



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

Agostinho de Vasconcelos Leite da Cunha

**AVALIAÇÃO DO PROGRAMA APOLUX SEGUNDO  
PROTOCOLOS DE MODELOS DE CÉU DO RELATÓRIO  
TÉCNICO CIE 171:2006**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Santa Catarina, como um dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo

Orientador: Prof. Dr. Anderson Claro

Florianópolis-SC  
2011

Catálogo na fonte elaborada pela biblioteca da  
Universidade Federal de Santa Catarina

C572a Cunha, Agostinho de Vasconcelos Leite da  
Avaliação do programa APOLUX segundo os protocolos  
de modelos de céu do Relatório Técnico CIE 171:2006  
[dissertação] / Agostinho de Vasconcelos Leite da  
Cunha ; orientador, Anderson Claro. - Florianópolis,  
SC, 2011.

186 p.: il., grafs., tabs.

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

Inclui referências

1. Arquitetura. 2. Simulação (Computadores). 3. Iluminação  
natural. 4. Software - Avaliação. I. Claro, Anderson. II.  
Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-  
Graduação em Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

CDU 72

Agostinho de Vasconcelos Leite da Cunha

**AVALIAÇÃO DO PROGRAMA APOLUX SEGUNDO OS  
PROTOCOLOS DE MODELOS DE CÉU DO RELATÓRIO  
TÉCNICO CIE 171:2006**

Esta dissertação foi julgada e aprovada perante banca examinadora de trabalho final, outorgando ao aluno o título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo, área de concentração Projeto e Tecnologia do Ambiente Construído, do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósARQ, da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC

Florianópolis, 21 de outubro de 2011.

---

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD.  
Coordenador do Curso

**Banca Examinadora:**

---

Prof., Dr. Anderson Claro,  
Orientador - UFSC

---

Prof. Fernando O. R. Pereira, PhD.  
UFSC

---

Prof. Fernando S. Westphal, Dr.  
UFSC

---

Prof.<sup>a</sup> Roberta Vieira Gonçalves de Souza, Dr.<sup>a</sup>  
UFMG



*“How I wish  
How I wish you were here  
We're just two lost souls  
Swimming in a fish bowl  
Year after year  
Running over the same old ground  
What have we found?  
The same old fears  
Wish you were here.”*

PINK FLOYD

Aos meus pais Jaciára Ferreira Leite, Avelino da Cunha, Agostinho Soares (*in memoriam*) e Arlete da Silva Soares (*in memoriam*). – Geração e Formação.

Pela ausência forçada, pelos bons e maus momentos compartilhados, dedico este trabalho à toda minha família, aos meus filhos Eric e Duda e minha esposa Noemia.

Amo todos vocês!!



## AGRADECIMENTOS

Ao meu primo, irmão, amigo e padrinho, Dr. Anselmo Soares e sua esposa, prof<sup>a</sup>. M.Sc. Maria Isolina de Castro Soares, pois sem os seus apoios incondicionais e irrestritos nada disso teria acontecido.

Ao amigo, professor e arquiteto Alexandre Cypreste Amorim; ao Ivan Lorenci; ao Vander Falchetto (Vandinho); a amiga, professora e engenheira Dr<sup>a</sup>. Georgia Serafim Araújo; aos compadres Genésio Virgílio, engenheiro e ex-aluno; Cida Caser – exemplos de perseverança e confiança; prof. M.Sc. Antônio Jonas Pinotti e Dra. Leila Fucci Batista, pela pétrea amizade, apoio e por confiarem e acreditarem em mim desde sempre.

Ao meu orientador, prof. Dr. Anderson Claro, pela disposição, competência e muita paciência ao me nortear neste trabalho e pela amizade que se cristalizou na convivência extra-orientação. As crianças também agradecem.

Aos professores Sonia Afonso, Fernando Ruttkay, Tarcísio Vanzin, Roberto Lamberts, Elvira Viveiros, Margarita Barretto, Vania Ulbricht, Ana Maria Zandomeneghi e Alice Pereira pela valiosa contribuição a minha formação.

Aos colegas do LabCon pela convivência sempre agradável e proveitosa, em especial ao Marcelo, Carol, Raphaela, Lucas, Natália e Letícia, pelos bons momentos e pela amizade – um porto seguro. Saudações labconianas a todos.

Aos colegas do PósARQ dos outros laboratórios de pesquisa, foi muito proveitosa a convivência ímpar durante as disciplinas que cursamos juntos.

À Ivonete (e agora a Ana Maria), a nossa incansável secretária do PósARQ, sempre pronta a nos ajudar no que fosse possível (e impossível, também - normalmente).

À todos os colegas do IFES, Campus Colatina, em especial aos colegas da Coordenadoria de Construção Civil, pela liberação para cursar o mestrado e também à prof<sup>a</sup>. M.Sc. Maria Luiza Fontana Linhalis, pelo apoio(íssimo) no inglês (valeu Iza).

À Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação pela paciência e pelo apoio financeiro na concessão da bolsa PIQDTec-CAPES.

Valeu gente!!!!



“Compreender as coisas que nos rodeiam é a melhor preparação para compreender o que há mais além.”

(Hipátia de Alexandria, 355 – 415)



## RESUMO

A simulação computacional vem se destacando como uma ferramenta de grande potencial para a análise da iluminação natural, mas com a profusão de vários softwares de iluminação fica a dúvida sobre quais são confiáveis nos resultados. Para preencher esta lacuna, a *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) publicou o Relatório Técnico CIE 171:2006 com protocolos de análise por estudos de caso, com cenários simples que destacam determinados aspectos da propagação da luz, parametrizados como validadores quantitativos de softwares de iluminação. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o software APOLUX segundo os protocolos de validação 5.8, 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14, selecionados do Relatório Técnico CIE 171:2006, utilizando os modelos de céu da norma CIE-ISO 15469:2004, dando continuidade ao trabalho iniciado por Carvalho (2009). A metodologia, para cada protocolo, constituiu-se da construção em 3D e o tratamento da geometria do modelo proposto seguido da simulação com obtenção dos resultados, calculados analiticamente quando necessário, e comparação com as referências analíticas. Para avaliação dos resultados definiu-se como limite aceitável, para o erro simulado e calculado, uma faixa entre  $\pm 5\%$ . Constatou-se, então, o alto grau de convergência entre os resultados simulados e calculados, principalmente nas maiores resoluções de visibilidade para as avaliações da Componente Refletida Externa (CRE) e a Componente Celeste (CC). Nos resultados da Componente Refletida Interna (CRI) observou-se que maiores quantidades de ciclos de iterações para maiores refletâncias aliado a menores fracionamentos produziam resultados mais precisos, não constituindo erro do software, mas limitações da equação. O APOLUX mostra-se, então, como um programa que é capaz de produzir resultados precisos e confiáveis na simulação da iluminação natural, podendo contribuir com pesquisas científicas para melhor compreensão do comportamento da iluminação natural e também auxiliar os profissionais na adoção de decisões mais seguras de projeto.

