_p$  – luminância de um ponto situado na abóbada celeste, de elevação  $\gamma$  [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ];

$L_z$  – luminância do zênite [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ];

$\gamma$  - elevação do centro da porção de céu considerada acima do horizonte [graus].

A procura pelo entendimento da disponibilidade da luz natural é antiga. Nos séculos XVIII e XIX, a hemisfera uniforme de Lambert, com luminância unitária, era o modelo de céu simplificado utilizado e permitiu o desenvolvimento dos primeiros métodos de cálculo de iluminação natural baseados nos conceitos de projeção do ângulo sólido de aberturas. No início do século XX, o modelo de céu uniforme foi testado e novas medições de luminância de céu permitiram a proposição do céu encoberto, com graduação variável do zênite ao horizonte, sendo esse tipo de distribuição adotado posteriormente pela CIE (KITTLER, 1967).

A literatura mostra que foram construídos vários modelos numéricos de céus para avaliar a distribuição da iluminação natural a partir da luminância da abóbada

celeste, como mostra o panorama que segue na tabela 2.1. Porém, eles não explicam de maneira precisa a variação de um céu claro para encoberto, pois as lacunas existentes são complementadas por interpolações ou modelos estatísticos (IGAWA; NAKAMURA; MATSUURA, 1999).

**Tabela 2.1 - Panorama dos modelos de céu para caracterizar a distribuição de luminâncias.**

<b>Autores</b>	<b>Função do modelo</b>	<b>Ano</b>	<b>Observações</b>
Moon e Spencer	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar a distribuição da luminância (céu encoberto).</li> </ul>	1942	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recomendado pela CIE em 1955 - céu encoberto padrão.</li> </ul>
Kittler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar a distribuição da luminância (céu claro).</li> </ul>	1967	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Recomendado pela CIE em 1973 - céu claro (completamente sem nuvens).</li> </ul>
Littlefair	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar a distribuição da luminância (céu Intermediário).</li> </ul>	1981	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Propõe a distribuição de luminância para cada altitude solar – denominação: <i>BRE Average Sky</i>.</li> </ul>
Nakamura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar a distribuição da luminância (céu Intermediário).</li> </ul>	1985	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Descreve a luminância do zênite para esta proposta de céu.</li> </ul>
Kittler	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar a distribuição da luminância (de céu claro p/ encoberto).</li> </ul>	1985	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Assumiu que a condição de céu varia de forma homogênea; de céu claro para encoberto.</li> </ul>
Perraudeau	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar as distribuições de luminâncias para cada tipo de céu.</li> </ul>	1988	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dispõe os céus em cinco categorias: encoberto; intermediário – encoberto; intermediário; intermediário – claro e céu claro.</li> </ul>
Perez	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar um modelo em função dos índices de claridade e de luminância do céu.</li> </ul>	1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Denominado <i>All weather model</i> e classificado para parametrizar as condições de céu encoberto brilhante, intermediário, claro turvo e muito claro.</li> </ul>
Perez, Kittler e Darula	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar as distribuições de luminâncias para cada tipo de céu.</li> </ul>	1997	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Classificação de distribuição de luminâncias do céu em quinze categorias.</li> </ul>
Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Caracterizar as distribuições de luminâncias para cada tipo de céu.</li> </ul>	2002	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Utilizou a classificação de distribuição de luminâncias do céu em quinze categorias, de Perez, Kittler e Darula, (1997).</li> </ul>

### 2.1.2. Níveis de iluminação em superfícies expostas à abóbada celeste

Os modelos de distribuição de luminâncias da abóbada celeste são determinantes para o cálculo de iluminâncias em superfícies expostas à fonte natural de iluminação (IGAWA; NAKAMURA, 2001).

Teoricamente, a iluminância “E” em um ponto “P” (centro da porção de céu com orientação qualquer) em relação à hemisfera, sem obstrução, é definida através da seguinte expressão:

$$E = \int_{\alpha=0}^{2\pi} \int_{\gamma=0}^{\frac{\pi}{2}} L(\alpha, \gamma) \cdot \cos \gamma \cdot \cos \beta \cdot d\gamma \cdot d\alpha \quad [\text{Equação 2.3}]$$

onde:

- L é a luminância do céu, em função do azimute<sup>2</sup> ( $\alpha$ ) e de uma altitude ( $\gamma$ ) de um ponto do céu [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ];

-  $\beta$  é o ângulo entre as normais da zona do céu e da superfície iluminada (de incidência) [graus];

Resolvendo a integral dupla, temos:

$$E = \sum_{i=1}^n \omega_i \cdot L(\alpha_i, \gamma_i) \cdot \cos \gamma_i \cdot \cos \beta_i \quad [\text{Equação 2.4}]$$

onde:

- n é o número de subdivisões da abóbada celeste;

-  $\omega_i$  é o ângulo sólido através do qual é vista a superfície i, esterradiano [sr].

Esta expressão significa que para cada ponto “P” contido em um plano de análise, a luz emitida pelos elementos visíveis de céu, em relação ao ponto, vai sendo adicionada, levando em consideração sua altitude e o ângulo sólido (LYNES, 1968; MIGUET; GROLEAU; MARENNE, 1996).

<sup>2</sup> É o ângulo entre o norte geográfico e o plano vertical, do ponto de vista do observador e com vértice no observador, estando compreendido entre  $0^\circ \leq \alpha_s \leq 360^\circ$ , medido a partir do norte no sentido horário. É obtido em função da hora do dia, da época do ano e da latitude e longitude geográfica do local considerado (CIE, 1996).

A figura 2.5 pode ser vista como uma hemisfera de raio unitário, construída em relação a “P” situado em um plano horizontal. O ponto “P” observa a área “S”, que representa um difusor de luminância uniforme “L” e compreende um ângulo sólido “ $\omega$ ” em relação a “P”.

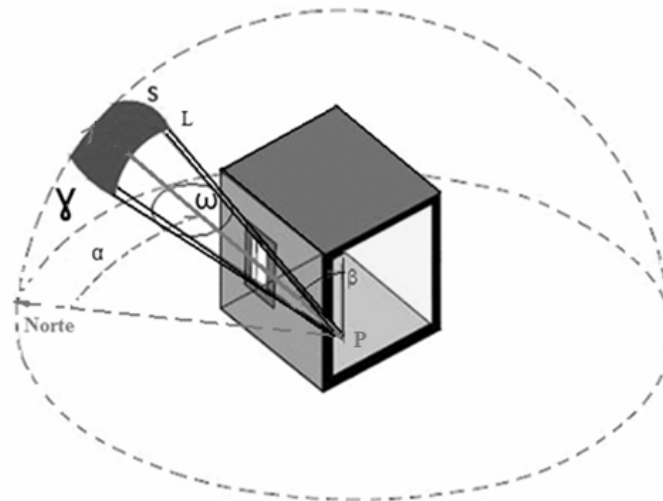


Figura 2. 5 – Desenho esquemático da distribuição de luminâncias para uma porção de área de céu.

O plano de visão do observador é considerado como um plano vertical paralelo ao plano da janela. Assim, conforme a figura 2.6, a equação para o cálculo do ângulo sólido é dada por:

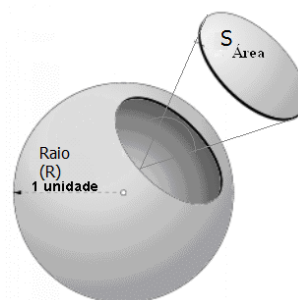


Figura 2.6 – Representação do ângulo sólido.  
 Fonte: [http://www.schorsch.com/kbase/glossary/Solid\\_angle.html](http://www.schorsch.com/kbase/glossary/Solid_angle.html)

$$\omega = (S / R^2) \quad \text{[Equação 2.5]}$$

Uma das razões pelas quais a iluminação natural está sendo vista de forma superficial pelos projetistas é a ausência de uma base de dados capaz de caracterizar de maneira precisa a fonte de luz natural. Esse parâmetro permite entender o comportamento luminoso do sistema de iluminação natural em interiores. Deve-se

considerar que a luminância externa disponível para a iluminação natural possui um grande potencial de incertezas para qualquer valor usado em cálculos e que, sem conhecimento pleno desse recurso, fica virtualmente impossível analisar os sistemas ao longo do tempo (ROBBINS, 1986).

A maior dificuldade em simular a iluminação natural está na caracterização da distribuição de luminância da fonte luminosa. Os cálculos auxiliam os simuladores de iluminação natural a descrever seu comportamento, mas sua complexa variabilidade impede que seja determinada com a devida exatidão. Por outro lado, os dados reais de um dia (ou de alguns dias) não podem ser extrapolados para todo o ano típico. Este contexto ilustra a dificuldade para a elaboração do projeto de iluminação, pois impede uma avaliação precisa do desempenho luminoso em ambientes internos (SZOKOLAY, 1980; LITTLEFAIR, 1981; MARDALJEVIC, 2000).

Para entender como a luz natural se propaga em ambientes internos, utiliza-se um modelo de divisão de fluxo em que a luz natural incidente é dividida em três componentes: celeste (CC), refletida interna (CRI), e refletida externa (CRE) – (figura 2.7). A soma dessas componentes gera o total de luz natural que atinge determinado ponto no ambiente interno.

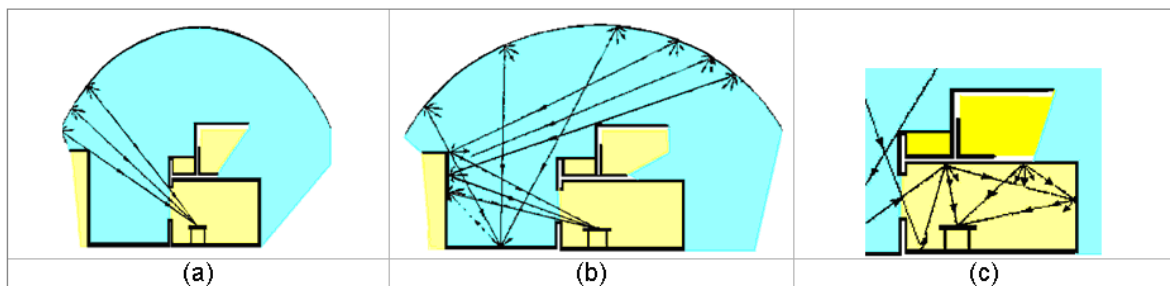


Figura 2.7 – a) Componente Celeste (CC).

b) Componente Refletida Externa (CRE).

c) Componente Refletida Interna (CRI).

Fonte: Soteras (1985).

Segundo Tregenza (1993), o céu pode ser subdividido em parcelas, em que a iluminância numa superfície exposta é a soma das iluminâncias produzidas pela parcela que aparece como fonte pontual.

[...] o céu pode ser subdividido em parcelas demarcadas pelos ângulos de altitude e azimute, a iluminância total é a soma das iluminâncias de cada uma delas que aparece como uma fonte pontual. Para medida de luminâncias de céu é recomendado que o padrão de varredura seja baseado em 145 parcelas variando a cada 11 graus de ângulo sólido [...] (TREGENZA, 1993, p. 1.35).

Nessas condições, a luminância de uma parcela de céu, sua posição e o seu ângulo sólido de visão, são considerados em função da posição relativa do ponto estudado e fornecerão a CC. Para determinar a CRE, as superfícies externas são consideradas através da projeção da obstrução (na porção observada de céu) e de sua “refletividade média”. Para caracterizar a CRI, são avaliadas as projeções das superfícies internas através da área, da geometria e da refletividade de superfícies.

## **2.2. Determinação do comportamento da iluminação natural a partir de medições em tempo real**

Alguns procedimentos são utilizados para suprir a falta de medições em tempo real que caracterizam a disponibilidade da luz natural. Entre eles, pode-se citar o monitoramento da iluminação natural através de dados de satélite. Esse procedimento é realizado através do programa denominado *Satel-light*. A caracterização da fonte luminosa é realizada através da iluminância global, obtida de hora em hora e convertida a partir da difusão da radiação solar, que é determinada pela relação entre a irradiância eletromagnética refletida, de forma direta ou difusa, e a irradiância incidente (FONTOYNONT et al., 1997). O procedimento gerou para a superfície terrestre, de várias partes do mundo, os mapas digitais com valores de iluminâncias para os anos compreendidos entre 1998 e 2002. Esta base de dados é disponibilizada na *internet* através do endereço <<http://www.satel-light.com>>. Janjai et al. (2008), em estudos desenvolvidos na Tailândia, utilizaram o *Satel-light* para fornecer o mapeamento digital de iluminâncias como parâmetro de informação para os projetos das edificações que utilizam a iluminação natural.

No entanto, foi em 1985 que surgiu a principal proposta destinada a caracterizar o comportamento da iluminação natural a partir de medições em tempo



real. Esta iniciativa, denominada International Daylight Measurement Programme (IDMP), propôs a instalação de estações de medição de iluminação natural ao redor do mundo. Em 1991, foi lançado o *Guide to Recommended Practice of Daylight Measurement*, documento que fornece as regras para a prática de medições e recomendações sobre o controle de qualidade, armazenamento e disseminação de dados de iluminação natural. Sua versão final foi aprovada em 1994, sendo adotada pela CIE, como o texto CIE 108/1994. Graças a esse programa, abriu-se uma série de estações de medição de iluminação natural em todo o mundo, produzindo dados que permitiram a avaliação de características relativas ao comportamento da luz natural para diversos tipos climáticos e condições atmosféricas (IDMP, 2008; CIE, 1994), entre elas, a iluminância global horizontal, a iluminância difusa horizontal, a iluminância do zênite, a luminância da abóbada, citando as principais.

Para ser considerada como “Estação de Classe de Pesquisa” é necessário medir a distribuição de luminâncias da abóbada celeste. O IDMP possui 48 estações oficiais em todo o mundo, mas somente 22 medem a distribuição de luminâncias (ilustrado pela figura 2.8). No Brasil, a primeira estação estabelecida de acordo com o padrão IDMP localiza-se na cidade de Florianópolis, situada na Universidade Federal de Santa Catarina (SOUZA; PEREIRA, 2004).

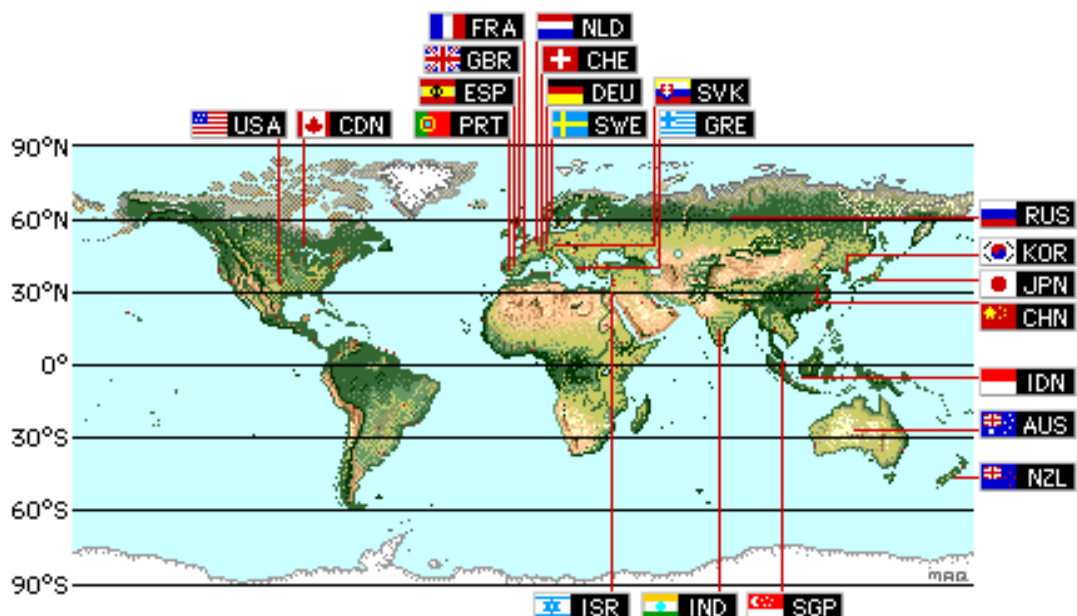


Figura 2.8 - Mapa de localização das estações de medição de iluminação natural e radiação solar da IDMP.

Fonte: <<http://idmp.entpe.fr/index.html>>.

O ano de 1991 foi declarado “Ano Internacional de Medição de Iluminação Natural” (IDMY, *International Daylight Measurement Year*) de forma a promover um esforço conjunto de diversos países e instituições para a medição das grandezas necessárias à caracterização do fenômeno da iluminação natural externa. Atualmente, o comitê técnico 3.25 da CIE possui a responsabilidade de manter as informações relativas à rede IDMP, disponibilizadas através da página <http://idmp.entpe.fr/> .

O Building Research Establishment (BRE) é o instituto de pesquisa responsável pela preparação das estações-classe de pesquisa e, além das medidas de iluminâncias, monitora a distribuição da luminância do céu a partir de um aparato capaz de varrer a abóbada celeste a cada 15 minutos. O aparato tem a propriedade de varrer a abóbada celeste em 145 zonas (recomendação da CIE/1996), caracterizadas por um ângulo sólido de 11 graus. Esse procedimento, entretanto, conforme Mardaljevic (2000), permite caracterizar apenas 68% da abóbada, mesmo considerando uma luminância uniforme dentro de cada zona (figura 2.9).

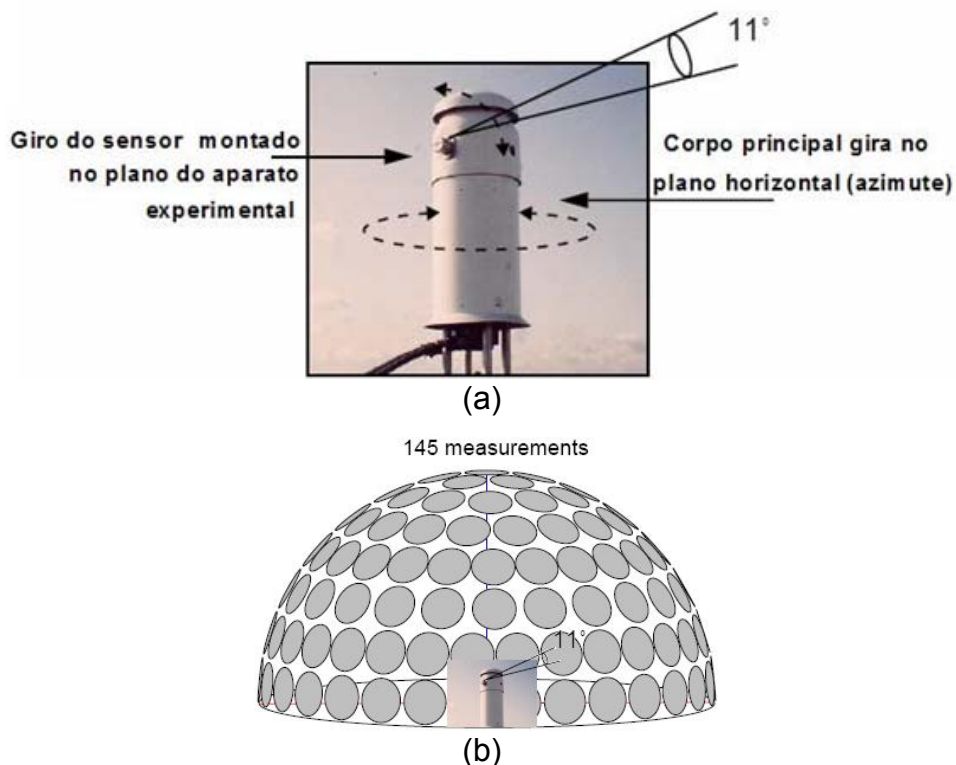


Figura 2.9 – a) Ilustração do aparato de medição utilizado para caracterizar a distribuição de luminâncias da abóbada celeste. b) Varredura da abóbada celeste em 145 partes. Fonte: Mardaljevic (2000).

Além do registro do comportamento luminoso da abóbada celeste e das iluminâncias externas, a base de dados do BRE-IDMP, produzida em 1992, disponibiliza as medidas de iluminâncias no interior de um ambiente real, levantadas em seis posições, simultaneamente ao mapeamento da abóbada. A figura 2.10 ilustra as instalações da estação de monitoramento de iluminação natural localizada em Londres.

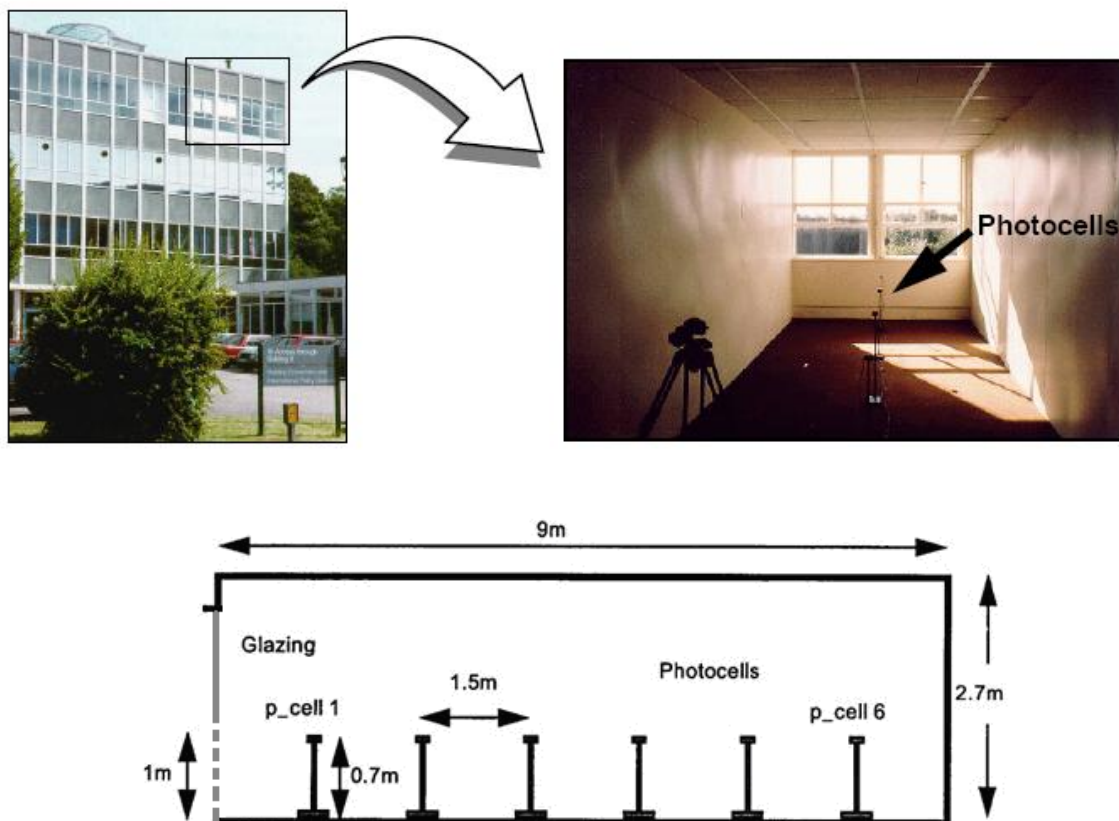


Figura 2.10 – Ilustração do ambiente real de estudos - seis posições de análise.  
Fonte: Mardaljevic (2000).

O propósito inicial era justamente montar uma base de dados contendo a caracterização das fontes de luz natural (abóbada e Sol) e as condições de iluminação resultantes num ambiente interno, durante o período de um ano. Tal base poderia ser utilizada para avaliar o comportamento de ferramentas de simulação. Entretanto, existe um equívoco nesse procedimento, uma vez que as iluminâncias internas monitoradas apresentam contribuição da luz refletida pelo entorno, que é visível para as aberturas laterais, mas tal contribuição não foi considerada pela estação IDMP.

### 2.3. Avaliação dos procedimentos de validação de programas de simulação de iluminação natural

Mardaljevic (2000) utilizou os registros do mapeamento digital da abóbada celeste fornecidos pela base de dados BRE-IDMP. Os dados gerados serviram para validar o programa Radiance Lighting Simulation System. A pesquisa permitiu a inserção dos valores da distribuição de luminâncias no simulador computacional. O pesquisador completou com interpolações os valores de luminâncias que faltavam cobrir a abóbada celeste fotometrada. O procedimento foi avaliado a partir dos resultados de iluminâncias simuladas no interior de um modelo virtual (em seis posições) e comparados com as iluminâncias medidas no interior do ambiente real.

Os resultados entre a diferença de iluminâncias medidas e simuladas no Radiance são representados pelos gráficos ilustrados na figura 2.11. A ordenada da curva foi definida através da frequência nominal de ocorrência em relação à posição de cada sensor – sendo a fotocélula 1 a mais próxima da janela e a 6 a mais afastada. A abscissa identifica o comportamento do erro relativo. Ele foi caracterizado pelo desvio padrão e, através do grau de “achatamento” da curva de função de distribuição (curtose), foram determinadas as maiores e as menores discrepâncias.

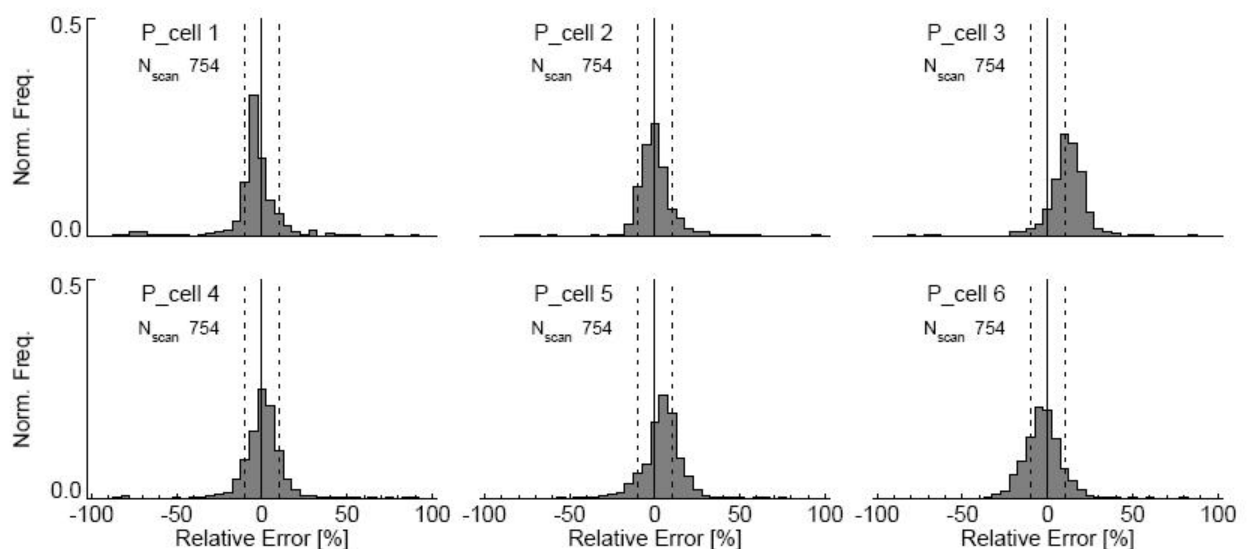


Figura 2.11 – Comportamento do erro relativo em relação ao posicionamento dos sensores.

Fonte: Mardaljevic (2000).

De 4.524 níveis de iluminâncias analisados, 2.885 deles (64%) apresentaram discrepâncias de  $\pm 10\%$ . Dos valores que restaram, 95% registraram diferenças de  $\pm 25\%$  e as demais foram superiores a  $\pm 50\%$ . As maiores discrepâncias aconteceram nas posições mais afastadas da janela, onde o grau de achatamento da curva é maior.

Mardaljevic (2000) encontrou dificuldades em caracterizar a contribuição da reflexão externa da edificação durante a simulação computacional. Esse fato ocorreu principalmente porque o aparato de medição não avaliou o plano vertical do ambiente real, e por haver situações em que as pequenas nuvens causavam variação significativa na luminância do céu durante o período de medição e nas variações da contribuição externa do piso devidas à chuva ou neve.

O ambiente de estudo foi considerado, para efeito de simulação, posicionado no plano do piso, não sendo avaliadas as influências da reflexão do entorno no terceiro andar do prédio (figura 2.12).

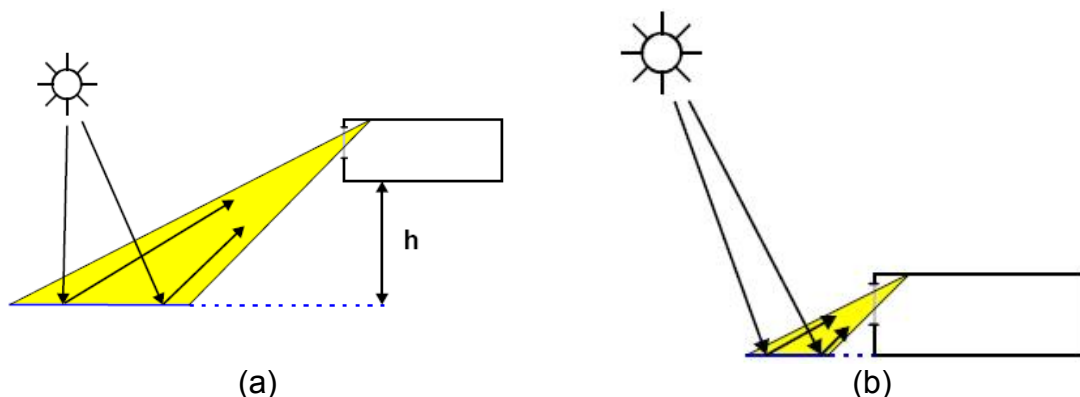


Figura 2. 12 – a) Identificação do ambiente real para avaliação da iluminação natural.  
 b) Posição do ambiente real considerado para a simulação.  
 Fonte: Mardaljevic (2000).

Pesquisadores como Hopkinson e Petherbridge (1953), assim como Griffith, Wenzler e Conover (1953), bem como Cabús (2002) destacaram a importância do solo como uma importante fonte de luz natural. Segundo os pesquisadores, negligenciar a contribuição da componente refletida externa altera o entendimento da distribuição da iluminação em interiores.

Lam (1986) também enfatizou a influência do uso da luz solar refletida no solo, em particular para edificações localizadas em baixas latitudes durante o verão. Tregenza (1995) descreveu os procedimentos teóricos que caracterizam o cálculo da

componente refletida no solo, na iluminação média no plano de trabalho e outras superfícies. Ele se baseou na iluminância solar normal e na iluminância horizontal difusa. Ng e Wong (2004) identificaram que é possível, variando a altura das edificações, melhorar o desempenho da iluminação natural em interiores; essa contribuição pode ser de 20 a 30%. A disponibilidade de energia solar nas fachadas decresce sensivelmente com o aumento da razão  $H \times L$  para ruas orientadas L-O. Fachadas em ruas estreitas ( $H \times L > 3$ ) recebem metade da energia potencialmente disponível, enquanto fachadas para ruas mais largas ( $H \times L = 0,5$ ) estão muito mais expostas. Na pesquisa realizada por Mesa et al. (2004), chegou-se à conclusão de que uma ótima relação de afastamento entre edificações seria de valores entre 2/3 e 1 em relação à altura das mesmas.

No Brasil, a única validação de programa de simulação de iluminação natural desenvolvida por um processo metodológico foi realizada em 2002 no simulador computacional Troplux (CABÚS, 2005a). Este método, referenciado por Cabús (2005b) considerou os erros aleatórios e os sistemáticos inerentes nos processos de validação. Na avaliação do erro sistemático, o estudo foi desenvolvido através de duas análises. A primeira foi através de uma validação comparativa, em que as iluminâncias simuladas em um modelo foram comparadas com o programa computacional Lumem Micro. A segunda, através de uma validação experimental, utilizando os parâmetros da estação classe pesquisa fornecidos pela base de dados BRE – IDMP. Foi comparada a simulação computacional de um modelo teórico com as informações de iluminâncias medidas em um ambiente real. Os resultados indicaram um coeficiente de correlação superior a 95% para todos os pontos estudados. Esse foi o indicativo de que a validação com dados reais pode ser considerada satisfatória. As fontes principais de imprecisão no procedimento ocorreram quando a luz do Sol esteve disponível, e em razão da especificação geométrica do modelo de estudo.

[...] a validação perfeita é uma impossibilidade. Porém os resultados mostram que o nível de previsão do TropLux é comparável àquele produzido pelo Radiance, como estudado por Mardaljevic (2000), e os resultados globais apresentaram-se consistentes [...] (CABÚS, 2005b, p. 259).

A dificuldade de incorporar ao projeto das edificações estudos referentes ao aproveitamento da iluminação natural é principalmente caracterizada pela falta de procedimentos que ajudem os especialistas a determinar a luz natural de uma maneira simples e precisa. O estudo desenvolvido na Flórida por Shalaby, King e Gold (2005) comparou medidas de iluminâncias entre um programa de simulação e medições em tempo real em interiores; os resultados apresentavam discrepâncias de 17% a 35%. A descrição da fonte luminosa foi baseada em medições da iluminância global em um céu claro, sem a presença do Sol. Concluiu-se nessa pesquisa que poderia ter sido utilizado um coeficiente de correção para melhorar as estimativas de iluminâncias.

Assim, cabe ainda investigar de que forma a solução proposta pelos pesquisadores pode ser otimizada, colocando-se as seguintes indagações: i) quanto de contribuição de iluminação natural partiu da luz refletida externamente na edificação durante a simulação computacional? ii) a parte não visível da abóbada observada pela janela, apresenta contribuição luminosa?

Não se pretende aqui discutir o grau de importância dos trabalhos de Mardaljevic (2000), Cabús (2005) e Shalaby, King e Gold (2005), pois foram os únicos, até o momento, a considerar o comportamento da iluminação no interior de uma edificação, a partir de medições simultâneas da abóbada celeste, e comparar os resultados com a simulação computacional; porém, suas pesquisas não respondem a essas indagações.

Durante as discussões referente ao trabalho de Mardaljevic, Littlefair<sup>3</sup> argumentou que a base de dados do BRE-IDMP não seria capaz de testar todos os aspectos da propagação da luz em ambientes internos. Mesmo salientando a relevância do trabalho, o método empregado para validar o Radiance foi desenvolvido sem considerar a reflexão externa relativamente ao entorno. Diante da influência da componente refletida no ambiente externo, já confirmada por diversos autores, esse aspecto diminui a importância dos resultados obtidos.

[...] o procedimento experimental de validação não considera a reflexão devida à obstrução externa visível por boa parte do ambiente interno.

---

<sup>3</sup> Pesquisador do Building Research Establishment - BRE, Watford.

Deve ser reconhecido que a base de dados BRE-IDMP não pode testar todos os aspectos de um programa de computação [...] (LITTLEFAIR: in MARDALJEVIC, 2000, p. 135).

Mardaljevic (2004) investigou a importância da obstrução do entorno em ambientes urbanos para caracterizar os efeitos da simulação da iluminação no interior da edificação. Nesse trabalho, foi observado no Radiance, em planos verticais, um valor superestimado de aproximadamente 50% dos valores simulados de iluminâncias em um modelo virtual, comparados com as medições em um ambiente real. Ele reconheceu que as validações deviam estar compreendidas em domínios, os denominados “*domain of validity*”, e, para essa pesquisa, o simulador estava fora do domínio de validade.

[...] os resultados da aplicação dos métodos de validação das ferramentas de simulação de iluminação natural, podem ficar dentro ou fora de domínio de validações. Em outras palavras, os resultados da simulação invariavelmente vão apresentar diferenças entre o valor teórico do processo de simulação e o valor medido e é importante considerar o grau de divergências entre eles. O objetivo é caracterizar o desempenho do processo de validação quanto à precisão da descrição dos cenários e um método de validação [...] (MARDALJEVIC, 2004, p. 234).

As medições para mapear a distribuição de luminâncias do céu seguem sendo metas de muitas pesquisas ao redor do mundo. Estudos recentes vêm revelando que ela pode ser adquirida através da utilização de mapeamento digital. Essa técnica utiliza sensores fotométricos ou câmeras digitais que processam os valores de luminância diretamente na imagem. O mapeamento digital que utiliza esse recurso torna-se um valioso meio para gerar em tempo real os mapas de distribuição de luminâncias (SPASOJEVIAC; MAHDAVI, 2003; LARSON, 2004).

A caracterização da quantidade e a qualidade da iluminação natural são essenciais para avaliar o potencial dos edifícios em relação ao usuário, ao conforto visual e à economia de energia. São poucos os procedimentos fotométricos precisos



usados pelos projetistas e pesquisadores (MOORE, 1984; SZOKOLAY, 2004). Mas é a determinação precisa da luminância que dá ao projeto maior qualidade na avaliação da iluminação natural, e o uso do mapeamento por fotografia digital traz vantagens para sua determinação, pois é rápido, integral e conveniente para a caracterização do seu registro (BERRUTTO, 1995; HOWLETT; HESCHONG; MCHUGH, 2007).

## **2.4. Mapeamento digital para avaliação da iluminação natural**

Embora a bibliografia traga indicações sobre a importância das relações de luminâncias entre diversos planos visuais, como observado em Lechner (2001), seu mapeamento e posterior representação não são das tarefas mais fáceis. Dependendo da interação entre a superfície e as fontes luminosas, a luminância pode variar pontualmente, caracterizando, dessa forma, a impossibilidade de levantar valores médios por unidade de área.

A qualidade da iluminação depende, entre outros fatores, da distribuição de luminâncias, pois complementa o espaço ao conferir ordem, dinâmica, ritmo e equilíbrio. O processamento da imagem digitalizada permite desenhar a distribuição da luz por todo o espaço, adicionando informações até então inacessíveis pelas técnicas de modelagem que utilizam sensores fotoelétricos pontuais, e torna possível a produção do mapeamento digital de luminâncias de maneira rápida e com significativa precisão (REINHARD et al., 2002). Objetivando obter o mapeamento digital para avaliar a iluminação natural, será desenvolvida nesta seção uma abordagem das técnicas utilizadas para gerar os mapas digitais de luminâncias. Essas técnicas utilizam as imagens de alta faixa dinâmica e a fotometria digital para processar as imagens.

### **2.4.1. Fotometria digital**

A fotometria é definida pela CIE como a medição da radiação em função da resposta visual humana em uma porção visível do espectro, com aproximadamente comprimentos de onda entre 394 a 760 nm (nanômetro). É através da fotometria que se pode mensurar a luz do ambiente luminoso proveniente de uma fonte luminosa, permitindo obter um conjunto preciso de dados quantitativos da iluminação (MAAMARI; FONTOYNONT, 2006).

O fotômetro é o instrumento capaz de medir as quantidades fotométricas e, em algumas câmeras fotográficas digitais, está acoplado aos sensores Charge-Coupled Device (CCD) para caracterizar a relação entre a luz registrada em cada *pixel* de uma imagem e sua luminância. O sensor CCD é um dispositivo eletrônico de carga elétrica acoplada em um semicondutor com a propriedade de transferir, unir e condensar os pontos sensíveis à luz. A imagem é apresentada por um campo visual orientado pelos ângulos sólidos formados pelos diversos pontos (*pixels*) (KONDO; IWATA; KIMURA, 1997; CABELLO, 1997; DILAURA, 2002).

É essencial usar a tecnologia dos sensores CCD para o mapeamento das luminâncias e avaliar suas relações visuais com as edificações para diferentes condições de céu. A tecnologia de máquinas digitais CCD simplifica a determinação da luminância. O que era uma medida tediosa de se obter, por ser alcançada somente ponto a ponto através de luminancímetros, agora possibilita caracterizar o ambiente visual com rapidez e em detalhes. Porém, é necessário cuidados com a projeção da imagem, com a calibração do sensor, com o intervalo de medição e com a incidência da luz do Sol (direta) para extrair os valores que assegurem avaliações com uma alta qualidade de dados (WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2006).

As câmeras fotográficas digitais CCD de precisão (figura 2.13), normalmente trabalham com um erro de  $\pm 2\%$  para medidas de luminâncias entre 0,1 e 100000  $\text{cd/m}^2$ . Elas podem ser utilizadas como instrumento fotométrico, e, a partir do auxílio de um programa computacional, as imagens adquiridas são editadas e representam a real distribuição da iluminação da cena (WIENOLD; CHRISTOFFERSEN, 2006; LUMETRIX, 2006).



Figura 2. 13 – Exemplo de câmera fotográfica digital IQCam da Lumetrix.

Com este equipamento, as imagens podem ser carregadas através de um histograma com distribuição de até 256 cores. Essa distribuição de cor é utilizada obedecendo a um comportamento definido pelas funções: linear, logarítmica, exponencial, e não estão relacionadas aos valores medidos de luminâncias, mas sim à representação de suas assinaturas espectrais, caracterizando as chamadas falsas cores. As câmeras digitais CCD têm a capacidade de modificar a abertura da íris, que é regulada mediante a intensidade da iluminação; apresentam uma projeção eqüidistante quando trabalham com lentes olho-de-peixe, nas quais as distâncias aumentam linearmente em relação ao centro de projeção. Os mapas com os dados fotometrados são apresentados pela imagem como uma matriz (linhas x colunas), relacionando, de acordo com sua precisão, mais de um milhão de dados em tempo real (DILAURA, 2002; LUMETRIX, 2006).

#### **2.4.2. Imagens de alta faixa dinâmica**

Os primeiros trabalhos visando à ampliação da faixa de luminâncias em imagens iniciaram-se na década de 1980, resultando no que se convencionou chamar de imagem de alta faixa dinâmica, “High Dynamic Range” (HDR), definida através da relação entre a maior e a menor luminância de uma imagem. Nessas imagens, partes originalmente ocultas por sombras ou por falta de contraste podem ser destacadas, sem que haja perdas nas partes mais claras, resultando numa imagem mais próxima à captada pelos olhos. Esse procedimento vem sendo aplicado no cinema e na TV para melhorar a qualidade das imagens, em especial aquelas produzidas digitalmente, como efeitos visuais e animações gráficas. Em computação, são usadas para representar valores reais de luminâncias em renderizações baseadas em imagens. A técnica tem sido apresentada como um avanço na fotografia digital e uma extensão para a criação de imagens HDR a partir de fotos digitais. Como exemplo de sua aplicação, pode-se salientar a inclusão desta prática na versão de 2006 do programa Adobe Photoshop.