**Palavras-chave:** Arquitetura. Simulação computacional. Iluminação Natural. Avaliação de software.



## ABSTRACT

The computer simulation has brought a great help as a tool of large potential for the analysis of daylighting, but due to the amount of various lighting softwares a doubt about which ones of the results are reliable remains. To fill this gap, the *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) published the Technical Report CIE 171:2006 with analysis protocols for case studies, with simple sceneries that highlight certain aspects of light propagation, which were acknowledged as quantitative parameters of software lighting. This research aims to evaluate the software APOLUX according to the validation protocols 5.8, 5.9, 5.11, 5.13 and 5.14, selected from the CIE Technical Report 171:2006, using models of the standard skies CIE-ISO 15469:2004, continuing the work initiated by Carvalho (2009). The methodology for each protocol consisted of the construction and processing of 3D geometry of the model proposed, followed by the obtainment of the simulation results, calculated analytically when necessary, and the comparison with analytical references. To evaluate the results, a range of  $\pm 5\%$  was defined as the limit acceptable for the simulated and calculated error. It was found then the high degree of convergence between the simulated and calculated results, especially in higher resolutions for the evaluation of visibility of External Reflected Component (ERC) and Sky Component (SC). In the results of the Internal Reflected Component (IRC) it was observed that larger amounts of cycles for higher reflectances iterations combined with smaller fractionations produced more accurate results not constituting software error, but limitations of the equation. The APOLUX shows up, thus, as a program that is capable of producing accurate and reliable results in the simulation of daylighting, and can contribute to scientific research providing better understanding of natural light behavior, and also help the professionals in the adoption of safer decisions in the project.

**Keywords:** Architecture. Computer simulation. Daylighting. Software assessment.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Parâmetros utilizados para definir a posição do Sol e do elemento arbitrário do céu P (Fontes: ISO 15469:2004 e Pereira, 2009, p. 15 – Destaque do autor).....	38
Figura 2: Padrões de gradação. Fonte: KITTLER, 2002.....	41
Figura 3: Padrões de indicatriz. Fonte: KITTLER, 2002.....	41
Figura 4: Escala de Luminâncias cd/m <sup>2</sup> (Fonte: APOLUX).....	42
Figura 5: Janela de apresentação do software APOLUX. Fonte: APOLUX.....	46
Figura 6: Interface do modo Fractal. Fonte: APOLUX.....	46
Figura 7: Interface do modo Foton. Fonte: APOLUX.....	46
Figura 8: Divisão das superfícies (planos) do modelo em triângulos (fracionamento). Fonte: APOLUX.....	46
Figura 9: Globo dividido em 60 faixas (destaque, do autor, de uma faixa na cor cinza). Fonte: CLARO (1998).....	47
Figura 10: Vista frontal e vista perspectivada da resolução de visibilidade de 15 faixas, em 745 parcelas no hemisfério superior (meio globo). Fonte: CARVALHO (2009), p. 23.....	48
Figura 11: Vista frontal e vista perspectivada da resolução de visibilidade de 30 faixas, em 2951 parcelas no hemisfério superior (meio globo). Fonte: CARVALHO (2009), p. 23.....	48
Figura 12: (a) Hemisfera projetada no plano e (b) ângulo sólido projetado. Fonte: ABNT (2004).....	48
Figura 13: Exemplo de máscara gerada pelo APOLUX. Fonte: APOLUX.....	49
Figura 14: Caixa de definição dos parâmetros da abóbada. Fonte: APOLUX...	49
Figura 15: Imagens fotometradas do céu de Florianópolis com o uso da IQCam 300. (fonte: PEREIRA, 2009).....	57
Figura 16: (a) Componente Celeste - CC; (b) Componente Refletida Externa – CRE; (c) Componente Refletida Interna – CRI. Todas na unidade de (%). Desenho do autor.....	62
Figura 17: Representação esquemática da metodologia (os ciclos para o globo 150 com fracionamento de 0,005m <sup>2</sup> são: 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 200, 250 e 300).....	68

Figura 18: Geometria do modelo com a fonte de luz isotrópica posicionada no centro do cômodo ( $x = y = z = 2,00\text{m}$ ).....	70
Figura 19: Cálculo do fator de forma para superfícies paralelas.....	72
Figura 20: Cálculo do fator de forma para superfícies perpendiculares.....	72
Figura 21: Cálculo da Componente Celeste sob o céu nublado CIE (ponto no chão e abertura horizontal). Fonte: CIE 171:2006, p. 34 e Tregenza, 1993, p. 2.33(1). Desenho do autor. ....	73
Figura 22: Geometria do estudo de caso com abertura zenital de 1,00m x 1,00m e posicionamento dos pontos de medição. Fonte: CIE 171:2006, p. 34. Desenho do autor.....	74
Figura 23: Posição dos pontos de medição em relação aos pontos cardeais em vista superior e em perspectiva. Desenho do autor.....	74
Figura 24: Posicionamento do Sol a 60° ao Sul. Desenho do autor. ....	74
Figura 25: Componente celeste (a) e componente refletida externa (b) para pontos no piso (a), no teto (b) e na parede (c) para uma abertura na fachada. Adaptado de: CIE 171:2006, p. 36. Desenhos do autor. ....	76
Figura 26: Cálculo da Componente celeste sob céu nublado CIE (ponto no piso e abertura vertical). Fonte: CIE 171:2006, p. 38 e Tregenza, 1993. Desenho do autor.....	77
Figura 27: Descrição da geometria e localização dos pontos de medição. Fonte: CIE 171:2006, p. 38. Desenho do autor.....	77
Figura 28: Posição dos pontos de medição em relação aos pontos cardeais. Desenho do autor.....	78
Figura 29: Posicionamento do Sol a 60° ao Sul. Desenho do autor. ....	78
Figura 30: Cálculo do Componente Celeste (a) e da Componente Refletida Externa (b) para uma abertura na fachada e uma máscara horizontal externa. Adaptado de: CIE 171:2006, p. 40. Desenho do autor. ....	79
Figura 31: Descrição geométrica da máscara horizontal externa e do estudo de caso. Fonte: CIE 171:2006, p. 41. ....	81
Figura 32: Diferentes dimensões da máscara horizontal externa (a) 0,50m, (b) 1,00m e (c) 2,00m. Desenhos do autor. ....	81
Figura 33: Posicionamento do Sol a 60° ao Sul. Desenho do autor. ....	82
Figura 34: Posicionamento dos pontos de referência no piso. Fonte: CIE 171:2006, p. 42. Desenho do autor. ....	82