A capacidade das imagens HDR permite preservar os valores de luminâncias dos *pixels* que compõem a cena e a possibilidade de serem geradas a partir de fotos digitais. Uma imagem HDR pode ser produzida pela combinação, através de programas específicos, de uma seqüência de fotos digitais de uma cena, obtidas com diferentes níveis de iluminação (em fotografia, tempos de exposições ou aberturas

diferentes), cobrindo toda a faixa dinâmica desejada (desde imagens que captam detalhes nas partes escuras a imagens que mostram melhor as partes mais claras). Na seqüência, essa imagem pode ser empregada em estudos de distribuição de luminâncias. A determinação das luminâncias é feita através da ponderação dos valores de vermelho (R), verde (G) e azul (B) de cada *pixel* com um padrão de luminâncias previamente conhecido (FARIA et al. 2007).

Existem diversos algoritmos que fazem a codificação de imagens HDR, criando vários padrões de armazenamento, com diferentes faixas dinâmicas e qualidades de reprodução de luminâncias. Um deles é o RGBE (*Red, Green, Blue, Exponential*). Ele é empregado pelo programa Desktop Radiance ao gerar seu “mapa de radiâncias”. Assim, o aplicativo Winimage desse programa, pode ser empregado para avaliações quantitativas, tanto para visualizar uma imagem HDR, como para gerar imagens com cores falsas ou com curvas de isoluminância das superfícies. A análise da qualidade da iluminação a partir de imagens HDR depende de uma adequada calibração da instrumentação empregada (câmeras digitais e programas de tratamento) e apresentam bom potencial como meio de estudar a distribuição de luminâncias (LARSON, 2004; TORRES, 2004).

## **2.5. Ferramentas de simulação da iluminação natural**

Em meio aos projetos de edificações, os profissionais que estudam a incidência da luz natural em interiores necessitam de informações que auxiliem em suas tomadas de decisão. O papel da simulação da iluminação natural é prever tal fenômeno de maneira eficaz, estimar a propagação da luz através de modelos que possam caracterizar sua intensidade, representar o comportamento da distribuição da iluminação das zonas de ofuscamento e da penetração direta do Sol (ROY; GEOFFREY, 2000).

Cabe às ferramentas de simulação assemelhar a visualização do ambiente à realidade. Elas têm sido classificadas como ferramentas simples, computadorizadas e desenvolvidas através de modelos físicos. O desenvolvimento de um procedimento de simulação auxilia o especialista da área nas diferentes etapas do projeto; à medida que

evolui, o processo decisório vai se tornando mais complexo e cabe ao projetista adequar a ferramenta às suas necessidades (MAAMARI et al., 2003).

### **2.5.1. Ferramentas de simulação simplificadas**

As ferramentas simples são caracterizadas pela utilização de diagramas, tabelas, formulações matemáticas simplificadas, todas capazes de permitir aos profissionais avaliar as idéias preliminares do projeto. As ferramentas simples são importantes no desenvolvimento do projeto da edificação, porém, não podem ser usadas para avaliar de forma detalhada os sistemas arquitetônicos mais complexos (ASCHEHOUG, 2000).

### **2.5.2. Ferramentas de simulação computadorizadas**

As ferramentas de simulação computadorizadas unidas a aplicativos específicos de desenho (CAD) permitem desenvolver um projeto rico em detalhes, principalmente em relação à geometria e ao traçado do projeto. A modelagem matemática utilizada no processo de simulação recorre a dois algoritmos, conhecidos como “radiosidade” e “traçado do raio”.

O método da radiosidade analisa as trocas de energia luminosa entre superfícies consideradas perfeitamente difusas (que distribuem a luz refletida igualmente em todas as direções). O procedimento geralmente é caracterizado por uma análise matemática que discretiza um meio contínuo em pequenos elementos. O procedimento trata o modelo de análise a partir da definição de suas propriedades físicas e geométricas.

O método do traçado do raio analisa o percurso de uma partícula luminosa, de sua emissão até sua absorção, ou vice-versa, sendo aplicado na análise dos fenômenos especulares das trocas luminosas. Seu método de abordagem depende do ponto de observação do modelo de análise. O conceito básico é que o observador vê um ponto em uma superfície como resultado da interação entre a superfície, naquele ponto, com os raios emanados de qualquer lugar da cena, seja através da iluminação

direta de uma fonte, seja por reflexão ou refração na incidência de outras superfícies (WARD, 1998).

Conforme relatam Roy (2000) e Maamari et al. (2003), certos algoritmos poderão ser mais precisos em alguns aspectos da propagação da iluminação, ou podem não levar certas leis físicas em consideração, provando que uma escolha consciente de um programa de iluminação que satisfaça as necessidades específicas do usuário não é um assunto simples, sendo indispensáveis alguns esforços adicionais nessa direção.

A utilização de ferramenta de simulação auxilia a descrição da distribuição da iluminação no interior de uma edificação e contribui para que seu aproveitamento substitua as fontes de iluminação artificial. A determinação segura da disponibilidade da luz natural, em ambientes fechados, requer modelos precisos de distribuição de luminância do céu (SPASOJEVIAC; MAHDAVI, 2005).

Ferramentas computacionais apresentam também a vantagem de estarem aliadas a outras tecnologias, como, por exemplo, a fotogrametria digital, que permite de forma rápida e precisa a reconstrução de modelos tridimensionais do meio urbano. O processo dá condições, por exemplo, de analisar o projeto de iluminação natural baseado em reais e complexas obstruções externas. Imagens aéreas ou de satélites, rastreadores de imagens de céu e outros, também podem ser citados como tecnologias promissoras de apoio ao projeto (NIKIFORIADIS, 2003).

### **2.5.3. Modelos físicos em escala reduzida submetidos em ambientes de exposição real e teórico**

Os modelos físicos são utilizados para representar o comportamento luminoso da edificação de uma maneira simples e objetiva. Retratam a *performance* da iluminação próxima à realidade, pois, uma vez que o comprimento de onda da luz é muito pequeno em comparação às dimensões de uma edificação, seu comportamento não é significativamente afetado pelo efeito de escala. Essas ferramentas podem se beneficiar dos ambientes de exposição de luminância controlada, especificamente o simulador de céu artificial, bem como sob reais condições de céu. Os modelos

permitem um estudo do desempenho, propagação, transmissão e reflexão da iluminação e análises qualitativas do projeto da edificação (JARVIS; DONN, 1997).

Segundo Cannon-Brookes (1997) e Thanachareonkit, Andersen e Scartezzini (2005), quando os modelos em escala são executados com níveis recomendados de cuidados, em relação à refletância das superfícies, orientação e características das janelas, podem ser precisos e importantes para as análises do comportamento da iluminação. No entanto, cabe ressaltar que, sem a devida precisão na escala, nas características construtivas do modelo e expostos em um céu claro ou encoberto, podem levar a discrepâncias superiores a 25%.

Os testes de iluminação com modelos físicos em escala reduzida podem ser desenvolvidos sob céu real ou sob céu artificial. Para avaliações qualitativas, os testes sob céu real são recomendados pela distribuição das suas luminâncias, reprodução pelas cores e a qualidade que a luz proveniente da abóbada celeste apresenta. Para avaliações quantitativas de iluminação, as condições de variabilidade do céu podem afetar consideravelmente o levantamento de dados de iluminação no interior das maquetes. A variabilidade das luminâncias medidas da abóbada celeste pode ser igual ou superior a 15%, mesmo em dias aparentemente idênticos (MOORE, 1984).

Evans et al. (1997), valendo-se de trabalhos com modelos físicos em escala reduzida, mencionou que o céu artificial é utilizado para examinar e comparar os efeitos de vários elementos de projeto, como por exemplo, os padrões de aberturas, zonas de iluminação e as propriedades dos materiais. Ainda se propõe a caracterizar a quantidade e a distribuição da luz natural em um espaço da edificação sob condição de céu encoberto.

Por serem ambientes com iluminação controlada, os céus artificiais complementam o desenvolvimento de avaliações quantitativas de iluminação natural. Esses ambientes têm sido desenvolvidos em centros de pesquisa e escolas de arquitetura para aplicações acadêmicas e profissionais. Existem diversos modelos de céus artificiais e podem ser classificados quanto à sua forma, em hemisféricos e retangulares (NAVAAB, 1996; MOORE, 1984; COOKSY et al., 1991; ABNT, 2004):

- Céu hemisférico (domo): o céu hemisférico pode simular a luminância do céu de duas formas:
  - reflexão em superfície refletora da luz projetada por uma série de lâmpadas posicionadas ao redor da base;
  - conjunto de lâmpadas espalhadas pela superfície do domo, com intensidade controlada, permitindo a fácil incorporação da luz solar direta pelo controle individualizado da intensidade das lâmpadas de acordo com a posição do Sol;
- Céu retilíneo (caixa de espelhos): a caixa de espelhos integra um forro plano, luminoso, com paredes espelhadas para criar um horizonte infinito por múltiplas reflexões; desta forma, simula apenas a distribuição de céu encoberto.

Apesar de sua utilidade no processo de medições com modelos, céus artificiais apresentam normalmente grandes dimensões, são onerosos e exigem calibração e manutenção apropriadas. Neste estudo, será dada ênfase ao céu retangular do tipo caixa de espelho, utilizado ao longo do procedimento metodológico.

#### **2.5.4. O céu artificial retangular do tipo caixa de espelhos**

O céu artificial é uma ferramenta para simular o comportamento da iluminação no desenvolvimento do projeto da edificação. Ele apresenta um ambiente controlado de exposição e distribuição de luz, com iguais valores em todas as direções azimutais, aumentando a luminância do horizonte para o zênite em uma relação de três vezes.

Como pode ser observado pela figura 2.14, o céu artificial é um volume cúbico, com um forro translúcido e iluminação artificial superior, fechado em suas quatro paredes com espelhos verticais, reproduzindo, de forma aproximada, a distribuição do céu encoberto definida pela Commission Internationale de l'Eclairage (CIE, 1994).

Segundo Evans et al. (1997), as análises quantitativas com modelos físicos podem apresentar dificuldades no estudo sob condições de céu real, pela alta variabilidade de luminâncias que a abóbada celeste apresenta, especialmente com um céu parcialmente encoberto. Condições de céu completamente claro e completamente



encoberto são recomendadas para fazer avaliações com maquetes, mas essas situações introduzem nos estudos uma alta dependência do fenômeno ambiental.



Figura 2. 14 – Céu artificial tipo caixa de espelho.  
Fonte: Laboratório de Conforto Ambiental da UFSC.

Cooksy et al. (1991) retrata que o céu artificial deve ser usado como uma ferramenta pedagógica com o propósito de levar aos estudantes o conceito das relações construtivas dos elementos de projeto e da iluminação natural. Entretanto, esse ambiente tem que ser verificado para que possa representar as características de distribuição de luminâncias semelhantes a um céu encoberto real. González (2007) apresentou um método para avaliação e calibração de um céu artificial para os estudos da iluminação natural com modelos físicos em escala reduzida.

Mardaljevic (2002) mencionou que o céu artificial pode ser usado para simular o comportamento da iluminação natural, pois representa um ambiente controlado com luminância da abóbada celeste padronizada, sem a presença do Sol e sem a variação de orientação para o cálculo dos fatores de iluminação natural.

## **2.6. Considerações a respeito da utilização de ferramentas de simulação de iluminação natural**

Uma pesquisa recente na *internet*, desenvolvida por Reinhart e Fitz (2006), revelou que 91% de um total de 185 profissionais trabalham com ferramentas de

simulação de iluminação natural. Os 9% que não usufruem desse recurso culpam a falta de informação e a negligência dos clientes em não pagar pelo custo adicional do uso dos simuladores. A pesquisa foi administrada no período entre 2 de dezembro de 2003 e 19 de janeiro de 2004. Os participantes representavam 27 países, predominantemente o Canadá (20%), Estados Unidos (20%), e Alemanha (12%). As profissões informadas variaram de consultores de energia, engenheiros (38%), arquitetos e desenhistas (31%) a pesquisadores (23%). Foram identificados, através de um questionário, os perfis dos profissionais que utilizam a simulação nos projetos de edificações: um primeiro, relacionado aos profissionais que trabalham somente com protótipos (a) e um segundo, relacionado àqueles que trabalham diretamente com os projetos das edificações (b). A figura 2.15 ilustra os resultados da pesquisa.

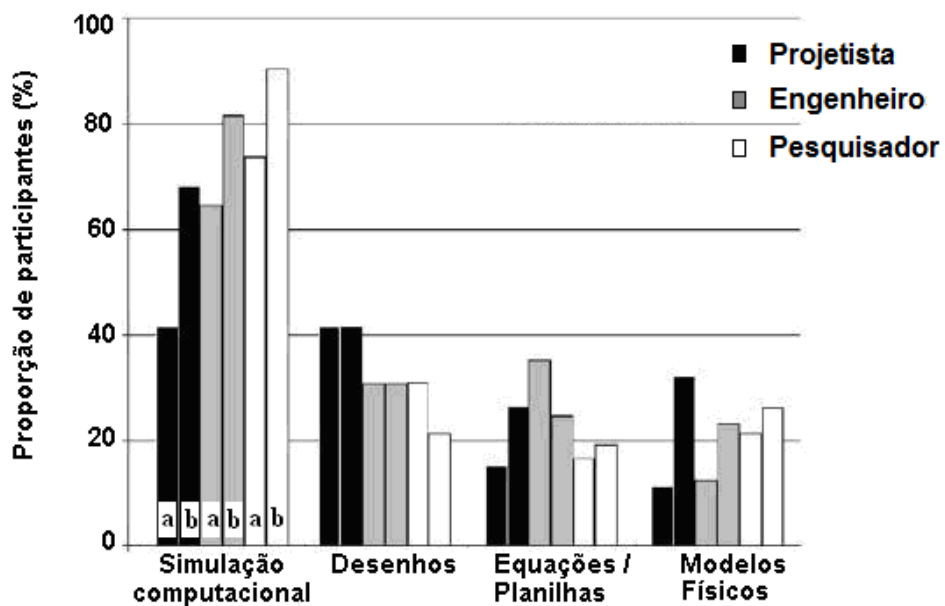


Figura 2.15 – Cenário de utilização das ferramentas de simulação de iluminação natural. Tipos de ferramentas de simulação utilizadas no protótipo (a) / projeto de edificação (b).

Fonte: Adaptado de REINHART; FITZ, 2006.

Esse estudo revelou que os profissionais “acreditam” que as ferramentas apresentam resultados precisos e utilizam a simulação computacional com maior frequência em relação aos modelos físicos e aos demais recursos para a avaliação da iluminação natural, como a experiência profissional, plantas e *layout* da edificação, equações e planilhas eletrônicas.

Reinhart e Fitz (2006) concluíram que a razão para essas afirmações está no fato de que a simulação computacional normalmente apresenta excelente qualidade visual, facilidade de análises através de gráficos e relatórios, modelagens complexas e facilidades na mudança de parâmetros construtivos ao longo das etapas dos projetos.

Para analisar se uma ferramenta computacional está representando de forma significativa os fenômenos físicos da iluminação, torna-se necessário desenvolver um processo de validação, caracterizado por um método que possa demonstrar suas convergências e divergências em relação ao real e que propicie ao profissional a sustentação necessária para a implementação de estratégias adotadas no projeto da edificação (MARDALJEVIC, 2000b; CIE, 2006).

## **2.7. Validação das ferramentas de simulação de iluminação natural**

O estabelecimento de um padrão de validação que assegure a confiabilidade nos simuladores ainda encontra uma série de dificuldades. Esta consideração é feita através de duas análises: a primeira, criteriosamente técnica, enaltece a falta de medições em tempo real que sirvam como parâmetro de verificação da simulação, incluindo a caracterização completa da fonte luminosa e a propagação da iluminação através de suas componentes refletidas externa e internamente; a segunda refere-se ao momento em que levamos a discussão para o projeto e as necessidades dos profissionais. Nesta situação, os anseios pela utilização dessas ferramentas não são os mesmos. Eles podem variar de acordo com as especificações do projeto e a sua utilidade. Assim, para usuários que estão interessados em desenvolver as primeiras idéias de um projeto, por exemplo, em relação aos aspectos geométricos de aberturas ou na avaliação qualitativa da iluminação, uma síntese realística, sem necessariamente representar de maneira precisa a realidade, pode ser suficiente. Para eles, o questionamento quantitativo da ferramenta não é relevante.

Os estudos de Maamari et al. (2006) e Maamari (2000) revelam que a confiabilidade nos simuladores é essencial quando se deseja analisar o conforto visual dos ocupantes ou a eficiência energética da edificação. Na literatura, existem basicamente três tipos de validação de programas, identificados como validação analítica; validação experimental; validação comparativa. São caracterizados da seguinte maneira:

a) Validação analítica: Os trabalhos de validação baseados na utilização de referências analíticas cobrem domínios limitados da propagação da luz. Em geral, são aplicados nos casos simplificados para avaliar uma suposição teórica nas etapas preliminares do projeto ou para testar um determinado parâmetro (e.g. iluminância de uma zona ou em um ponto do ambiente) referente à propagação da luz durante o procedimento de simulação.

b) Validação experimental: Neste tipo de validação, os resultados das iluminâncias e/ou luminâncias simuladas são comparados aos medidos em modelos físicos ou em ambientes reais, considerando as incertezas inerentes ao processo de medição.

As fontes de erros introduzidas na descrição do relatório experimental são reproduzidas numericamente, e a importância desses parâmetros reduzem possíveis equívocos cometidos pelos profissionais durante a execução do projeto da edificação.

c) Validação comparativa: A validação comparativa é uma comparação de resultados de várias simulações computacionais desenvolvidas entre programas. Esse tipo de validação é o mais realizado e pode ser feito se houver uma referência analítica ou um programa de referência já validado experimentalmente. A vantagem dessa tipologia é dar aos usuários a possibilidade de escolher o melhor entre vários programas, de acordo com o seu desempenho. Porém, os resultados das comparações requerem um máximo de transparência, principalmente em relação às informações sobre a complexidade de cada procedimento ocorrido na simulação (divisão da abóbada celeste, fracionamento das superfícies, detalhamento da geometria, entre outros) e sobre o tempo de cálculo para adquirir os resultados.

Com a necessidade de estabelecer informações sobre o desempenho dos programas de simulação e auxiliar os usuários a avaliar sua precisão, foram propostos alguns procedimentos para validação de ferramentas de simulação a partir do relatório CIE n. 171/2006. O documento sugere que os cenários usados para validar um programa sejam projetados com um número limitado de parâmetros, realçando-se um aspecto particular da propagação da iluminação, a fim de identificar com maior

facilidade as vantagens e as desvantagens do programa. Esses parâmetros podem ser divididos em três grupos principais:

1. A descrição da fonte luminosa e os cálculos para sua propagação.
2. A transferência da iluminação por aberturas (vidros, dispositivos de proteção solar, entre outros).
3. As inter-reflexões entre diferentes tipos de materiais.

O processo de validação preferencial preconizado pelo relatório é o experimental, porém o alto custo e o ajuste dos equipamentos fotométricos nos modelos físicos e em cenários reais revelam-se como principais problemas para sua adequação. Para validar o processo de simulação, é necessário utilizar modelos com refletâncias conhecidas. O objetivo é limitar e minimizar os erros devidos à propagação indireta da luz dentro do ambiente. A fotometria imposta para esse tipo de validação deve caracterizar a geometria do cenário, a fonte e a propagação da iluminação natural.

As recomendações da CIE n. 171/2006, em relação aos aspectos geométricos, baseiam-se em configurações simples (por exemplo, quartos retangulares sem obstruções internas). Ao avaliar os cálculos de *daylight factor*,<sup>4</sup> deve-se usar só uma abertura e preferencialmente realçar a influência de um determinado parâmetro. Essa descrição deve incluir a posição exata e as características do elemento de passagem da iluminação.

Entre outras sugestões, o relatório salienta:

- São preferidas superfícies com reflexão perfeitamente difusa. A refletância das superfícies deve ser medida em uma esfera integradora ou por comparação de luminância com dois cartões de refletâncias conhecida (CIE, 1998).
- Quando uma simulação assume que as reflexões de superfícies são idealmente difusoras, essa suposição deve ser verificada e justificada com medidas de

---

<sup>4</sup> DF é a razão entre a iluminação natural num determinado ponto num plano horizontal interno em função da luz recebida direta ou indiretamente da abóbada celeste, com uma distribuição de luminâncias conhecida, e a

luminância (em direções diferentes) em cima de uma amostra do material da superfície.

- Em cenários onde a simulação é comparada com ambientes reais, é preferível evitar distribuições de luminâncias complexas, como vegetação, sombras irregulares e prédios vizinhos.

Em relação aos pontos de análise, é importante minimizar os erros relacionados a correções do efeito redutor do ângulo de incidência, evitar o posicionamento do sensor de tal maneira que a medida aponte para linhas com sombras, onde qualquer variação na posição do sensor pode envolver uma variação significativa na iluminância recebida.

Deve-se também definir um número suficiente de pontos de medida para caracterizar o cálculo da iluminância do ambiente de estudo e evitar áreas de superfície do quarto com reflexões especulares sem controle.

Relativamente às recomendações gerais, o relatório CIE n. 171/2006 dispõe que:

- É importante manter as superfícies internas com características fotométricas conhecidas (refletância e especularidade). Se uma variação considerável for observada, as superfícies devem ser restabelecidas e um novo ensaio fotométrico de avaliação deve ser registrado (refletância em particular).
- Com aberturas de luz natural envidraçadas, realizar medidas com e sem vidro para separar o erro devido à transmissão direcional do vidro relacionada à iluminância direta e as inter-reflexões de superfície.
- É importante observar as variações da distribuição de luminâncias externas no mesmo tempo do processamento das medidas internas, incluindo a influência do entorno.

---

iluminação num plano horizontal externo, produzida pela abóbada celeste totalmente desobstruída, expressa como uma percentagem (ABNT, 1999).

- Para uma descrição precisa da distribuição de luminância são necessários o uso de luminancímetros, rastreadores de céus com campo hemisférico de visão ou mapeamento digital.

## 2.8. Parâmetros descritivos para análise dos sistemas de medição

Os erros geralmente podem ser classificados em duas categorias: sistemáticos e aleatórios. Os erros sistemáticos correspondem à parcela previsível do erro, correspondente ao erro médio. São os erros ocorridos em razão das limitações dos instrumentos.

O erro aleatório é a parcela imprevisível do erro, ou seja, quem promove a ação no processo de medição é o responsável pelas repetições levarem a resultados diferentes (CIE 171/2006).

Devem ser feitos esforços para se obterem estimativas precisas para cada fonte de erro. A estimativa de cada erro deve ser informada como + / - uma porcentagem relacionada ao valor medido, caracterizando as incertezas do processo de medição. O erro global calculado (MONTGOMERY; RUNGER, 2003) usa a seguinte equação:

$$EG = \sqrt{\Sigma erro^2} \quad \text{[Equação 2.6]}$$

onde:

EG = erro global estimado;

$\Sigma$ erro = somatório dos erros aleatórios.

A partir das descrições das fontes potenciais de erro, e quando houver possibilidade, os métodos devem considerar e calcular suas magnitudes. Desta maneira, os resultados seriam informados a partir da indicação (I) mais a correção ou erro sistemático (C) e mais ou menos o erro global (EG). A equação 2.7 define os resultados de medição (RM) da seguinte maneira:

$$RM = I + C \pm EG \quad \text{[Equação 2.7]}$$

Deve-se considerar e corrigir nos trabalhos com simulação da iluminação natural as medidas com erros sistemáticos. Entre as principais, podemos citar a variação de leitura nos equipamentos em razão da temperatura ou das flutuações de energia, ensaios com as fotocélulas, incluindo a correção do efeito co-seno.

Já, as medidas com erros aleatórios podem ser exemplificadas através das instruções negligenciadas durante as medições com os instrumentos, pela falta de orientação, instabilidade e imprecisão da fotocélula, e pela determinação indevidamente especificada da refletância superficial (CIE n. 171/2006; MAAMARI, 2004).

Erros de sensibilidade espectrais são dependentes da fonte luminosa e normalmente estão perto de 1% (HAYMAN, 2003). Os erros nos sensores e equipamentos são informados através de especificações técnicas de cada fabricante.

## **2.9. Conclusão**

A iluminação produzida pelo céu depende da distribuição de sua luminância. Para descrevê-la, a maioria dos simuladores emprega modelos padronizados de céu, representados através de equações matemáticas e estatísticas, o que vale caracterizá-la sob condições médias de disponibilidade de luz. Esse fato gera discrepâncias entre a simulação e a avaliação da iluminação natural em ambientes reais. Por esse motivo, as validações comparativas entre programas devem ser utilizadas quando se tem um programa computacional de referência, ou seja, que permita descrever com precisão a distribuição de luminâncias e determinar uma base de dados adequada à sua representação. Sem essa prerrogativa, o que se recomenda são as sugestões da CIE n. 171/2006 para a validação comparativa de programas computacionais.

A validação experimental reúne condições para validar um programa computacional, pois é através desse procedimento que é possível considerar a fonte luminosa de maneira precisa, o que inclui a abóbada e as reflexões externas da edificação, ambas medidas no mesmo instante em que é analisada a distribuição da iluminação em um ambiente real. Mardaljevic (2000) estabeleceu no procedimento de validação do programa computacional Radiance, discrepâncias entre a simulação da iluminação em modelos teóricos e ambientes reais na ordem de 10% a 25%, porém sem avaliar na simulação as reflexões externas do ambiente real.



Os estudos desenvolvidos por Spasojeviac e Mahdavi (2005) demonstram que a utilização da câmera fotográfica com sensores CCD apresenta-se como uma alternativa de grande potencial para explorar o comportamento da distribuição de luminâncias da fonte. Ela é capaz de caracterizar sua distribuição e servir como base de dados à simulação computacional. O trabalho segue com a descrição do processo metodológico proposto para a avaliação das ferramentas de simulação de iluminação natural.

## **3. Método de trabalho proposto**

### **3.1. Introdução**

Como observado no capítulo 2, por estimar a fonte luminosa através de modelos padronizados de céu e não considerar as implicações oriundas da reflexão do entorno, os programas computacionais e os modelos físicos em escala apresentam limitações ao simular a distribuição da iluminação natural. Partindo da solução de suas restrições, propõe-se um método para avaliar o desempenho das ferramentas de simulação de iluminação natural.

Neste capítulo, são apresentados os principais aspectos do processo metodológico proposto. Inicialmente, descrevem-se os ambientes de exposição utilizados na pesquisa, caracterizados pelo céu artificial de tipo caixa de espelhos, pela abóbada celeste e entorno edificado. Na seqüência, é feito um detalhamento do ambiente real, do modelo físico em escala, assim como do mapeamento digital de luminâncias. Para finalizar, são realizadas uma descrição do programa computacional submetido ao método de validação, e uma dos equipamentos fotométricos empregados.

### **3.2. Proposta para um céu artificial de tipo caixa de espelhos**

Propõe-se nesta seção, validar experimentalmente o procedimento de simulação computacional, utilizando o mapeamento digital de luminâncias da abóbada do céu artificial.

Neste contexto, emprega-se um sistema fotométrico (detalhado na seção 3.5) capaz de caracterizar a fonte de luz de maneira integral e instantânea. Os dados de luminâncias gerados são utilizados como entrada para a simulação teórica e inseridos no algoritmo do programa; assim, as iluminâncias são calculadas no interior de um modelo digital. O processo compara o comportamento luminoso medido por sensores fotoelétricos no modelo físico (referência) com o obtido por simulação computacional no interior do modelo de mesmo desenho da maquete. Esse procedimento permite verificar as discrepâncias entre eles e validar o simulador computacional.

Nessa fase do trabalho, o modelo físico em escala reduzida é considerado como referência, porque serve como indicação para verificar o desempenho dos processos teóricos de simulação de iluminâncias.

As etapas para realizar a proposta de trabalho a partir de distribuições de luminâncias do céu artificial assim podem ser resumidas:

- Caracterização digital da distribuição de luminâncias do ambiente (abóbada do céu artificial).
- Inserção da base de dados gerada na ferramenta de simulação computacional exposta ao método.
- Realização do procedimento de medição de iluminâncias (com sensores fotoelétricos) no interior do modelo utilizado como referência.
- Análise comparativa dos valores simulados e medidos, avaliação das suas discrepâncias e validação da ferramenta de simulação computacional.

A Figura 3.1 demonstra de maneira esquemática a proposta de trabalho em um céu artificial.

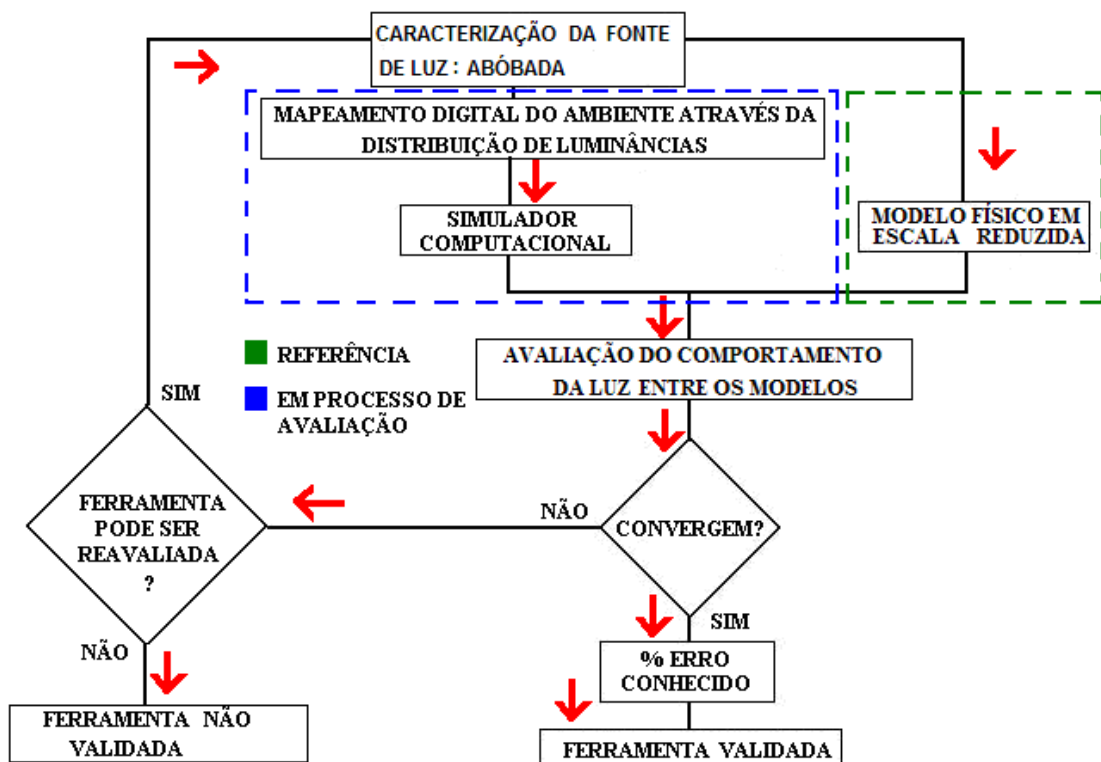


Figura 3.1 – Representação esquemática da proposta metodológica em céu artificial.

### **3.3. Proposta para um ambiente de exposição real**

Este procedimento é semelhante ao descrito na seção 3.2.1. A principal diferença está na verificação da contribuição e influência dos elementos de reflexão exteriores nos processos de simulação. A proposta para um ambiente de exposição real, o ambiente de estudo é usado como referência enquanto o simulador computacional e o modelo físico em escala reduzida apresentam-se, respectivamente, em processo de validação e avaliação.

Assim, o mapeamento digital da fonte é utilizado como entrada para a simulação teórica e inserido no algoritmo do simulador. O processo permite obter as iluminâncias no interior do modelo teórico. Simultaneamente ao mapeamento digital de luminâncias, mede-se por meio de sensores fotoelétricos a iluminância no ambiente real e no modelo físico em escala. Os resultados são comparados aos da simulação computacional.

As etapas para realizar o processo metodológico assim podem ser resumidas:

- Caracterização da distribuição de luminâncias da fonte utilizando os recursos da fotografia digital.
- Realização da medição experimental com os sensores fotoelétricos simultaneamente no ambiente real e no modelo físico em escala reduzida.
- Desenvolvimento da simulação computacional com os dados de luminâncias obtidos através do mapeamento digital.
- Análise comparativa das iluminâncias simuladas no interior dos modelos com as medidas no ambiente real.
- Validação e avaliação das ferramentas de simulação submetidas ao processo metodológico.

A figura 3.2 demonstra de maneira esquemática a proposta de trabalho apresentada nesta seção.

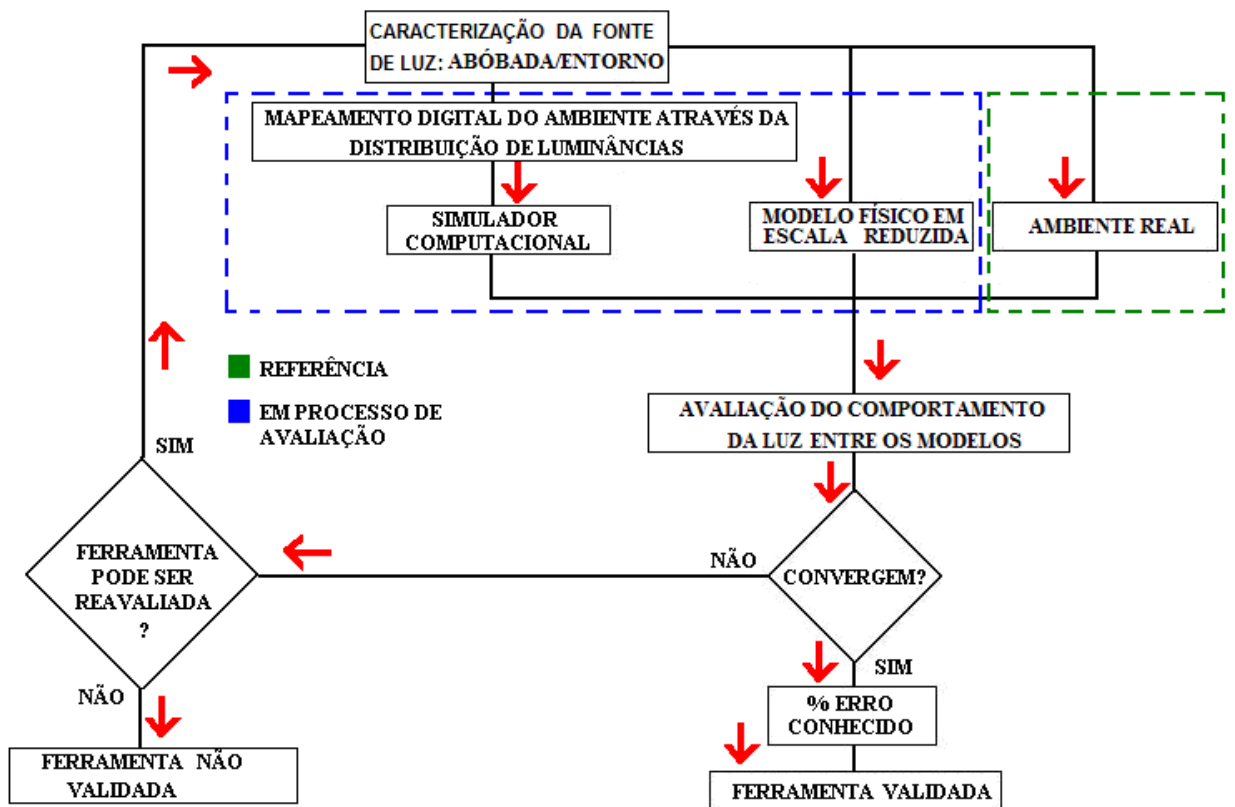


Figura 3.2 – Representação esquemática da proposta metodológica para um ambiente de exposição real.

### 3.4. Características dos modelos

Os modelos utilizados nessa pesquisa estão relacionados a um ambiente real, um modelo físico em escala reduzida e um modelo digital. Suas principais características estão detalhadas como segue.

#### 3.4.1. Ambiente real

A pesquisa foi realizada no prédio da sede do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, situado no *campus* da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), na cidade de Florianópolis. A figura 3.3 ilustra sua localização.



Figura 3.3 - Localização do prédio da arquitetura no *campus* da UFSC.  
Fonte: [www.ufsc.br](http://www.ufsc.br).

A figura 3.4 identifica o prédio e o arranjo de suas janelas orientadas para o sul. Na janela superior, à direita, localiza-se o ambiente real. Na esquerda, outro ambiente, com sua abertura destinada a posicionar o modelo físico em escala.



Figura 3.4 – Localização do ambiente real e o arranjo de suas janelas.

O plano vertical externo observado das janelas está ilustrado pela figura 3.5.



Figura 3.5 – Vista panorâmica da abertura do ambiente real de estudos.

A cobertura do prédio (imediatamente acima do ambiente real) observada na figura 3.6 é utilizada como base de medição para o mapeamento digital da abóbada celeste e do entorno.



Figura 3.6 – Base de medição de iluminação natural, cobertura do prédio.

O ambiente real, visualizado na figura 3.7 (a), tem um comprimento de 4m, largura de 2,10m, um pé direito de três metros e apresenta paredes de cor branca, piso de cor palha e teto de cor alecrim. O ambiente possui uma única janela ( $75 \times 75 \text{cm}^2$ ), disposta a 1,05m do piso, centralizada na parede frontal em relação à entrada (figura 3.7b). Localizados em uma linha central, no piso da sala, foram montados os sensores LICOR (detalhados em 3.7.1).

O primeiro sensor está disposto a um metro da janela, outro no centro da sala e o terceiro a três metros da janela. Além desses, colocaram-se dois sensores no plano vertical, com a finalidade de medir a iluminância na parede direita e esquerda da sala a uma altura de 0,75m do piso.

Parte dessas disposições segue de uma orientação da IEA (1998), que, através da Tarefa 21, sugere o posicionamento dos sensores em sistemas que utilizam luz natural. Este *layout* foi copiado para o modelo físico em escala reduzida e para o modelo digital usado no simulador computacional.

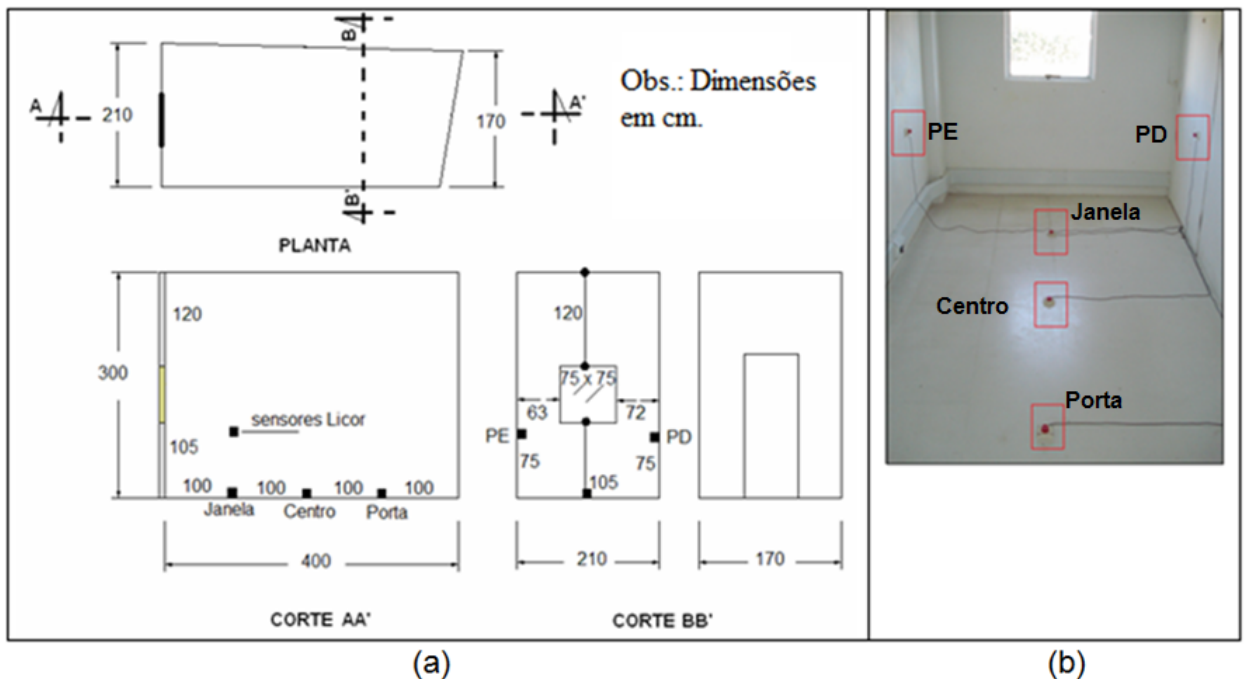


Figura 3.7 – a) *Layout* do ambiente de estudo (dimensões do ambiente real).  
b) Disposição dos sensores fotoelétricos.

### 3.4.2. Modelo físico em escala reduzida

O modelo físico foi construído em escala 1:5, de compensado, com 2 cm de espessura. Apresenta possibilidade de abertura no piso, no teto, e para os registros de fotografia, foi feita uma abertura circular no fundo do modelo. As figuras 3.8 (a), (b) e (c) ilustram seus detalhes.

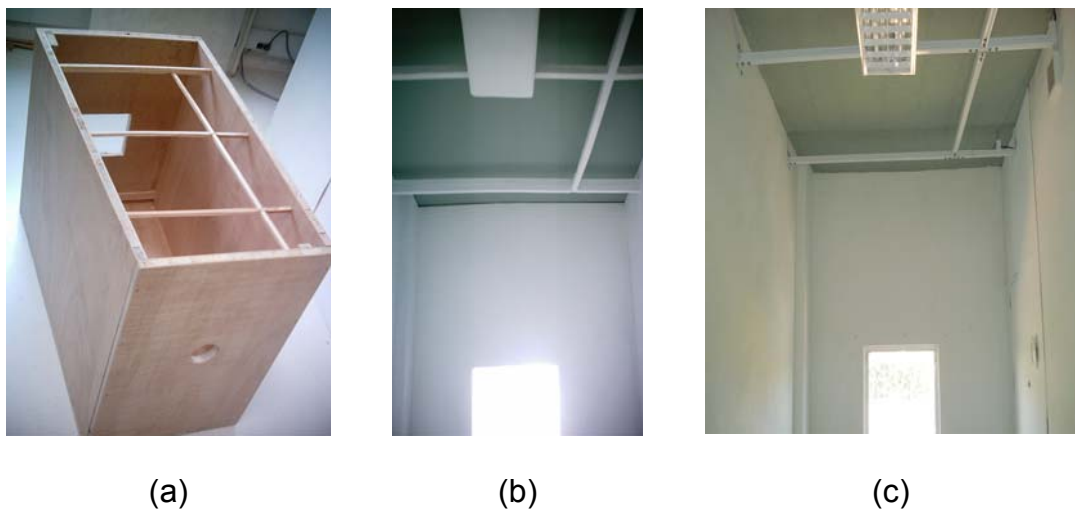


Figura 3.8 – a) Construção inicial.  
b) Detalhes construtivos da maquete (teto).  
c) Foto comparativa do ambiente real.



Essas características proporcionam total flexibilidade para a colocação dos sensores LICOR, facilitando as medições de iluminâncias no seu interior, conforme ilustração da figura 3.9.(a).

A espessura do compensado permite que os sensores fiquem embutidos e no mesmo plano do piso e da parede da maquete. Tais quais a sala de estudos, foram dispostos cinco sensores, três com espaçamentos simétricos de 20 cm ao longo do comprimento do modelo, e dois verticais (parede direita e esquerda) com uma altura de 15 cm.

A figura 3.9.(b) apresenta a maquete no céu artificial de tipo caixa de espelhos, e a 3.9 (c) quando submetida ao céu real e entorno natural. Nesta segunda situação, o modelo é colocado em um recinto fechado de 2,5 x 1,3m, em uma janela ao lado do ambiente de estudos, nivelado e projetado para fora do prédio, com a finalidade de aproximar o ângulo de visão do exterior observado em ambiente real.

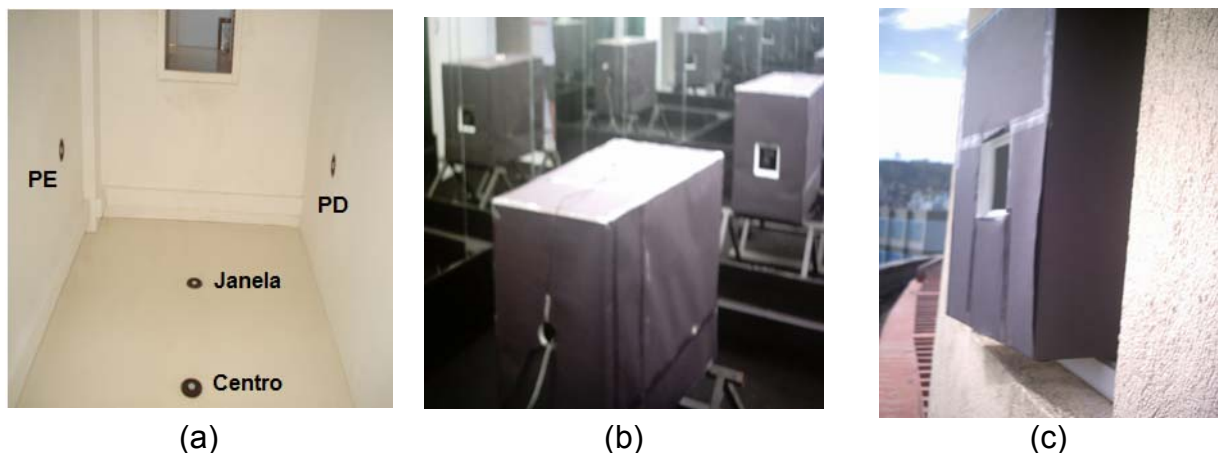


Figura 3.9 – a) Detalhe do posicionamento dos sensores no interior da maquete.  
b) Posicionamento da maquete para a medição fotométrica no céu artificial.  
c) Posicionamento da maquete para a medição fotométrica no céu real + entorno.

A maquete apresenta as paredes, o teto e o piso cobertos por tinta Suvinil com as mesmas propriedades da sala de estudo. As medições do comportamento luminoso no ambiente real e no modelo físico foram realizadas sem a presença do vidro da abertura. Esse procedimento evitou sua influência caracterizada pela transmitância e especularidade durante as simulações computacionais.

### 3.4.3. Modelo digital

O modelo digital foi produzido conforme o *layout* da sala e da maquete descrito nas seções anteriores. Foi construído em CAD e importado para o programa submetido ao processo metodológico (figura 3.10.a).

Nesta seção, serão adiantadas algumas informações sobre o programa de simulação para se compreender o desenho do modelo digital. Foi submetida a esta proposta um simulador capaz de representar o modelo sob dois aspectos: relacionado às características geométricas (espaciais) e às características físicas atribuídas às propriedades dos materiais. As características geométricas encontram-se apoiadas em um sistema de eixos cartesianos X, Y e Z. O sistema tem orientação coincidente do eixo Z+ com o zênite, o eixo X+ com a direção leste e o eixo Y+ com a direção norte. As características físicas individualizam o ambiente a partir da configuração da reflexão dos materiais.

Além dessas características, foi necessário determinar o fator de fracionamento, ou seja, a subdivisão sob a qual todas as superfícies do modelo serão divididas. Essa divisão ocorreu em pequenos triângulos, em que cada vértice desse triângulo representa um ponto, sobre o qual podem ser simulados a iluminância, a luminância ou o fator da luz do dia. Esse fracionamento caracteriza o grau de precisão da simulação, ou seja, quanto maior for o fracionamento, maiores o nível de precisão e o tempo de simulação.

O programa testado denomina-se Apolux e permite utilizar um coeficiente de fracionamento diferenciado, em que o nível de precisão da iluminação é adequado à necessidade de projeto. Nessas condições, o modelo foi constituído de 47 planos, supostos como opacos e difusores perfeitos, divididos em 5.482 triângulos (figura 3.10b).

Para a definição das distribuições de iluminâncias no plano de análise, tomaram-se, como referência, os valores dos vértices dos triângulos que coincidem com a posição dos sensores utilizados para a medição fotométrica.

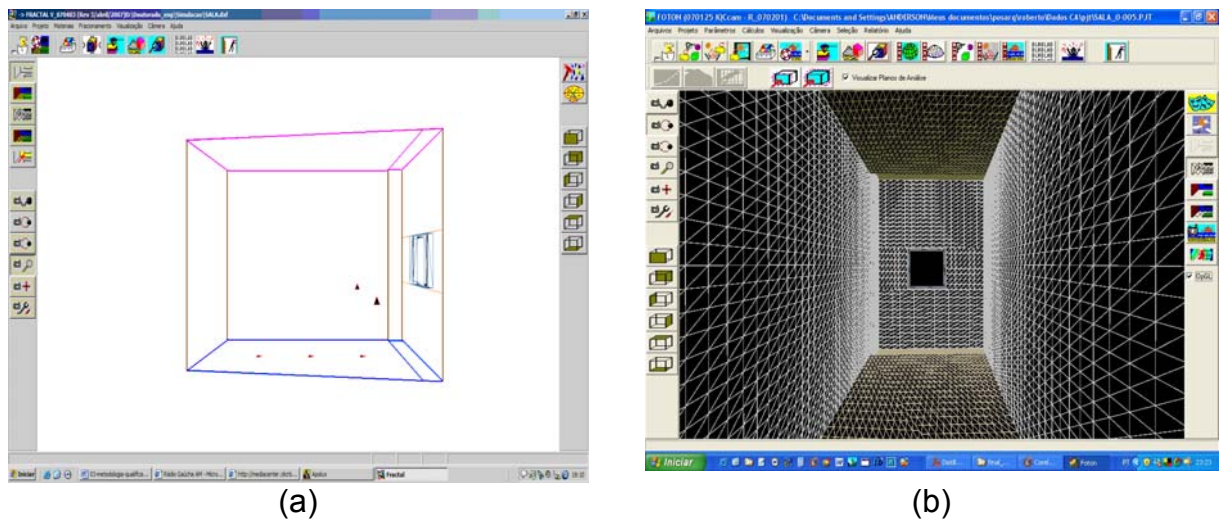


Figura 3.10a) Modelo importado do CAD para o simulador computacional.  
b) Modelo digital fracionado.

As refletâncias foram ajustadas tais quais os valores obtidos na pintura do modelo em escala reduzida e no ambiente real (detalhadas em 4.1). Foram atribuídas por uma rotina do programa e estão associadas às cores dos *layers* que são preliminarmente definidos no desenho desenvolvido no CAD (ver figura 3.11).

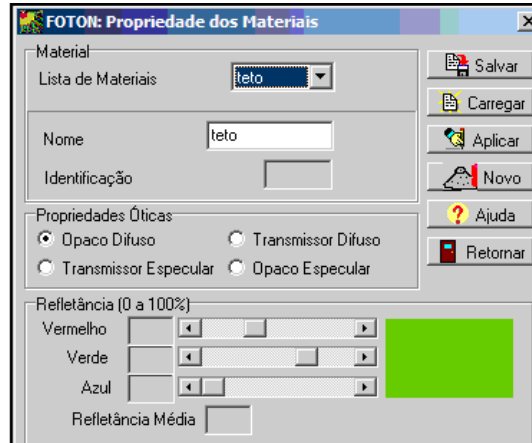


Figura 3.11 – Propriedades reflexivas dos materiais do modelo virtual.

### 3.5. O mapeamento digital de luminâncias

A câmera digital utilizada neste trabalho é denominada IQCam<sup>1</sup> Imaging Photometer – 300 (ilustrada pela figura 3.12), foi empregada como instrumento fotométrico para o mapeamento digital de luminâncias. O equipamento apresenta uma lente olho de peixe com abertura angular de aproximadamente 186 graus e permite, através do cenário digitalizado, identificar a distribuição de luminâncias em  $\text{cd}/\text{m}^2$  para

<sup>1</sup> Câmera fabricada pela empresa canadense Lumetrix: [www.lumetrix.com](http://www.lumetrix.com).

cada *pixel* da imagem. O apêndice A, seção A1.2, detalha a verificação da confiabilidade do equipamento.

O mapeamento é realizado com o auxílio de um programa proprietário de nome RT-32, onde as imagens são editadas e uma base de dados de luminância para cada *pixel* é produzida. Essa base relaciona um mapa digital de luminâncias, que representa, através de seus *pixels*, mais de um milhão de dados fotométricos.



Figura 3.12 – Câmera digital IQC 300.

O programa RT-32 ajusta-se em relação ao período, à velocidade e à precisão do registro fotométrico. Nesta pesquisa, os mapas de luminâncias são obtidos sem controle de tempo de aquisição. A cada imagem, é realizada uma análise *in loco* para verificar a presença de alterações, distorções ou de pontos com sobreposição ou subexposição de luminâncias, caracterizando, se necessário, novos ajustes. Os valores médios de luminâncias são medidos para cada grupo de três *pixels* que compõe a foto garantindo a máxima resolução possível do sistema de aquisição.

O modo de integração das imagens sofre variações através da precisão e da velocidade de aquisição. É controlado a partir de uma escala numérica de 0,25% a 5% através do sistema *Global Luminance Resolution Step*. Esse parâmetro de ajuste mostra-se com bom desempenho em uma posição intermediária. Durante o ensaio, para assegurar velocidade e precisão de qualidade, foi marcado 1% no aplicativo. A figura 3.13 mostra os parâmetros preliminares de ajustes.

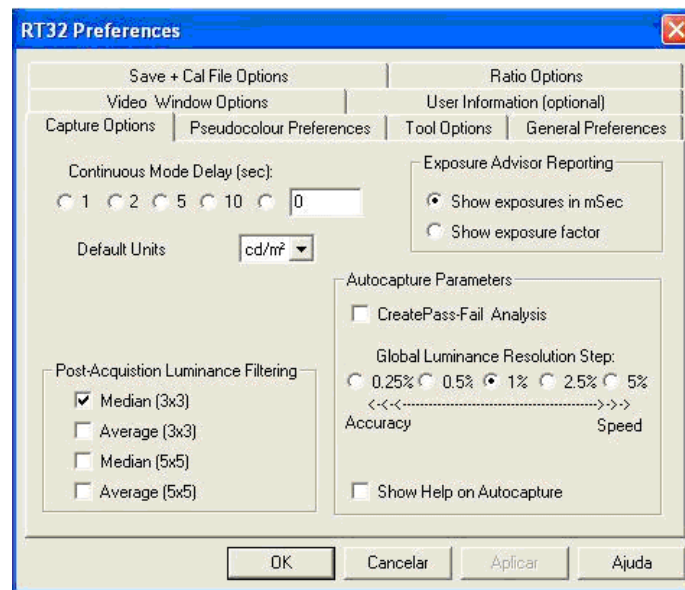


Figura 3.13 - Parâmetros de ajustes da IQC.

As imagens são carregadas através de um histograma com uma distribuição de até 256 cores. Esta distribuição é utilizada obedecendo a um comportamento definido pela função logarítmica, que apresentou os melhores desempenhos na visualização dos diferentes ambientes fotometrados. A figura 3.14 ilustra esse parâmetro de ajuste.

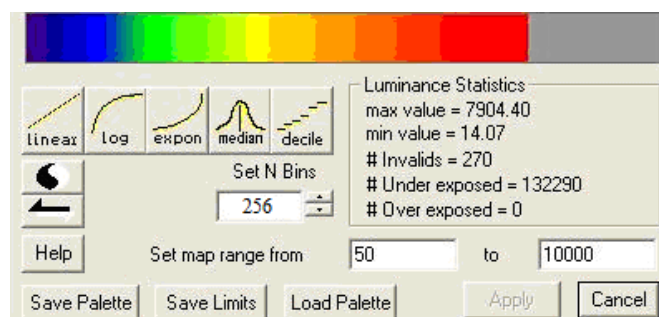


Figura 3.14 - Parâmetros para ajuste e controle da imagem fotometrada pela IQC.

A janela identificada pela figura 3.15 representa o principal ponto de controle da imagem. O aplicativo possibilita mudanças nas funções que representam o histograma de cores. Permite ao usuário promover modificações em relação ao intervalo de luminâncias fotometrados. Tem a capacidade de modificar a abertura da íris da lente, que é regulada automaticamente pelo programa mediante a intensidade de ajuste da iluminação da cena. Na IQC 300, o ajuste da abertura ou o fechamento da íris é manual, com valores de 5,6 para avaliações no céu artificial e de 16 para avaliações de exposição no céu + entorno.

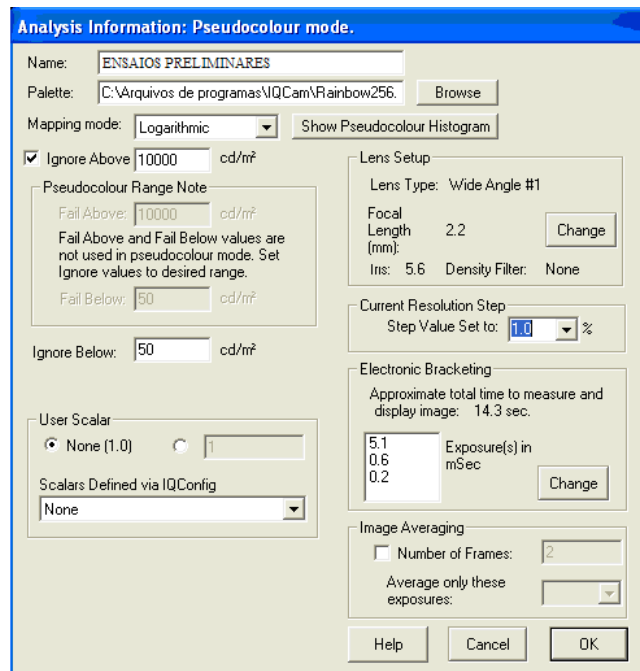
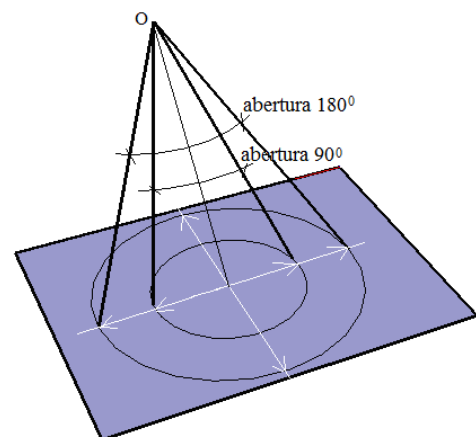
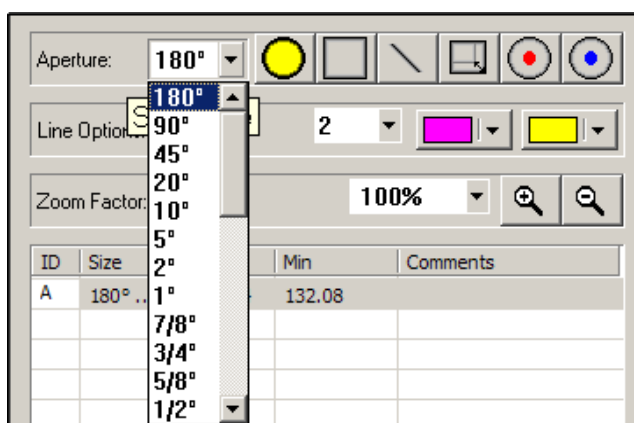


Figura 3.15 – Resumo dos parâmetros de ajuste da imagem.

O RT 32 permite, através do comando *tools*, exportar, remover e salvar, os dados que representam a distribuição de luminância da imagem em uma matriz de 1.292 linhas por 1.030 colunas. As imagens editadas em arquivos textos (\*.txt) podem gerar planilhas, gráficos e relatórios para descrever o comportamento de parte ou de toda a imagem digitalizada. As aberturas focais para recortá-la podem ser reguladas pelo programa em até 180 graus (ver figura 3.16).



(a)

(b)

Figura 3.16a) Comando para recortar a imagem através de diferentes aberturas focais.  
 b) Figura esquemática para representar as aberturas focais no recorte das imagens fotometradas.

### 3.5.1. Mapeamento digital no céu artificial de tipo caixa de espelhos

A figura 3.17 ilustra a IQC no interior do céu artificial. O equipamento permite estudar a distribuição de luminâncias de todo o hemisfério ao qual a maquete está exposta, composto pela fonte (teto do céu artificial), mais as paredes especulares, até o nível da câmera. A figura 3.18 (a) mostra a IQC no céu artificial.



Figura 3.17 – Disposição da IQC no céu artificial.

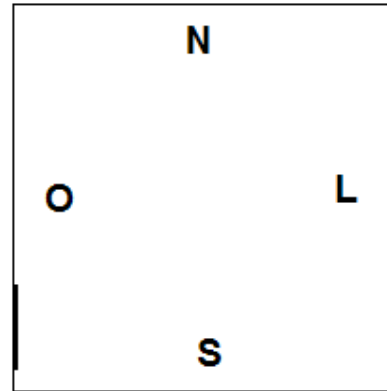
A câmera é colocada acima da maquete a uma altura de 1,25m em relação ao piso. Durante os ensaios, foi nivelada em relação ao plano de trabalho por um nível de bolha.

O trabalho de Gonzáles (2007) descreve o processo de calibração desse céu artificial tipo caixa de espelhos, onde foi comprovada uma distribuição de luminâncias seguindo o padrão da CIE para céu encoberto. Foi estabelecido um *layout* para esse ambiente e as paredes foram caracterizadas como norte, sul, leste e oeste (figura 3.18b). Esse desenho tem a finalidade de sugerir o melhor posicionamento para as maquetes, evitando-se as pequenas variações (<3%) das distribuições de luminâncias causadas pela deformação e marcas existentes nos espelhos. Nestas condições, o lado preferencial para posicionar o modelo é o norte.



(a)

Figura 3.18a) IQC no céu artificial.  
b) *Layout* do ambiente.



(b)

A imagem fotometrada pela IQC (figuras 3.19 e 3.20) confirma o comportamento luminoso do ambiente teórico, em que a luminância do zênite é aproximadamente três vezes a luminância do horizonte.

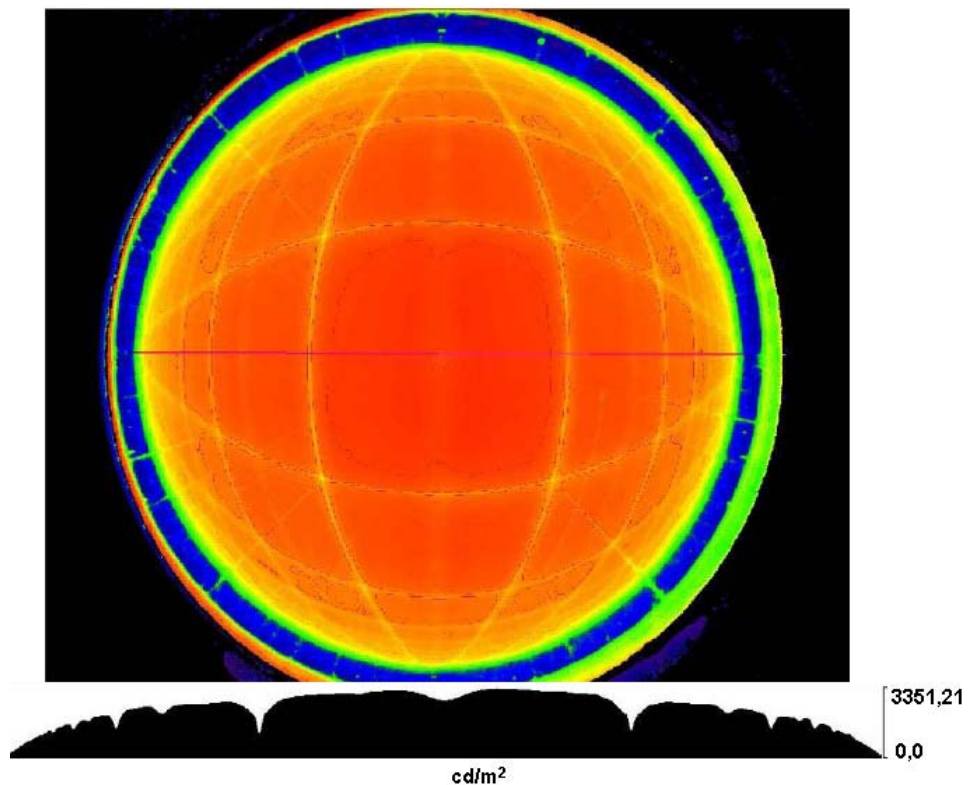


Figura 3.19 – Imagem fotometrada pela IQC, caracterizando o mapa de luminâncias do céu artificial.



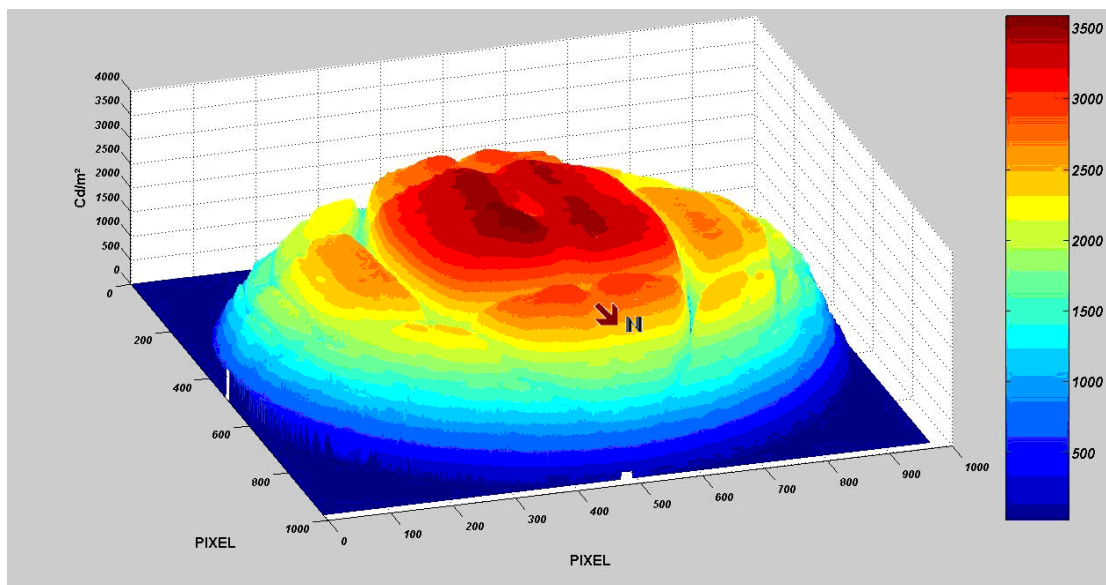


Figura 3.20 – Mapa em 3D de luminâncias do céu artificial.  
 Fonte: Programa MatLab.

Os valores dos níveis de luminâncias fotometradas foram importados para o Matlab 7.0. A distribuição de luminância no céu artificial apresenta uma luminância no zênite de aproximadamente 3.300 cd/m<sup>2</sup> e uma luminância no horizonte de aproximadamente 1.030 cd/m<sup>2</sup>. Sua escala está representada pelo eixo Z do gráfico. A abertura focal de 180 graus marcada na imagem do RT-32 com coordenadas [646,515] gera uma matriz de 980 x 980 e representa a imagem integral da abóbada.

### 3.5.2. Mapeamento digital da fonte de luz natural

Tendo como foco a determinação da contribuição luminosa efetiva das fontes, essa etapa identifica o mapeamento da distribuição de luminâncias, representando dois planos de referência: um, horizontal, que caracteriza a abóbada celeste, e outro, vertical, que configura a situação de exposição para aberturas laterais, definindo uma porção da abóbada e do entorno.

A contribuição da reflexão externa, oriunda da parcela inferior do hemisfério, normalmente é estimada na simulação da iluminação natural por um albedo<sup>2</sup> de 20%. Faz parte do escopo deste trabalho responder aos questionamentos iniciais e descrever a fonte luminosa que efetivamente contribui para os procedimentos de

<sup>2</sup> **Albedo:** É a medida da quantidade de radiação solar refletida por um corpo ou uma superfície. É calculado como sendo a razão entre a quantidade de radiação refletida pela quantidade de radiação recebida. Depende da faixa de onda eletromagnética considerada e do ângulo de incidência. Normalmente, é considerado em relação à faixa do espectro visível e em relação à normal da superfície (KITTLER, 1967).

simulação. A figura 3.21 ilustra de maneira esquemática como os planos de medição são fotometrados com a câmera IQCam.

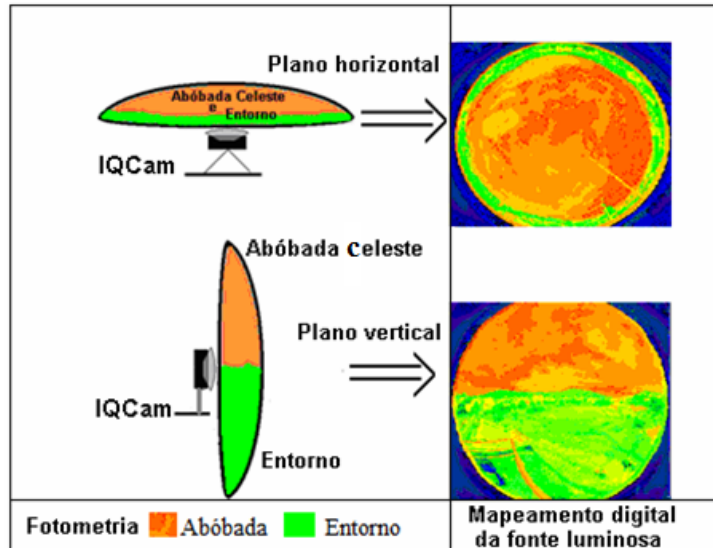


Figura 3.21 – Representação esquemática do mapeamento da fonte de luz natural.

A figura 3.22 mostra um mapa de luminâncias da abóbada celeste com a câmera apontando para o zênite, enquanto a figura 3.23 apresenta um mapa de luminâncias obtido com a câmera apontando para o sul, mostrando um meio céu e todo o seu entorno natural e edificado. As imagens fotometradas identificam a luminância de todo um hemisfério visível, num intervalo de medição que varia de 500 a  $10^5$  cd/m<sup>2</sup>.

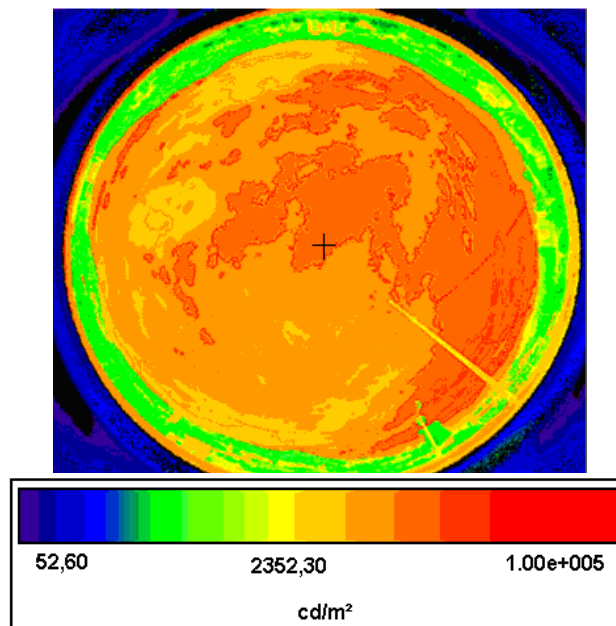


Figura 3.22 – Mapa de luminâncias de um céu real em 13 mar. 2008,14h.

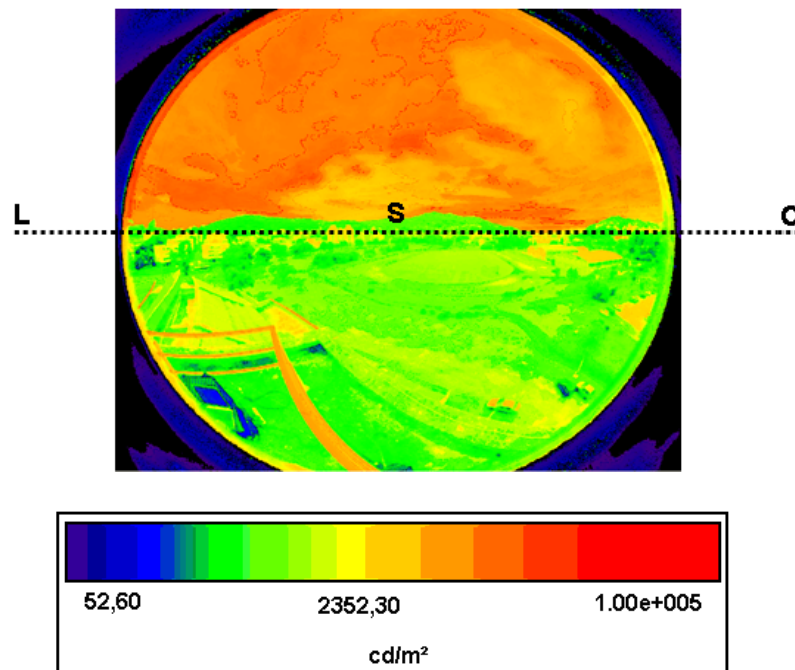


Figura 3.23 – Mapa de luminâncias do céu+entorno em 13 mar. 2008, 14h.

### 3.6. O programa submetido ao processo de avaliação e à simulação computacional

A ferramenta computacional utilizada neste trabalho é o programa Apolux,<sup>3</sup> que se fundamenta nos algoritmos propostos por Claro (1998). O programa é capaz de determinar a relação de visibilidade entre diferentes pontos de um ambiente, bem como a exposição desses pontos à abóbada celeste. Ele utiliza um sistema de projeções esféricas de precisão ajustável. As projeções são feitas através de elementos finitos, possibilitando um grau variado de resolução, tanto na obtenção da visibilidade, quanto posteriormente, na aplicação da equação de radiossidade para o cálculo dos níveis de luminâncias.

Além do cálculo de uma distribuição da abóbada segundo as fórmulas padronizadas pela CIE (1996), o Apolux permite importar os arquivos de luminâncias gerados pela câmera IQC, associando esses valores ao mesmo sistema de projeção utilizado pelo algoritmo, caracterizando um hemisfério luminoso correspondente ao hemisfério fotometrado. No modelo vetorial esférico, a abóbada celeste é dividida em faixas de variação uniforme na altura, por sua vez divididas em ângulos de azimute, de forma a subdividir cada faixa em parcelas iguais, sendo que, no conjunto das faixas, as

<sup>3</sup> Download gratuito no endereço: [www.labcon.ufsc.br/foton](http://www.labcon.ufsc.br/foton).

parcelas representam ângulos esféricos aproximadamente iguais. O Apolux faz uso de divisões entre aproximadamente 5.000 e 150.000 parcelas (CLARO, 2004). O método utilizado para a definição dos valores da abóbada e da posição do Sol é o descrito por Tregenza (1993).

Na simulação da luz natural com o programa Apolux é necessário especificar a fonte de luz, que pode ser a abóbada celeste e/ou o entorno da edificação. O programa possui o modo de entrada que permite configurar a fonte produzida pela IQC. Para o procedimento de aquisição, é necessário determinar os parâmetros definidos por um sistema de coordenadas x, y e z, caracterizando o círculo de captura e a orientação visual dos planos que projetam a abóbada e o entorno, ou a sua combinação (figura 3.24). Esse aplicativo é definido pelo Apolux como “tipo de conversão” e representa como “principal” a abóbada celeste, como “secundário” o entorno e como “principal + secundário” a combinação dos dois hemisférios fotografados em diferentes planos de medição. Com as coordenadas [646, 515], é possível estabelecer uma abertura angular de aproximadamente 180 graus.

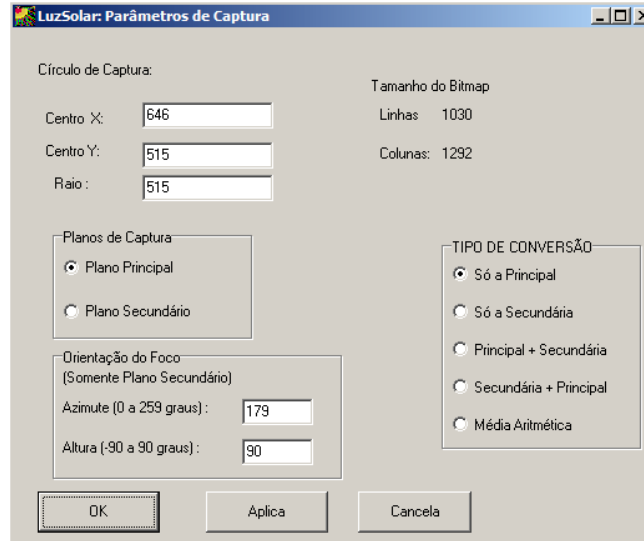


Figura 3.24 – Ajustes da projeção e orientação da imagem fotometrada pela câmera IQC.

Fonte: Apolux.

As figuras 3.25 (a), (b) e (c) ilustram as projeções da abóbada, do entorno e a combinação dessas projeções configuradas pelo Apolux através do mapeamento digital do sistema de aquisição de dados.

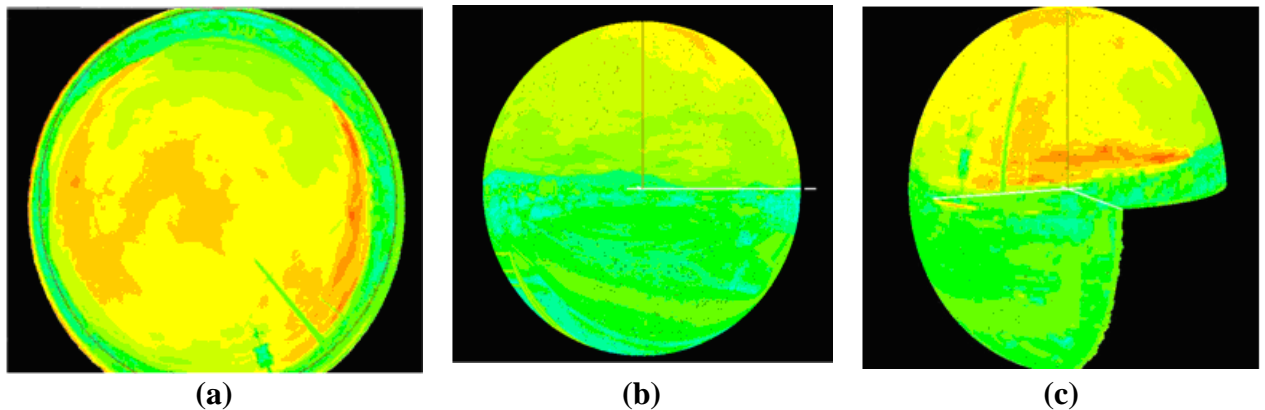


Figura 3.25 – Distribuição da luminância em um céu real em 13 mar. 2008, 14h.

a) Abóbada celeste – plano de referência horizontal.

b) Entorno – plano de referência vertical.

c) Combinação em 3D dos dois planos.

Fonte: Apolux.

Esse procedimento, com certeza, garante uma maior aproximação dos valores obtidos através da simulação computacional com os que caracterizam a distribuição real da iluminação nas edificações.

### 3.7. Características da instrumentação utilizada no processo metodológico

Os equipamentos utilizados nesse processo metodológico são detalhados nesta seção e têm como objetivo determinar e avaliar o comportamento da iluminação natural no interior da sala de estudo e no modelo físico em escala reduzida. Descrevem-se as principais características da instrumentação utilizada no processo metodológico.

#### 3.7.1. Sensores fotométricos

As fotocélulas foram usadas no procedimento experimental para dois tipos de medições; i) para medidas internas de iluminâncias (Lux) na sala de estudos e na maquete; e ii) para medidas da iluminância no plano de referência vertical (sem a presença do Sol). Em ambas as situações de trabalho, foram empregados fotossensores de qualidade da marca LICOR, tipo LI 210 – SA (figura 3.26).



Figura 3.26 – Sensor LICOR LI 210 SA.  
Fonte: [www.licor.com](http://www.licor.com).

O sensor LI-210 tem como principal característica sua resposta espectral. Ele é aproximado à curva de sensibilidade do olho (recomendada pela CIE) com uma tolerância de  $\pm 5\%$ . Apresenta uma resposta de co-seno corrigido para responder a vários ângulos de incidência. Apresenta uma faixa de variação (faixa de valor de erro aleatório esperado) de  $\pm 2\%$  para cada ano de uso. O sensor deve ser calibrado a cada dois anos. O apêndice A, seção A1.1, detalha a calibração dos sensores.

### 3.7.2. Luminancímetro

O Luminancímetro é o aparelho utilizado para medir a luminância em  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Neste trabalho, é especificado como Luminancímetro KONICA MINOLTA LS – 110, ilustrado pela figura 3.27. Ele tem a propriedade de captar o brilho de objetos contidos em uma faixa de utilização, que vai de 0,01 a 999.900  $\text{cd}/\text{m}^2$ , com um ângulo sólido de  $1/3$  de grau.



Figura 3.27 – Luminancímetro LS-110.

O equipamento é usado para monitorar a avaliação das imagens fotometradas pela IQC em diferentes pontos no céu artificial e no céu real e apresenta, segundo o fabricante, uma precisão de  $\pm 3\%$ . O apêndice A, seção A1.2, detalha a verificação da confiabilidade do equipamento.

### 3.7.3. Sistema de aquisição de dados

O *data-logger* DL2e, da marca Delta-T, é um dispositivo capaz de armazenar dados de iluminâncias (figura 3.28). Está ligado a dez fotocélulas LICOR, cinco na sala de estudos e cinco no modelo físico em escala reduzida.



Figura 3.28 – *Data-Logger* DL2e.  
Fonte: Empresa Delta-T.

Os dados registrados pelos sensores são armazenados na memória do *logger* e podem ser periodicamente transferidos a um computador. O equipamento utiliza o programa *Ls2Win* (figura 3.29), destinado a configurar os tipos de sensores, ajustar o tempo de aquisição e exportar os dados para as planilhas eletrônicas.

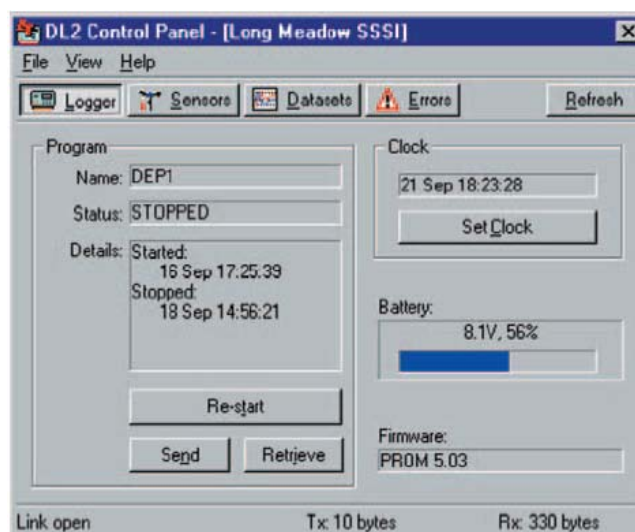


Figura 3.29 – Programa *Ls2Win* do *data-logger* DL2e.  
Fonte: Empresa Delta T.

O *logger* tem um painel com teclado complementar e pode ser empregado para conferir e controlar as operações sem uso de computador. É totalmente modular e, através de conectores ligados a 13 régua, permite a leitura de até 62 canais. O equipamento apresenta um relógio interno e pode fixar dados com intervalos regulares. Os dados são armazenados em unidades de tensão (mV) e convertidos para dados de iluminâncias (Lux).