Figura 35: Cálculo da Componente Celeste (a) e da Componente Refletida Externa (b) para uma abertura na fachada e uma máscara vertical externa. Adaptado de: CIE 171:2006, p. 42. Desenho do autor.....	83
Figura 36: Descrição geométrica, vista em corte, da máscara vertical externa do estudo de caso. Fonte: CIE 171:2006, p. 44.....	85
Figura 37: Diferentes dimensões da máscara vertical externa (a) 3,00m, (b) 6,00m e (c) 9,00m. Desenhos do autor. ....	86
Figura 38: Protocolo 5.14 - Posicionamento do Sol a 60° ao Sul. Desenho do autor.....	86
Figura 39: Fracionamentos de (a) 0,5m <sup>2</sup> , (b) 0,05m <sup>2</sup> e (c) 0,005m <sup>2</sup> do modelo. Fonte: APOLUX.....	87
Figura 40: Formato dos planos de análise e ponto considerado para medição... 88	
Figura 41: Posicionamento do plano de análise horizontal nos modelos dos protocolos (a) 5.9, (b) 5.11, (c) 5.13 e (d) 5.14.....	89
Figura 42: Modelagem dos planos vertical e horizontal para cálculo das luminâncias uniformes das máscaras horizontais. Desenho do autor.....	90
Figura 43: Definição do comprimento da máscara horizontal. Desenho do autor. ....	90
Figura 44: Modelo com as paredes externas e com a máscara horizontal externa. Desenho do autor.....	91
Figura 45: Protocolo 5.14 - Definição do comprimento da máscara vertical. Desenho do autor.....	91
Figura 46: Ângulo de visão do ponto A para a abertura zenital 1,00 x 1,00m e a parcela visível da abóbada celeste .....	108
Figura 47: Visualização, a partir do ponto A, da abertura 1,00m x 1,00m. ....	109
Figura 48: Visualização, a partir do ponto A, de influência do globo dividido em 15 faixas.....	109
Figura 49: Visualização, a partir do ponto A, de influência do globo dividido em 30 faixas.....	109
Figura 50: Visualização, a partir do ponto A, de influência do globo dividido em 60 faixas.....	109



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Panorama dos modelos de céu para caracterizar a distribuição de luminâncias (Fonte: PEREIRA, 2009, p. 17).....	35
Tabela 2: Parâmetros padrões de indicatriz e de gradação.....	40
Tabela 3: Combinações dos parâmetros de indicatriz e de gradação. Os destacados em amarelo compõem o conjunto de quinze tipos de céu.....	40
Tabela 4: Parâmetros padrões e tipos de céu [Adaptado de Kittler (2002)].....	42
Tabela 5: Tipos de céu para a latitude de 19,5° (Colatina-ES) com $\gamma_s=60^\circ$ e $\alpha_s=0^\circ$ , apresentados com e sem as trajetórias solares. Fonte: APOLUX .....	43
Tabela 6: Comparação entre os métodos de validação de software. ....	51
Tabela 7: Resultados dos procedimentos de validação dos programas Radiance e APOLUX. Fonte: Adaptado de PEREIRA (2009), p. 109.....	58
Tabela 8: Protocolos aplicáveis nesta pesquisa.....	63
Tabela 9: Resumo da previsão de simulações a serem realizadas neste trabalho. ....	92
Tabela 10: Características dos protocolos aplicados neste trabalho.....	93
Tabela 11: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para os fracionamentos de 0,5, 0,05 e 0,005 nos globos 60, 90 e 150 com 20 ciclos de iterações da radiosidade.....	96
Tabela 12: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para os fracionamentos de 0,5, 0,05 e 0,005 nos globos 60, 90 e 150 com 60 ciclos de iterações da radiosidade.....	99
Tabela 13: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para as variações de ciclos de iterações da radiosidade na resolução de visibilidade do globo 150 com fracionamento de 0,005.....	101
Tabela 14: Ocorrência de erros (em %) no protocolo 5.8 para os fracionamentos de 0,5 e 0,005 para todos as resoluções de visibilidade simuladas. ....	103
Tabela 15: Ocorrência de erros (em %) no protocolo 5.8 para o fracionamento de 0,005 para todos as resoluções de visibilidade simuladas.....	103
Tabela 16: Ocorrência de erros (em %) no protocolo 5.8 para o fracionamento de 0,005 para a resolução de visibilidade do globo 150.....	103
Tabela 17: Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.8, para todos os fracionamentos e média geral. ....	103

Tabela 18: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos na parede. ....	105
Tabela 19: Comparação dos erros no céu tipo 3 no APOLUX, VELUX e AGi32. ....	109
Tabela 20: Protocolo 5.9 - Comparações dos valores de referência com os obtidos nos softwares APOLUX, VELUX e AGi32 no céu tipo 03. ....	110
Tabela 21: Valores de referência do céu tipo 3 reposicionados. ....	110
Tabela 22: Protocolo 5.9 – Erros em %, no APOLUX, recalculados com os valores de referência do céu tipo 03 reposicionados. ....	110
Tabela 23: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos no piso. ....	111
Tabela 24: Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.9, abertura zenital de 1,00m x 1,00m. ....	114
Tabela 25: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos na parede. ....	115
Tabela 26: Comparação dos erros (em %) no céu tipo 1 no APOLUX e no Velux Daylight Visualizer 2. ....	118
Tabela 27: Comparação dos valores de referência entre os protocolos 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 nos pontos A, B e C no céu tipo 1 e no APOLUX com o globo 150. ....	119
Tabela 28: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos no piso. ....	119
Tabela 29: Comparação dos erros (em %) no céu tipo 13 no APOLUX e no Velux Daylight Visualizer 2. ....	122
Tabela 30: Comparação dos valores de referência entre os protocolos 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 nos pontos G, H e I no céu tipo 13 e no APOLUX com o globo 150. ....	122
Tabela 31: Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.9, abertura zenital de 4,00m x 4,00m. ....	123
Tabela 32: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos na parede. ....	124

Tabela 33: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no piso. .....	128
Tabela 34: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no teto. .....	131
Tabela 35: Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.11, abertura lateral de 2,00m x 1,00m. ....	134
Tabela 36: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos na parede. .....	135
Tabela 37: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no piso. .....	138
Tabela 38: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no teto. .....	142
Tabela 39: Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.11, abertura lateral de 4,00m x 3,00m. ....	145
Tabela 40: Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara horizontal de 0,50m. ....	146
Tabela 41: Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara horizontal de 1,00m. ....	148
Tabela 42: Comparação das referências entre os céus 01, 15 e 16 dos protocolos 5.13 e 5.14. ....	151
Tabela 43: Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara horizontal de 2,00m. ....	151
Tabela 44: Faixa de ocorrências para máscaras horizontais dos erros no protocolo 5.13. ....	154
Tabela 45: Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara vertical de 3,00m. ....	155
Tabela 46: Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara vertical de 6,00m. ....	158
Tabela 47: Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara vertical de 9,00m. ....	160
Tabela 48: Protocolo 5.14 – Porção visível (em %) do céu e da máscara vertical (MV), vista pela abertura 2,00 x 1,00m, relativa a cada ponto de medição. ....	163