### **3.8. Considerações finais**

Este capítulo apresentou os procedimentos para caracterizar de maneira precisa o comportamento luminoso da fonte de luz, a partir do mapeamento digital de luminâncias e da simulação computacional, bem como descreveu o processo metodológico para avaliar as ferramentas de simulação de iluminação natural em interiores, e validar seu desempenho.

Por recomendação do fabricante da IQC, o mapeamento digital ocorreu somente nos dias em que foram identificadas luminâncias reduzidas, em geral com nuvens cobrindo o Sol e a região circunsolar, uma vez que luminâncias excessivas podem danificar o sensor fotométrico e o circuito eletrônico integrado. Cabe ressaltar, que a caracterização da contribuição da abóbada e do entorno através deste procedimento experimental depende apenas da variação espacial e da magnitude do fluxo luminoso através de suas componentes celeste e refletida, independente das condições atmosféricas. Desta forma, para a simulação computacional no ambiente interno, é suficiente informar a luminância apresentada pelos elementos visíveis da fonte, levando-se em consideração sua altitude e o ângulo sólido.

Além de avaliar o desempenho das ferramentas de simulação, os resultados apresentados no capítulo que segue permitirão verificar que a reflexão do entorno, visível por boa parte do ambiente interno, deve ser adequadamente considerada pelos procedimentos de simulação computacional. Ignorar a reflexão do entorno, na concepção do projeto, pode representar uma das simplificações de maior influência na avaliação da iluminação natural.

O anexo A deste trabalho apresenta os resultados dos testes de confiabilidade dos procedimentos experimentais. O anexo B apresenta o cálculo do erro global decorrente das iluminância medidas pelos equipamentos. O anexo C mostra a tabelas



dos resultados das iluminâncias calculadas a partir do sistema de aquisição de dados DL2e. O anexo D apresenta um disco compacto contendo a base de dados obtida a partir do mapeamento digital de luminâncias, assim como, os valores de iluminâncias medidos experimentalmente no ambiente real e no modelo físico, e por fim, um tutorial de utilização do programa computacional explicando como importar os mapas fotometrados em céu artificial e céu real.

## **4. Avaliação dos resultados - o desempenho das ferramentas de simulação de iluminação natural**

Neste capítulo, são realizados os procedimentos necessários para desenvolver um método de avaliação de desempenho de ferramentas de simulação de iluminação natural através do mapeamento digital de luminâncias caracterizadas pelo céu e exterior. Para atingir este objetivo as etapas estão divididas da seguinte maneira; inicialmente, apresentam-se às reflexões superficiais dos modelos utilizadas no procedimento de simulação, em seguida é apresentado o mapeamento digital de luminâncias que simula a fonte de luz natural em um céu artificial. Na terceira etapa, são apresentados os resultados do procedimento metodológico a fim de determinar a influência dos elementos de reflexão exterior no processo de simulação. Em um quarto momento, é produzido o mapeamento digital de luminâncias para caracterizar a fonte de luz em céu real. Na quinta etapa, são identificados os pontos de divergências entre os desempenhos das ferramentas, a partir da comparação entre a distribuição da iluminação simulada e as medições de iluminâncias obtidas em um procedimento experimental, bem como, são feitas as considerações finais que avaliam as ferramentas de simulação.

### **4.1. Determinação das reflexões superficiais dos modelos**

Nesta seção, são verificados os percentuais de refletâncias recomendados por Castro et al. (2003) e os medidos nas superfícies opacas dos modelos de estudo (ambiente real e o modelo físico em escala). A autora da pesquisa realizou uma análise experimental em pastilhas utilizando tintas fornecidas pelo fabricante Suvinil. O ensaio ocorreu com o auxílio de uma esfera integradora e avaliou as refletâncias em amostras cobertas com látex acrílico nas cores branca, palha e alecrim. Os resultados identificaram refletâncias respectivamente iguais a 88%, 70% e 36%.

O ambiente real e o modelo físico foram pintados com tintas do fabricante Suvinil recomendadas pela autora. Foram usados os seguintes látex nas superfícies dos modelos: cor branca na parede, cor palha para o piso e cor alecrim para o teto. No entanto, com as medições das refletâncias obtidas nas superfícies dos modelos de estudo, realizadas *in loco* através do método do luminômetro e demonstradas no apêndice A, seção A3, foi possível verificar que os índices estavam em média 14% inferiores aos recomendados por Castro et al. (2003). Os melhores resultados

ocorreram nas superfícies do modelo físico em escala e o pior resultado ocorreu na parede do ambiente real com uma discrepância de 19%.

Para decidir quais as refletâncias superficiais que seriam utilizadas nas avaliações das ferramentas, sejam aquelas recomendadas pela autora sejam aquelas definidas por meio de medições *in loco*, foi desenvolvido um teste para determinar as discrepâncias entre as iluminâncias medidas no ambiente real e simuladas no programa computacional.

Os erros relativos foram calculados em relação às iluminâncias medidas no ambiente real. Foi escolhido o dia 03/04/2008, 9h30min e avaliada as iluminâncias nas posições do sensor dispostas no ambiente real (E-AR) e no modelo digital (E-IQC). A tabela 4.1 ilustra os resultados.

As refletâncias comparadas foram:

- Parede (88% - Castro) x Parede (75% - medida)
- Piso (70% - Castro) x Piso (64% - medida)
- Teto (36% - Castro) x Teto (34% - medida)

Tabela 4.1 – Análise de iluminâncias para determinar os índices de reflexão usados na pesquisa.

Posição do sensor	Iluminâncias medidas no ambiente real (E-AR) [lx]	Iluminâncias simuladas no modelo digital (E-IQC) [lx]		*Erro relativo entre as simulações do programa computacional	
		Referência Castro	Referência Medida	Referência Castro (%)	Referência Medidas (%)
Janela	1028	1045	1020	<b>-16,6</b>	1
Centro	561	792	499	<b>-41,2</b>	11
Porta	357	599	287	<b>-67,8</b>	20
PE	872	1057	926	<b>21,2</b>	-6
PD	847	1103	820	<b>30,2</b>	3

\* Erro relativo = [(E-AR) – (E-IQC)]/(E-AR)]\*100

Utilizando no procedimento de simulação as recomendações da autora, as discrepâncias entre as iluminâncias foram superiores a 30%, em praticamente todas as posições dos sensores analisados. Utilizando no procedimento de simulação as refletâncias obtidas através de medições, os valores das iluminâncias simuladas, aproximaram-se do comportamento das iluminâncias medidas no ambiente real.

Esse efeito pode estar relacionado às diferenças entre as rugosidades das pastilhas de prova utilizadas por Castro et al. (2003) e as rugosidades das superfícies dos modelos. Nesse contexto, foram tomados os seguintes índices de refletâncias para todos os procedimentos de avaliação das ferramentas de simulação: parede 75%, piso 64% e teto 34%.

## 4.2 Procedimento metodológico aplicado no céu artificial tipo caixa de espelhos - apresentação e análise dos resultados

O procedimento metodológico aplicado em céu artificial precedeu ao processo metodológico em ambiente de exposição real objetivando dar consistência ao método proposto. O céu artificial é um ambiente de exposição controlado, calibrado e de comportamento luminoso conhecido, conforme Gonzáles (2007). Cabe ressaltar que houve dez repetições nos procedimentos de medição e atribuído um valor médio de iluminância para cada posição de análise, a dispersão dos resultados medidos foi na ordem de  $\pm 1,0\%$  e estão de acordo com os estudos de Gonzáles (2007).

A figura 4.1 mostra a distribuição fotométrica do céu artificial, que apresenta uma relação de luminâncias ( $\text{cd}/\text{m}^2$ ) entre o zênite e o horizonte de aproximadamente três para um (3:1). Esta distribuição caracteriza uma condição de céu encoberto conforme a Commission Internationale de L'Eclairage (1996).

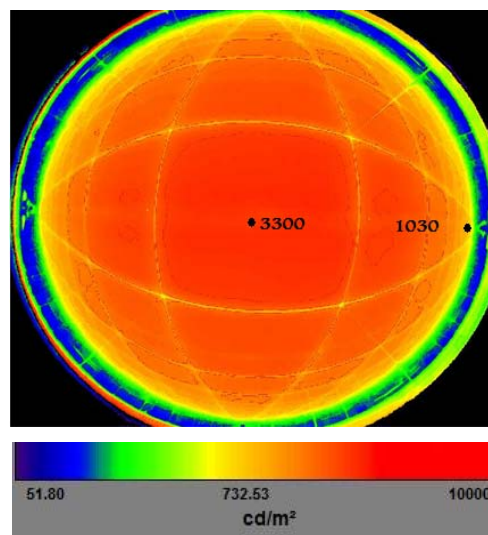


Figura 4.1 – Mapa de luminâncias fotometradas pela IQC em um céu artificial tipo caixa de espelhos.

A avaliação do Apolux é caracterizada pela comparação entre a iluminância medida por sensores fotométricos, colocados em cinco posições no interior de um

modelo físico e o desempenho luminoso nessas posições simulado no modelo digital. As figuras 4.2 (a) e (b) ilustram as posições descritas como “parede direita” (PD), “parede esquerda” (PE), “janela”, “centro” e “porta”.

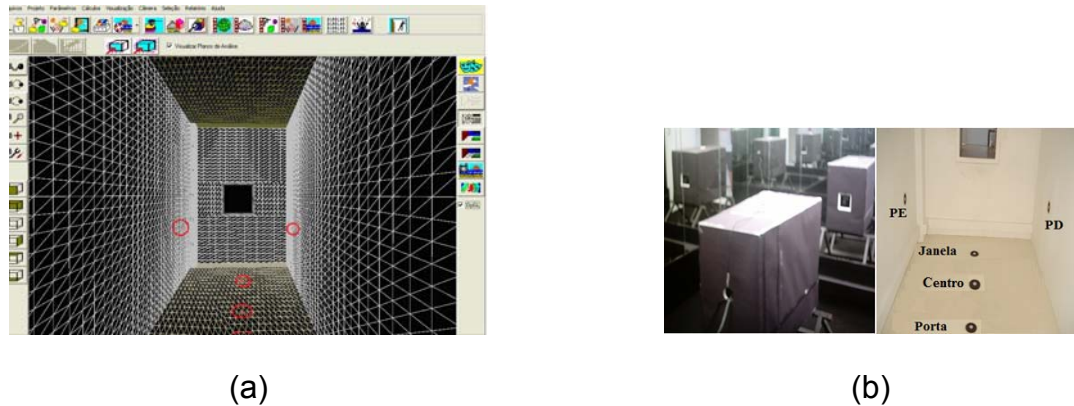


Figura 4.2 – a) Posições de análise das iluminâncias. Fonte: Apolux.  
b) Ilustração do modelo de referência.

Além da fotometria da fonte luminosa do céu artificial, foi realizada a simulação computacional (figura 4.3) a partir da distribuição de luminâncias de um céu encoberto, segundo a equação padronizada pela CIE (1996). Esse parâmetro permitiu uma comparação entre os valores de iluminâncias simulados pelo Apolux, utilizando-se a equação 2.2 (página 16) e os valores de iluminâncias obtidos experimentalmente no modelo físico.

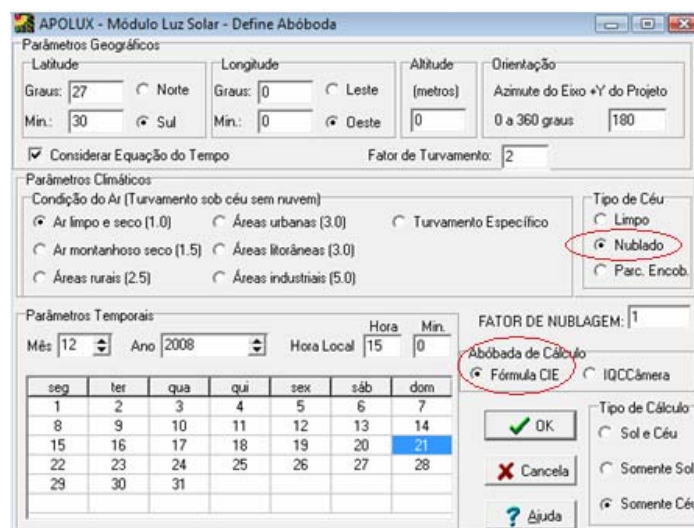


Figura 4.3 – Configuração de tipo de céu encoberto. Fonte: Apolux.

Durante o procedimento experimental foram identificadas as iluminâncias medidas *in loco* no plano de referência horizontal do céu artificial. As dez medições, ocorreram com a iluminação do céu artificial estabilizada, revelando, uma

iluminância da abóbada de  $7,2\text{kLux} \pm 2\%$ , e de acordo com Gonzáles (2007), o que possibilitou, conferir a adequação do procedimento utilizado para a inserção dos mapas digitais de luminância no processo de simulação computacional (figura 4.4) e a simulação baseada no modelo de céu encoberto padrão CIE.

A Referência teórica para a configuração do hemisfério que caracteriza o globo é realizada segundo Claro (1998). Nesse trabalho, o globo é definido segundo um conjunto de representações de direções (co-senos diretores) caracterizando um hemisfério projetado por um círculo. Este círculo corta o globo com um vetor normal em relação ao seu centro, apontado para o lado do globo que corresponde ao hemisfério desejado. Assim, define-se no programa computacional o azimuth e a altura desse vetor (vetor normal ao plano que define o hemisfério de captura) e, obtém-se o hemisfério ao qual está associada a fotografia do hemisfério capturado pela câmera IQC. Os mapas digitais com a distribuição de luminâncias importadas para o Apolux, conforme o exemplo da ilustração da figura 4.4, e as medições *in loco* de iluminâncias formam a base de dados. Essas informações estão disponibilizadas em um disco compacto, cujo arquivo é chamado “céu artificial” e localizado no apêndice D.

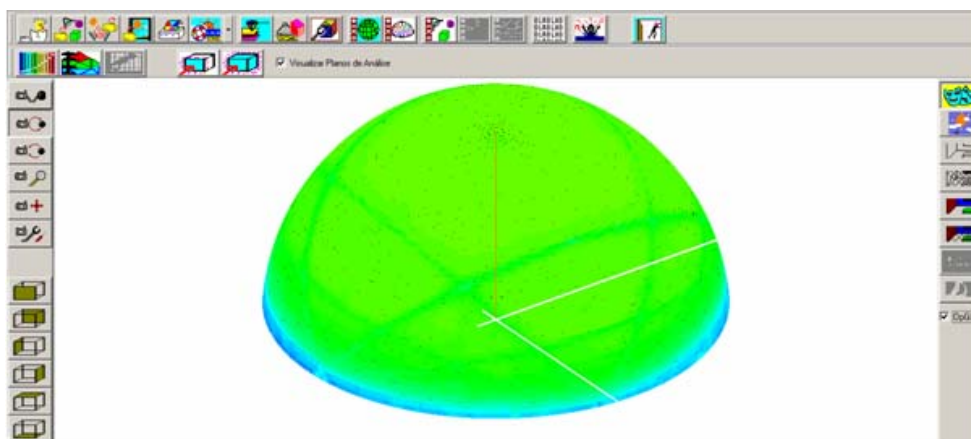


Figura 4.4 – Distribuição da luminância em um céu artificial . Fonte: Apolux.

Os resultados desta etapa do trabalho estão dispostos na tabela 4.2. A primeira coluna apresenta a posição dos pontos de análise. Em seguida, identificam-se as iluminâncias medidas experimentalmente na maquete de denominação E\_M; elas servem de parâmetro de comparação para os procedimentos de simulação no Apolux. Considerando-se a base de dados desenvolvida através do mapeamento digital de luminâncias, a simulação computacional determina a iluminância E\_IQC,

da mesma forma que, tomando-se como referência o céu encoberto padrão CIE, simula-se a iluminância E\_CIE.

Tabela 4.2 – Comparação entre os valores de iluminâncias.

Posição do sensor	Referência (E-M) [Lux]	Simulação Apolux		$\Delta\_IQC$ [[E-M)-(E-IQC)]	$\Delta\_CIE$ [[E-M)-(E-CIE)]	Erro Relativo	
		(E-IQC) [Lux]	(E-CIE) [Lux]			*IQC (%)	**CIE (%)
PD	216	202	178	14	38	6,5	17,6
PE	201	198	179	3	22	1,5	10,9
Janela	213	202	198	11	15	5,2	7,0
Centro	163	143	110	20	53	12,3	32,5
Porta	99	85	66	14	33	14,1	33,3

\* ERRO RELATIVO = [(E-M) – (E-IQC)/(E-AR)]\*100

\*\* ERRO RELATIVO = [(E-AR) – (E-CIE)/(E-AR)]\*100

A figura 4.5 resume os resultados das iluminâncias verificadas pela medição experimental e pelos procedimentos de simulação no Apolux.

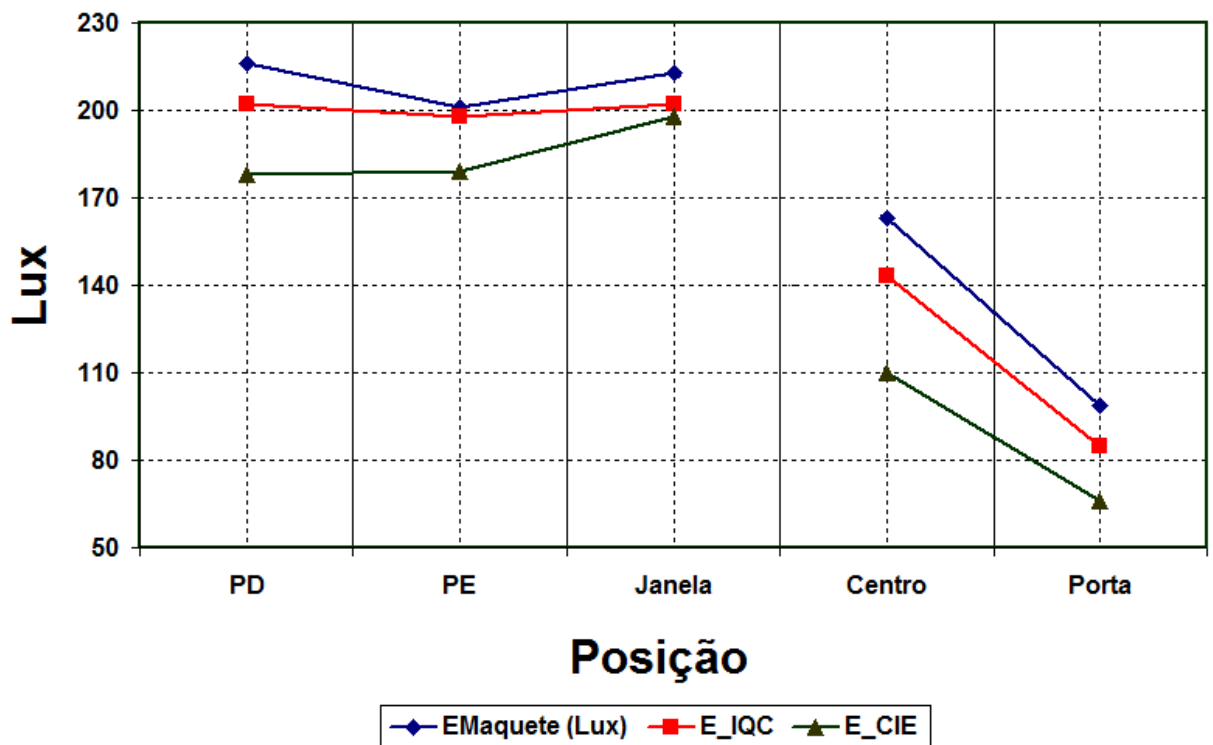


Figura 4.5 – Gráfico comparativo das iluminâncias no interior dos modelos.

Fisicamente, a análise dos resultados verificada através do comportamento da iluminância reside na identificação da relação existente entre o ambiente interno e a representação do seu desempenho luminoso através da ferramenta de

simulação computacional. Essa relação é verificada através de uma análise estatística entre as variáveis “ $E_M$ ” x “ $E_{IQC}$ ” e “ $E_M$ ” x “ $E_{CIE}$ ” e representada pela correlação linear de Pearson ( $r$ ). As correlações foram determinadas para estabelecer o grau de aproximação entre o comportamento luminoso simulado e o medido. A presença de uma correlação forte, “ $r$ ” maior que 0,6, pode estimar significativamente uma variável a partir da outra.

As avaliações estimadas identificaram uma correlação de 99,01% entre as iluminâncias  $E_M$  e  $E_{IQC}$ , e de 96,11% entre as iluminâncias  $E_M$  e  $E_{CIE}$ . As fortes correlações estabelecem que as simulações computacionais descrevem um comportamento luminoso semelhante à referência, porém com maior aproximação para os valores de iluminâncias simulados a partir da base de dados gerada pelos mapas digitais de luminâncias. Este fato não causa qualquer surpresa, pois é previsível pelos modelos teóricos consagrados internacionalmente, no entanto, jamais foram representados através de avaliações quantitativas dessa natureza.

A análise para verificar o desempenho da simulação computacional foi caracterizada pelo erro relativo entre os valores de iluminância  $E_M$  x  $E_{IQC}$  e  $E_M$  x  $E_{CIE}$ . Destaca-se o valor simulado ( $E_{IQC}$ ), no Apolux, de 202 Lux para um medido de 213 Lux na posição do sensor denominada “janela” na maquete. Nos pontos próximos dessa posição, os resultados dos níveis de iluminâncias apresentaram as menores discrepâncias. Elas estiveram abaixo de 7% nas posições “PD”, “PE” e “janela”, e inferiores a 15% nas posições “centro” e “porta”. A figura 4.6 apresenta os erros relativos entre os modelos.

As distorções representadas pela simulação que utiliza como fonte luminosa o modelo de céu padronizado pela CIE ( $E_{CIE}$ ) apresentaram valores entre 7% e 17,6% nas posições próximas à abertura do modelo e abaixo de 35% nas posições centro e porta. Resultados mais discrepantes do modelo de referência comparando com a simulação através do mapeamento digital. Os aplicativos de simulação computacional da iluminação natural, em sua grande maioria, estimam a fonte luminosa através de modelos de céu padrão CIE; no entanto, essa aproximação é representada pelas condições médias de disponibilidade de luz, o que reforça a adequação do uso do mapeamento digital para avaliar a fonte luminosa.



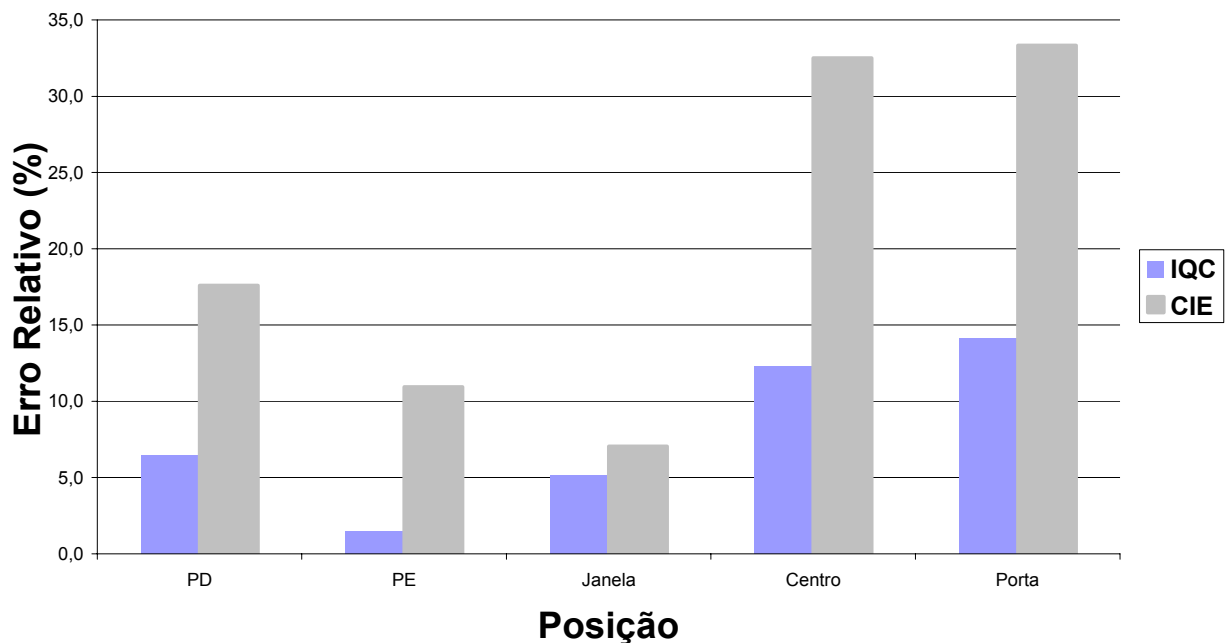


Figura 4.6 – Erro relativo (%) entre os modelos em relação à iluminância da maquete.

Até este momento, não existe um padrão de referência na literatura que estabeleça com precisão quanto de discrepância pode haver entre um procedimento de simulação e a realidade. Para considerar o desempenho do Apolux validado, tomou-se um valor de discrepância admitida (diferenças entre os valores medidos e simulados) de 25%. Esse valor é adotado a partir dos estudos desenvolvidos por Mardaljevic (2000). Pode-se perceber que, nessas condições, esse parâmetro de referência teórica não foi superado ao aplicar o método proposto. As maiores discrepâncias foram observadas no plano do piso dos modelos, com valores de, aproximadamente, 14% a 12% na posição “porta” e “centro”, respectivamente. As pesquisas relatam que as maiores diferenças entre os valores simulados e medidos tendem para as posições mais afastadas da janela. Mardaljevic (2000) comentou que a iluminância no fundo de um modelo, com uma única abertura e profundidade maior que sua largura, composta de luz inter-refletida, é mais difícil de ser simulada com precisão em relação às posições onde a iluminação é direta (posições próximas à janela). Este resultado permite supor que nas situações que ocorrem maiores discrepâncias, podem ser oriundas de um maior tempo de cálculo, pois nessas posições a luz se distribui a partir de sua componente refletida interna.

Cabe salientar que os menores valores encontrados nas medições de iluminâncias na PE podem estar sendo afetados pelos cantos do céu, porta de

acesso e as juntas de união das placas de espelhos. Segundo Gonzáles (2007) esse aspecto foi verificado com a avaliação da distribuição das iluminâncias sobre a superfície do céu artificial, observando áreas com menores iluminâncias.

O método empregado permitiu mapear 100% da abóbada e avaliou o comportamento da iluminação no interior do modelo computacional, assim como, mostrou-se adequado para o processo de validação de ferramentas de simulação computacional.

### **4.3 Caracterização da contribuição efetiva do entorno**

O objetivo deste estudo é verificar que a correta caracterização da fonte de luz natural, a que efetivamente contribui para a iluminação em interiores, deve considerar a abóbada celeste visível pelas aberturas e o seu entorno, cujos planos representam a disponibilidade direta e refletida da luz natural em superfícies com aberturas laterais.

Busca-se mostrar por meio de simulação computacional, que a luz proveniente de parcelas da abóbada não visíveis por uma abertura lateral de uma edificação, é considerada através da reflexão do entorno. Desta forma, demonstra-se que somente o mapeamento através do plano de referência vertical, que contém parte da abóbada e o entorno, é suficiente para caracterizar as condições de iluminação no interior da edificação.

A figura 4.7 ilustra a equivalência entre os planos combinados “horizontal + vertical” e o plano “vertical” para a caracterização das condições de exposição de uma abertura lateral.

Inicialmente, é simulada a contribuição luminosa de toda a abóbada celeste. Numa segunda situação, é considerado o plano de referência vertical, na qual é descrita parte da abóbada celeste (meio céu na frente do modelo) e o entorno. Por último, é caracterizada a combinação entre os dois planos de referência. Essa etapa acaba definindo se existe ou não contribuição direta da parcela da abóbada não visível pela superfície do modelo estudado.

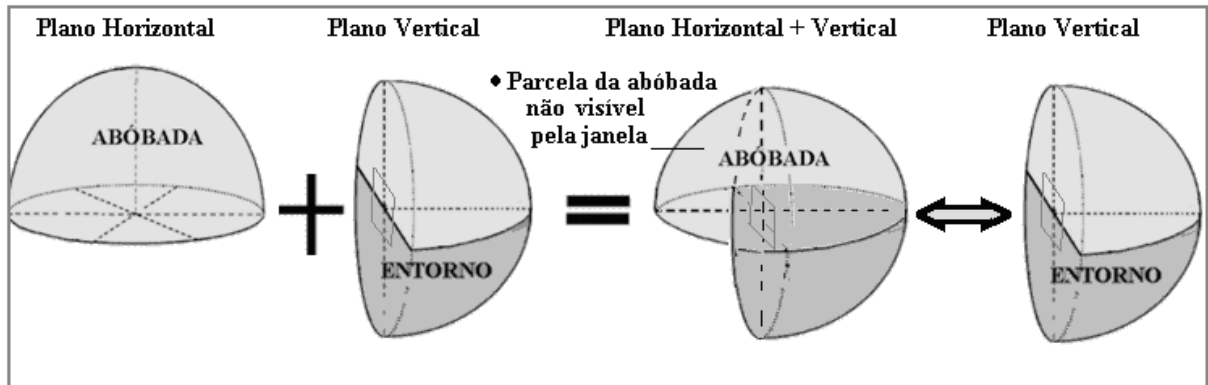


Figura 4.7 – Representação esquemática para avaliar os planos de referência.

Os procedimentos propostos para a realização deste estudo são resumidos, como seguem:

- A fonte luminosa é fotometrada e caracterizada pelos planos de referência através do mapeamento digital de luminâncias, posteriormente utilizado como dados de entrada para a simulação computacional.
- São realizadas simulações computacionais, determinando-se as iluminâncias na superfície de um modelo teórico representado por uma superfície vertical (figura 4.8).
- São calculadas as discrepâncias entre as iluminâncias simuladas para cada plano de referência: plano horizontal; plano horizontal + plano vertical; e plano vertical.
- É caracterizada a condição do plano vertical (céu + entorno) e comparada sua equivalência com os planos combinados (horizontal + vertical).

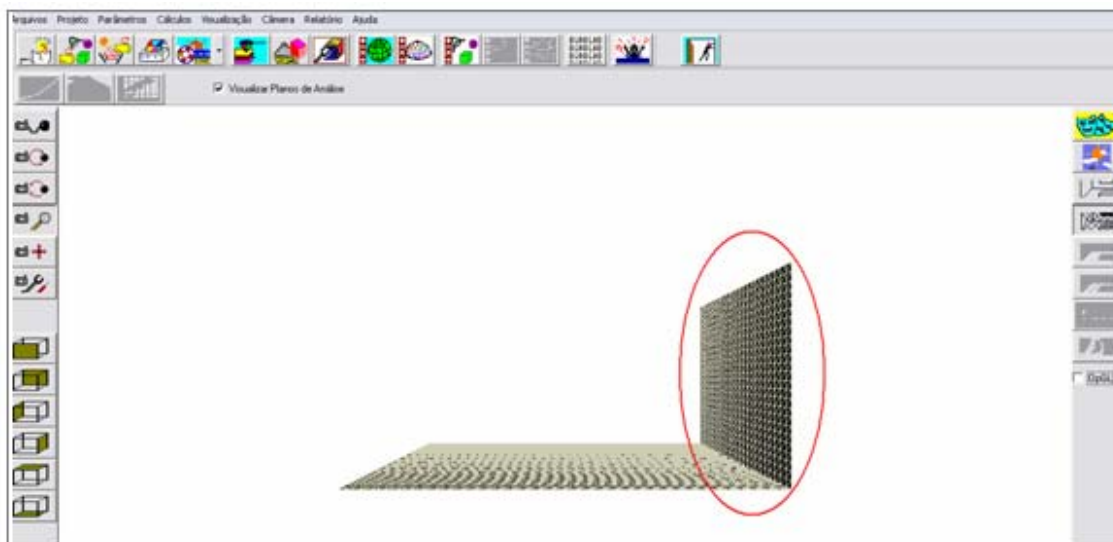



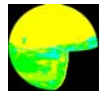
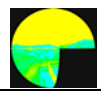
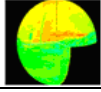
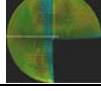
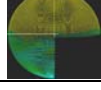
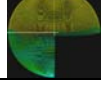
Figura 4.8 – Modelo teórico para avaliação da contribuição luminosa do entorno.  
 Fonte: Apolux.

Com os dados que caracterizam a fonte luminosa inserida no Apolux, foram simuladas sete situações (projeções) de céu real em diferentes dias e horários. Os resultados das iluminâncias na superfície do modelo são apresentados na tabela 4.3.

A primeira coluna estabelece a data e o período em que foi caracterizada a fonte luminosa. A segunda descreve os planos de referência nas diferentes condições de exposição. Em seguida, são identificadas as medidas de iluminâncias, *in loco*, no plano de referência vertical. Essa medição revela, respectivamente, a iluminância de parte da abóbada e entorno visíveis pelo plano do modelo. Assim, foi possível conferir a adequação do procedimento utilizado para a inserção dos mapas digitais de luminância no processo de simulação computacional.

A penúltima coluna apresenta os resultados da simulação computacional utilizando os dados fotometrados pelos planos de referência. Na última coluna, destaca-se a contribuição média do entorno, de 26%, chegando a percentuais superiores a 35% em 3 de abril de 2008, no período de 08h30min. Esse valor foi determinado pelas diferenças encontradas entre as iluminâncias simuladas na superfície do modelo teórico, de acordo com a base de dados obtida pela fotometria da abóbada inteira (plano de referência horizontal) e de 1/2 abóbada + entorno (plano de referência vertical).

Tabela 4.3 – Contribuição do entorno obtida através da simulação computacional.

Data / Período	Planos de referência		Iluminâncias medidas no plano vertical [kLux]	Iluminâncias simuladas [Lux]	Contribuição do entorno [%]
26/11/2008 (08h40min)	Abóbada inteira		17,9	15774	16,58
	1/2abóbada + entorno			18909	
	Abóbada inteira + entorno			18909	
4/12/2008 (14h00min)	Abóbada inteira		11,8	9109	24,19
	1/2abóbada + entorno			12016	
	Abóbada inteira + entorno			12099	
1/12/2008 (17h15min)	Abóbada inteira		10,7	9363	15,41
	1/2abóbada + entorno			11069	
	Abóbada inteira + entorno			11069	
13/03/2008 (14h00min)	Abóbada inteira		11,4	7888	22,25
	1/2abóbada + entorno			10054	
	Abóbada inteira + entorno			10145	
1/04/2008 (16h35min)	Abóbada inteira		4,9	3420	32,29
	1/2abóbada + entorno			5051	
	Abóbada inteira + entorno			5051	
3/04/2008 (08h30min)	Abóbada inteira		9,9	5928	37,84
	1/2abóbada + entorno			9537	
	Abóbada inteira + entorno			9537	
3/04/2008 (09h00min)	Abóbada inteira		12,3	9122	31,48
	1/2abóbada + entorno			13313	
	Abóbada inteira + entorno			13313	
			Média		26%

Ao combinar em 3D os planos de referência (horizontal e vertical), foi constatado que a porção da abóbada celeste não visível pelo modelo teórico não

apresenta contribuição direta na iluminação do modelo, mas, certamente, o faz através da reflexão do entorno. Este efeito é identificado em cada resultado simulado e permite concluir que a fonte, caracterizada pela parcela de luz atribuída ao plano de referência vertical, que contém o meio céu e o entorno em frente à superfície, é suficiente para verificar a contribuição luminosa na mesma.

Este procedimento, com certeza, garante uma maior aproximação dos valores obtidos através de simulação computacional com os que caracterizam a distribuição real da iluminação nas edificações.

Os resultados obtidos na tabela 4.2 mostram que a componente refletida no entorno pode contribuir bem mais que os 20% usualmente considerados, e sua correta consideração permite reduzir os equívocos na avaliação da iluminação natural das edificações.

O estudo mostrou para uma condição de céu real uma contribuição média do entorno de 26% em relação à abóbada, com um valor mínimo de 15,4% e um máximo de 37%. A efetiva contribuição da iluminação natural em interiores deve considerar a abóbada celeste visível pelas aberturas e o seu entorno, cujos planos representam a disponibilidade direta e refletida da luz natural em superfícies com aberturas laterais.

#### **4.4 Procedimento metodológico aplicado no ambiente de exposição real**

Nesta etapa da pesquisa, avalia-se o desempenho das ferramentas de simulação de iluminação natural em um ambiente de exposição real. Os trabalhos desenvolvidos objetivam descrever de forma precisa a fonte luminosa, considerando meia abóbada e o entorno. Esse procedimento objetiva corrigir as imprecisões encontradas em Mardaljevic (2000) e Cabús (2005-b) no método de validação dos programas Radiance e Troplux, respectivamente. O método desenvolvido pelos pesquisadores não levou em consideração a reflexão do entorno edificado.

##### **4.4.1 Apresentação dos dados – mapeamento digital de luminâncias**

Foram avaliados 25 mapas que caracterizam a distribuição de luminâncias da fonte, em dias iguais e diferentes, alternando diferentes períodos de avaliação. De maneira simultânea ao mapeamento digital de luminâncias, foram medidas as iluminâncias nos pontos de análise em um ambiente real e na maquete. Tal qual a

avaliação dos modelos no céu artificial, estes pontos são caracterizados pelos cinco sensores dispostos nos modelos, e são denominados como “parede direita” (PD), “parede esquerda” (PE), “janela”, “centro” e “porta”.

A tabela 4.4 apresenta um exemplo dos resultados de iluminâncias medidos a partir do sistema de aquisição DL2e, no dia 12 de abril de 2008 às 15h. A primeira coluna apresenta os pontos de análise avaliados no ambiente real e na maquete. Na segunda, terceira e quarta colunas, aparecem os parâmetros necessários para determinar os valores de iluminância medidos pela fotocélula a partir do sinal de tensão lido pelo equipamento de aquisição. Os demais dias estão apresentados e detalhados no anexo C.

Tabela 4.4 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 15h00min.

<b>Ambiente Real</b>	<b>Resistor [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Constante calibração K</b>	<b>Tensão elétrica [mV]</b>	<b>Iluminâncias (<math>\frac{K.V}{R}1000</math>) [Lux]</b>
PE	9,87	4,634	2,637	1238
PD	9,98	3,259	3,611	1179
Janela	9,86	3,761	2,837	1082
Centro	9,92	3,394	2,140	732
Porta	9,93	3,347	1,523	514
<b>Maquete</b>	<b>Resistor [<math>\Omega</math>]</b>	<b>Constante calibração K</b>	<b>Tensão elétrica [mV]</b>	<b>Iluminância (<math>\frac{K.V}{R}1000</math>) [Lux]</b>
PE	9,66	3,261	3,596	1214
PD	9,94	3,419	3,415	1174
Janela	9,87	3,228	3,348	1095
Centro	9,94	3,170	2,799	893
Porta	10,07	3,305	1,925	632

O plano da fonte luminosa é aquele observado pela abertura lateral do ambiente real e do modelo físico em escala 1:5. Esse plano foi registrado dispondo-se a IQC imediatamente acima da janela do ambiente de estudos.

Como a abertura angular da lente olho de peixe da IQC apresenta 186 graus, o RT-32 permitiu o recorte da imagem em uma abertura angular de 180 graus a partir das coordenadas [646, 515] que representam seu centro. A figura 4.9 ilustra alguns desses detalhes que caracterizam a fonte luminosa.

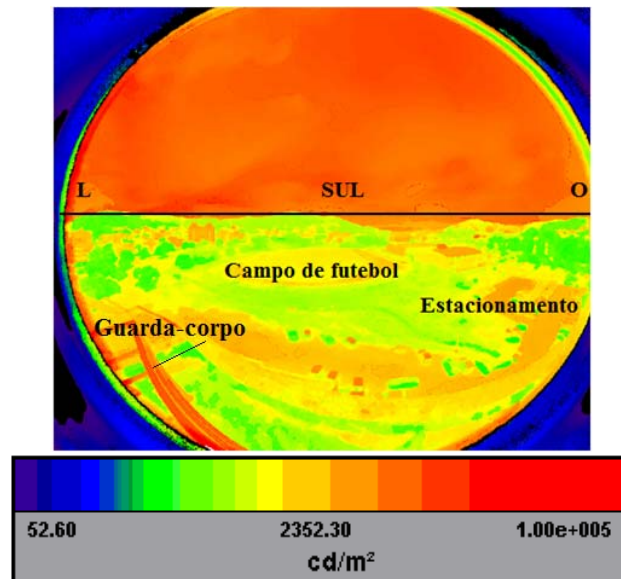


Figura 4.9 – Imagem adquirida de um meio céu real e entorno em 28 nov. 2007, 09h40min

Se houver necessidade, a base de dados obtida através do procedimento metodológico, além de possibilitar a leitura no simulador computacional, pode ser adquirida e lida por outros aplicativos, tais como o Matlab ou Excel (figura 4.10). Desta maneira, é possível detalhar as posições, os principais pontos de análise e/ou verificar a magnitude dos valores de luminâncias a partir de uma escala de cores.

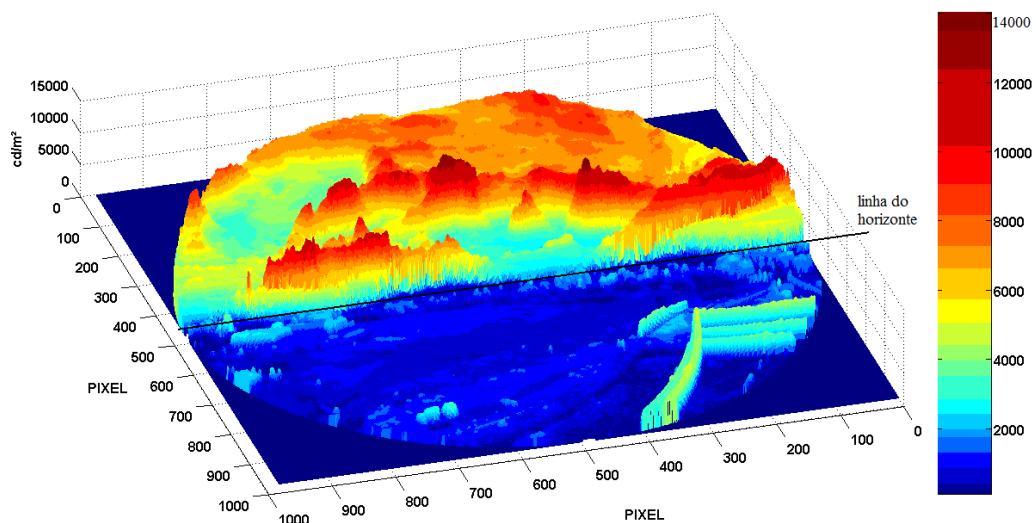


Figura 4.10 – Imagem de um meio céu real + entorno em 13 mar. 2008, 14h.  
Fonte: Matlab 7.0.

A imagem apresenta o detalhe da linha do horizonte dividindo a porção que caracteriza meia abóbada e o entorno edificado. Mesmo com um céu coberto por nuvens, a abóbada apresenta diferentes zonas de luminâncias, que variam de 2000cd/m<sup>2</sup> a 14000cd/m<sup>2</sup>. O entorno apresenta para essa configuração uma distribuição que varia de 800 cd/m<sup>2</sup> a 2.800 cd/m<sup>2</sup>.



O mapeamento digital de luminâncias, ilustrado pelas imagens 4.11 a 4.23, caracterizam a base de dados da pesquisa. A fotometria da distribuição de luminâncias, obtida no dia 12 de abril de 2008, às 15 horas (figura 4.23 (a)), apresentou um comportamento com pouca variabilidade da abóbada e do entorno. O mapeamento digital determinou luminâncias médias próximas de 12.500 cd/m<sup>2</sup> para meia abóbada e 1.500 cd/m<sup>2</sup> para o entorno. Comparativamente ao dia 12 de abril de 2008, a base de dados obtida em 3 de abril de 2008 (figura 4.16 (a)) apresentou uma maior variabilidade para a meia abóbada, com destaque para o horário das 09h30min. As iluminâncias fotometradas nesse período apresentaram valores para meia abóbada entre 9.000 cd/m<sup>2</sup> e 16.000 cd/m<sup>2</sup> e, para o entorno, entre 800 cd/m<sup>2</sup> a 1.500 cd/m<sup>2</sup>. O céu mais brilhante é evidenciado no dia 28 de novembro de 2007, 09h40min (figura 4.12 (a)), com uma distribuição de luminâncias para meia abóbada variando de 16.000 cd/m<sup>2</sup> a 18.000 cd/m<sup>2</sup>, e uma variabilidade para o entorno de 1.500 cd/m<sup>2</sup> a 3.000 cd/m<sup>2</sup>. O céu mais escuro apresentou-se no dia 2 de dezembro de 2007, as 18:00 horas (figura 4.13 (a)), com luminâncias entre 2300 cd/m<sup>2</sup> a 4.000 cd/m<sup>2</sup> para meia abóbada, porém com uma distribuição de luminâncias para o entorno de 800 cd/m<sup>2</sup> a 2.000 cd/m<sup>2</sup>.

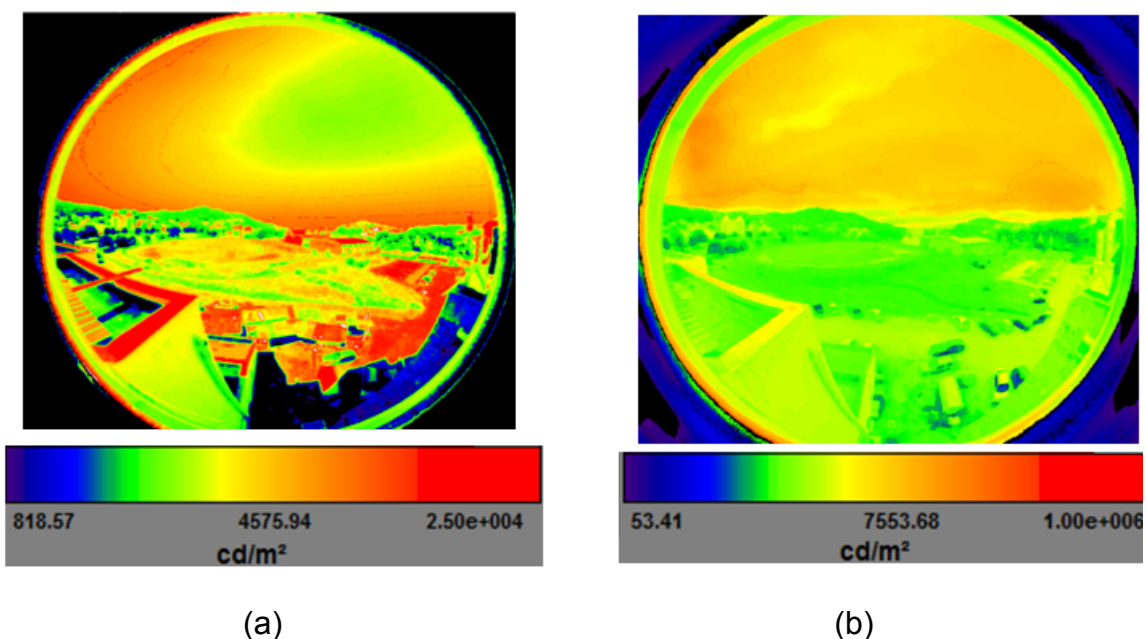


Figura 4.11 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 2 fev. 2007, 10h. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 26 nov. 2007, 8h40min.

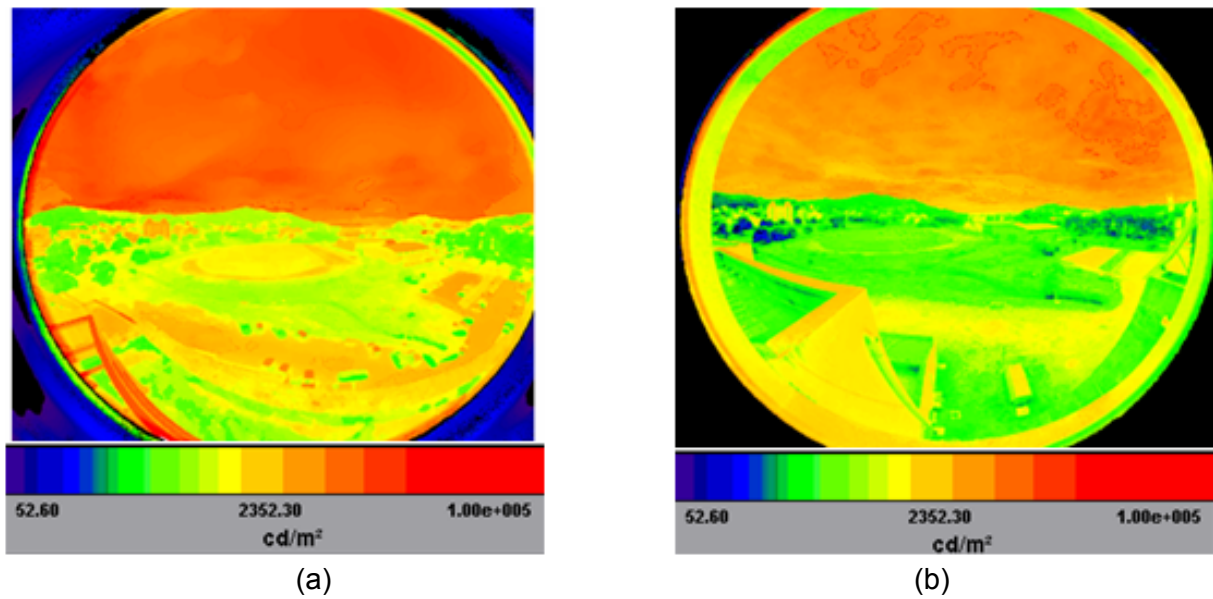


Figura 4.12 a) Imagem adquirida de um meio céu real e entorno em 28 nov. 2007, 09h40min. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 1 dez. 2007, 17h15min.

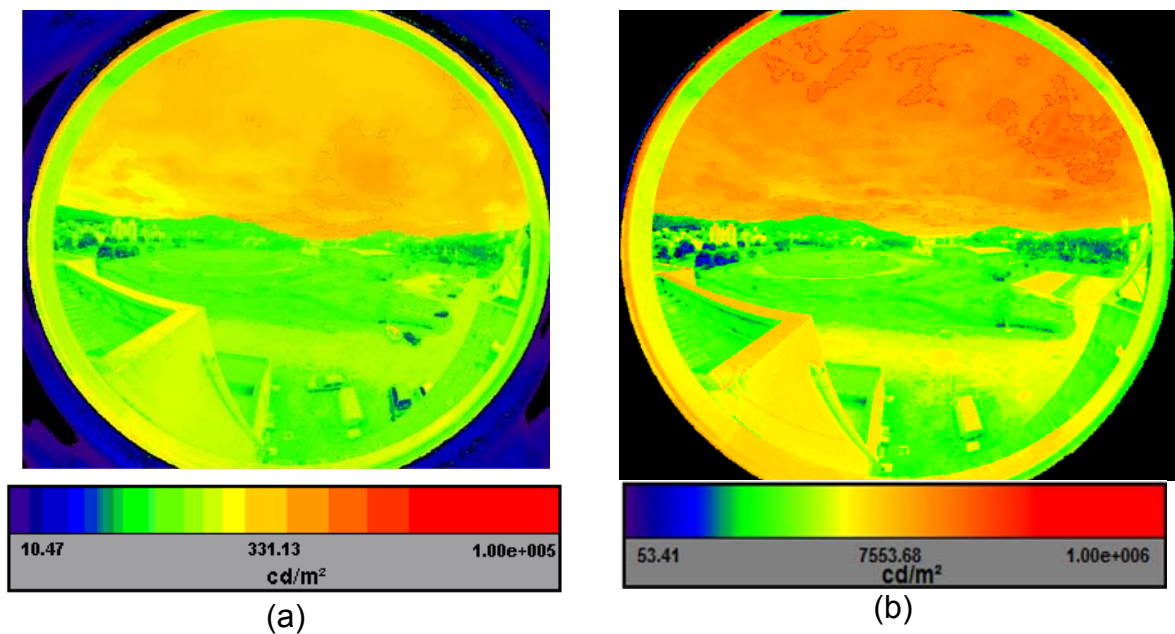


Figura 4.13 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 2 dez. 2007, 18h. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 4 dez. 2007, 14h00min.

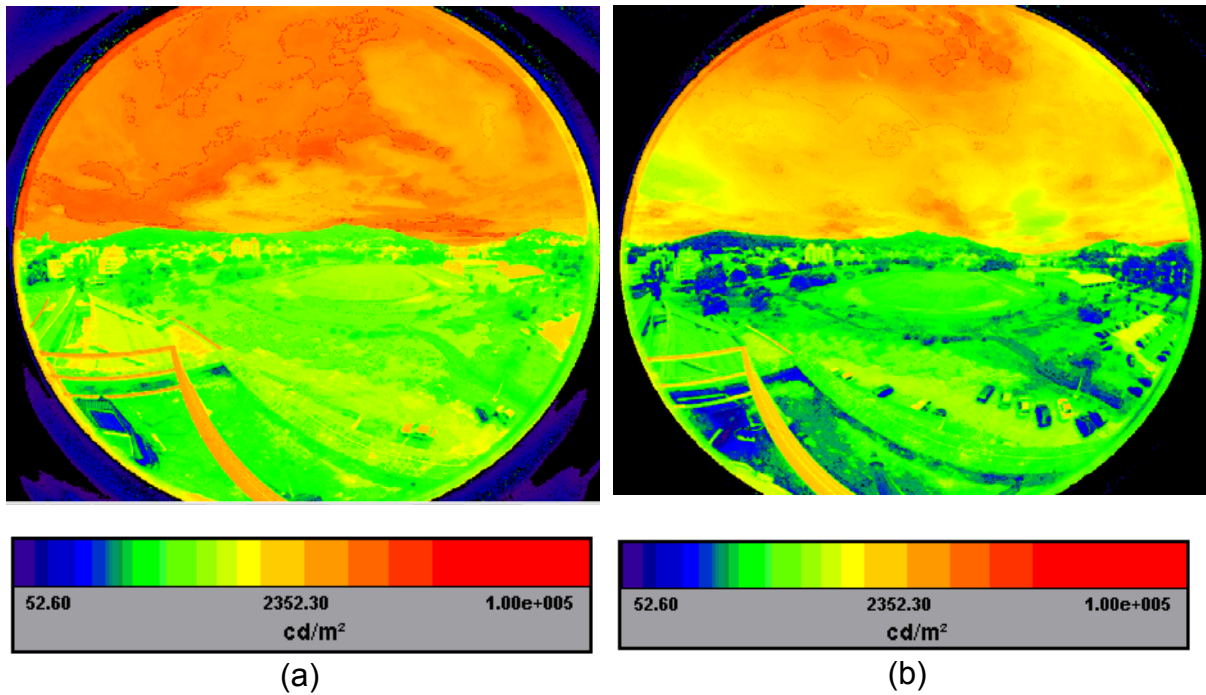


Figura 4.14 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 13 mar. 2008, 14h. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 1 abr. 2008, 16h35min.

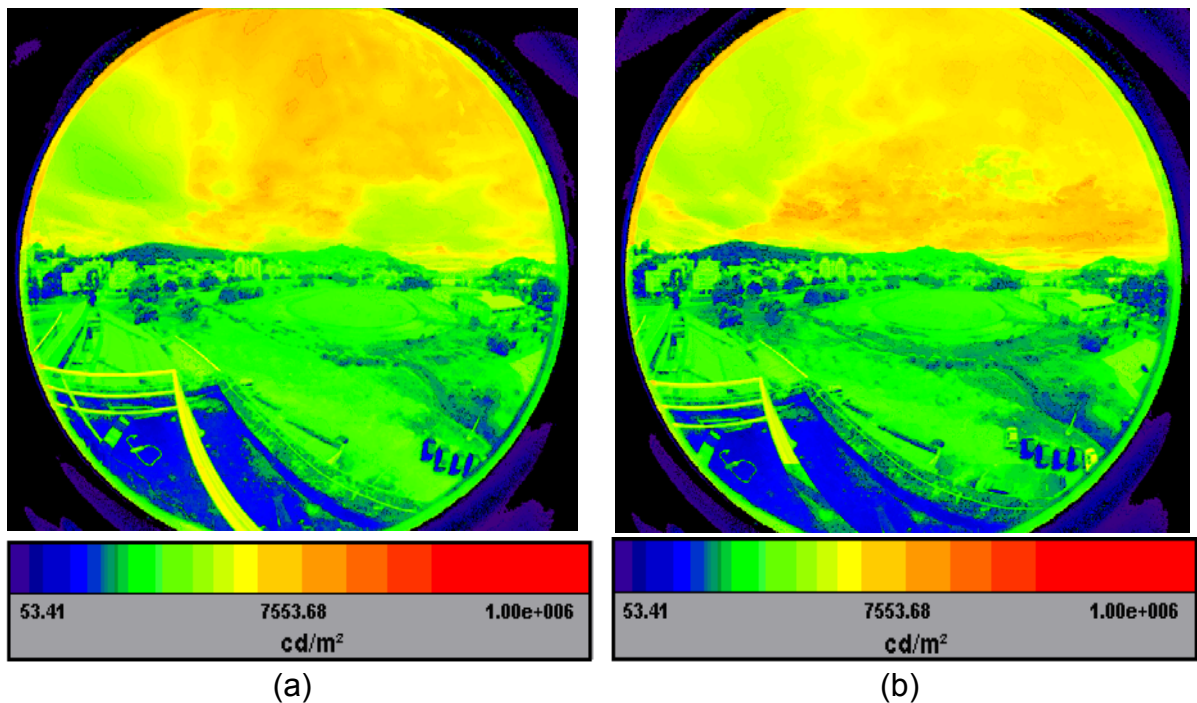


Figura 4.15 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 3 abr. 2008, 8h30min. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 3 abr. 2008, 9h.

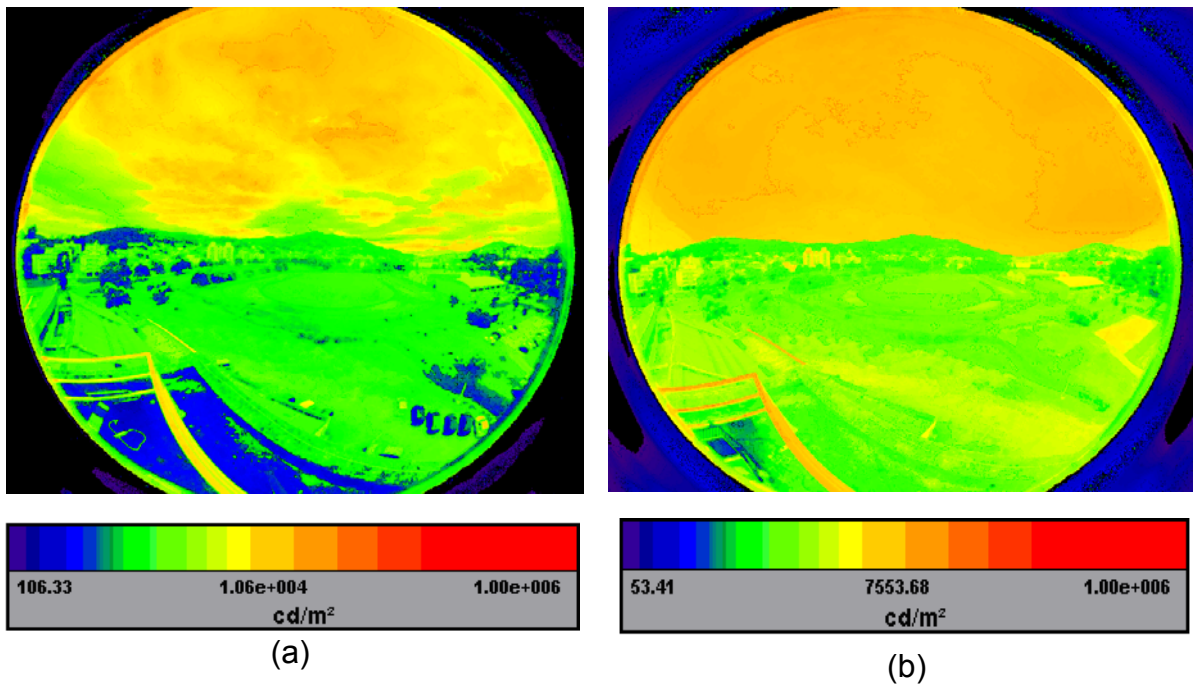


Figura 4.16 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 3 abr. 2008, 9h30min. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 12h.

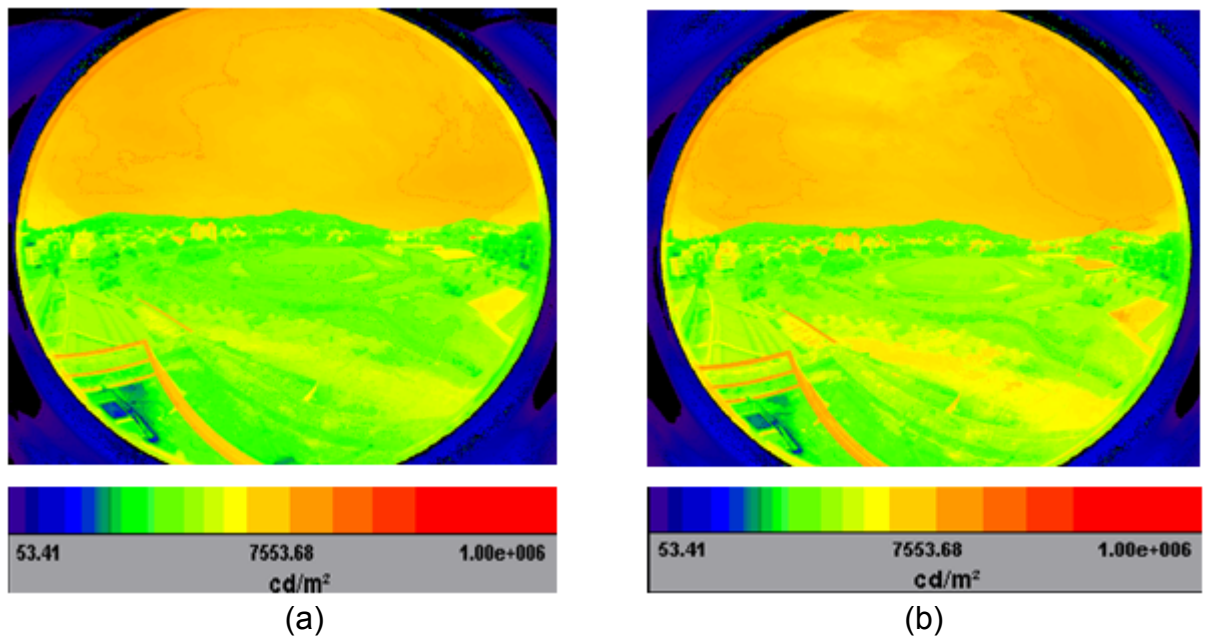


Figura 4.17 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 12h25min. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 12h40min.

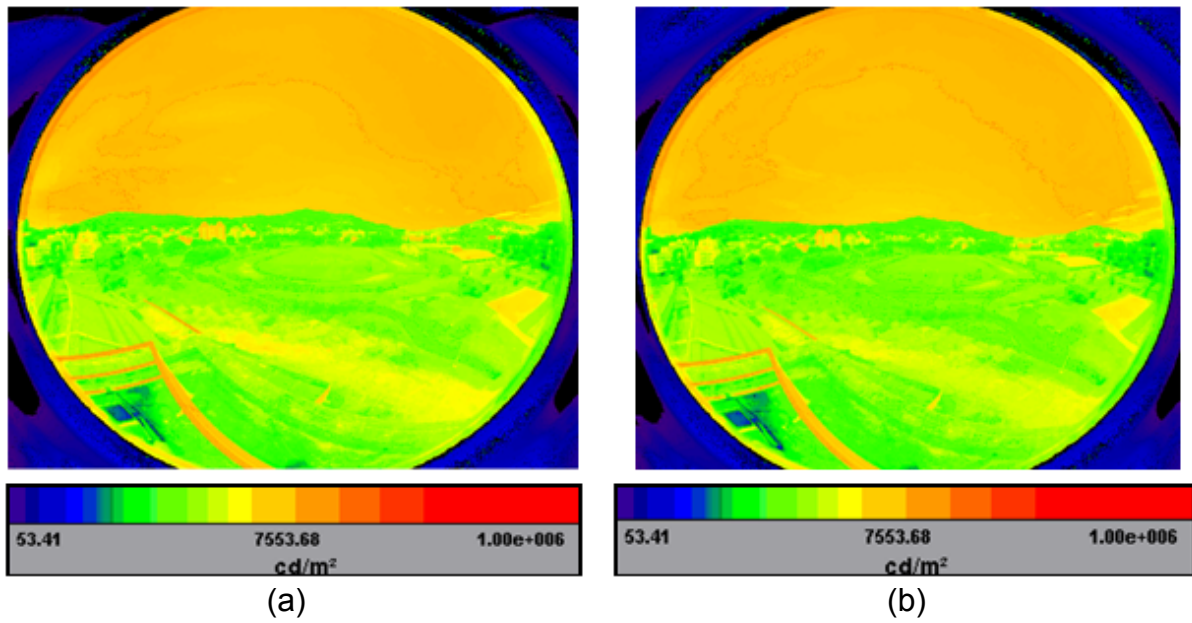


Figura 4.18 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h15min.

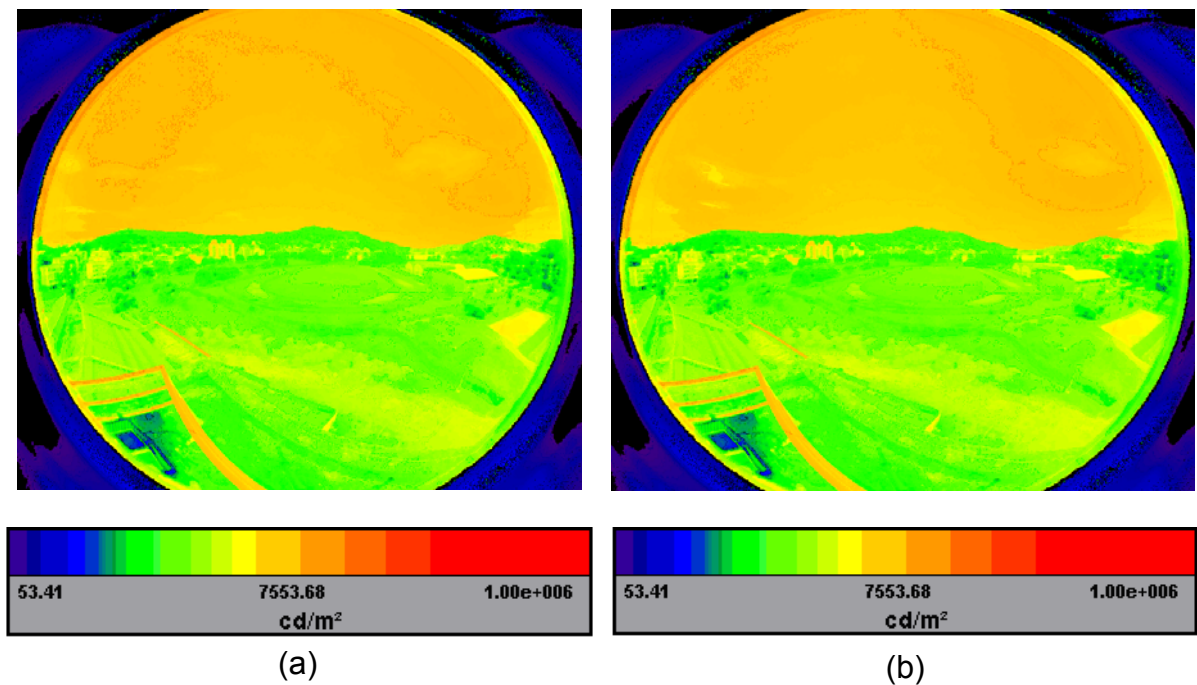
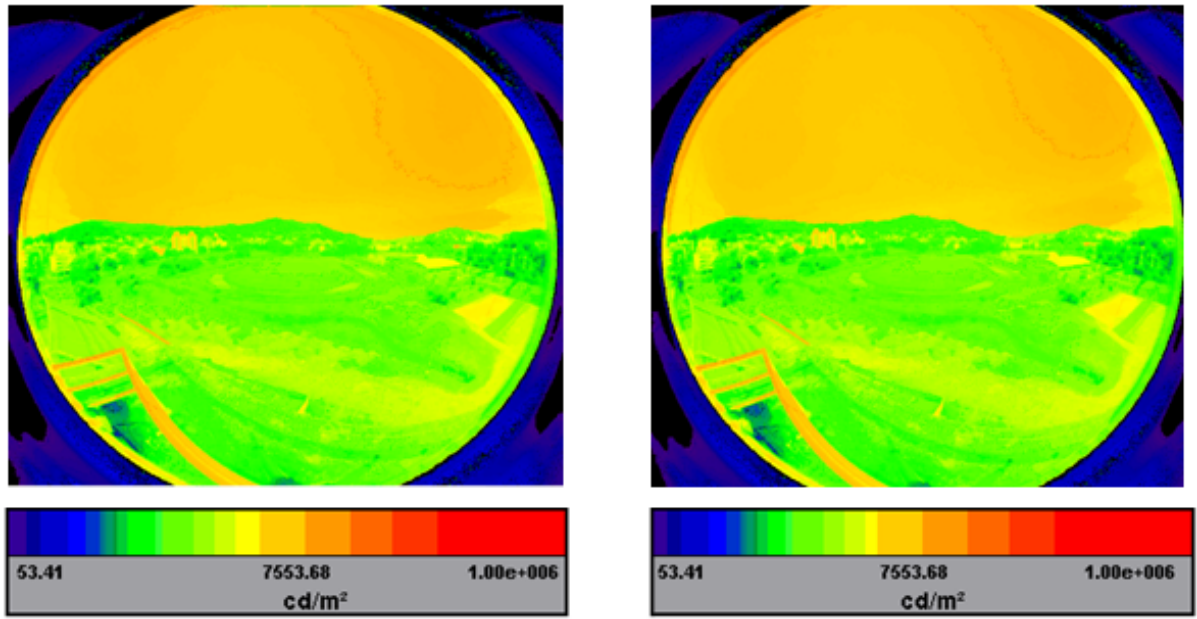


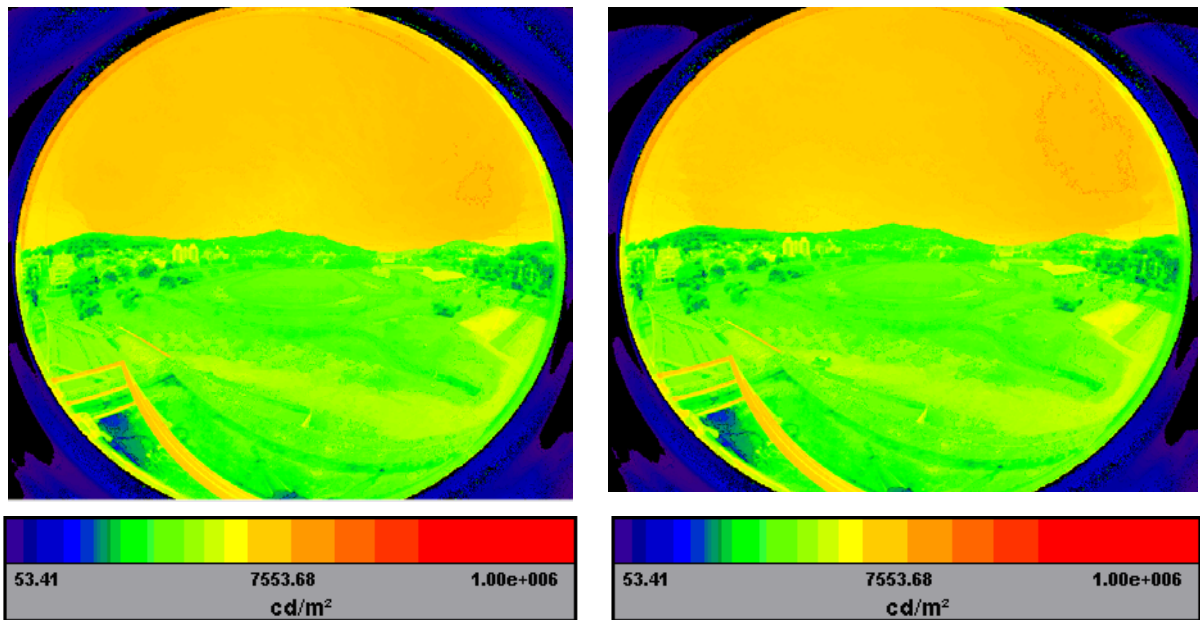
Figura 4.19 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h30min. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h40min.



(a)

(b)

Figura 4.20 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 13h50min.  
b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h.



(a)

(b)

Figura 4.21 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h10min.  
b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h20min.

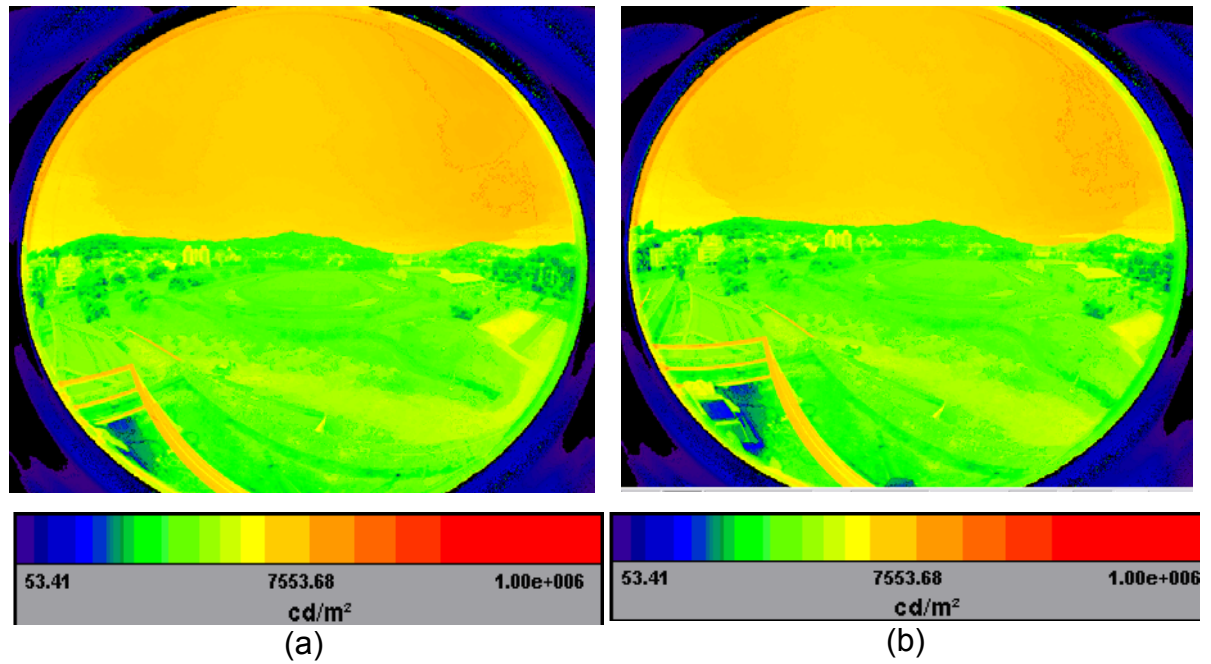


Figura 4.22 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h30min. b) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 14h40min.

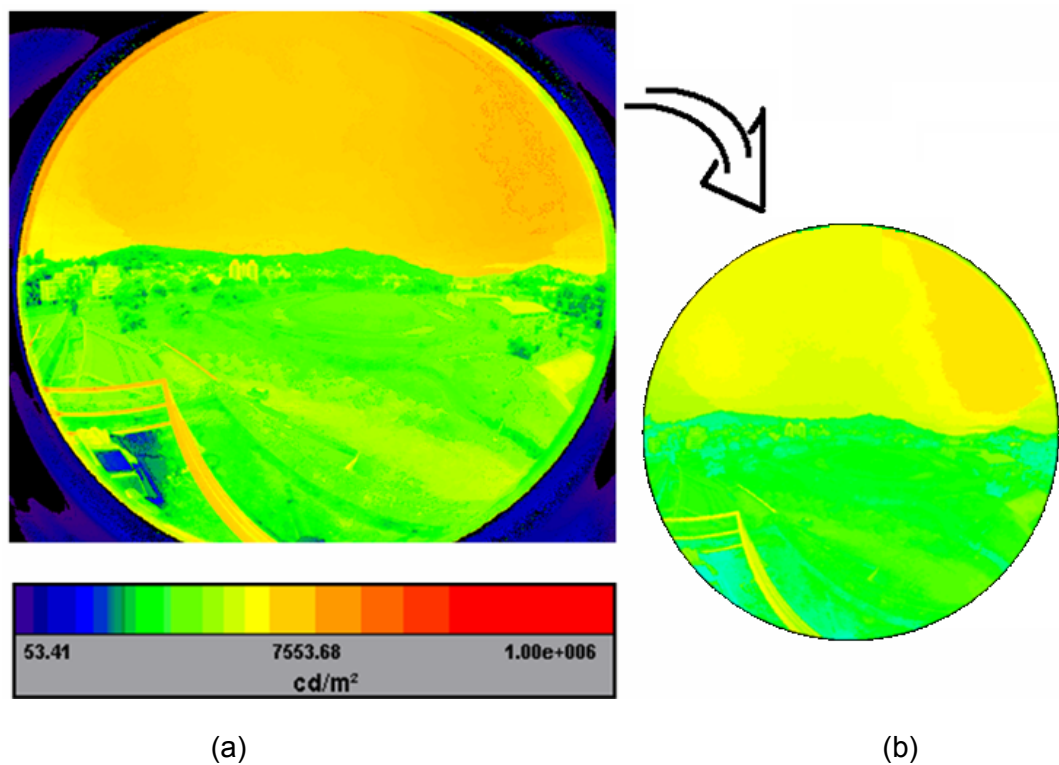


Figura 4.23 a) Imagem adquirida de um meio céu real + entorno em 12 abr. 2008, 15h. b) Imagem do apolux após a inserção do mapeamento digital de 12 abr. 2008, 15h.

Os 25 mapas digitais com a distribuição de luminâncias importadas para o Apolux, conforme o exemplo da ilustração da figura 4.23 (b), e as medições *in loco* de iluminâncias formam a base de dados da pesquisa. Essas informações, assim como o tutorial de configuração do Apolux para a importação da fonte, estão disponibilizados em um disco compacto localizados no apêndice D.

#### 4.4.2 Apresentação dos dados – iluminâncias internas

Com a inserção dos mapas de distribuição de luminâncias no Apolux, foi possível simular a distribuição da iluminação no modelo digital do ambiente. A tabela 4.5 apresenta os resultados das iluminâncias medidas no ambiente real de referência (E\_AR), no modelo físico (E\_M) e simuladas no modelo computacional (E\_IQC). Os dados apresentados estão distribuídos em 25 condições de céu, analisados em diferentes dias e horários. A tabela ainda apresenta os erros relativos em suas duas últimas colunas para cada ponto estudado.

Tabela 4.5 – Apresentação dos resultados de iluminâncias e do erro relativo.

	Posições	Ambiente Real (E_AR) [Lux]	Maquete (E_M) [Lux]	Simulação (E_IQC) [Lux]	Erro_Maquete (%) $\frac{(E_{AR} - E_M)}{E_{AR}} \cdot 100$	Erro_IQC (%) $\frac{(E_{AR} - E_{IQC})}{E_{AR}} \cdot 100$
<b>1</b> <b>02/02/2007</b> <b>10h00min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 3,4	PE	664	682	759	-3	-14
	PD	683	698	798	-2	-17
	Janela	604	615	649	-2	-7
	Centro	472	486	551	-3	-17
	Porta	398	410	495	-3	-24
<b>2</b> <b>26/11/20007</b> <b>08h40min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 17,9	PE	1006	1069	969	-6	4
	PD	1020	1098	996	-8	2
	Janela	931	1023	867	-10	7
	Centro	598	687	523	-15	13
	Porta	301	349	317	-16	-5
<b>3</b> <b>28/11/20007</b> <b>09h40min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 21,2	PE	1160	1129	1218	3	-5
	PD	1419	1395	1377	2	3
	Janela	1129	1101	940	2	17
	Centro	785	860	647	-10	18
	Porta	541	598	457	-11	16



Tabela 4.5 – Apresentação dos resultados de iluminâncias e do erro relativo (continuação).

	Posições	Ambiente Real (E_AR) [Lux]	Maquete (E_M) [Lux]	Simulação (E_IQC) [Lux]	Erro_Maquete (%) $\frac{(E\_AR - E\_M)}{E\_AR} \cdot 100$	Erro_IQC (%) $\frac{(E\_AR - E\_IQC)}{E\_AR} \cdot 100$
<b>4</b> <b>01/12/2007</b> <b>17h15min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 10,7	PE	515	526	530	-2	-3
	PD	561	568	553	-1	1
	Janela	554	539	584	3	-5
	Centro	351	383	330	-9	6
	Porta	240	281	200	-17	17
<b>5</b> <b>02/12/2007</b> <b>18h00min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 3,45	PE	585	593	596	-1	-2
	PD	545	570	458	-5	16
	Janela	528	518	537	2	-2
	Centro	306	350	294	-14	4
	Porta	204	243	174	-19	15
<b>6</b> <b>04/12/2007</b> <b>14h00min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 11,8	PE	928	981	1005	-6	-8
	PD	852	950	844	-12	1
	Janela	788	867	835	-10	-6
	Centro	502	634	557	-26	-11
	Porta	318	380	353	-19	-11
<b>7</b> <b>13/03/2008</b> <b>14h00min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 11,4	PE	666	624	638	6	4
	PD	691	735	716	-6	-4
	Janela	736	715	797	3	-8
	Centro	432	479	475	-11	-10
	Porta	316	363	347	-15	-10
<b>8</b> <b>01/04/2008</b> <b>16h35min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 4,9	PE	389	399	320	-3	18
	PD	413	435	351	-5	15
	Janela	384	395	367	-3	4
	Centro	205	224	195	-9	5
	Porta	152	169	125	-11	18
<b>9</b> <b>03/04/2008</b> <b>08h30min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 9,9	PE	586	542	512	8	13
	PD	669	663	708	1	-6
	Janela	677	655	659	3	3
	Centro	381	430	476	-13	-25
	Porta	259	279	303	-8	-17

Tabela 4.5 – Apresentação dos resultados de iluminâncias e do erro relativo (continuação).