Tabela 49: Protocolo 5.14 – Cálculo da iluminância para a região da máscara vertical vista para os pontos no piso, de acordo com as referências CIE para os céus tipo 1 e 5.....	165
Tabela 50: Protocolo 5.14 – Fator de forma analítico em relação à máscara vertical de 9,00m. ....	166
Tabela 51: Protocolo 5.14 – Fator de forma analítico em relação ao céu para o cenário com a máscara vertical de 9,00m. ....	166
Tabela 52: Protocolo 5.14 – Quadro resumo do Fator de forma analítico. ....	167
Tabela 53: Protocolo 5.14 – Quadro resumo do Fator de forma analítico CIE equivalente ao fator de forma calculado pelo APOLUX. ....	167
Tabela 54: Protocolo 5.14 – Fator de forma (CC=DF=FF) obtido no APOLUX. ....	168
Tabela 55: Protocolo 5.14 – Fator de forma relativo a abertura lateral obtido no APOLUX.....	168
Tabela 56: Protocolo 5.14 – Quadro resumo dos fatores de forma obtidos no APOLUX relativo a totalidade da abertura lateral, ao céu e a máscara vertical. ....	169
Tabela 57: Protocolo 5.14 – Resumos dos fatores de forma (analíticos e simulados) e dos erros (em %) entre eles. ....	169
Tabela 58: Faixa de ocorrência de erros na comparação entre os fatores de forma analítico e simulado para as máscaras verticais de 3, 6 e 9m e para toda a abertura lateral (AL).....	170
Tabela 59: Resumo da faixa de ocorrência de erros na comparação entre os fatores de forma analítico e simulado. ....	171
Tabela 60: Relação das ocorrências descartadas e válidas para os protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14, sem computar os resultados do Fator de Forma do 5.14. ....	171
Tabela 61: Resumo dos resultados com as ocorrências válidas para os protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14. ....	172

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,5 nos globos 60, 90 e 150 com 20 ciclos de iterações da radiosidade.....	97
Gráfico 2: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,05 nos globos 60, 90 e 150 com 20 ciclos de iterações da radiosidade.....	98
Gráfico 3: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,005 nos globos 60, 90 e 150 com 20 ciclos de iterações da radiosidade.....	98
Gráfico 4: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,5 nos globos 60, 90 e 150 com 60 ciclos de iterações da radiosidade.....	99
Gráfico 5: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,05 nos globos 60, 90 e 150 com 60 ciclos de iterações da radiosidade.....	100
Gráfico 6: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,05 nos globos 60, 90 e 150 com 60 ciclos de iterações da radiosidade.....	100
Gráfico 7: Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para as variações de ciclos de iterações da radiosidade na resolução de visibilidade do globo 150 com fracionamento de 0,005.....	102
Gráfico 8: Protocolo 5.8 – Resumo geral dos erros (em %)......	104
Gráfico 9: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos na parede. ....	107
Gráfico 10: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos na parede. ....	107
Gráfico 11: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos na parede .....	108
Gráfico 12: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos no piso. ....	112
Gráfico 13: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos no piso. ....	113
Gráfico 14: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos no piso. ....	113
Gráfico 15: Protocolo 5.9 – Abertura 1,00m x 1,00m: Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60, 90 e 150 para os pontos no piso e na parede. ....	114
Gráfico 16: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos na parede. ....	117
Gráfico 17: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos na parede. ....	117

Gráfico 18: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos na parede. ....	118
Gráfico 19: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos no piso. ....	121
Gráfico 20: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos no piso. ....	121
Gráfico 21: Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos no piso. ....	121
Gráfico 22: Protocolo 5.9 – Abertura 4,00m x 4,00m: Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60, 90 e 150 para os pontos no piso e na parede. ....	123
Gráfico 23: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos na parede. ....	126
Gráfico 24: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos na parede. ....	127
Gráfico 25: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos na parede. ....	127
Gráfico 26: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no piso. ....	130
Gráfico 27: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no piso. ....	130
Gráfico 28: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no piso. ....	130
Gráfico 29: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no teto. ....	132
Gráfico 30: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no teto. ....	133
Gráfico 31: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no teto. ....	133
Gráfico 32: Protocolo 5.11 – Abertura lateral 2,00m x 1,00m: Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60, 90 e 150 para os pontos na parede, piso e no teto. ....	134
Gráfico 33: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos na parede. ....	137
Gráfico 34: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos na parede. ....	137
Gráfico 35: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos na parede. ....	138

Gráfico 36: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos globo 60 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no piso.....	140
Gráfico 37: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos globo90 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no piso.....	141
Gráfico 38: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos globo150 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no piso.....	141
Gráfico 39: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no teto. ....	143
Gráfico 40: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no teto. ....	144
Gráfico 41: Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no teto. ....	144
Gráfico 42: Protocolo 5.11 – Abertura lateral 4,00m x 3,00m: Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60, 90 e 150 para os pontos na parede, piso e no teto.145	
Gráfico 43: Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara horizontal de 0,50m. ....	147
Gráfico 44: Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara horizontal de 0,50m. ....	148
Gráfico 45: Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara horizontal de 1,00m. ....	150
Gráfico 46: Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara horizontal de 1,00m. ....	150
Gráfico 47: Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara horizontal de 2,00m. ....	153
Gráfico 48: Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara horizontal de 2,00m. ....	153
Gráfico 49: Protocolo 5.13 – Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60 e 90 para as máscaras horizontais de 0,50m, 1,00m e 2,00m. ....	154
Gráfico 50: Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara vertical de 3,00m. ....	157
Gráfico 51: Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara vertical de 3,00m. ....	157
Gráfico 52: Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara vertical de 6,00m (visualização de todos os pontos)...	159
Gráfico 53: Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara vertical de 6,00m (visualização de todos os pontos)...	160

Gráfico 54: Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara vertical de 9,00m (visualização de todos os pontos, exceto o ponto F do céu 12).....	162
Gráfico 55: Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara vertical de 9,00m (visualização de todos os pontos, exceto o ponto F do céu 12).....	162
Gráfico 56: Protocolo 5.14 - Erros (em %) entre os fatores de forma analítico e simulado. ....	170
Gráfico 57: Resumo dos resultados com as ocorrências válidas para os protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14.....	172

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

BRE – Building Research Establishment;

CAD – Computer-Aided Design (Projeto Assistido por Computador);

CC – Componente Celeste (SC – Sky Component);

CIE - Commission Internationale de l'Eclairage (Comissão Internacional de Iluminação);

CRE – Componente Refletida Externa (ERC – External Reflected Component);

CRI – Componente Refletida Interna (IRC – Internal Reflected Component);

FF – Fator de Forma

FLD – Fator de Luz Diurna / Fator de Luz do Dia (DF – Daylight Factor);

IDPM – International Daylight Measurement Programme;



## SUMÁRIO

<b>SUMÁRIO .....</b>	<b>25</b>
<b>1- INTRODUÇÃO.....</b>	<b>29</b>
1.1- Objetivos.....	31
1.1.1 Objetivo Geral.....	31
1.1.2 Objetivos Específicos.....	31
<b>2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>33</b>
2.1- Considerações Iniciais .....	33
2.2- Modelos Numéricos.....	35
2.3- Cálculo da distribuição de luminâncias relativas a partir do conceito de céu geral do CIE.....	37
2.4- Parâmetros padrões e Tipos de céu.....	40
2.5- O software APOLUX .....	45
2.6- Validação de softwares .....	50
2.7- O Relatório Técnico CIE 171:2006 .....	52
2.7.1- casos Experimentais: Protocolos para análise da luz artificial .....	53
2.7.2- Casos com referenciais analíticos: Protocolos para análise da iluminação de forma geral. ....	54
2.8- Validações de software pelo Relatório Técnico CIE 171:2006 .....	55
2.8.1- Software VELUX Daylight Visualizer 2 (Gratuito).....	55
2.8.2- Software AGi32 V. 1.94 (Comercial). ....	56
2.9- Validações do software APOLUX.....	56
2.9.1- Estudo de validação experimental.....	56
2.9.2- Validação com os protocolos 5.3, 5.4, 5.6 e 5.7 do Relatório Técnico CIE 171:2006.....	58
2.10- Considerações finais .....	59
<b>3- METODOLOGIA .....</b>	<b>61</b>
3.1- Procedimentos adotados .....	65
3.2- Métodos aplicados para análise .....	65
3.3- Representação esquemática da metodologia.....	66
3.4- Protocolo 5.8.....	69
3.4.1- Escopo do Teste .....	69
3.4.2- Referência Analítica.....	69
3.4.3- Descrição do modelo do Estudo de Caso.....	70

3.5- Protocolo 5.9 .....	70
3.5.1- Escopo do Teste.....	70
3.5.2- Referência Analítica .....	70
3.5.3- Descrição do modelo do Estudo de Caso.....	73
3.6- Protocolo 5.11 .....	75
3.6.1- Escopo do Teste.....	75
3.6.2- Referência Analítica .....	75
3.6.3- Descrição do modelo do Estudo de Caso.....	77
3.7- Protocolo 5.13 .....	78
3.7.1- Escopo do Teste.....	78
3.7.2- Referência Analítica .....	78
3.7.3- Descrição do modelo do Estudo de Caso.....	81
3.8- Protocolo 5.14 .....	82
3.8.1- Escopo do Teste.....	82
3.8.2- Referência Analítica .....	83
3.8.3- Descrição do modelo do Estudo de Caso.....	85
3.9- Simulações .....	86
3.9.1- Protocolo 5.8.....	86
3.9.2- Protocolos 5.9 ao 5.14 .....	87
3.9.2.1- Itens em comum.....	88
3.9.2.2- Itens particulares .....	89
3.10- Resumo dos Estudos de Caso .....	92
<b>4- RESULTADOS .....</b>	<b>95</b>
4.1- Protocolo 5.8 .....	95
4.2- Protocolo 5.9 .....	105
4.2.1- Abertura Zenital de 1,00m x 1,00m.....	105
4.2.2- Abertura Zenital de 4,00m x 4,00m.....	115
4.3- Protocolo 5.11 .....	124
4.3.1- Abertura Lateral de 2,00m x 1,00 .....	124
4.3.2- Abertura Lateral de 4,00m x 3,00 .....	135
4.4- Protocolo 5.13 .....	146
4.4.1- Máscara Horizontal de 0,50m.....	146
4.4.2- Máscara Horizontal de 1,00m.....	148
4.4.1- Máscara Horizontal de 2,00m.....	151

4.5- Protocolo 5.14.....	155
4.5.1- Máscara Vertical de 3,00m .....	155
4.5.2- Máscara Vertical de 6,00m .....	157
4.5.3- Máscara Vertical de 9,00m .....	160
4.6- Resumo dos resultados .....	171
<b>5- CONCLUSÕES .....</b>	<b>173</b>
5.1- Quanto ao Relatório Técnico e aos protocolos .....	173
5.2- Quanto aos resultados das simulações .....	174
5.3- Limitações de estudo .....	175
5.4- Considerações Finais .....	175
5.5- Sugestões para trabalhos futuros.....	175
<b>6- REFERÊNCIAS.....</b>	<b>177</b>



## 1- INTRODUÇÃO

A luz natural oferece diversos benefícios para o ser humano, sendo um recurso que está sendo cada vez mais aproveitado pelos arquitetos no desenvolvimento de seus projetos devido, entre várias razões, ao grande potencial para se reduzir o consumo de energia, à qualidade de iluminação proporcionada, conforto, relação interior-exterior, bem-estar psicológico e fisiológico. Mas, conforme Lomardo (2011, p. 93), “A iluminação natural ainda é pouco utilizada devido às bruscas variações de clareamento a que estão sujeitas, em função de variações meteorológicas.”, dificultando a previsão da quantidade de luz.

A possibilidade de visualizar o espaço antes de ser construído e conseguir avaliar quantitativa e qualitativamente a iluminação natural no ambiente contribui na seleção de estratégias adequadas para o conforto ambiental e a eficiência energética. Entretanto, conforme Pereira (2009) a quantidade de variáveis a serem consideradas é muito grande, tais como: localização geográfica, horário, nebulosidade, tamanho e altura das edificações vizinhas, orientação das fachadas, características dos materiais, geometria dos ambientes, etc.

Devido a isso a simulação da iluminação natural, conforme o contexto energético e ambiental atual, ganha cada vez mais importância como sendo uma das principais ferramentas de concepção de projetos de iluminação, seja em modelos físicos ou pelo computador, consolidando-se então como um importante meio para representar e compreender o fenômeno.

No campo da simulação computacional da iluminação, face às necessidades crescentes, um número cada vez maior de softwares estão sendo desenvolvidos em todo o mundo e sem informação suficiente sobre as potencialidades, limites e exatidão. A respeito disso, Carvalho (2009) coloca:

*Devido à grande quantidade de softwares, existentes e em desenvolvimento, que simulam a iluminação natural e suas diferentes abordagens de cálculo analítico, existe uma lacuna em relação a quanto esses programas representam adequadamente (ou com poucos desvios) o fenômeno físico real. Podem ocorrer imprecisões nos cálculos dos softwares que se agravam com a necessidade de referências para a avaliação dos mesmos (CARVALHO, 2009, p. 03).*

Esta falta de informação afeta consideravelmente a confiança de potenciais usuários nas simulações de iluminação em geral. Esses usuários são, muitas vezes, incapazes de escolher um software de simulação de iluminação que responda corretamente às suas necessidades.

A Comissão Internacional de Iluminação (CIE, *Commission Internationale de l'Eclairage*) é uma entidade internacional independente, fundada em 1913 e sediada em Viena (Áustria) e que dedica-se ao intercâmbio de informações sobre o que se refere a iluminação. É aceita como máxima autoridade na área de iluminação, sendo reconhecida como uma organização internacional de caráter normativo pela ISO (*International Organization for Standardization*) e pela IEC (*International Electrotechnical Commission*).

Com a profusão mundial de softwares de simulação de iluminação disponíveis viu-se a necessidade de avaliar a precisão das simulações (CIE 171:2006). Foi, então, proposta uma metodologia de validação baseada no conceito de testar separadamente os diferentes aspectos da propagação da luz.

Para isso, o Relatório Técnico CIE 171:2006 apresenta um conjunto de estudos de caso abrangendo todos os aspectos da propagação e da simulação da iluminação, onde cada um deles envolve um número muito limitado de parâmetros, minimizando as fontes de erro.

Estes estudos de caso podem ser usados para avaliar a capacidade dos softwares de simulação em respeitar as leis físicas relacionadas a esses parâmetros, comparando os resultados de simulação para referências analíticas ou experimentais.

O programa a ser avaliado nesta pesquisa é o APOLUX, desenvolvido pelo prof. Dr. Anderson Claro, amplamente utilizado em estudos e pesquisas pelo Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon) do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da UFSC (CTC-UFSC), de forma a confirmar sua confiabilidade como ferramenta de simulação da iluminação natural (PEREIRA, 2009; CARVALHO, 2009; CLARO, 2010)<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Alguns dos trabalhos publicados que utilizam o programa APOLUX se encontram no site: <http://www.labcon.ufsc.br/foton/>, guia ARTIGOS.