	Posições	Ambiente Real (E_AR) [Lux]	Maquete (E_M) [Lux]	Simulação (E_IQC) [Lux]	Erro_Maquete (%) $\frac{(E_{AR} - E_M)}{E_{AR}} \cdot 100$	Erro_IQC (%) $\frac{(E_{AR} - E_{IQC})}{E_{AR}} \cdot 100$
<b>10</b> <b>03/04/2008</b> <b>09h00min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 12,3	PE	785	693	855	12	-9
	PD	938	898	904	4	4
	Janela	666	657	682	1	-2
	Centro	467	521	539	-12	-15
	Porta	351	385	355	-10	-1
<b>11</b> <b>03/04/2008</b> <b>09h30min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 16,5	PE	872	850	926	3	-6
	PD	847	829	819	2	3
	Janela	1028	988	1020	4	1
	Centro	561	637	499	-14	11
	Porta	357	410	287	-15	20
<b>12</b> <b>12/04/2008</b> <b>12h00min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 17,7	PE	1466	1408	1521	4	-4
	PD	1499	1466	1580	2	-5
	Janela	1449	1424	1395	2	4
	Centro	944	1100	828	-17	12
	Porta	671	748	505	-11	25
<b>13</b> <b>12/04/2008</b> <b>12h25min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 18,1	PE	1466	1404	1399	4	5
	PD	1499	1439	1447	4	3
	Janela	1274	1261	1272	1	0
	Centro	883	1039	767	-18	13
	Porta	656	755	541	-15	18
<b>14</b> <b>12/04/2008</b> <b>12h40min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 18,2	PE	1584	1524	1730	4	-9
	PD	1591	1547	1762	3	-11
	Janela	1482	1470	1380	1	7
	Centro	999	1174	901	-18	10
	Porta	721	842	589	-17	18
<b>15</b> <b>12/04/2008</b> <b>13h00min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 18,8	PE	1493	1435	1369	4	8
	PD	1550	1516	1440	2	7
	Janela	1465	1449	1258	1	14
	Centro	964	1139	777	-18	19
	Porta	680	800	496	-18	27
<b>16</b> <b>12/04/2008</b> <b>13h15min</b> Iluminância no plano vertical [kLux] 18,9	PE	1429	1371	1318	4	8
	PD	1466	1441	1343	2	8
	Janela	1420	1408	1228	1	14
	Centro	911	1076	762	-18	16
	Porta	646	757	498	-17	23

Tabela 4.5 – Apresentação dos resultados de iluminâncias e do erro relativo (continuação).

	Posições	Ambiente Real (E_AR) [Lux]	Maquete (E_M) [Lux]	IQC (E_IQC) [Lux]	Erro_Maquete (%) $\frac{(E\_AR - E\_M)}{E\_AR} \cdot 100$	Erro_IQC (%) $\frac{(E\_AR - E\_IQC)}{E\_AR} \cdot 100$
<b>17</b>						
<b>12/04/2008</b>	PE	1383	1342	1253	3	9
<b>13h30min</b>	PD	1445	1417	1389	2	4
Iluminância no plano vertical [kLux]	Janela	1390	1378	1219	1	12
18,9	Centro	895	1054	735	-18	18
	Porta	630	733	489	-16	22
<b>18</b>						
<b>12/04/2008</b>	PE	1388	1342	1260	3	9
<b>13h40min</b>	PD	1442	1415	1353	2	6
Iluminância no plano vertical [kLux]	Janela	1371	1361	1194	1	13
19,1	Centro	894	1057	736	-18	18
	Porta	638	751	465	-18	27
<b>19</b>						
<b>12/04/2008</b>	PE	1359	1305	1232	4	9
<b>13h50min</b>	PD	1422	1395	1384	2	3
Iluminância no plano vertical [kLux]	Janela	1333	1325	1141	1	14
18,9	Centro	872	1034	717	-19	18
	Porta	619	729	498	-18	20
<b>20</b>						
<b>12/04/2008</b>	PE	1254	1210	1267	4	-1
<b>14h00min</b>	PD	1351	1321	1323	2	2
Iluminância no plano vertical [kLux]	Janela	1290	1281	1149	1	11
18,9	Centro	825	980	722	-19	12
	Porta	576	682	486	-18	16
<b>21</b>						
<b>12/04/2008</b>	PE	1277	1218	1152	5	10
<b>14h10min</b>	PD	1240	1218	1254	2	-1
Iluminância no plano vertical [kLux]	Janela	1227	1213	1109	1	10
18,9	Centro	785	935	662	-19	16
	Porta	556	660	446	-19	20
<b>22</b>						
<b>12/04/2008</b>	PE	1291	1238	1142	4	12
<b>14h20min</b>	PD	1273	1255	1264	1	1
Iluminância no plano vertical [kLux]	Janela	1215	1206	1089	1	10
18,8	Centro	799	953	673	-19	16
	Porta	568	674	436	-19	23
<b>23</b>						
<b>12/04/2008</b>	PE	1479	1420	1293	4	13
<b>14h30min</b>	PD	1499	1448	1385	3	8
Iluminância no plano vertical [kLux]	Janela	1281	1270	1075	1	16
18,1	Centro	898	1054	684	-17	24
	Porta	669	771	486	-15	27

Tabela 4.5 – Apresentação dos resultados de iluminâncias e do erro relativo (continuação).

	Posições	Ambiente Real (E_AR) [Lux]	Maquete (E_M) [Lux]	IQC (E_IQC) [Lux]	Erro_Maquete (%) $\frac{(E\_AR - E\_M)}{E\_AR} \cdot 100$	Erro_IQC (%) $\frac{(E\_AR - E\_IQC)}{E\_AR} \cdot 100$
<b>24</b> 12/04/2008 14h40min Iluminância no plano vertical [kLux] 17,6	PE	1274	1236	1212	3	5
	PD	1234	1214	1265	2	-3
	Janela	1180	1170	1064	1	10
	Centro	774	924	664	-19	14
	Porta	548	665	462	-21	16
	<b>25</b>					
12/04/2008 15h00min Iluminância no plano vertical [kLux] 16,8	PE	1238	1214	1136	2	8
	PD	1179	1190	1238	-1	-5
	Janela	1082	1095	1061	-1	2
	Centro	732	893	665	-22	9
	Porta	514	632	467	-23	9

#### 4.4.3 Análise dos resultados

As avaliações apresentadas nesta seção foram realizadas separando-se os pontos de análise “PD”, “PE”, “janela”, “centro” e “porta” para cada mapeamento realizado. Todos os valores de iluminâncias simulados foram comparados com os valores de iluminâncias medidos no ambiente de referência.

Da mesma maneira como foi realizado o procedimento metodológico no céu artificial, foram também determinadas as correlações para estabelecer o grau de aproximação entre o comportamento luminoso simulado pelas ferramentas e o medido no ambiente de referência. Os resultados apresentam uma forte correlação entre os parâmetros analisados, conforme mostram as figuras 4.24 a 4.28.

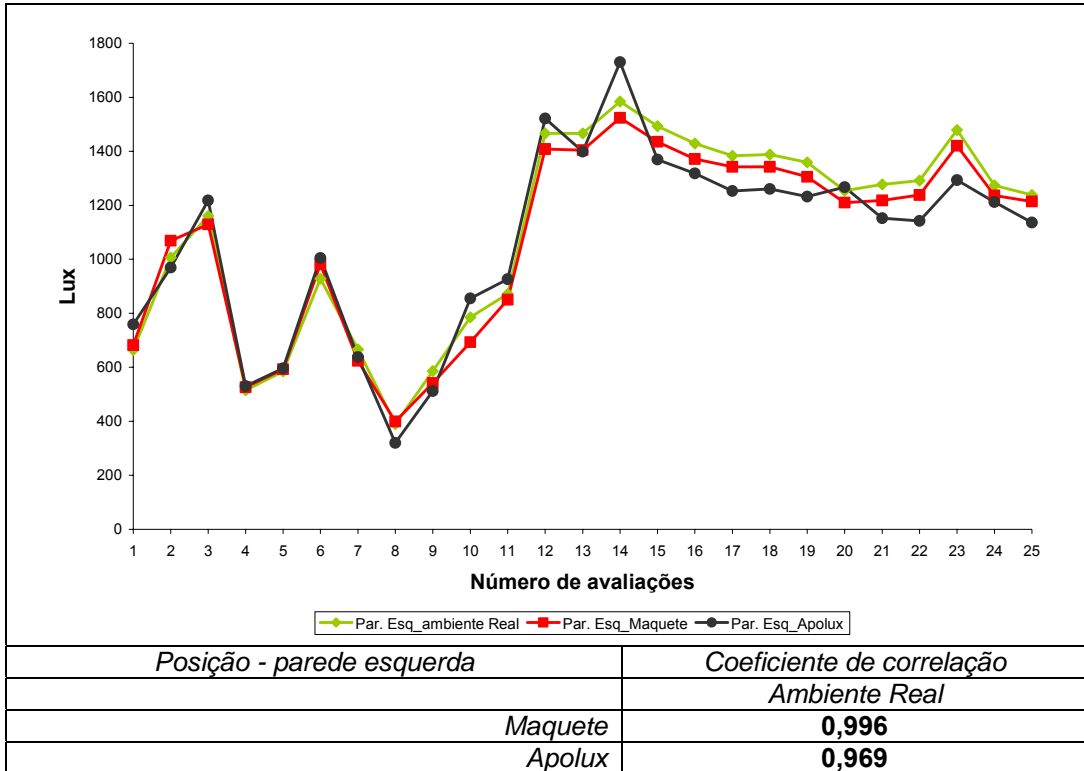


Figura 4.24 – Comparação da iluminância: ambiente real x simulações na posição “parede esquerda”.

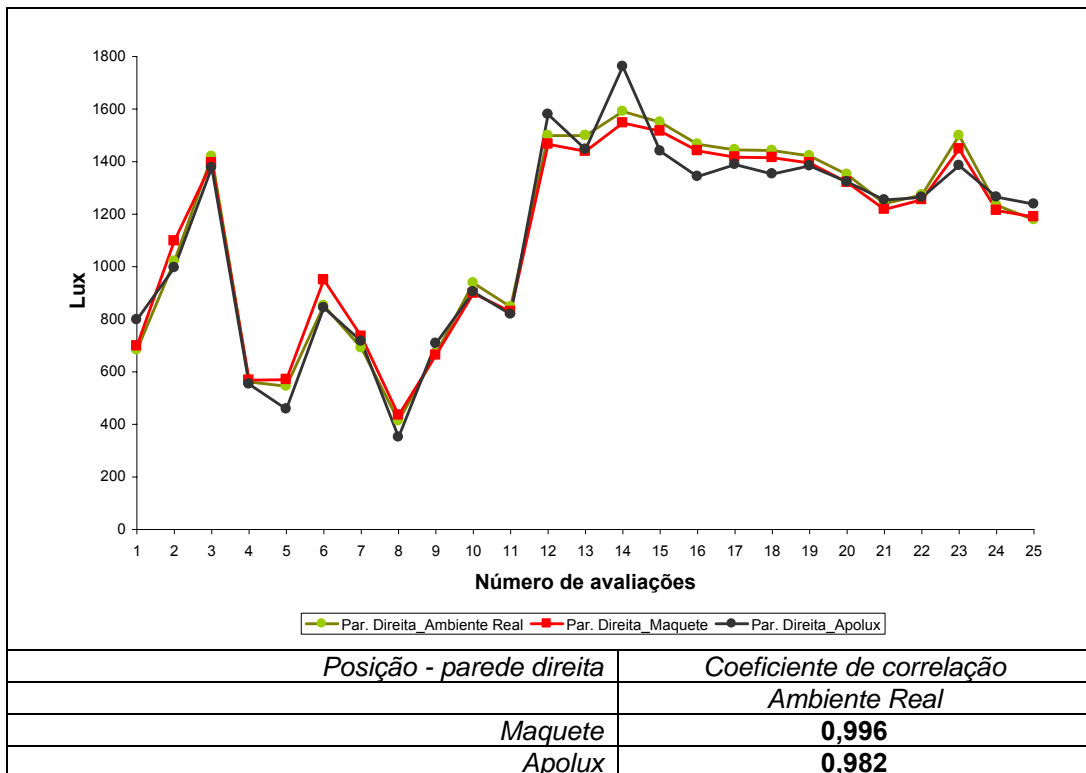


Figura 4.25 – Comparação da iluminância: ambiente real x simulações na posição “parede direita”.

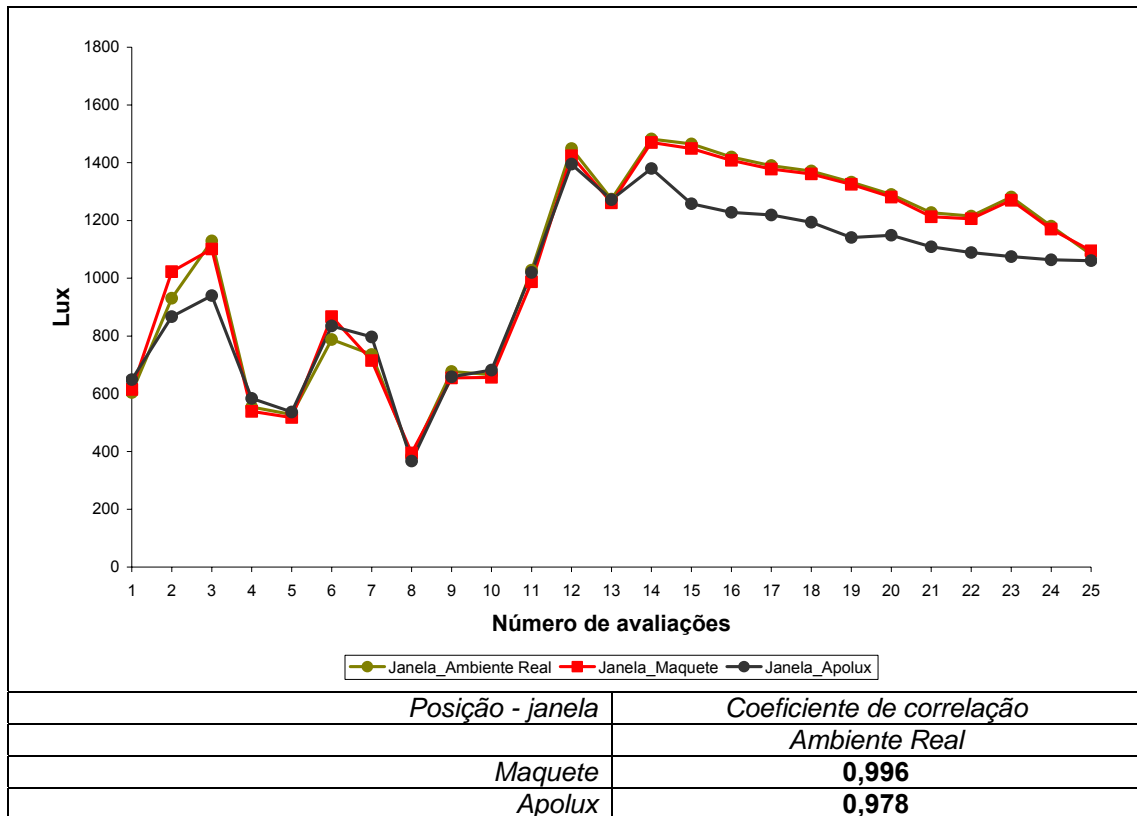


Figura 4.26 – Comparação da iluminância: ambiente real x simulações na posição “janela”.

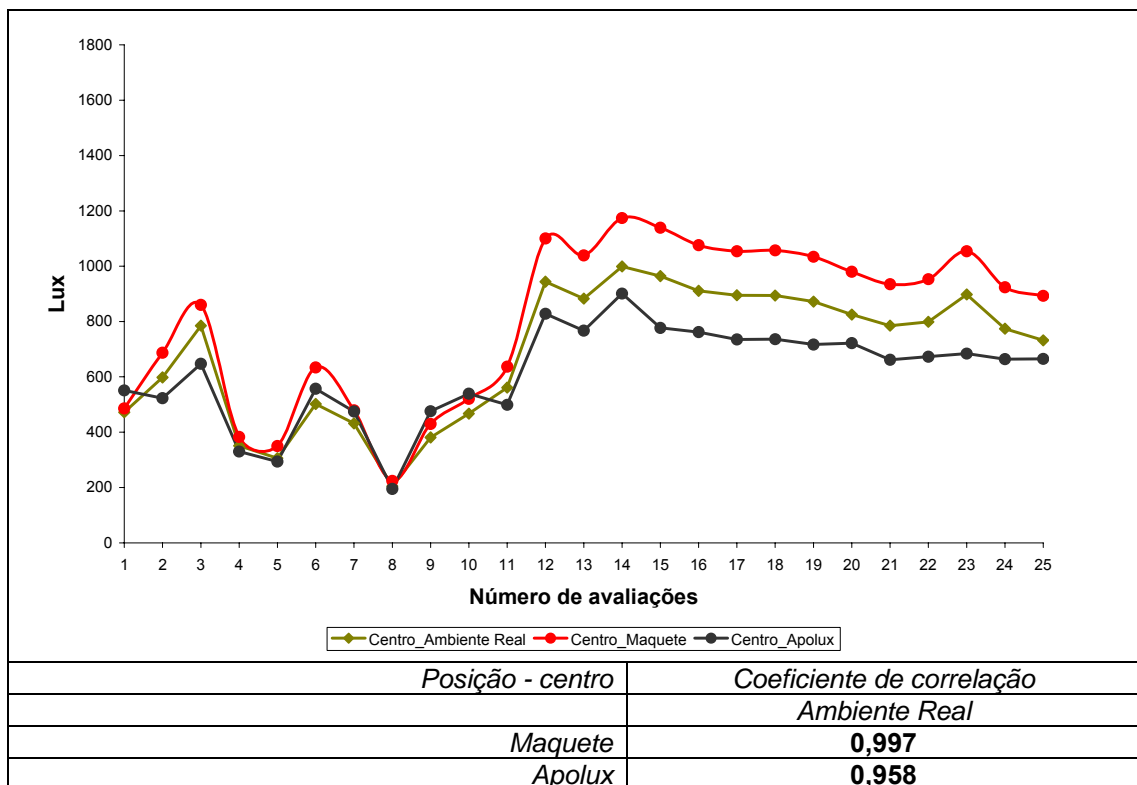


Figura 4.27 – Comparação da iluminância: ambiente real x simulações na posição “centro”.

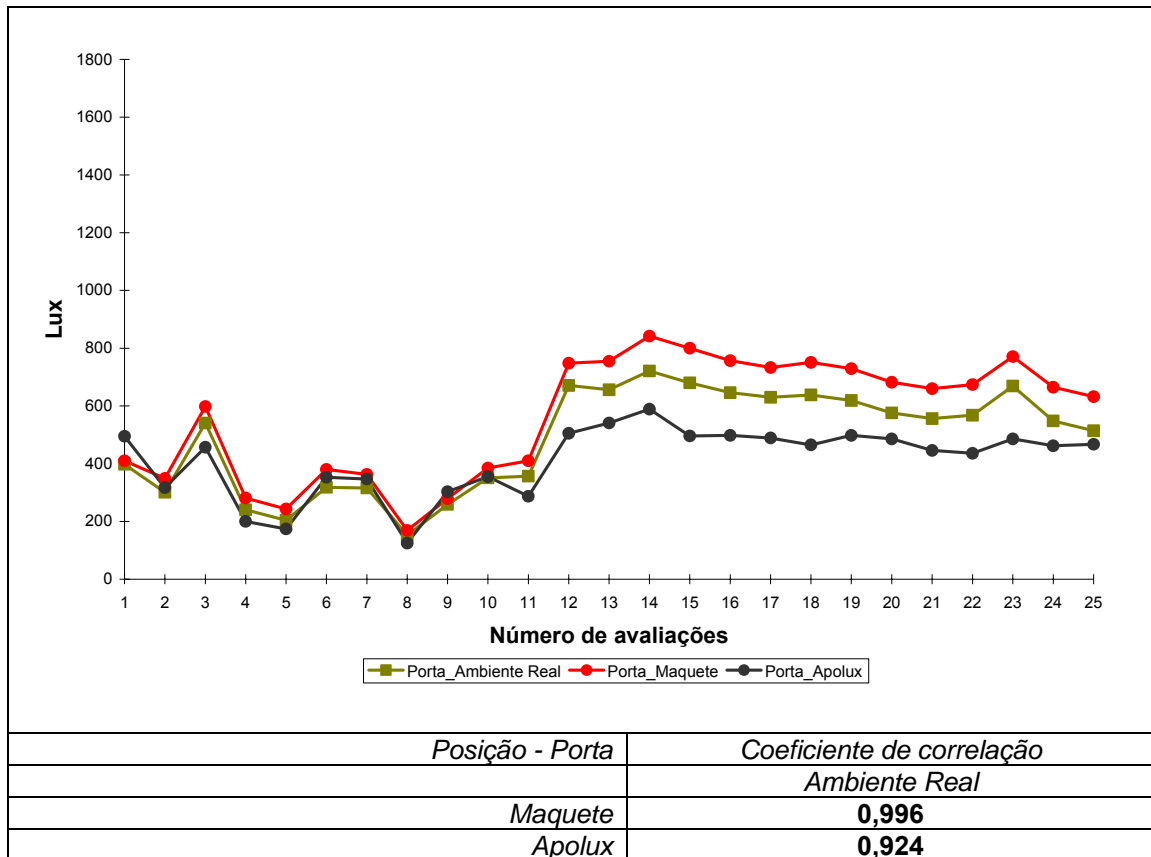


Figura 4.28 – Comparação da iluminância - ambiente real x simulações na posição “porta”.

A análise entre o ambiente real e a maquete indica uma correlação de 99,6% nos pontos próximos à abertura. Quando realizada pela simulação computacional, indica uma correlação média de 97,6%, sendo que, à medida que os pontos ficam mais afastados da abertura, a correlação entre os parâmetros analisados na simulação computacional diminui, aproximadamente, 2% na posição “centro” e 8% na posição “porta”, enquanto, na maquete, permanecem estáveis.

Observando-se os resultados ilustrados pelos gráficos, pode-se constatar que, nos pontos mais afastados da janela, a simulação computacional subestima os valores reais de iluminâncias, e a simulação ocorrida pelo modelo físico superestima os valores reais medidos no ambiente de estudos. Exemplificando: no dia 12 de abril de 2008, 12h40min, página 94, na posição “porta”, os resultados simulados na maquete indicaram luminâncias de 842 Lux e, na simulação computacional, 589 Lux. Ao observar o exemplo do dia 1º de abril de 2008, 16h35min, página 93, na posição “porta”, tem-se uma simulação de 169 Lux na maquete e 125 Lux na simulação computacional.

O desempenho do modelo físico, avaliado em 125 registros de iluminâncias, pode ser resumido da seguinte maneira: i) 64% da frequência de ocorrência resultaram erros de até 10%; ii) 35,2% da frequência de ocorrência resultaram erros entre 10% e 25%; iii) 0,8% resultou erro acima de 25%. As diferenças entre a simulação e o comportamento real da iluminação estiveram 99,2% das vezes com erros relativos até 25% (figura 4.29).

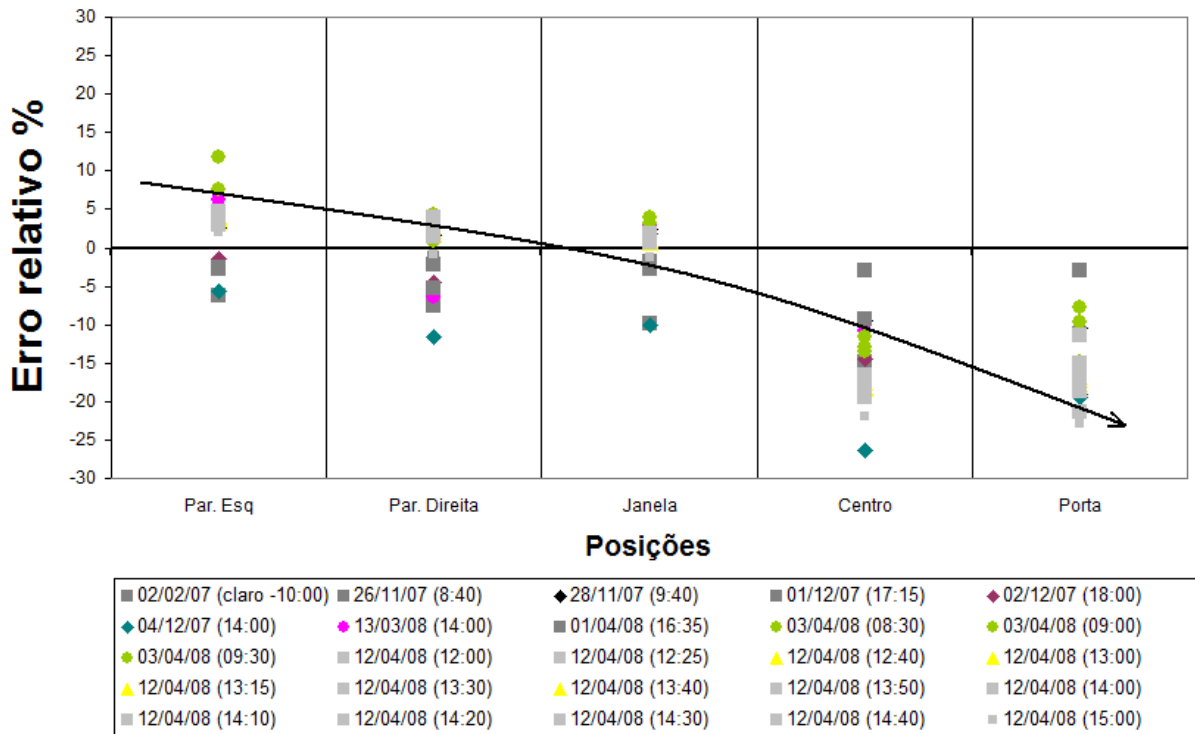


Figura 4.29 – Comportamento dos erros relativos na simulação desenvolvida com o uso de maquete.

Para fazer uma comparação entre o desempenho das ferramentas de simulação, foi feita uma análise do comportamento luminoso no interior do ambiente real para cada posição e em função do intervalo entre 8h30min e 18h00min (figura 4.30).



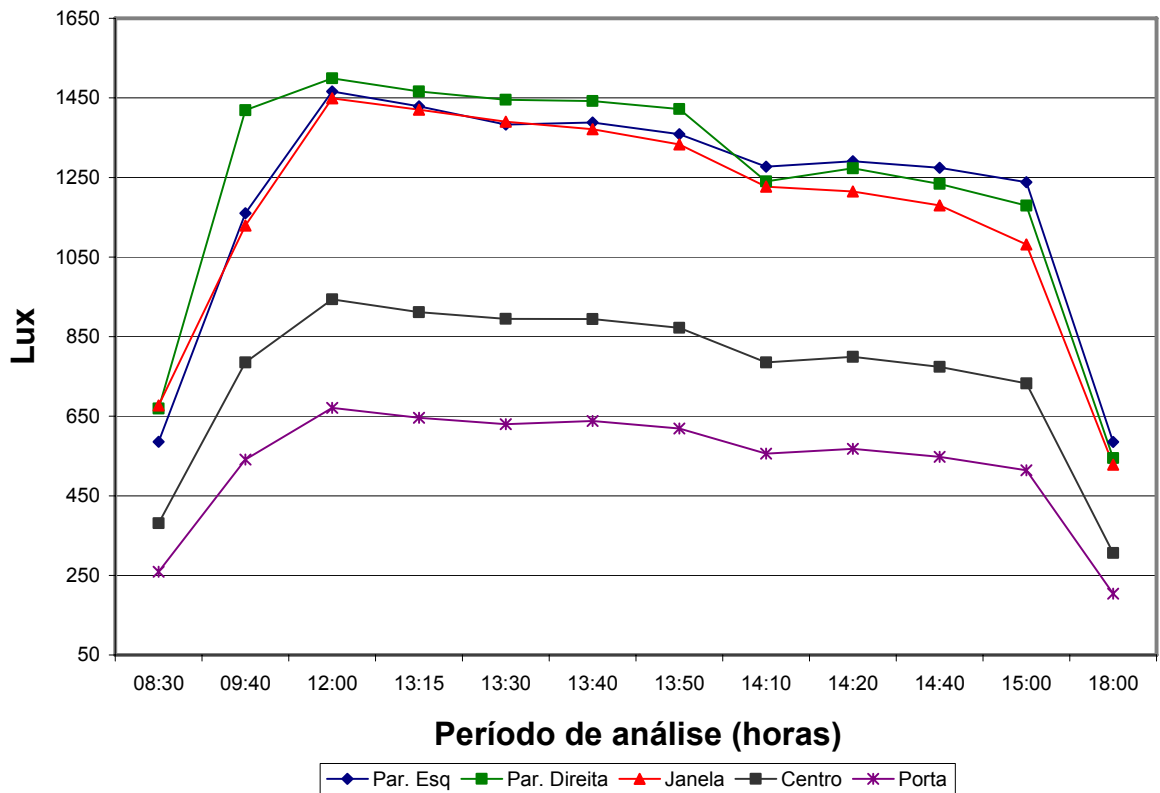


Figura 4.30 – Comportamento luminoso no ambiente real.

As figuras 4.31 e 4.32 ilustram a variação das discrepâncias das simulações física e computacional para o mesmo período.

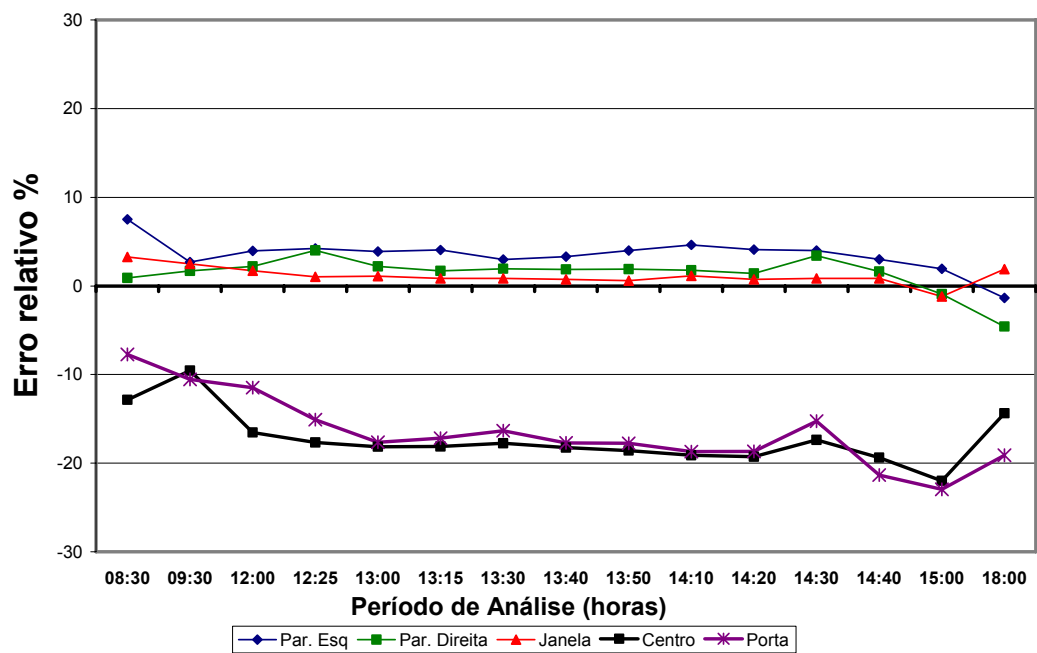


Figura 4.31 – Comportamento das discrepâncias entre o modelo físico e o ambiente real.

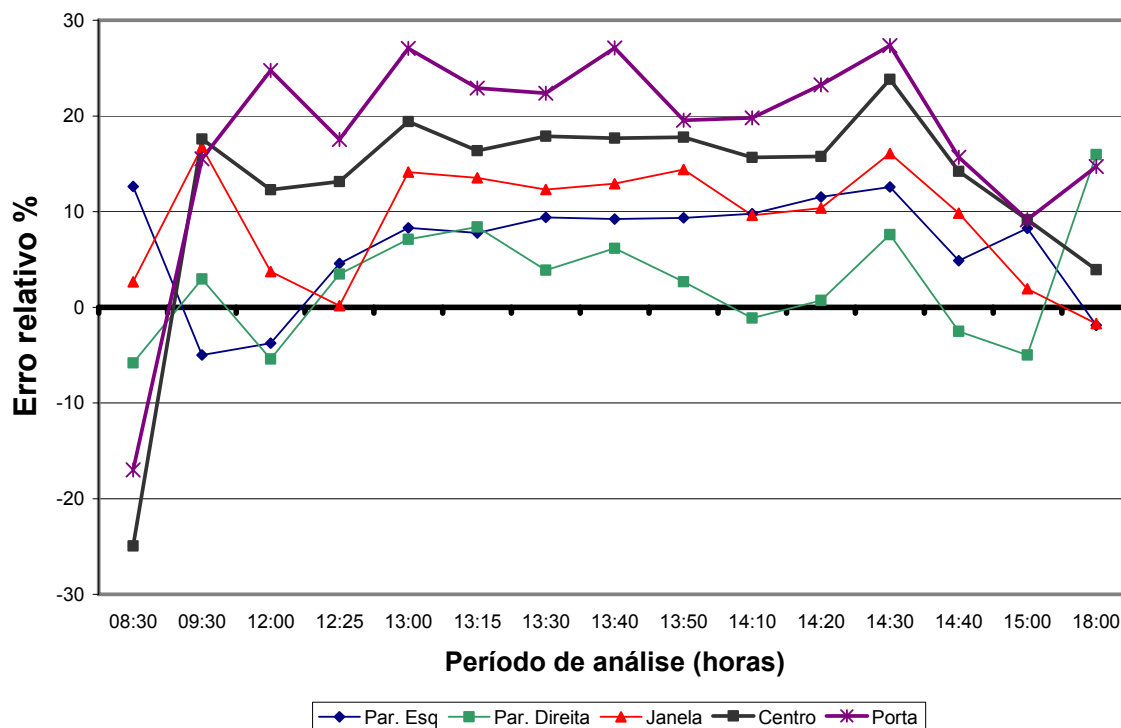


Figura 4.32 – Comportamento das discrepâncias entre a simulação computacional e o ambiente real.

Como observado, além de subestimar os resultados nos pontos mais afastados da janela, as discrepâncias na simulação computacional apresentam-se mais afastadas do comportamento luminoso real. Comparada à simulação computacional, observa-se que a simulação no modelo físico aproximou os resultados de iluminâncias em relação aos medidos no ambiente real com menores distorções.

Para visualizar um detalhamento do desempenho das ferramentas de simulação em relação a cada de ponto de análise são apresentados os histogramas de frequência de erro relativo em relação à medição no ambiente real. A figura 4.33 ilustra o desempenho do modelo físico em escala reduzida e a figura 4.34 o desempenho do Apolux. São identificados pela relação entre a frequência de ocorrência e as discrepâncias calculadas entre a iluminação real e a simulada.

O eixo das abscissas apresenta os erros relativos com uma faixa de variação de  $\pm 25\%$ , e o eixo das ordenadas apresenta a frequência relativa. À medida que a largura da base do histograma aumenta, o desempenho da ferramenta diminui.

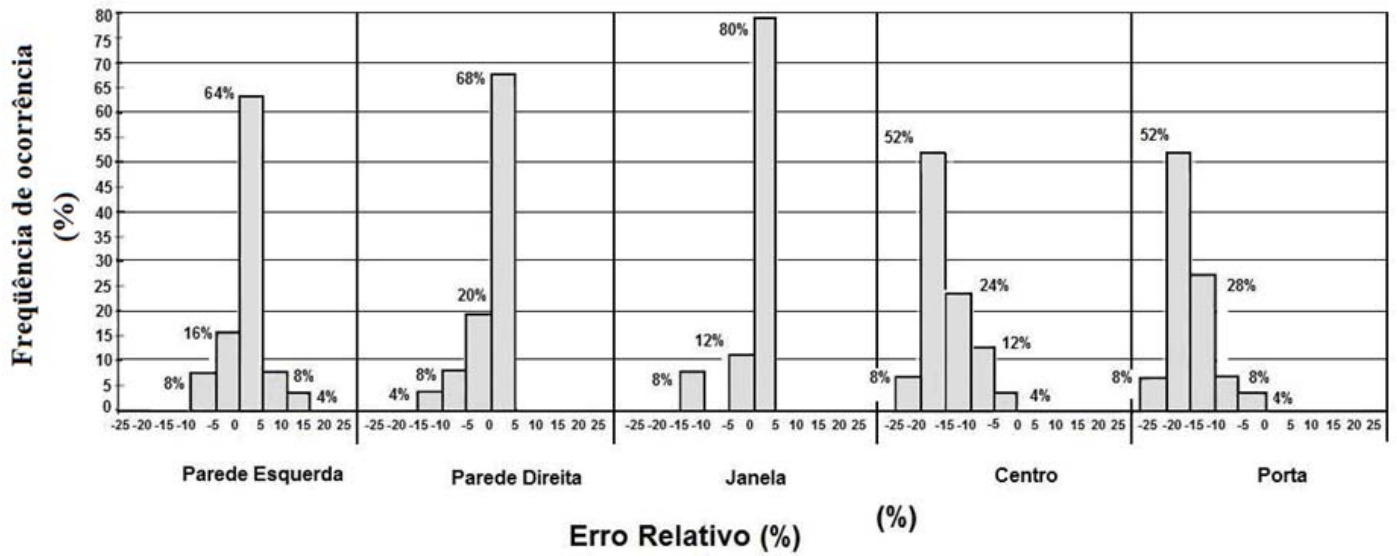


Figura 4.33 – Frequência de ocorrência dos erros relativos – ambiente real x modelo físico em escala reduzida.

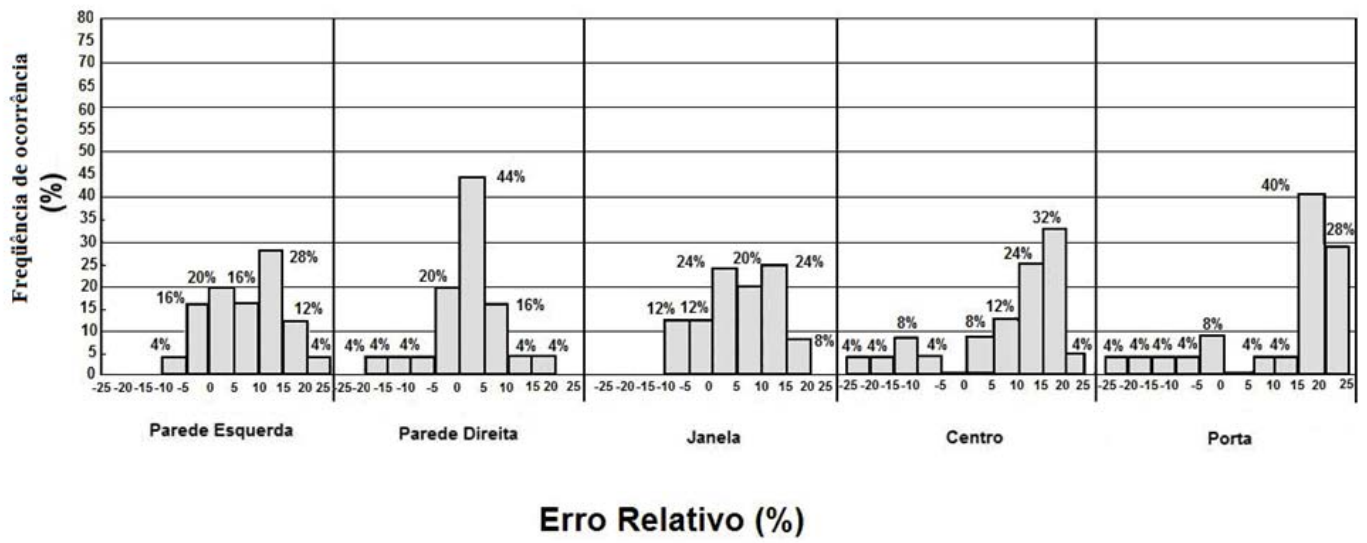


Figura 4.34 – Frequência de ocorrência dos erros relativos – ambiente real x Apolux.

Os maiores erros aparecem nas posições “centro” e “porta”, e esse comportamento ocorreu em ambas as ferramentas. O sinal negativo do erro relativo indica que a maquete simula os valores de iluminâncias acima dos valores do ambiente real, ocorrendo um deslocamento para a esquerda. O sinal positivo do erro relativo indica que a simulação computacional apresenta valores abaixo do ambiente real, razão do deslocamento para a direita do eixo das abscissas.

Em relação à simulação no modelo físico, os pontos próximos da abertura mostram erros com uma faixa de variação de  $\pm 5\%$  e frequências acima de 50%. O melhor desempenho ocorre na posição janela, com 80% de frequência para erros relativos entre  $\pm 5\%$ .

Em relação à simulação computacional, o desempenho também é melhor nesses pontos próximos à abertura, porém com um erro médio de  $\pm 10\%$ . A base do histograma da figura 4.34 mostra o pior comportamento da ferramenta de simulação na posição porta, com 68% de frequência de ocorrência com erros relativos entre 15% e 25%. Nesse contexto, pode-se afirmar que a maquete simula a iluminação natural com melhor desempenho, principalmente nos pontos próximos da abertura.

#### **4.4.4 Validação da ferramenta de simulação computacional**

Em relação ao procedimento de avaliação da ferramenta de simulação computacional desse trabalho, toma-se como referência a proposta sugerida por Mardaljevic (2000). A análise desenvolvida nessa seção leva em consideração:

- a precisão fotométrica da fonte;
- os planos luminosos compostos pela abóbada e o entorno;
- os erros relativos entre os valores teóricos e os experimentais, obtidos com céu real.

A tabela 4.6, compara os resultados que validaram o programa Radiance com os resultados da proposta deste trabalho. Foram analisadas vinte e cinco tomadas de dados nos cinco pontos de análise, resultando 125 simulações computacionais de iluminâncias na ferramenta computacional Apolux. No Radiance as informações para avaliar as iluminâncias simuladas a partir do mapeamento digital da abóbada

celeste (itens 2.2 e 2.3) foram realizadas em seis posições durante um ano, totalizando  $1,33 \times 10^6$  registros.

Tabela 4.6 – Resultados dos procedimentos de validação dos programas Radiance e Apolux.

<b>RADIANCE</b>	
Fonte: Abóbada (* 68% medido + 32% interpolado)	
Discrepâncias entre iluminâncias medidas e simuladas	
De 4.524 registros de iluminâncias avaliados: 2.885 (64%) apresentaram →	Até 10%
1.557 (34%) apresentaram →	Entre 10% e 25%
82 (2%) apresentaram →	Acima de 50%
*54.600 registros de luminâncias medidas. Gerando informações para avaliar a iluminância em seis posições (medidas simultâneas) em um ano (364 análises). Fonte: Mardaljevic (2000).	
<b>APOLUX</b>	
Fonte: 1/2 abóbada + Entorno (**100%)	
Discrepâncias entre iluminâncias medidas e simuladas	
De 125 registros de iluminâncias avaliados: 68 (54,4%) apresentaram →	Até 10%
54 (43,2%) apresentaram →	Entre 10% e 25%
3 (2,4%) apresentaram →	Acima de 25%
** $1,33 \times 10^6$ registros de luminâncias mapeadas digitalmente para cada imagem, em um total de 25 imagens fotometradas. Avaliações de medições de iluminâncias em cinco posições (medidas simultâneas) totalizando 125 avaliações.	