## **1.1- OBJETIVOS**

### **1.1.1 OBJETIVO GERAL**

Avaliar o programa APOLUX segundo os protocolos de validação 5.8, 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14, selecionados do Relatório Técnico CIE 171:2006, utilizando os modelos de céu da norma CIE-ISO 15469:2004.

### **1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- a. Dar continuidade ao trabalho iniciado por Carvalho (2009).
- b. Verificar se os resultados dos cálculos do software são consistentes com as condições de cálculo parametrizadas como validadoras segundo os protocolos da CIE 171:2006 e os tipos de céu conforme a norma CIE-ISO 15469:2004.
- c. Verificar a convergência dos resultados das avaliações segundo diferentes graus de resolução de cálculo.
- d. Identificar possíveis inconsistências nos algoritmos de cálculo.



## 2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1- CONSIDERAÇÕES INICIAIS

A luz sempre esteve presente, de alguma forma, nos diversos escritos filosóficos, religiosos e psicológicos da humanidade (BARNABÉ, 2007), e também nas pesquisas científicas. Sempre esteve ligada à sensação de segurança, tanto que o homem primitivo já usava o fogo como fonte artificial de luz e para afugentar os animais (GRAZIANO JR., 2004).

Platão (1970), através da “alegoria da caverna”, imagina um grupo de escravos acorrentados, desde a infância, olhando para as sombras que eram projetadas na parede, que eram, para eles, a única realidade existente.

Conforme Barros (1999, p. 11), “*Sem luz, a vida não seria possível. Sem percepção, não haveria sensibilidade nem inteligência. A luz faz para a vida aquilo que a percepção faz para a inteligência*”.

De acordo com Le Corbusier (1977, p. XXIX), “*Nossos olhos são feitos para ver as formas sob a luz*”. Então, iluminar é mais que fornecer a quantidade de luz suficiente para uma atividade desenvolvida em um espaço determinado: a iluminação deve “*expressar valores conotativos ao projeto, modificando, controlando e mediando a luz; possibilitando com isso a qualificação do espaço envolvente no qual se vive*” (BARNABÉ, 2007).

Conforme Kittler e Darula (2002), a luz natural sempre desempenhou um papel dominante na vida humana. Ela é vital para a saúde e conforto, sendo um fator determinante na qualidade dos interiores dos edifícios.

Segundo Lomardo (2011, p. 94):

*O aproveitamento da iluminação natural pode racionalizar o consumo de energia elétrica, se forem tomadas corretas providências para a entrada da luz visível, evitando-se o excesso da radiação solar direta.*

Percebe-se, então, que a luz natural é uma condicionante fundamental na arquitetura, que faz parte do processo conceitual do projeto. Este processo se faz por escolhas de parâmetros (conforto ambiental, utilidade, racionalidade, estética, sustentabilidade, economia, entre outros) que direcionam o projeto, sendo alguns mais e outros menos valorizados, conforme o direcionamento dado pelo profissional.

Entretanto a luz natural normalmente é considerada como uma circunstância do conforto térmico e não é priorizada adequadamente por ser muito complexa de avaliar, conforme afirma Pereira (2009, p. 03):

*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.*

Então, para estimar a iluminação o mais próximo possível da realidade (simulação) necessita-se conhecer as condições de iluminação natural durante todo o ano.

Para uma avaliação eficiente do desempenho da iluminação natural, a ferramenta mais comum ao arquiteto é o modelo físico em escala reduzida, pois é confiável, de fácil aplicação e usado para visualizar a forma final do projeto, suas fachadas e espaços internos. A dificuldade está no custo da montagem do modelo e em reproduzir fielmente todas as peças necessárias (BAKER et. al., 1993).

Este paradigma está mudando, pois atualmente a simulação computacional vem se mostrando uma poderosa ferramenta na compreensão do fenômeno da iluminação natural, sendo cada vez mais utilizada pelos profissionais. Com computadores cada vez mais potentes no processamento de dados, as imagens sintetizadas possibilitam uma melhor visualização e possibilitam uma avaliação quantitativa e qualitativa do ambiente a ser construído, auxiliando o arquiteto na tomada de decisões.

Muitos são os trabalhos que se utilizam da simulação computacional em pesquisas. Mardaljevic (1995) utiliza o banco de dados do BRE (Building Research Establishment) para validar o software Radiance; Tsangrassoulis e Bourdakis (2003) comparam resultados obtidos pelo procedimento prático de desenho, desenvolvido por Tregenza, e resultados simulados usando Radiance (radiosidade) e Lightscape 3.2 (Ray-tracing); Christakou (2004) estuda a simulação computacional da iluminação natural avaliando, comparativamente, quatro softwares; Cabús (2005) apresenta o processo de validação do programa TROPLUX; Pereira (2009) valida o APOLUX conforme os

parâmetros desenvolvidos em sua tese e compara os resultados das medições *in loco* com os obtidos na simulação chegando a valores muito próximos aos obtidos por Mardaljevic (1995).

A simulação computacional da iluminação natural tem como base os conhecimentos físicos e óticos que definem o estado da abóbada celeste e do sol. A abóbada é geralmente dividida em várias parcelas, conforme o grau de precisão da distribuição de luminâncias, e os resultados são obtidos através das iterações sucessivas da energia luminosa em função da inter-reflexão e transmissão da luz nos ambientes.

Parte das atividades recentes no CIE foi destinada a definir modelos numéricos das distribuições de luminâncias típicas que podem ser descritas no céu como uma grande fonte primária de luz.

## 2.2- MODELOS NUMÉRICOS

Conforme Pereira (2009, p. 16-17), a evolução dos estudos de céu tem início com a esfera com luminância uniforme unitária de Lambert, um modelo de céu simplificado que permitiu o desenvolvimento dos primeiros cálculos de iluminação natural baseados nos conceitos de projeção do ângulo sólido de aberturas. Moon e Spencer, em 1942, caracterizam a distribuição de luminâncias para céu encoberto; Kittler, em 1967, para céu claro; Littlefair, em 1981, para céu intermediário; Perraudau, em 1988, dispôs cinco categorias de céu; Perez, Kittler e Darula, em 1997, classificaram quinze categorias de céu e em 2002 o CIE adota esta classificação resultando na norma *ISO 15.469:2004 Spatial distribution of daylight - CIE standard general Sky* (Tabela 1Tabela 1).

**Tabela 1:** Panorama dos modelos de céu para caracterizar a distribuição de luminâncias (Fonte: PEREIRA, 2009, p. 17)

Autores	Função do modelo	Ano	Observações
Moon e Spencer	Caracterizar a distribuição da luminância (céu encoberto).	1942	Recomendado pela CIE em 1955 - céu encoberto padrão.
Kittler	Caracterizar a distribuição da luminância (céu claro).	1967	Recomendado pela CIE em 1973 - céu claro (completamente sem nuvens).

Continua

Continuação da Tabela 1

Autores	Função do modelo	Ano	Observações
Littlefair	Caracterizar a distribuição da luminância (céu Intermediário).	1981	Propõe a distribuição de luminância para cada altitude solar – denominação: <i>BRE Average Sky</i> .
Nakamura	Caracterizar a distribuição da luminância (céu Intermediário).	1985	Descreve a luminância do Zênite para esta proposta de céu.
Kittler	Caracterizar a distribuição da luminância (de céu claro p/ encoberto).	1985	Assumiu que a condição de céu varia de forma homogênea; de céu claro para encoberto.
Perraudeau	Caracterizar as distribuições de luminâncias para cada tipo de céu.	1988	Dispõe os céus em cinco categorias: encoberto; intermediário – encoberto; intermediário; intermediário – claro e céu claro.
Perez	Caracterizar um modelo em função dos índices de claridade e de luminância do céu.	1990	Denominado <i>All weather model</i> e classificado para parametrizar as condições de céu encoberto brilhante, intermediário, claro turvo e muito claro.
Perez, Kittler e Darula	Caracterizar as distribuições de luminâncias para cada tipo de céu.	1997	Classificação de distribuição de luminâncias do céu em quinze categorias.
Commission Internationale de l'Eclairage (CIE)	Caracterizar as distribuições de luminâncias para cada tipo de céu.	2002	Utilizou a classificação de distribuição de luminâncias do céu em quinze categorias, de Perez, Kittler e Darula, (1997).

A norma *ISO 15.469:2004 Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky* tem como proposta:

- Ser uma base universal para a classificação das medições das distribuições de luminância do céu;
- Apresentar um método de cálculo das distribuições de luminâncias do céu nos procedimentos que envolvem iluminação natural.

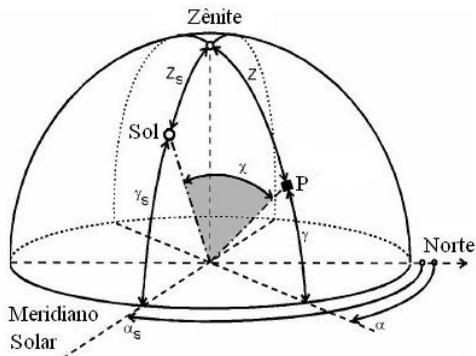
A norma define que a distribuição de luminâncias relativas, a luminância do céu em qualquer ponto, é dada em função da luminância do Zênite. As distribuições de luminâncias têm as seguintes características:

- Elas são simétricas em relação ao meridiano solar e são funções da distância angular entre o Sol e o Zênite;
- Elas são definidas por funções contínuas. Essas distribuições são típicas de céu sem nuvens e aqueles onde a cobertura de nuvens é homogênea. Elas fornecem uma aproximação, para o céu de nuvens não homogêneas, que é suficientemente precisa para muitos cálculos práticos em iluminação natural;
- A luminância, em qualquer ponto do céu depende do ângulo entre o Sol e o elemento arbitrário do céu, e do ângulo entre o elemento arbitrário do céu e o Zênite. Ela é dada em termos de duas funções: a dispersão relativa da indicatriz e a gradação de luminância entre horizonte e o Zênite.

A Norma define, também, um conjunto de condições dos níveis de iluminância externa que vincula a luz do sol e do céu para propostas práticas e teóricas.

### **2.3- CÁLCULO DA DISTRIBUIÇÃO DE LUMINÂNCIAS RELATIVAS A PARTIR DO CONCEITO DE CÉU GERAL DO CIE**

Os tipos de céu são modelos programados a partir das fórmulas e parâmetros da *ISO 15.469:2004 Spatial distribution of daylight - CIE standard general sky*, conforme a luminância do elemento arbitrário do céu (P), um ponto em qualquer posição da abóbada celeste (Figura 1).



**Figura 1:** Parâmetros utilizados para definir a posição do Sol e do elemento arbitrário do céu P (Fontes: ISO 15469:2004 e Pereira, 2009, p. 15 – Destaque do autor)

Onde:

- $Z_s$  – ângulo entre o Zênite e o Sol [graus];
- $Z$  – ângulo entre o Zênite e o elemento do céu [graus];
- $\gamma_s$  - elevação solar a partir do horizonte [graus].
- $\gamma$ - elevação do elemento do céu a partir do horizonte [graus].
- $\chi$  – ângulo compreendido entre o ponto P e o Sol [graus];
- $\alpha_s$  – Azimute do Sol (sentido horário a partir do Norte) [graus];
- $\alpha$  – Azimute do elemento arbitrário do céu P (sentido horário a partir do Norte) [graus];

A posição arbitrária do elemento do céu é definida pelo ângulo entre o Zênite e o elemento do céu ( $Z$ ) e a diferença de Azimute entre o elemento ( $\alpha$ ) e o meridiano solar ( $\alpha_s$ ); então a sua distância do Sol é definida pela Equação 1:

$$\chi = \arccos(\cos Z_s \cdot \cos Z + \sin Z_s \cdot \sin Z \cdot \cos|\alpha - \alpha_s|) \dots \text{Equação 1}$$

Conforme Claro et. al, (2010) a determinação de cada tipo de céu parte de um conjunto de fórmulas único, nas quais um conjunto de cinco parâmetros discretos ( $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $d$ ,  $e$ ) descrevem as condições atmosféricas apresentando quinze combinações distintas, cada uma definindo um tipo de distribuição relativa de luminâncias para cada parcela de céu, comparada com uma dada luminância da parcela correspondente ao Zênite.

A relação da luminância  $L_p$  do elemento arbitrário do céu para a luminância do Zênite  $L_z$  é expressa na fórmula seguindo o padrão de céu claro atual do CIE, conforme a Equação 2:

$$\frac{L_p}{L_z} = \frac{f(\chi) \cdot \varphi(Z)}{f(Z_s) \cdot \varphi(0^\circ)} \dots\dots\dots \text{Equação 2}$$

Onde:

- $L_p$  – Luminância do elemento arbitrário do céu P, em cd/m<sup>2</sup>;
- $L_z$  – Luminância do Zênite, em cd/m<sup>2</sup>;

A função  $\varphi$  de gradação<sup>2</sup> de luminância se refere à luminância do elemento arbitrário do céu relativa ao seu ângulo zenital, conforme a Equação 3:

$$\varphi(Z) = 1 + a \cdot \exp\left(\frac{b}{\cos Z}\right) \dots\dots\dots \text{Equação 3}$$

Quando:  $0 \leq Z < \frac{\pi}{2}$ .

No horizonte o valor é:  $\varphi\left(\frac{\pi}{2}\right) = 1$

E o valor no Zênite é expresso na Equação 4:

$$\varphi(0^\circ) = 1 + a \cdot \exp(b) \dots\dots\dots \text{Equação 4}$$

Onde  $a$  e  $b$  são os parâmetros de gradação (ver Tabela 2).

A função  $f$  expressa a dispersão da indicatriz<sup>3</sup> que relaciona a luminosidade relativa do elemento arbitrário do céu a sua distância angular do Sol, conforme a Equação 5:

$$f(\chi) = 1 + c \cdot \left[ \exp(d \cdot \chi) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 \chi \dots\dots\dots \text{Equação 5}$$

O valor da função no Zênite é expresso na Equação 6:

$$f(Z_s) = 1 + c \cdot \left[ \exp(d \cdot Z_s) - \exp\left(d \cdot \frac{\pi}{2}\right) \right] + e \cdot \cos^2 Z_s \dots\dots\dots \text{Equação 6}$$

Onde  $c$ ,  $d$ , e  $e$  são os parâmetros de dispersão da indicatriz (ver Tabela 2).