Mardaljevic (2000) verificou no Radiance uma frequência de ocorrência de 64% para as discrepâncias até 10%. No Apolux, foi observada uma frequência de ocorrência de 54,4% para os erros relativos até 10%. No intervalo entre 10% e 25%, ocorreu uma frequência de ocorrência de 34% no Radiance e 43,2% no Apolux.

Pode-se dizer que, das 125 simulações ocorridas no Apolux, 97,6% apresentaram discrepâncias de até 25% e somente 2,4% ficaram acima desse valor, porém todas inferiores a 50%. No simulador computacional Radiance, 2% das ocorrências resultaram discrepâncias acima de 50%.

A figura 4.35 mostra as discrepâncias entre a simulação computacional do Apolux e o ambiente real.

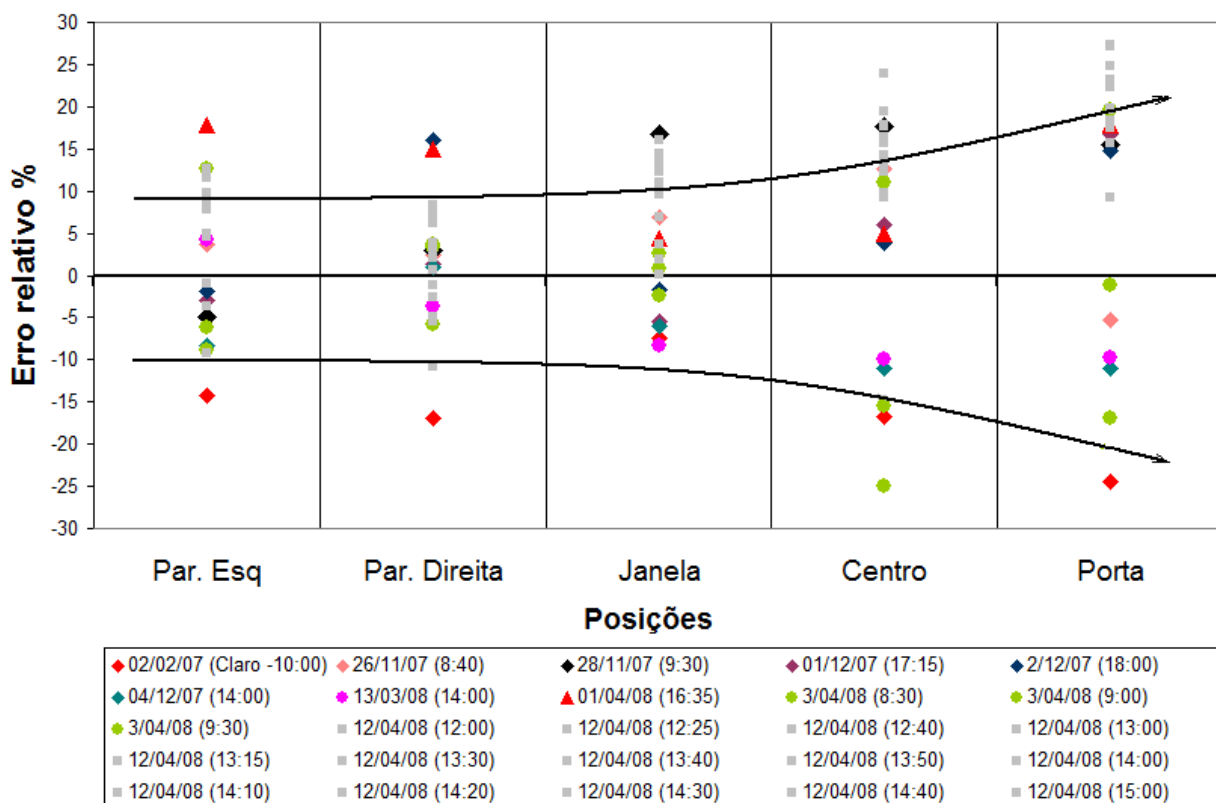


Figura 4.35 – Comportamento dos erros relativos na simulação computacional desenvolvida pelo Apolux.

A validação experimental é uma indicação da CIE 171 (2006) e, atualmente, representa a principal referência para o tema. Mesmo não apontando um critério quantitativo definido que caracterize um afastamento máximo aceitável entre a simulação e a realidade, percebe-se que o termo “validação” está diretamente relacionando ao conhecimento de quanto os valores simulados se afastam dos resultados reais.

Os dados apresentados mostram uma significativa semelhança com o comportamento que resultou na validação experimental do Radiance, permitindo afirmar que o Apolux também representa a realidade de maneira consistente, e portando, pode ser considerado válido como uma ferramenta de simulação.

#### 4.5 Considerações finais

Nesta pesquisa, tanto o modelo digital, quanto a maquete, foram criteriosamente construídos e buscou-se representar da melhor maneira as propriedades reflexivas das paredes, teto e piso, tanto na magnitude como na distribuição espacial, assim como no detalhe construtivo da abertura e a aquisição

da fonte luminosa. Supõe-se que o aumento das discrepâncias ocorridas nas posições afastadas da abertura dos modelos é devido à maior inter-reflexão da luz nos materiais. A pesquisa, no entanto, não estabelece um estudo que possa descrever, de maneira precisa, um modelo que explique o fenômeno observado.

O desempenho do modelo físico, obtido a partir do procedimento metodológico proposto, permite verificar que a ferramenta representa a realidade de maneira consistente e pode dar uma resposta adequada ao comportamento da iluminação em interiores.

Da mesma maneira, o método empregado permitiu, a partir do mapeamento digital de luminâncias, caracterizar as principais fontes luminosas e, de maneira simultânea à aquisição da fonte, medir as iluminâncias em um ambiente real gerando uma base de dados precisos para a utilização em processos de avaliação de ferramentas de simulação. Os padrões de luminância da abóbada celeste e entorno foram mapeados e introduzidos no Apolux de modo a avaliar sua precisão absoluta, sem as incertezas e limitações introduzidas quando se usa modelos padronizados de céu. Verificou-se que a reflexão de luz no entorno, visível por boa parte do ambiente interno, quando adequadamente considerada nos procedimentos de simulação, representa uma componente significativa do fenômeno. Nessas condições, o Apolux simula adequadamente o comportamento da iluminação no interior do ambiente real e tomando como referência os estudos de Mardaljevic (2000) pode-se, efetivamente, comprovar a eficiência de seu desempenho.



## **5. Conclusões**

### **5.1 Introdução**

Com o objetivo de construir um método para avaliar o desempenho das ferramentas de simulação de iluminação natural, individualizadas pelos simuladores computacionais e pelos modelos físicos em escala reduzida, desenvolveu-se neste trabalho um procedimento experimental aplicando o mapeamento digital de luminâncias.

Os estudos foram realizados em um ambiente teórico de exposição, caracterizado pelo céu artificial tipo caixa de espelhos, e em um ambiente de exposição caracterizado pelo céu real, considerando meia abóbada celeste e o entorno. A base de dados foi obtida através da utilização de uma câmera especializada denominada IQCam Imaging Photometer – 300.

As luminâncias medidas foram adotadas como dados de entrada do programa de simulação computacional a ser avaliado, permitindo, assim, simular o comportamento da iluminação no interior de um ambiente teórico. O simulador computacional utilizado neste trabalho é denominado Apolux. O programa se fundamenta nos algoritmos propostos por Claro (1998) e permitiu importar os arquivos de luminâncias gerados pela câmera IQC.

Simultaneamente à aquisição fotométrica da fonte luminosa, foram medidas as iluminâncias no interior de um modelo de referência. Nos estudos realizados no céu artificial o modelo de referência foi uma maquete. No método aplicado em céu encoberto o modelo de referência foi um ambiente real. As discrepâncias encontradas possibilitaram, de uma maneira precisa, estabelecer uma proposta de avaliação de desempenho dos dois simuladores.

As principais conclusões sobre o método proposto estão descritas como segue.

### **5.2 O mapeamento digital de luminâncias**

A câmera digital IQC-300 empregada como instrumento fotométrico para o mapeamento digital de luminâncias identificou a distribuição de luminâncias em  $\text{cd/m}^2$  para cada *pixel* da imagem, caracterizando a relação entre o fluxo luminoso e a luminância da superfície que o gerou. Por recomendação do fabricante, em céu real, o

mapeamento digital ocorreu somente nos dias em que foram identificadas luminâncias reduzidas, em geral com nuvens cobrindo o Sol e a região circunsolar, uma vez que luminâncias excessivas podem danificar o sensor fotométrico e o circuito eletrônico integrado.

Considerando o céu artificial, os 26 mapas digitais de luminâncias fotometrados pela câmera IQC servem de base de dados para os procedimentos de validação de programas computacionais, e permitem caracterizar a fonte luminosa com precisão, incluindo a abóbada celeste e o entorno.

Cabe ressaltar, que as contribuições da abóbada e do entorno através deste procedimento experimental dependem apenas da variação espacial e da magnitude do fluxo luminoso através de suas componentes celeste e refletida, independentemente das condições atmosféricas. Desta forma, para a simulação computacional no ambiente interno, é suficiente informar a luminância apresentada pelos elementos visíveis da fonte, levando-se em consideração sua altitude e o ângulo sólido.

### **5.3 Estudos realizados com as luminâncias medidas no céu artificial**

As luminâncias medidas do céu artificial foram incluídas na base de dados de entrada do programa de simulação. Estas informações permitiram determinar a fonte de luz de maneira precisa. Uma outra simulação computacional foi realizada a partir da distribuição de luminâncias de um céu encoberto, segundo a equação padronizada pela CIE (1996). Esse parâmetro permitiu uma comparação entre os valores de iluminâncias simulados pelo Apolux, utilizando-se uma fonte luminosa mapeada digitalmente e uma fonte luminosa teórica. Deve-se salientar, que simultaneamente aos registros do comportamento da fonte luminosa obtidos pelos mapas digitais de luminâncias, foram medidas as iluminâncias no modelo físico.

Os erros relativos nas iluminâncias resultantes das simulações que adotam o céu padronizado pela CIE apresentaram valores entre 7% e 17,6% nas posições próximas à abertura do modelo e menores que 35% nas posições centro e porta.

O procedimento de simulação, utilizando o mapeamento digital de luminâncias fotometrado a partir da abóbada do céu artificial, verificou que nos pontos próximos da abertura do modelo de referência, os resultados simulados dos níveis de iluminâncias também apresentaram as menores diferenças. As discrepâncias observadas estiveram

abaixo de 10% e, nas mais afastadas da abertura, posições “centro” e “porta”, indicaram erros relativos inferiores a 15%, permitindo supor que as simulações tornam-se mais discrepantes quando ocorre o aumento da componente refletida interna. Esse fato pode estar relacionado com as refletâncias utilizadas no trabalho, permitindo supor que aumentando os percentuais das refletâncias superficiais, menores serão as discrepâncias nessas posições.

As avaliações identificaram, em média, uma correlação de 99,01% entre as iluminâncias medidas e simuladas a partir dos mapas digitais fotometrados, e de 96,11% entre as iluminâncias medidas e simuladas a partir de um céu encoberto padrão CIE. As fortes correlações estabelecem que as simulações computacionais descrevem um comportamento luminoso semelhante à referência, porém com maior aproximação para os valores de iluminâncias simulados a partir da base de dados gerada pelos mapas digitais de luminâncias. Este fato é esperado, no entanto inédito sob os aspectos quantitativos aplicado pelo método proposto.

Os aplicativos de simulação computacional da iluminação natural, em sua grande maioria, estimam a fonte luminosa através de modelos de céu padrão CIE; no entanto, essa aproximação é representada pelas condições médias de disponibilidade de luz, o que reforça a adequação do uso do mapeamento digital para avaliar a fonte luminosa.

#### **5.4 A contribuição do entorno nas aberturas laterais**

Nos estudos realizados em um céu real, os resultados da simulação computacional, utilizando os dados fotometrados pela abóbada celeste e o seu entorno, visíveis pelas aberturas laterais, destacaram uma contribuição média do entorno de 26%, chegando a percentuais superiores a 35%.

Este valor foi determinado pelas diferenças encontradas entre as iluminâncias simuladas na superfície de um modelo teórico, considerando-se a base de dados obtida pela fotometria da abóbada inteira (plano de referência horizontal) e comparando-se com a fotometria de 1/2 abóbada + entorno (plano de referência vertical). Ao combinar os planos horizontal e vertical, a porção da abóbada celeste não visível pelo modelo teórico não apresenta contribuição direta na iluminação do modelo, mas certamente o faz através da reflexão do entorno. Esse efeito permite concluir que a fonte, caracterizada pela parcela de luz atribuída ao plano de referência vertical, que

contém o meio céu e o entorno na frente da superfície, é suficiente para verificar a contribuição luminosa na mesma.

O procedimento criado permitiu verificar a contribuição do entorno, medido em céu real, em aberturas laterais e determinou a influência dos elementos de reflexão exteriores nos processos de simulação.

## **5.5 Estudos realizados com as luminâncias medidas no céu real**

Tal qual aplicada no céu artificial, o método proposto foi aplicado ao céu real. Nessa etapa, a fonte luminosa foi fotometrada com a câmera IQC apontando para o sul, mostrando um meio céu e todo o seu entorno natural e edificado. As 25 imagens fotometradas identificaram a luminância de todo o hemisfério visível pela abertura lateral do ambiente de estudos.

Simultaneamente aos registros do comportamento da fonte luminosa, obtido pelos mapas digitais de luminâncias, foram medidas as iluminâncias no ambiente de estudos e no modelo físico. Usadas como referência, as iluminâncias verificadas no ambiente real foram comparadas com as iluminâncias obtidas pela simulação computacional e pelo modelo físico em escala reduzida.

### **5.5.1 O desempenho do modelo físico em escala reduzida**

O modelo físico em escala reduzida reproduziu o ambiente real, com as paredes de cor branca, piso de cor palha e teto de cor alecrim, com refletâncias respectivamente iguais a 75%, 64% e 34%.

O desempenho da ferramenta de simulação, avaliado em 125 registros de iluminâncias, apresentou 64% da frequência de ocorrência com erros de até 10%; assim como, 35,2% da frequência de ocorrência com erros entre 10% e 25%; e 0,8% com erro acima de 25%. As diferenças entre a simulação e o comportamento real da iluminação estiveram 99,2% das vezes com erros relativos até 25%.

Pode-se concluir que o modelo físico apresentou o melhor desempenho nas posições estudadas próximas à abertura. Na posição “parede esquerda”, “parede direita” e “janela” os erros relativos estiveram, em média, na faixa de  $\pm 5\%$ . Na posição “parede esquerda” pode-se verificar uma leve tendência da maquete simular os valores de iluminâncias acima dos valores do ambiente real, acentuada nas posições “centro” e “porta”. Nessas posições os erros relativos ficaram compreendidos entre 15% e 20%.

Os resultados mostram que as maiores diferenças entre os valores simulados e medidos tendem para as posições “centro” e “porta”, permitindo supor que em situações nas quais as simulações estejam sendo influenciadas pela inter-reflexão da luz nas superfícies, suas respostas tornam-se mais discrepantes.

### **5.5.2 O desempenho da ferramenta computacional – validação do Apolux**

O modelo digital reproduziu o ambiente real, com as paredes, piso e teto, com refletâncias respectivamente iguais a 75%, 64% e 34%. Pode-se concluir que o Apolux apresentou o melhor desempenho nas posições próximas à abertura. Porém, na posição “parede esquerda”, “parede direita” e “janela” os erros relativos estiveram, em média, na faixa de  $\pm 10\%$ . Os estudos nas posições “parede esquerda” e “janela” mostram uma tendência do programa simular os valores de iluminâncias abaixo dos valores do ambiente real, acentuada nas posições “centro” e “porta”. Nessas posições os erros relativos ficaram compreendidos entre 15% e 25%. Assim como observado nos estudos realizados no céu artificial, a simulação apresenta maiores discrepâncias nas posições mais afastadas da janela.

Para validar o programa computacional Apolux, tomou-se como referência as discrepâncias encontradas na proposta de trabalho realizada por Mardaljevic (2000). A análise desenvolvida levou em consideração a precisão fotométrica da fonte, os planos luminosos compostos pela luz direta (abóbada) e a refletida (entorno), bem como os erros relativos entre valores teóricos e experimentais, obtidos com céu real.

Mardaljevic (2000a) verificou no Radiance uma frequência de ocorrência de 64% para as discrepâncias até 10%. No Apolux, foi observada uma frequência de ocorrência de 54,4% para os erros relativos até 10%. Nas discrepâncias entre 10% e 25%, houve uma frequência de ocorrência de 34% no Radiance e 43,2% no Apolux. Pode-se dizer que, das 125 simulações ocorridas no Apolux, 97,6% apresentaram um índice de discrepâncias de até 25% e somente 2,4% ficaram acima deste valor, porém todas inferiores a 50%. No simulador computacional Radiance, 2% das ocorrências resultaram discrepâncias acima de 50%.

Os dados apresentados mostram uma significativa aproximação entre o comportamento que resultou na validação experimental do Radiance, permitindo, de maneira consistente, validar experimentalmente o programa computacional Apolux.

## 5.6 Limitações da pesquisa

A principal limitação do trabalho esteve relacionada aos cuidados com o equipamento fotométrico digital. A sensibilidade da IQC-300, em relação aos dias em que foram identificadas luminâncias oriundas do Sol e da região circunsolar, caracterizando luminâncias excessivas que podiam danificar o sensor fotométrico e o circuito eletrônico integrado. Mesmo sombreando a lente com protetor, as imagens apresentaram distorções e erros de medição, inviabilizando os resultados.

Durante a pesquisa, utilizou-se a simulação da iluminação natural no interior de um ambiente de geometria simples e uma única abertura lateral. No entanto, pode-se prognosticar que ambientes com outras tipologias podem apresentar dificuldades em sua avaliação. Não foi possível nessa pesquisa testar ambientes com diferentes áreas de aberturas e novos posicionamentos na fachada. Os resultados podem sofrer a influência significativa dos elementos de proteção e controle solar. Esses projetos podem ser analisados pelo método proposto, considerando-se o plano da fonte luminosa que efetivamente contribui para a iluminação no interior da edificação. No caso de aberturas que apresentam elementos de controle, por exemplo, cortinas e vidros especiais para proteções e controle solar, a fotometria da fonte luminosa deve considerar suas interferências, recomendando, nesse caso, reposicionar a câmera digital IQC-300 para o interior do ambiente.

Em relação às reflexões utilizadas nos procedimentos de simulação e no modelo do ambiente real, o apêndice A, sessão A3, identifica através do método do luminancímetro as medições *in loco* das refletâncias superficiais da parede, teto e piso. Elas ficaram afastadas daquelas medidas por Castro et al. (2003), e possivelmente, não leva em conta as diferenças de rugosidade próprias de cada superfície. Essa limitação na análise superficial do ambiente real e do modelo físico em escala reduzida certamente contribuiu para que nas posições dos sensores, centro e porta, indicassem menores resultados de iluminâncias em relação à realidade, e possivelmente, subdimensionassem os resultados. Mesmo com essas circunstâncias os resultados que avaliaram o desempenho das ferramentas de simulação foram bastante satisfatórios e uma análise mais detalhada das superfícies certamente levará a resultados mais significativos.

## 5.7 Considerações finais

Os resultados apresentados neste trabalho permitem dizer que o programa computacional Apolux e o modelo físico em escala, levando em consideração as limitações do trabalho, representam significativamente o comportamento luminoso de um ambiente real.

As previsões de iluminâncias, nos pontos afastados da abertura dos modelos teóricos, apresentaram as maiores discrepâncias em relação às medições de referência. Isso se deve à dificuldade das ferramentas em simular zonas iluminadas, preponderantemente pela componente refletida interna e podem ser amenizadas utilizando valores maiores de refletâncias superficiais.

Os resultados encontrados na pesquisa permitem concluir que a simulação ocorrida no modelo físico apresenta um melhor desempenho que a obtida no simulador computacional. Apesar de superestimar os resultados nos pontos mais afastados da janela, o modelo físico apresenta as discrepâncias mais frequentes com menores erros relativos.

## 5.8 Sugestões e encaminhamentos de trabalhos futuros

Este trabalho proporciona, aos especialistas da área de iluminação natural, o acesso a um método de verificação de desempenho das ferramentas de simulação, objetivando aumentar a confiança dos profissionais que utilizam esse recurso. As diferentes fases de projetos de edificações requerem ferramentas de simulação que representem adequadamente o fenômeno da iluminação natural. O propósito é estabelecer metas de eficiência de energia, conforto aos usuários e avaliação de desempenho energético em edifícios.

Embora tenha apresentado resultados satisfatórios, o método proposto possui algumas limitações, que poderiam ser amenizadas para obter maior aplicabilidade. Sugerem-se as seguintes ações:

- Análise de modelos com materiais apresentando diferentes propriedades reflexivas para estabelecer uma relação da contribuição luminosa da componente refletida interna no comportamento luminoso do ambiente.
- Utilizar a base de dados obtida para avaliar programas computacionais de simulação de iluminação natural que permitam a leitura dos mapas digitais.

- Desenvolver uma análise fotométrica com a condição de céu claro para avaliar a influência do Sol na contribuição do entorno.

Para o procedimento de validação dos programas computacionais de simulação que visam à determinação da dinâmica temporal das iluminâncias baseadas em arquivos climáticos anuais é essencial estabelecer a correta caracterização da fonte de luz natural que efetivamente contribui para a iluminação em interiores. Neste contexto, deve-se considerar a abóbada celeste visível pelas aberturas e o seu entorno, cujos planos representam a disponibilidade direta e refletida da luz natural em superfícies com aberturas laterais.

Os trabalhos de validação devem ser estimulados, mesmo sabendo-se das dificuldades relacionadas à caracterização da propagação da iluminação natural. Essas dificuldades acentuam-se com a localização geográfica, com o posicionamento das fachadas, com as características das aberturas, porém, uma análise precisa da iluminação natural nos projetos das edificações caracteriza um trabalho rico em detalhes, para os quais é imprescindível o conhecimento da fonte que efetivamente contribui para a iluminação no interior das edificações. Propõe-se que a base de dados obtida seja utilizada para o procedimento de avaliação em outros programas computacionais.



## BIBLIOGRAFIA

- ABNT/CB-01 (1999). **15.215-1: Iluminação natural – Parte 1: Conceitos Básicos e Definições**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro de Construção Civil. Julho.
- ABNT/CB-02. (2003a). **15.215-2: Iluminação natural – Parte 2: Procedimentos de cálculo para a estimativa da disponibilidade de luz natural**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro de Construção Civil. Agosto.
- ABNT/CB-02. (2003b). **15.215-3: Iluminação natural – Parte 3: Procedimento de cálculo para a determinação da iluminação natural em ambientes internos**, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro de Construção Civil. Agosto.
- ABNT/CB-02. (2004). **15.215-4: Iluminação natural – Parte 4: Verificação experimental das condições de iluminação interna de edificações – Método de medição**. Associação Brasileira de Normas Técnicas, Comitê Brasileiro de Construção Civil, novembro de 2004.
- ANDERSEN, M. (2004). **Generalization of the direct sky component calculation to openings of arbitrary tilt angle**. The illuminating Engineering Society of North America. LEUKOS, v. 1, p. 39-56. October de 2004.
- APOLUX. (2007). **Programa de Simulação Computacional de Iluminação Natural - versão beta** ([www.labcon.ufsc.br/foton](http://www.labcon.ufsc.br/foton)).
- ASCHEHOUG, J. C. (2000). **Design Tools 6**. Daylight in Buildings, p. 1-19.
- BAKER, N; FANCHIOTTI, A; STTEMERS, K. **Daylighting in Architecture – a European reference book**. (1993). Commission of the European Communities, Directorate-General XII for Science Research and Development, James & James Ltd.

- BERRUTTO, V; FONTOYNT, M. (1995). **Applications of CCD cameras to lighting research: review and extensions to the measurement of glare indices.** *Proceedings 23rd Session CIE.*
- BRANDÃO, R. S; ALUCCI, M.P. (2005). **Solar access in tropical cities: towards multicriteria solar envelope.** In: International Conference on Passive and Low Architecture, p. 22.
- CABELLO, A. J. (1997). **Fotometría con Detectores en Arreglo Matricial.** Tesis de Magister en Luminotecnia. Universidad Nacional de Tucuman – Facultad de Ciências Exactas y Tecnologia Instituto de Luminitecnia Luz e Vision.
- CABÚS, Ricardo. (2002). **Tropical daylighting: predicting sky types and interior illuminance in north-east Brazil.** 288 f. Thesis (Doctor) - School Of Architectural Studies.
- CABÚS, R. (2005a). **TROPLUX: Um Sotaque Tropical na simulação da luz natural em edificações.** Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC), p. 250-259.
- CABÚS, R. (2005b). **Validação do Programa TROPLUX.** Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído (ENTAC), p. 250-259.
- CANNON-BROOKES. (1997). **Simple scale models for daylighting design: Analysis of sources of error in illuminance prediction.** *Lighting Research and Technology*, v. 29, p. 135-142.
- CASTRO, ADRIANA A. SILVA; LABAKI, LUCILA; CARAM, ROSANA; BASSO, ADMIR, FERNANDES, MAURO. (2003). **Medidas de refletância de cores de tintas através de análise espectral.** *Ambiente Construído*, Porto alegre, v.3, p.69-76, jun.
- CIE STANDARD - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. (1994). **Guide to recommended practice of daylight measurement. Technical report.** Publication CIE 108-1994, Vienna, Austria.

- CIE STANDARD - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. (1996). **Spatial distribution of daylight - CIE standard overcast sky and clear sky.** Publication CIE S n. 003.3/E-1996, Vienna, Austria.
- CIE STANDARD - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. (2002). **Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky.** Wien: CIE. (CIE DS n. 011.2/E:2002).
- CIE STANDARD - COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. (2006). **Technical Report.** CIE n. 171/2006. **Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs.**
- CLARO, A; PEREIRA, F. O. R; AGUIAR, G. P. (2004). **Desenvolvimento do Protótipo do Software LuzSolar para Análise e Projeto de Iluminação Natural em Arquitetura e Urbanismo,** Relatório Final do Projeto n. 027-01 entregue à CELESC 2003, LABCON/ UFSC, v. único, p. 1-15 .
- CLARO, A. (1999). **Luz solar: modelo vetorial esférico para radiosidade / ray-tracing,** Anais do V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e do II Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, Fortaleza, cd-rom, p. 1-6.
- CLARO, A. (1998). **Modelo vetorial esférico para radiosidade aplicado à iluminação natural.** Tese de Doutorado, 177 p., UFSC, Florianópolis.
- COOSKY, C; LOVELAND, J; MILLET, M; VANAGS, A. (1991). **Limits of the sky. Testing and evaluation of the current state-of-the art in mirror-box sky simulation.** Department of Architecture University of Washington, p. 2753-2760. Washington.
- DARULA, S; KITTLER, R. (2002). **CIE General Sky Standard Defining Luminance Distributions.** Energy and Buildings, p. 243-254.
- DEBEVEC, P. E. (2007). HDRShop: **High Dynamic Range Image Processing and Manipulation.** <http://www.debevec.org/HDRShop>, acesso em 30/08/2007.

- DILAURA, D. L. (2002). **Photometria. Illuminating Engineering Society of North America**. Lighting Research and Technology, p. 80-88.
- EVANS, J.M; BOGATTO, M; EGUIA, S; BAROLDI, G. (1999). **Uso de Modelos a Escala em el Cielo Artificial**. Avances en Energias Renovables y Medio Ambiente (ASADES). Cordoba, Argentina, v.1, p. 121-124.
- FARIA, J. R. G. (2007) **Análises de distribuição de luminâncias através de imagens HDR compostas por fotos de câmeras snapshot**. ENCAC-ELACAC 2007 - IX Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e V Encontro Latino-americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. Anais do IX Encontro Nacional e V Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto, v. 1. p. 677-686.
- FARIA, J. R. G; SANTOS, A. P. M; SILVA, C. M; TESCARO, J. L. (2007). **Aplicações de imagens HDR compostas por fotos digitais em análises de distribuição de luminâncias**. ENCAC-ELACAC 2007 - IX Encontro Nacional sobre Conforto no Ambiente Construído e V Encontro Latino-americano sobre Conforto no Ambiente Construído, 2007, Ouro Preto. Anais do IX Encontro Nacional e V Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Ouro Preto, 2007. v. 1. p. 687-696.
- FONTOYNONT, M. (1999). **Daylight performance of buildings**, ENTPE, European Commission Directorate General XII for Science, James & James, Lyons, France, p. 119-127.
- FONTOYNONT, M., DUMORTIER, D., HEINEMAN, D., HAMMER, A., OLSETH, J., SKATVEIT, A., INEICHEN, P., REISE, C., PAGE, J., ROCHE, L., BEYER, H.G., WALD, L., SANTOS, A.; (1997). **SATELLIGHT: A European program dedicated to serving daylight data computed for Meteosat images**. In: Proceedings of the eighth European Lighting Conference, 11–14 May, Amsterdam.
- GEEBELEN, B; NEUCKERMANS, H. (2003). **Optimizing Daylight Simulation for Speed and Accuracy**. Department of Architecture, Urban Design and Regional Planning. Eighth International IBPSA Conference. Eindhoven, Netherlands. August p. 11-14.

- GONZÁLEZ, A. C. (2007). **Avaliação e Calibração de um Céu Artificial para Estudos de Iluminação Natural com Modelos Físicos em Escala Reduzida**. Mestrado, Pós-graduação em Arquitetura. UFSC.
- GRIFFITH, J. W; WENZLER O. F; CONOVER, G. W. (1953). **The importance of ground reflection in daylighting**. Illuminating Engineering. New York, v. 48: p. 35-38.
- HAYMAN, S. (2003). **Daylight measurement error**. Lighting Research and Technology (35), p. 101-110.
- HOPKINSON, R. G; PETHERBRIDGE, P. (1953). **The natural lighting of buildings in sunny climates by sunlight reflected from the ground and from opposing facades**. Conference on Tropical Architecture. London.
- HOWLETT, O; HESCHONG, L; MCHUGH, L. (2007). **Scoping Study for Daylight Metrics from Luminance Maps**. LEUKOS, v. 3, n. 3, January, p. 201 – 215. The Illuminating Engineering Society of North America. Protocolo: n. 10.1582/LEUKOS.2007.03.03.003.
- INTERNATIONAL DAYLIGHT MEASUREMENT PROGRAMME (IDMP). (2008). <<http://idmp.entpe.fr>>, acessado em 23mar.2007.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). (2006). **Daylighting Simulation: Methods, Algorithms, Resources - Solar Heating and Cooling Programme Task 21 / Energy Conservation in Buildings and Community**. Systems Programme Annex 29: Daylight in Buildings. December.
- ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY OF NORTH AMERICA (IESNA). (1993). **Lighting Handbook – reference and application**, Illuminating Engineering Society of North America, 9<sup>th</sup> Edition, New York.
- INTERNATIONAL STANDARD (ISO), (2003). **Spatial distribution of daylight** — CIE standard general sky. ISO/FDIS n. 15469.

- IGAWA, N; NAKAMURA, H; MATSUURA, k. (1999). **Sky Luminance Distribution Model of Daylight Environment**. International Building Performance Simulation Association, v.2, p. 969-975.
- IGAWA, N; NAKAMURA, H. (2001). **All Sky Model as a standard sky for the simulation of daylight environment**. Published by Elsevier Science Ltd. Building and Environment 36, p. 763–770.
- JANJAI, S; TOHSING, K; NUNEZ, M; LAKSANABOONSONG, J. (2008). **A technique for mapping global illuminance from satellite data**. Solar Energy, v. 82, p. 543–555.
- JANNUZZI, G DE M. (2005). **Power sector in Brazil and its impacts on energy efficiency and research and development activities**. Energy Policy, v. 33, p. 1753-1762.
- JARVIS, D; DONN, M. (1997). **Comparison of Computer and Model Simulations of a Daylight Interior With Reality**. International Building Performance Simulation Association.
- KITTLER, R., (1985). **Luminance Distribution Characteristics of Homogeneous Skies: a Measurement and Prediction Strategy**. Lighting Research and Technology, v.17, n.4, p. 183-188.
- KITTLER, R. (1967). **Standardization of outdoor conditions for the calculation of daylight factor with clear skies**. The CIE International Conference on Sunlight in Buildings, Rotterdam, p. 273-285.
- KITTLER, R. (1994). **The need for standard skies and models for energy conservation measures**, Lighting Research and Technology, v. 26, p. 171-180.
- KONDO, T; IWATA, T; KIMURA K. (1997). **Study on the Evaluation System of Visual Environment Including Daylight**. RIGHT LIGHT 4, v. 2.
- LAM, W. M. C. (1986). **Sunlighting – as formgiver for architecture**. Van Nostrand Reinhold Company, New York. 464p.

- LARSON, W. (2004). **Fast, Robust Image Registration for Compositing High Dynamic Range Photographs from Hand-Held Exposures**. Journal of Graphics Tools (<http://igt.akpeters.com/papers/Ward03/>).
- LARSON, W. (1998). **Rendering with *Radiance*: A Practical Tool for Global Illumination**. Short for Special Interest Group on GRAPHics and Interactive Techniques. 129p.
- LECHNER, N. (2001). **Heating, cooling, lighting: design methods for architects**. Book Second Edition. New York: John Wiley & Sons.
- LEDER, S.M. (2007). **Ocupação Urbana e Luz Natural: Proposta de Parâmetro de Controle da Obstrução do Céu para Garantia da Disponibilidade à Luz Natural**. Tese de Doutorado. 241 p., Uiversidade Federal de Santa Catarina.
- LI-COR, (1991). **LI-COR Radiation Sensors - Instruction Manual**, LI-COR inc. Publication No. 8609-56, Lincoln, USA.
- LITTLEFAIR, P. (1981). **The luminance distribution of an average sky**, Lighting Research and Technology, Elsevier Science Ltd., Great Britain, v.13, p. 192-198.
- LUMETRIX. (2007). **Manual corp. RT32 digital photometric image analysis system V.3**. <[www.lumitrix.com.br](http://www.lumitrix.com.br)>, acessado em mar.2008.
- LYNES, J. A. (1968). **Principles of natural lighting**. Elsevier Publishing Company, New York, USA.
- MAAMARI, F; FONTOYNONT, M. (2006). **Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs**. Elsevier B.V. Energy and Buildings 38, p. 869-877.
- MAAMARI, F; ANDERSEN, M; BOER, J; CARROLL, W.L. (2006). **Experimental validation of simulation methods for bi-directional transmission properties at the daylighting performance level**. Elsevier B.V. Energy and Buildings 38, p. 878-889.

- MAAMARI, F. (2004). **La Simulation Numérique de l'éclairage, Limites et Potentialités**. Tese de Doutorado. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon.
- MAAMARI, F. (2000). **Protocoles de Tests de Logiciels de Simulation d'Eclairage**. DEA (Master's thesis) in Civil Engineering. Lyon: ENTPE, INSA de Lyon.
- MAAMARI, F; FONTOYNONT, M; HIRATA, M; KOSTER, J; MARTY, C; TRANSGRASSOULIS, A. (2003). **Reliable Datasets for Lighting Programs Validation, Benchmark Results**. Conferência Internacional CISBAT 2003, p. 241-246, EPFL Lausanne / Switzerland, October.
- MARDALJEVIC, J. (2002). **A 'Gold Standard'. Dataset for the validation of illuminance predictions**. Joint IEA 31 - CIE 3.33 Meeting, p.26, Ottawa, October. <<http://www.iesd.dmu.ac.uk/~jm>>.
- MARDALJEVIC, J. (2006). **Daylight: Monitoring, Sky Models, and Daylight Indoors**. Daylighting Simulation, p. 341-390.
- MARDALJEVIC, J. (2000a). **Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients**. Thesis submitted of the requirements of the De Montfort University for the degree of Doctor of Philosophy.
- MARDALJEVIC, J. (1995). **Validation of a Lighting Simulation Program Under Real Sky Conditions**. Lighting Research and Technology, p. 181-188.
- MARDALJEVIC, J. (2004). **Verification of program accuracy for illuminance modeling: assumptions, methodology and an examination of conflicting findings**. Lighting Research and Technology, p. 217-242.
- MARDALJEVIC, J. (2000b). **The BRE-IDMP dataset: a new benchmark for the validation of illuminance prediction techniques**. Institute of Energy and Sustainable Development (IESD), De Montfort University, Leicester LE7 9SU, UK.
- MESA, N. A; PATTINI, A; CÓRICA, I; DE ROSA, C. (2004). **Metodologia de evaluacion de la potencialidad de la luz natural para iluminar edificios, en**



- entornos de alta densidad, en zonas áridas andinas.** Estúdios de arquitectura bioclimática, México, v.6, p. 279-297.
- MIGUET, F; GROLEAU, D; MARENNE, C. (1996). **A Sunlight and Skylight Evaluation Tool for Urban Built Forms.** PLEA 1996, Building and Urban Renewal, p. 235-246.
- MOORE, F. (1984). **Concepts and practice of architectural daylighting,** Van Nostrand Reinhold, New York, 1984.
- MONTGOMERY, D; RUNGER, G. (2003). **Estatística Aplicada e Probabilidade para Engenheiros. Tradução Applied Statistic and Probability for Engineers, 2<sup>nd</sup> Edition.** LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A.
- NAVAAB, M. (1996). **Scale model photometry techniques under simulated sky conditions,** The 1995 IESNA Annual Conference, Illuminating Engineering Society OF North America, summer, p. 160 – 171.
- NG, E; WONG, N. H. (2004). **Better Daylight and Natural Ventilation by Design. In: International Conference on Passive an Low Energy Architecture.** PLEA 2004, p. 175-179.
- NIKIFORIADIS, FAIDON; PITTS, ADRIAN. (2003). **3D Digital geometric reconstruction of the urban environment for daylight simulation.** Building Simulation, Eighth International IBPSA Conference, Eindhoven, p. 951-958, 14 ago.
- OPTRONIC LABORATORIES (2001). **Manuals Sphere Standards - Application Note (A15).**
- PERRAUDEAU, M. (1988). **Luminance models.** National Lighting Conference. Cambridge, p.291-292.
- PEREZ, R; MICHALSKY, J; SEALS, R. (1992). **Modeling sky illuminance angular distribution for real sky conditions: experimental evaluation of existing algorithms,** Journal of the Illuminating Engineering Society, p. 84 – 92.
- RADIANCE. 2007. <<http://radsite.lbl.gov/radiance/papers/sg94.1/paper.html>>.

- REINHART, C; ANDERSEN, M. (2006). **Development and validation of a Radiance model for a translucent panel**. Elsevier B.V. Energy and Buildings.
- REINHART, C; FITZ, A. (2006). **Findings from a survey on the current use of daylight simulations in building design**. Elsevier B.V. Energy and Buildings, v. 38, p. 824 – 835.
- REINHARD, E; STARK, E; SHIRLEY, P; FERWERDA, J. (2002). **Photographic tone reproduction for digital images**. Journal da Universidade of Utah, USA. Disponível: <<http://www.cs.utah.edu/~reinhard/cdrom/tonemap.pdf>>.
- ROCHA, EUNICE; SANTOS, C; COSTA, T; FARACO R. (2006). **Desenvolvimento e Aplicação de uma Metodologia de Confecção de Modelos Físicos para Predição e Avaliação da Iluminação Natural**. Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, p. 821-830.
- ROBBINS, C. (1986). **Daylighting – Design and analysis**, Van Nostrand Reinhold, New York.
- ROY, G. (2000). **A Comparative Study of Lighting Simulation Packages Suitable for use in Architectural Design**. School of Engineering Murdoch University - Austrália, publicação de relatório técnico.
- SHALABY, A. M; KING, J; GOLD, M. (2005). **Evaluating Lightscape's accuracy for predicting daylighting illuminance compared to an actual space**. International Solar Energy Society (ISES). <<http://www.sbse.org/awards/docs/Shalaby.pdf>>.
- SOTERAS, R. M. (1985). **Geometría e Iluminación Natural - introducción de la iluminación natural en el proceso de control gráfico del diseño**, Tesis Doctoral, ETSAB, UPC, Barcelona, España.
- SPASOJEVIAC, B; MAHDAVI, A. (2005). **Sky Luminance Mapping for Computation Daylight Modeling**. Ninth International IBPSA Conference, Montréal, Canada, p. 1163-1170.
- SZOKOLAY, S. V. (1980). **Environmental science handbook**, The Construction Press, Lancaster, England, p. 77-184.

- SZOKOLAY, S. V. (2004). **Introduction to architectural science: the basis of sustainable design**. Architectural Press, Elsevier Science, Oxford, p. 95 – 126.
- TORRES, S. (2004). **Image based lighting for glare assessment. Third Annual Radiance Workshop** – Fribourg, December. Disponível: <[http://www.radiance-online.org/radiance-workshop3/cd/Torres\\_talk.pdf](http://www.radiance-online.org/radiance-workshop3/cd/Torres_talk.pdf)>.
- THANACHAREONKIT, A; ANDERSEN, M; SCARTEZZINI, J-L. (2005). **Comparing daylighting performances assessment of buildings within scale models and test modules**. Journal, Solar Energy, v. 79, p. 107-220.
- TREGENZA, P. R; WATERS, M. (1983). **Daylighting coefficients**. Lighting Research and Technology, v.15, n. 2, p. 65-71.
- TREGENZA, P. R. (1993). **Daylighting algorithms**, ETSU S 1350, School of Architecture Studies, University of Sheffield, Crown Publishing.
- WARD, G; Shakespeare, R. (1998). **Rendering with radiance: the art and science of lighting visualization**. San Francisco: Morgan Kaufmann, p.664.
- WIENOLD, J; CHRISTOFFERSEN, J. (2006). **Evaluation methods and development of a new glare prediction model for daylight environments with the use of CCD cameras**. Elsevier B.V. Energy and Buildings.

## APÊNDICE A

Este apêndice descreve os procedimentos utilizados para a calibração e análise de desempenho dos equipamentos de medição que auxiliam o processo metodológico, bem como faz uma verificação *in loco* das refletâncias dos materiais utilizados comparando-as com as referenciadas por Castro (2003).

### A.1 Calibração e Verificação dos equipamentos de medição

#### A.1.1 Calibração dos sensores

Para garantir a confiabilidade dos dados medidos com os fotossensores da marca LICOR, tipo LI 210 – AS, utiliza-se um sistema portátil de calibração denominado Calibrador 1800-02 (figura A1). O equipamento contém uma lâmpada de quartzo de halogênio, com uma potência de 200 Watts e uma tensão estabilizada controlada por um circuito eletrônico. A lâmpada está montada em uma base distante 20,3 cm em relação à porta de acesso do sensor a ser calibrado. As tampas e os compartimentos interiores reduzem a perda de luz do mesmo modo que um laboratório ótico. Deste modo, o sensor é colocado na porta do compartimento do calibrador e recebe um fluxo luminoso de 11.095 Lux.



Figura A1 - Calibrador 1800-02.

O processo de calibração necessita do cálculo da constante  $K_c$  (equação A1) usada para transformar a medida de tensão em iluminância.

$$K_c = E \cdot R/V$$

[equação A1]

onde:

$K_c$  – constante calculada [ $\text{Klux} \cdot \Omega / \mu\text{V}$ ].

E – nível de iluminância da fonte padrão [11,095kLux].

R – resistor padrão de (10  $\Omega$ ) [ $\Omega$ ].

V – tensão elétrica medida pelo *data-logger* [mV].

No procedimento experimental, ocorrido no ambiente real e no modelo físico, os valores da tensão em mV (milivolts) são registrados pelo *data-logger* DL2e, e os níveis de iluminâncias são determinados através da equação A1.

### A.1.2 Verificação das medidas de luminâncias utilizando uma esfera integradora

O Luminancímetro LS-110 foi utilizado durante o procedimento experimental para verificar o desempenho da câmera digital IQC. Ambos os equipamentos foram submetidos a um processo de verificação no Instituto de Eletrônica de Potência (INEP), localizado no Departamento de Engenharia Elétrica da UFSC. A verificação contou com uma esfera integradora IS48, com 1.220mm de diâmetro, da empresa alemã Gröbel UV-Elektronik. Este equipamento, ilustrado pela figura A2, é aplicado na avaliação do fluxo luminoso total de uma fonte de luz.

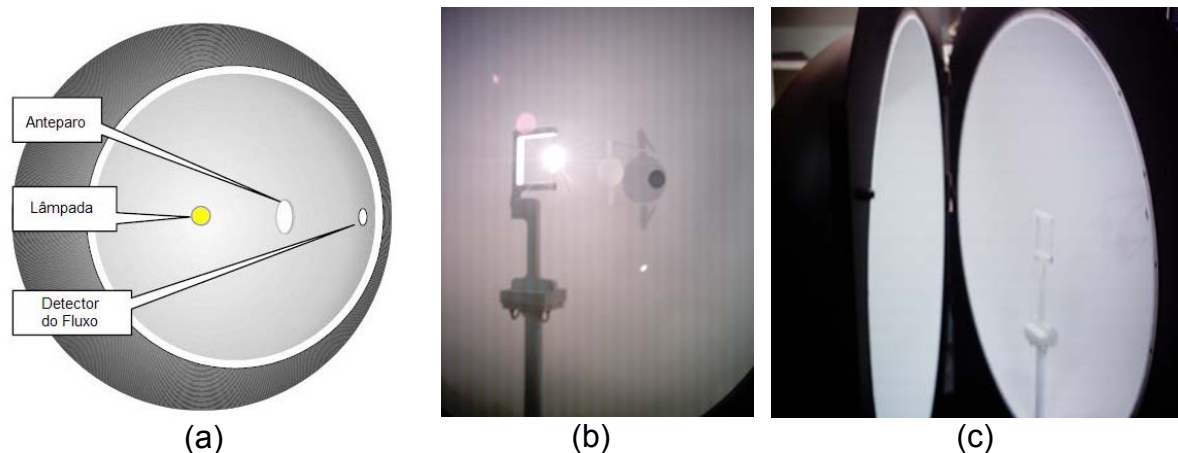


Figura A2 a) Composição de uma esfera integradora.

(b) Detalhe da esfera integradora.

(c) Esfera integradora do INEP.

A teoria assume que a parte interna da esfera é um difusor perfeito. Assim, para qualquer comprimento de onda, tem-se o mesmo índice de refletância. Ela contém uma porta de entrada, uma fonte luminosa estabilizada (lâmpada), um anteparo para evitar que haja radiação direta da fonte sobre o sensor e um ponto detector do fluxo total emitido.

Além do luminômetro LS-110, a IQC também foi adaptada diretamente ao detector de fluxo da esfera integradora. Esse ensaio permitiu verificar a linearidade<sup>1</sup> e a repetitividade<sup>2</sup> dos equipamentos a partir da variação do fluxo luminoso da lâmpada (figura A3).



Figura A3 – A IQCam adaptada ao detector de fluxo da esfera integradora.

A esfera é coberta com sulfato de bário ( $BaSO_4$ ), cujo índice de refletância é igual a 98%. Considerando que todo elemento de área dentro da esfera ilumina todos os outros elementos com valores de iluminâncias uniformes, temos:

$$\rho = \frac{L\pi}{E} \quad \text{[Equação A2]}$$

onde:

$\rho$  – Refletância [%].

$\pi$  – Pi.

L – Luminância [ $cd/m^2$ ];

E – Iluminância [Lux];

O ensaio ocorreu, alterando-se o fluxo luminoso da lâmpada até seu valor nominal. Este controle é realizado variando-se a corrente elétrica de 4,5A a 6,5A. Para cada variação de 1A da corrente, foram registradas três medições de luminâncias com

<sup>1</sup> Corresponde à diferença entre a média das indicações obtidas de um processo de medição e um valor de referência.

<sup>2</sup> Corresponde à faixa dentro da qual as indicações do processo de medição são esperadas quando é envolvido um mesmo operador, que mede a mesma característica do produto e em condições operacionais idênticas.

o luminômetro LS-110 e três medições de iluminâncias com o sensor LICOR 210-SA.

Os dados obtidos no ensaio podem ser observados na tabela A1. O cálculo do coeficiente de reflexão foi realizado através da equação A2. Assim, foi possível calcular o índice de refletância médio do luminômetro (94,92%) e verificar a diferença em relação ao índice de refletância da esfera (98%). O resultado indicou uma discrepância de aproximadamente -3% para a leitura do luminômetro. Este erro está dentro da faixa de variação fornecida pelo fabricante do equipamento com margem de  $\pm 3\%$ .

Com as comparações entre as medições de luminâncias realizadas pelo luminômetro e a IQC, foi possível identificar um erro sistemático de +17% na câmera.

Tabela A1 – Avaliação da calibração do luminômetro e da IQC.

Varição de corrente [A]	Iluminância medida no sensor [lx]	Luminância medida c/ o luminômetro [cd/m <sup>2</sup> ]	Luminância medida c/ a IQC [cd/m <sup>2</sup> ]	Erro médio [%]	Cálculo do coeficiente de reflexão [%]
	313	96,4	115		
4,5	305	89,8	118		
	309	96,3	114		
<b>Média</b>	<b>309,00</b>	<b>94,17</b>	<b>115,67</b>	<b>18,59</b>	<b>95,74</b>
	1250	372,1	450		
5,5	1255	371,3	450,1		
	1241	370,1	450,3		
<b>Média</b>	<b>1248,67</b>	<b>371,17</b>	<b>450,13</b>	<b>17,54</b>	<b>93,38</b>
	3501,1	1066	1260,3		
6,5	3508,1	1066	1247,8		
	3499,8	1067	1244		
<b>Média</b>	<b>3503,00</b>	<b>1066,33</b>	<b>1250,70</b>	<b>14,74</b>	<b>95,63</b>
Diferença média entre as medições da IQC e o luminômetro				17%	Média = 94,92%

A seção que segue tem como objetivo verificar o sistema de projeção da lente olho de peixe da IQC, bem como verificar o desempenho do equipamento em ambientes com fluxos luminosos superiores aos testados pela esfera integradora.

## A.2 Verificação do mapeamento digital obtido pelas imagens da câmera IQC

### A.2.1 Avaliação do sistema de projeção

A verificação da projeção da lente da IQC foi desenvolvida a partir de um sistema de coordenadas marcadas em oito posições no ambiente real. A figura A4 ilustra o posicionamento das coordenadas na parede. Essas posições apresentam aberturas focais de  $180^{\circ}$ ,  $160^{\circ}$ ,  $150^{\circ}$  e  $90^{\circ}$  em relação ao centro da sala, e em relação ao plano da lente da IQC. A IQC está disposta a uma altura de 50 cm em relação ao piso.



Figura A4 – Posicionamento das coordenadas no plano vertical com aberturas focais em 180, 160, 150 e 90 graus.

Após a aquisição da imagem (figura A5), foram marcadas quatro aberturas focais, ilustradas com círculos identificando os ângulos  $10^{\circ}$ ,  $20^{\circ}$ ,  $90^{\circ}$  e  $180^{\circ}$ . Os círculos projetados pelo comando do programa RT-32 coincidiram, de maneira aproximada, com os pontos de análise ( $90^{\circ}$  e  $180^{\circ}$ ), de modo que a escala real foi conservada ao longo dos círculos concêntricos. Pode-se constatar que as distâncias das coordenadas aumentaram linearmente em relação ao centro de projeção, caracterizando uma projeção equidistante.

Com este experimento, foi possível observar uma abertura focal da lente de  $186^{\circ}$  graus. A figura A6 resume de maneira gráfica o comportamento da projeção da lente da IQC.



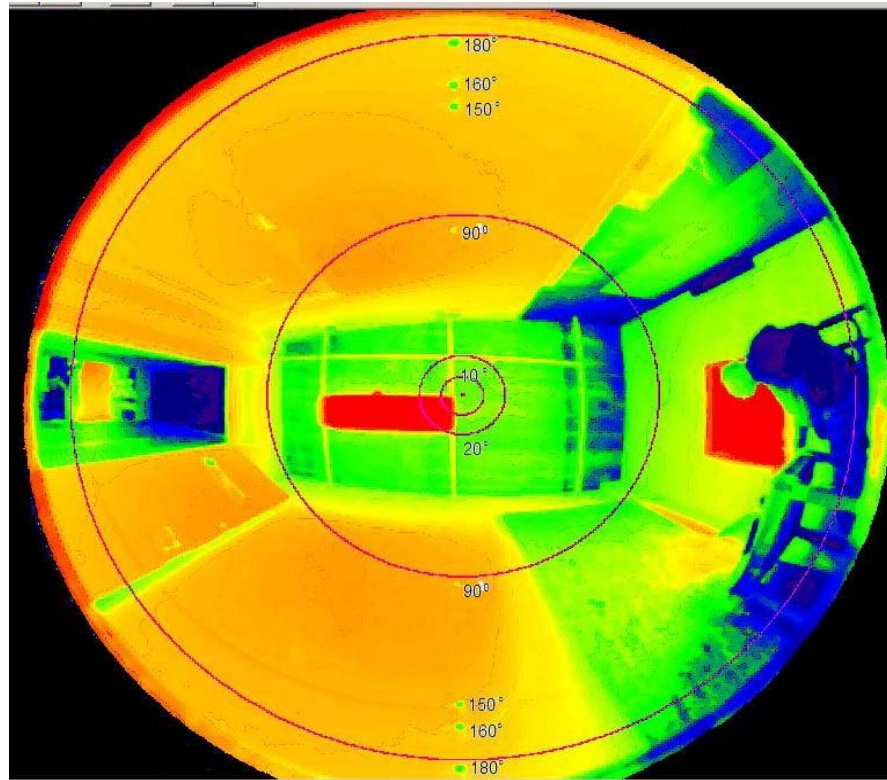


Figura A5 – Imagem digitalizada do ambiente real de estudos.

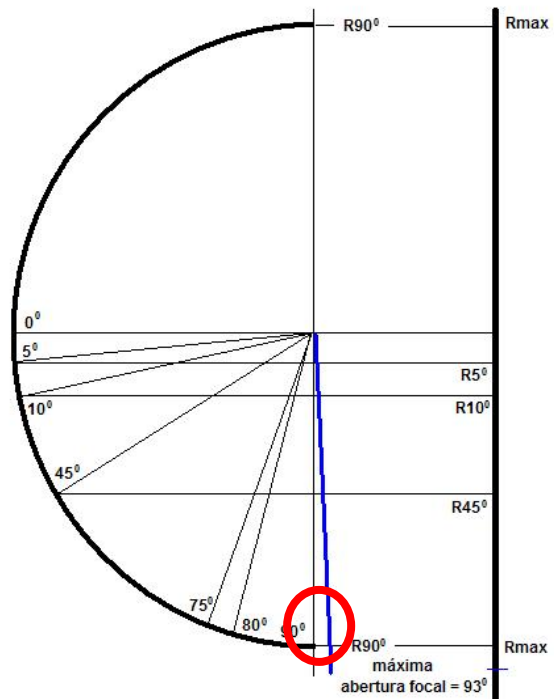


Figura A6 – Representação da abertura focal e a projeção da imagem.

### A.2.2 Procedimento experimental de monitoramento de luminâncias medidas pela IQC em diferentes ambientes de exposição

O procedimento experimental realizado para monitorar os valores de luminâncias medidos pela IQC ocorreu em três ambientes de exposições. O primeiro, no céu artificial tipo caixa de espelhos. O segundo, no ambiente real de estudos, e o terceiro, na cobertura do prédio sede do curso de Arquitetura e Urbanismo, ambos sob condição de céu real.

A figura A7 ilustra uma imagem ampliada do céu artificial, onde, nas paredes norte e sul, estão localizados os pontos “a”, “b”, “c”, “d” e “e”. Esses pontos são usados para identificar os valores de luminância na imagem digitalizada pela IQC e, posteriormente, usados para marcar as posições onde serão efetuadas as medições *in loco* de luminâncias realizadas pelo luminancímetro.

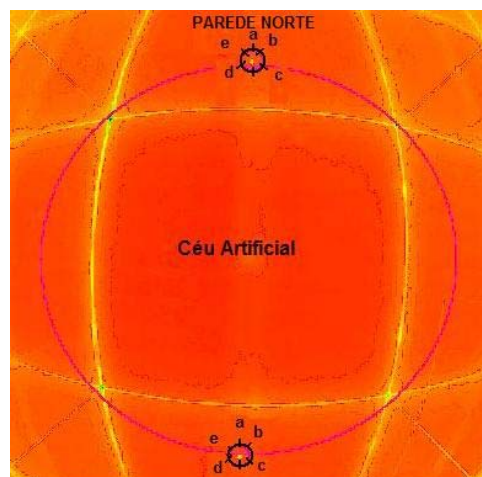
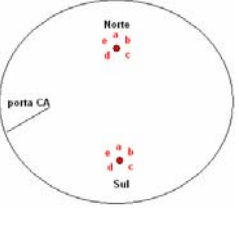


Figura A7 – Imagem ampliada da parede norte e sul do céu artificial, identificando os pontos de referência.

O programa RT-32 permite, com exatidão, verificar os níveis de luminâncias nesses pontos. Para esse procedimento, foi demarcado um círculo ao redor da coordenada e descrito um relatório com o valor médio de luminâncias nos pontos fotometrados. Esses valores foram comparados com os valores médios medidos pelo luminancímetro nos pontos “a”, “b”, “c”, “d” e “e”.

Os ensaios com o luminancímetro foram repetidos quatro vezes. A posição do LS 110 foi criteriosamente a mesma ocupada pela IQC. Assim, foram estabelecidas comparações e determinadas as diferenças entre elas. A tabela A2 ilustra os dados obtidos ao longo do processo.

Tabela A2 – Resultados do procedimento experimental para avaliar o desempenho da IQC no céu artificial (medidas em  $\text{cd}/\text{m}^2$ )

	Pontos	Norte	Sul	Norte	Sul	Norte	Sul	Norte	Sul
	a	2520	2607	2719	2713	2627	2590	2615	2642
	b	2437	2552	2641	2614	2552	2583	2550	2588
	c	2520	2503	2675	2559	2694	2640	2637	2641
	d	2815	2685	2634	2654	2647	2660	2647	2598
	e	2504	2611	2654	2568	2578	2629	2619	2679
Média Luminancímetro [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]		2559	2592	2665	2622	2620	2620	2614	2630
Valor Medido na IQC [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ]		3000	3000	3200	3200	3200	3200	3100	3100
Discrepâncias [%]		15	16	17	18	18	18	16	15

Os resultados identificaram que a IQC aumentava os níveis de iluminâncias, em média 17% em relação às medições realizadas com o luminancímetro, confirmando um erro sistemático, encontrado quando a câmera foi submetida ao fluxo luminoso da esfera integradora, naquela ocasião, para medidas de luminâncias não superiores a  $1300 \text{ cd}/\text{m}^2$ .

Os procedimentos experimentais seguiram com avaliações na sala de estudo e na cobertura do prédio. O objetivo foi monitorar o comportamento da IQC em condições de níveis de exposição de iluminação maiores que o céu artificial.

A figura A8 ilustra a imagem fotométrica da sala. Neste experimento, foram demarcados três pontos em uma linha vertical e três pontos em uma linha horizontal. E, da mesma forma que a avaliação no céu artificial, foram verificadas as discrepâncias entre as medições com a IQC e o luminancímetro.

Os três pontos (P1, Pc e P2) analisados em uma linha horizontal e em uma linha vertical da sala sofreram a influência da variabilidade da luz natural incidente pela janela da sala de estudos. Os instrumentos foram utilizados com, pelo menos, três minutos de defasagem, tempo necessário para a colocação do luminancímetro na posição onde estava localizada a IQC e efetuar a medida.

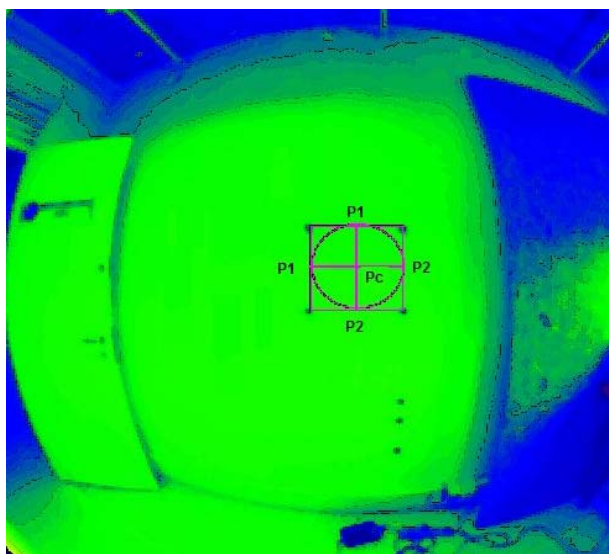
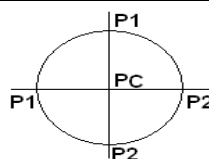


Figura A8 – Imagem fotométrica da parede da sala de estudos, contendo quatro pontos de referência.

Os resultados podem ser observados na tabela A3. Foi identificado que os dados fotometrados de luminâncias obtidos pela IQC eram aumentados entre 15,9% a 23,3% em relação às medições realizadas com o luminômetro LS-110.

Tabela A3 – Resultados do procedimento experimental para avaliar o desempenho da IQC na sala de estudos.

Data	AH IQC	P1	Pcentro	P2	AH Lum	P1	Pcentro	P2	E1	Ecentro	E2	Erro Médio
		cd/m <sup>2</sup>				cd/m <sup>2</sup>						
26/set	1	235	225	203	1	182	176	169	22,6	21,8	16,7	20,4
27/set	2	178	171	168	2	131	133	131	26,4	22,2	22,0	23,6
	3	178,3	167,5	169,5	3	143	145	145	19,8	13,4	14,5	15,9
	4	181	169,7	168,2	4	136	133	140	24,9	21,6	16,8	21,1
<b>Erro Total Médio</b>												<b>20,2</b>
Data	AV IQC	P1	Pcentro	P2	AV Lum	P1	Pcentro	P2	E1	Ecentro	E2	Erro Médio
		cd/m <sup>2</sup>				cd/m <sup>2</sup>						
26/set	1	225	240	261	1	186	189	207	17,3	21,3	20,7	19,8
27/set	2	165	171,7	176	2	125,5	131,4	151	23,9	23,5	14,2	20,5
	3	165	173,5	183	3	136	138	144	17,6	20,5	21,3	19,8
	4	167	176	182	4	124	133	146	25,7	24,4	19,8	23,3
<b>Erro Total Médio</b>												<b>20,8</b>
IQC	Câmera digital											
Lum	Luminômetro											
AV	Análise vertical											
AH	Análise horizontal											
E	Erro											



Na última avaliação do equipamento fotométrico, as figuras A9 e A10 ilustram a imagem digitalizada pela IQC na cobertura do prédio e as posições que apresentaram

facilidade de identificação na imagem digitalizada. A figura A9 mostra um ponto no telhado e a figura A10 mostra o ponto na estrutura esquerda do guarda-corpo da cobertura. As discrepâncias encontradas apontaram um aumento nos níveis de luminâncias medidos na IQC em aproximadamente 19% em relação às medições realizadas com o luminômetro.



Figura A9 - Imagem fotométrica para avaliação dos valores de luminâncias – ponto no telhado.



Figura A10 - Imagem fotométrica para avaliação dos valores de luminâncias (ponto no telhado).

Neste contexto, foi definido um índice de correção para a câmera digital IQC levando-se em consideração o erro médio da leitura do luminômetro de -3% e as discrepâncias estudadas. Este procedimento, ilustrado pelo esquema da figura A11, proporcionou ajustar os valores de luminâncias medidos pela IQC.

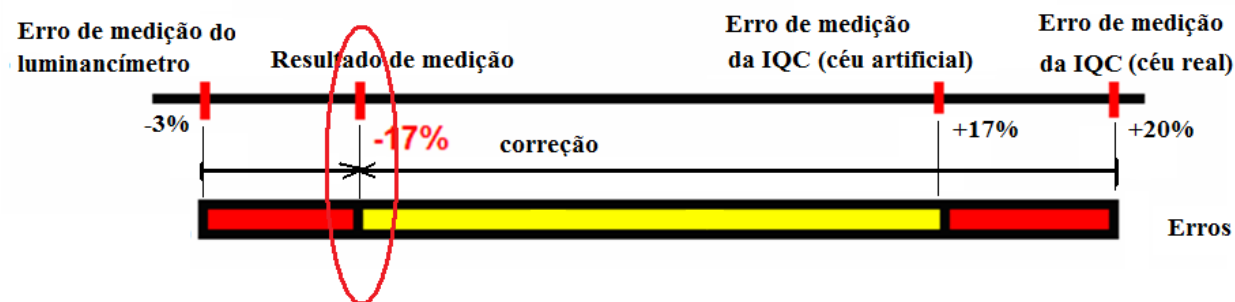


Figura A11 – Ilustração esquemática da correção dos valores de luminâncias medidas pela IQC.

Estabeleceu-se um erro sistemático de -17% para os valores medidos pela IQC, e foi criada uma rotina na programação computacional do Apolux para efetuar a correção (figura A12) e aproximar os dados fotometrados à realidade.

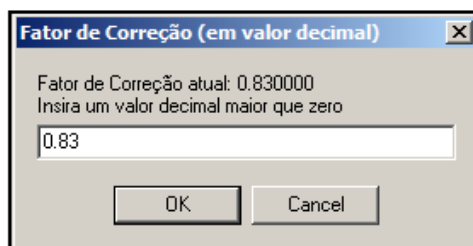


Figura A12 – Correção dos níveis de luminâncias medidos pela IQC durante a simulação do Apolux.

### A.3 Verificação das refletâncias dos materiais utilizados na pesquisa

Para analisar possíveis discrepâncias entre a rugosidade superficial da amostra e a dos modelos foi realizado uma avaliação *in loco*, levando em consideração as recomendações de Castro et al. (2003). Dessa maneira cobriu-se as paredes, piso e teto do ambiente real e do modelo físico em escala com o látex acrílico da Suvinil, respectivamente nas cores branca, palha e alecrim. Assumindo que as superfícies dos modelos são opacas e totalmente difusoras, foi realizado um experimento, utilizando o método do luminômetro para a análise das refletâncias, assim, por meio da equação A2 foi possível calcular a refletância das superfícies do modelo físico (M) e do ambiente real (A). Para registrar as medições de luminâncias, foi utilizado o luminômetro LS-110 e, para determinar os valores de iluminâncias, foi empregado o sensor fotométrico LI 210, calibrado, da marca LICOR. Os resultados do ensaio podem ser observados na tabela A4.

Tabela A4 – Resultados do procedimento experimental para avaliar a refletância ( $\rho$ ) das superfícies.

Posições	L (cd/m <sup>2</sup> )		E (Lux)		$\rho$ (%)		$\rho$ média (%)		Discrepâncias (%) Medições x Castro, (2003)	
	A	M	A	M	A	M	A	M	A	Modelo
<b>Parede Direita</b> Refletância de referência <b>88%</b>	115,1	118,7	504,0	492,0	0,72	0,76	0,72	0,74	18	16
	114,5	117,3	504,0	493,0	0,71	0,75				
	115,5	115,3	504,0	493,0	0,72	0,73				
	113,1	116,0	504,0	492,0	0,70	0,74				
	115,4	115,0	504,0	493,0	0,72	0,73				
<b>Parede Esquerda</b> Refletância de referência <b>88%</b>	105,6	118,7	471,0	492,0	0,70	0,76	0,71	0,74	19	16
	108,3	117,3	472,0	493,0	0,72	0,75				
	106,2	115,3	471,0	493,0	0,71	0,73				
	107,8	116,0	471,0	492,0	0,72	0,74				
	108,1	115,0	472,0	493,0	0,72	0,73				
<b>Piso</b> Refletância de referência <b>70%</b>	70,0	64,6	354,0	323,0	0,62	0,63	0,62	0,62	11	11
	71,0	65,4	356,0	327,0	0,63	0,63				
	69,0	63,4	355,0	325,0	0,61	0,61				
	69,7	65,7	355,0	327,0	0,62	0,63				
	70,6	64,6	356,0	329,0	0,62	0,62				
<b>Teto</b> Refletância de referência <b>36%</b>	25,2	14,8	231,0	140,0	0,34	0,33	0,32	0,33	11	8
	23,3	14,9	231,0	140,0	0,32	0,33				
	23,2	14,9	231,0	140,0	0,32	0,34				
	23,8	14,9	231,0	140,0	0,32	0,34				
	23,5	14,8	231,0	140,0	0,32	0,33				
A - Ambiente M - Modelo							ERROS (%)		15	13

As discrepâncias entre os índices de refletâncias medidos e os recomendados por Castro et al. (2003) estão em média 15% inferiores. Os melhores resultados ocorreram na superfície do modelo em escala, e o pior resultado ocorreu na parede do ambiente real com uma discrepância de 19%.

## APÊNDICE B

### Fontes de erros aleatórios causados pelos instrumentos de medição

Nesta etapa, são analisadas as incertezas decorrentes do procedimento experimental, cuja finalidade é determinar o erro global (EG) estimado. As fontes de erros aleatórios nos resultados de medição são descritas a seguir:

- ◆ **Calibração do sensor:** As características nominais da fonte de luz utilizada para calibração do sensor devem ser informadas pelo fabricante, assim como deve-se trabalhar com uma tensão elétrica de fornecimento constante e prover ao sensor um fluxo luminoso conhecido. A recomendação do fabricante é empregar uma incerteza de medição de  $\pm 1\%$ .
- ◆ **Exposição do sensor:** Após longos períodos de exposição, as células tendem a tornar os resultados de medição discrepantes, e faz-se necessária a recalibração em períodos regulares de dois anos. Em presença de temperaturas maiores que  $45^{\circ}\text{C}$ , o fabricante recomenda considerar uma incerteza de  $\pm 1\%$ . Hayman (2003) considera uma incerteza de  $\pm 2\%$  para regiões com climas tropicais. Neste trabalho, foi considerado um valor de  $\pm 1\%$  em razão de a média anual de temperaturas em Florianópolis atingir  $20^{\circ}\text{C}$  e os sensores serem calibrados a cada ano.
- ◆ **Resposta do co-seno:** Refere-se às medidas que precisam totalizar a radiação que atinge uma superfície plana de todos os ângulos de uma hemisfera e são obtidas mais precisamente por meio de um sensor de co-seno corrigido. Os sensores LI 210 SA utilizados neste experimento possuem resposta de co-seno corrigida para ângulos de incidência de  $80^{\circ}$ . O fabricante recomenda considerar uma incerteza de medição de  $\pm 1\%$ .



- ◆ **Disposição e nivelamento do sensor:** Segundo a CIE (1994), a falta de critérios para o nivelamento dos sensores pode causar erros de  $\pm 1\%$  a  $\pm 10\%$ . Neste trabalho, todos os sensores foram criteriosamente nivelados pelos planos de medições (parede e piso) e em bases de fixação. Nessas condições, foi estabelecida uma incerteza de  $\pm 1\%$  conforme parâmetro utilizado.
- ◆ **Sensibilidade espectral:** O sensor deve estar corrigido para apresentar uma sensibilidade espectral próxima à curva de sensibilidade do olho humano. A CIE (1994) recomenda considerar uma incerteza de medição na ordem de  $\pm 1\%$ .

O erro global estimado (EG), levando-se em consideração as incertezas mencionadas, calculado através da equação 2.7, é igual a  $\pm 2,2\%$ , inferior às tolerâncias máximas de 5% exigidas pela CIE (1994) e pela ABNT (2003-A, 2003-B); assim, os resultados das medições (RM) dos níveis de iluminâncias são avaliados dentro de uma indicação (I) medida pelos sensores.

## APÊNDICE C

Nesta seção, apresentam-se os cálculos para determinar os 125 valores de iluminâncias analisadas nas cinco posições de estudo. A iluminância é obtida pela equação A1 a partir do sinal da tensão elétrica (mV) lida pelo DL2e. As tabelas completam as 25 avaliações realizadas no ambiente real e no modelo físico em escala.

Tabela C.1 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr.2008, 14h40min.

Ambiente real	Resistor [Ω]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	2,713	1274
PD	9,98	3,259	3,780	1234
Janela	9,86	3,761	3,095	1180
Centro	9,92	3,394	2,261	774
Porta	9,93	3,347	1,627	548
Maquete	Resistor [Ω]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminância $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	3,655	1234
PD	9,94	3,419	3,531	1214
Janela	9,87	3,228	3,592	1175
Centro	9,94	3,170	2,898	924
Porta	10,07	3,305	1,996	655

Tabela C.2 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 14h30min.

Ambiente real	Resistor [Ω]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	3,149	1479
PD	9,98	3,259	4,592	1499
Janela	9,86	3,761	3,359	1281
Centro	9,92	3,394	2,625	898
Porta	9,93	3,347	1,986	669
Maquete	Resistor [Ω]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	4,207	1420
PD	9,94	3,419	4,210	1448
Janela	9,87	3,228	3,883	1270
Centro	9,94	3,170	3,304	1054
Porta	10,07	3,305	2,350	771

Tabela C.3 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 14h20min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	2,749	1291
PD	9,98	3,259	3,898	1273
Janela	9,86	3,761	3,184	1215
Centro	9,92	3,394	2,336	799
Porta	9,93	3,347	1,684	568
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	3,667	1238
PD	9,94	3,419	3,648	1255
Janela	9,87	3,228	3,686	1206
Centro	9,94	3,170	2,987	953
Porta	10,07	3,305	2,054	674

Tabela C.4 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 14h10min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	2,720	1277
PD	9,98	3,259	3,799	1240
Janela	9,86	3,761	3,217	1227
Centro	9,92	3,394	2,294	785
Porta	9,93	3,347	1,649	556
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	3,608	1218
PD	9,94	3,419	3,542	1218
Janela	9,87	3,228	3,709	1213
Centro	9,94	3,170	2,931	935
Porta	10,07	3,305	2,012	660

Tabela C.5 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 14h00min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	2,671	1254
PD	9,98	3,259	4,138	1351
Janela	9,86	3,761	3,382	1290
Centro	9,92	3,394	2,412	825
Porta	9,93	3,347	1,710	576
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	3,583	1210
PD	9,94	3,419	3,840	1321
Janela	9,87	3,228	3,915	1281
Centro	9,94	3,170	3,073	980
Porta	10,07	3,305	2,078	682

Tabela C.6 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 13h50min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	2,895	1359
PD	9,98	3,259	4,356	1422
Janela	9,86	3,761	3,495	1333
Centro	9,92	3,394	2,549	872
Porta	9,93	3,347	1,837	619
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	3,866	1305
PD	9,94	3,419	4,056	1395
Janela	9,87	3,228	4,051	1325
Centro	9,94	3,170	3,243	1034
Porta	10,07	3,305	2,221	729

Tabela C.7 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 13h40min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	2,957	1388
PD	9,98	3,259	4,415	1442
Janela	9,86	3,761	3,593	1371
Centro	9,92	3,394	2,612	894
Porta	9,93	3,347	1,892	638
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	3,974	1342
PD	9,94	3,419	4,114	1415
Janela	9,87	3,228	4,161	1361
Centro	9,94	3,170	3,314	1057
Porta	10,07	3,305	2,287	751

Tabela C.8 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 13h30min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	2,945	1383
PD	9,98	3,259	4,425	1445
Janela	9,86	3,761	3,644	1390
Centro	9,92	3,394	2,617	895
Porta	9,93	3,347	1,869	630
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	3,975	1342
PD	9,94	3,419	4,119	1417
Janela	9,87	3,228	4,212	1378
Centro	9,94	3,170	3,306	1054
Porta	10,07	3,305	2,233	733

Tabela C.9 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008,13h15min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [ $\Omega$ ]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	3,044	1429
PD	9,98	3,259	4,490	1466
Janela	9,86	3,761	3,722	1420
Centro	9,92	3,394	2,663	911
Porta	9,93	3,347	1,916	646
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [ $\Omega$ ]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	4,060	1371
PD	9,94	3,419	4,189	1441
Janela	9,87	3,228	4,305	1408
Centro	9,94	3,170	3,373	1076
Porta	10,07	3,305	2,307	757

Tabela C.10 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008,13h00min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [ $\Omega$ ]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	3,181	1493
PD	9,98	3,259	4,746	1550
Janela	9,86	3,761	3,841	1465
Centro	9,92	3,394	2,816	964
Porta	9,93	3,347	2,018	680
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [ $\Omega$ ]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	4,251	1435
PD	9,94	3,419	4,407	1516
Janela	9,87	3,228	4,430	1449
Centro	9,94	3,170	3,571	1139
Porta	10,07	3,305	2,436	800

Tabela C.11 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008,12h40min.

Ambiente real	Resistor [Ω]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	3,374	1584
PD	9,98	3,259	4,872	1591
Janela	9,86	3,761	3,887	1482
Centro	9,92	3,394	2,920	999
Porta	9,93	3,347	2,140	721
Maquete	Resistor [Ω]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	4,516	1524
PD	9,94	3,419	4,497	1547
Janela	9,87	3,228	4,495	1470
Centro	9,94	3,170	3,680	1174
Porta	10,07	3,305	2,565	842

Tabela C.12 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 12h25min.

Ambiente real	Resistor [Ω]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	3,123	1466
PD	9,98	3,259	4,592	1499
Janela	9,86	3,761	3,340	1274
Centro	9,92	3,394	2,579	883
Porta	9,93	3,347	1,946	656
Maquete	Resistor [Ω]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	4,160	1404
PD	9,94	3,419	4,184	1439
Janela	9,87	3,228	3,856	1261
Centro	9,94	3,170	3,259	1039
Porta	10,07	3,305	2,301	755

Tabela C.13 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 12 abr. 2008, 12h00min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [ $\Omega$ ]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	3,122	1466
PD	9,98	3,259	4,590	1499
Janela	9,86	3,761	3,800	1449
Centro	9,92	3,394	2,759	944
Porta	9,93	3,347	1,992	671
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [ $\Omega$ ]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	4,172	1408
PD	9,94	3,419	4,262	1466
Janela	9,87	3,228	4,354	1424
Centro	9,94	3,170	3,448	1100
Porta	10,07	3,305	2,280	748

Tabela C.14 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 03 abr. 2008, 09h30min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [ $\Omega$ ]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	1,857	872
PD	9,98	3,259	2,594	847
Janela	9,86	3,761	2,697	1028
Centro	9,92	3,394	1,640	561
Porta	9,93	3,347	1,060	357
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [ $\Omega$ ]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	2,472	850
PD	9,94	3,419	2,456	829
Janela	9,87	3,228	3,020	988
Centro	9,94	3,170	1,999	637
Porta	10,07	3,305	1,248	410



Tabela C.15 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 03 abr. 2008, 09h00min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	1,671	785
PD	9,98	3,259	2,872	938
Janela	9,86	3,761	1,747	666
Centro	9,92	3,394	1,364	467
Porta	9,93	3,347	1,041	351
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	2,052	693
PD	9,94	3,419	2,610	898
Janela	9,87	3,228	2,009	657
Centro	9,94	3,170	1,635	521
Porta	10,07	3,305	1,172	385

Tabela C.16 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 03 abr. 2008, 08h30min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	1,248	586
PD	9,98	3,259	2,050	669
Janela	9,86	3,761	1,775	677
Centro	9,92	3,394	1,114	381
Porta	9,93	3,347	0,769	259
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	1,604	542
PD	9,94	3,419	1,928	663
Janela	9,87	3,228	2,003	655
Centro	9,94	3,170	1,348	430
Porta	10,07	3,305	0,849	279

Tabela C.17 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 1 abr. 2008, 16h35min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	0,828	389
PD	9,98	3,259	1,266	413
Janela	9,86	3,761	1,007	384
Centro	9,92	3,394	0,600	205
Porta	9,93	3,347	0,450	152
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	1,182	399
PD	9,94	3,419	1,265	435
Janela	9,87	3,228	1,207	395
Centro	9,94	3,170	0,701	224
Porta	10,07	3,305	0,515	169

Tabela C.18 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 13 mar. 2008, 14h00min.

<b>Ambiente real</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	1,419	666
PD	9,98	3,259	2,116	691
Janela	9,86	3,761	1,930	736
Centro	9,92	3,394	1,264	432
Porta	9,93	3,347	0,939	316
<b>Maquete</b>	<b>Resistor</b> [Ω]	<b>Constante calibração</b> K	<b>Tensão elétrica</b> [mV]	<b>Iluminâncias</b> $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	1,850	624
PD	9,94	3,419	2,138	735
Janela	9,87	3,228	2,187	715
Centro	9,94	3,170	1,501	479
Porta	10,07	3,305	1,107	363

Tabela C.19 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 4 dez. 2007, 14h00min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	1,977	928
PD	9,98	3,259	2,608	852
Janela	9,86	3,761	2,067	788
Centro	9,92	3,394	1,466	502
Porta	9,93	3,347	0,944	318
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	2,906	981
PD	9,94	3,419	2,762	950
Janela	9,87	3,228	2,651	867
Centro	9,94	3,170	1,989	634
Porta	10,07	3,305	1,158	380

Tabela C.20 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 02 dez. 2007, 18h00min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	1,246	585
PD	9,98	3,259	1,671	545
Janela	9,86	3,761	1,384	528
Centro	9,92	3,394	0,895	306
Porta	9,93	3,347	0,606	204
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	1,757	593
PD	9,94	3,419	1,658	570
Janela	9,87	3,228	1,585	518
Centro	9,94	3,170	1,097	350
Porta	10,07	3,305	0,740	243

Tabela C.21 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 1 dez. 2007, 17h15min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	1,097	515
PD	9,98	3,259	1,719	561
Janela	9,86	3,761	1,453	554
Centro	9,92	3,394	0,967	331
Porta	9,93	3,347	0,712	240
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	1,559	526
PD	9,94	3,419	1,652	568
Janela	9,87	3,228	1,649	539
Centro	9,94	3,170	1,201	383
Porta	10,07	3,305	0,857	281

Tabela C.22 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 28 nov. 2007, 09h40min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	2,471	1160
PD	9,98	3,259	4,347	1419
Janela	9,86	3,761	2,960	1129
Centro	9,92	3,394	2,295	785
Porta	9,93	3,347	1,604	541
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	3,345	1129
PD	9,94	3,419	4,055	1395
Janela	9,87	3,228	3,366	1101
Centro	9,94	3,170	2,697	860
Porta	10,07	3,305	1,823	598

Tabela C.23 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 26 nov. 2007, 08h40min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	2,143	1006
PD	9,98	3,259	3,124	1020
Janela	9,86	3,761	2,442	931
Centro	9,92	3,394	1,748	598
Porta	9,93	3,347	0,889	300
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	3,166	1069
PD	9,94	3,419	3,192	1098
Janela	9,87	3,228	3,127	1023
Centro	9,94	3,170	2,154	687
Porta	10,07	3,305	1,063	349

Tabela C.24 – Tabela de iluminâncias determinadas a partir do sistema de aquisição DL2e em 2 fev. 2007, 10h00min.

Ambiente real	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,87	4,634	1,414	664
PD	9,98	3,259	2,091	683
Janela	9,86	3,761	1,583	604
Centro	9,92	3,394	1,379	472
Porta	9,93	3,347	1,181	398
Maquete	Resistor [ $\Omega$ ]	Constante calibração K	Tensão elétrica [mV]	Iluminâncias $(\frac{K.V}{R}1000)$ [Lux]
PE	9,66	3,261	2,020	682
PD	9,94	3,419	2,029	698
Janela	9,87	3,228	1,880	615
Centro	9,94	3,170	1,523	486
Porta	10,07	3,305	1,249	410