<sup>2</sup> Gradação é a progressão por graus sucessivos, o aumento ou a diminuição sucessiva e gradual.

<sup>3</sup> Figura geométrica tridimensional representada por um elipsóide de três eixos que, neste caso, é usada para gerar distribuição espacial de valores.

## 2.4- PARÂMETROS PADRÕES E TIPOS DE CÉU

Ao analisar a dispersão relativa da indicatriz para vários céus medidos sob a distribuição típica de luminância, turvamento e nebulosidade, selecionados de um grupo de dados, foram definidos seis padrões da função de gradação (em romanos), pelos parâmetros *a* e *b* e seis padrões da função indicatriz (em arábicos) pelos parâmetros *c*, *d* e *e* (ver Tabela 2).

**Tabela 2:** Parâmetros padrões de indicatriz e de gradação

	Gradação		Indicatrix			
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	
<b>I</b>	4.00	-0.70	<b>1</b>	0.00	-1.00	0.00
<b>II</b>	1.10	-0.80	<b>2</b>	2.00	-1.50	0.15
<b>III</b>	0.00	-1.00	<b>3</b>	5.00	-2.50	0.30
<b>IV</b>	-1.00	-0.55	<b>4</b>	10.00	-3.00	0.45
<b>V</b>	-1.00	-0.32	<b>5</b>	16.00	-3.00	0.30
<b>VI</b>	-1.00	-0.15	<b>6</b>	24.00	-2.80	0.15

Através de combinações simples, algumas mais raras e outras mais freqüentes, foi determinado um conjunto de quinze tipos de céu que cobrem o espectro usual de céus típicos mais comuns.

**Tabela 3:** Combinações dos parâmetros de indicatriz e de gradação. Os destacados em amarelo compõem o conjunto de quinze tipos de céu.

<b>I.1</b>	<b>II.1</b>	<b>III.1</b>	IV.1	V.1	VI.1
<b>I.2</b>	<b>II.2</b>	<b>III.2</b>	<b>IV.2</b>	V.2	VI.2
I.3	II.3	<b>III.3</b>	<b>IV.3</b>	V.3	VI.3
I.4	II.4	<b>III.4</b>	<b>IV.4</b>	<b>V.4</b>	VI.4
I.5	II.5	III.5	IV.5	<b>V.5</b>	<b>VI.5</b>
I.6	II.6	III.6	IV.6	V.6	<b>VI.6</b>

As curvas resultantes das funções indicatriz e de gradação são mostradas nas Figuras 2 e 3, a seguir.

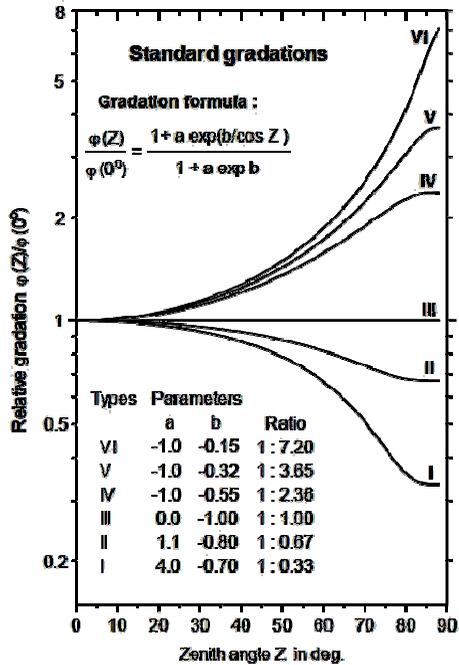


Figura 2: Padrões de gradação. Fonte: KITTLER, 2002.

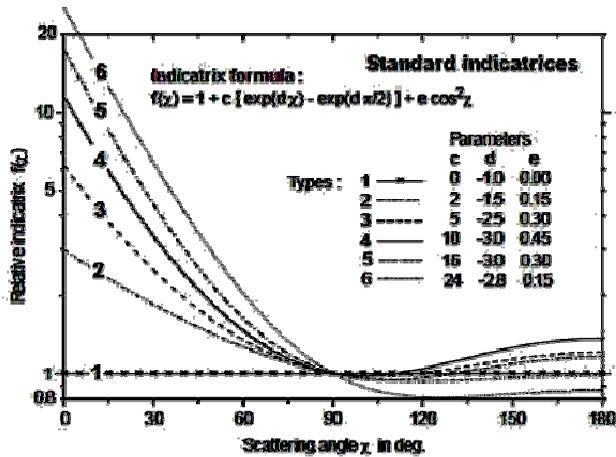


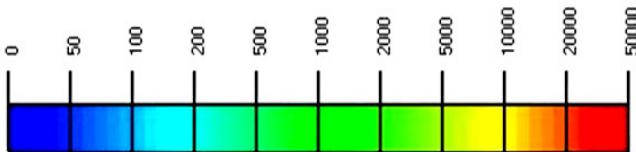
Figura 3: Padrões de indicatriz. Fonte: KITTLER, 2002.

Na Tabela 4 estão identificados os tipos de céu resultantes das combinações dos parâmetros de indicatriz e gradação.

**Tabela 4:** Parâmetros padrões e tipos de céu [Adaptado de Kittler (2002)]

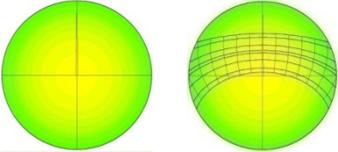
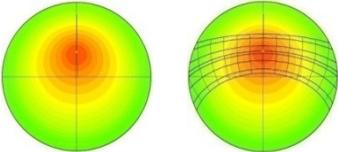
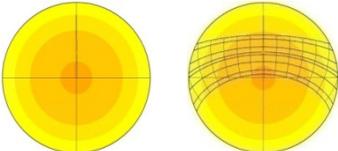
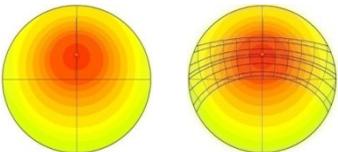
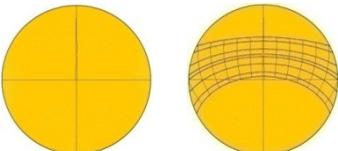
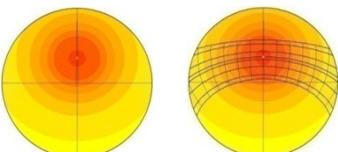
Grupo de gradação	<i>a</i>	<i>b</i>	Grupo de indicatriz	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>e</i>	Céu
I	4.0	-0.70	1	0	-1.0	0.00	Tipo 01
I	4.0	-0.70	2	2	1.5	0.15	Tipo 02
II	1.1	-0.80	1	0	-1.0	0.00	Tipo 03
II	1.1	-0.80	2	2	1.5	0.15	Tipo 04
III	0.0	-1.00	1	0	-1.0	0.00	Tipo 05
III	0.0	-1.00	2	2	-1.5	0.15	Tipo 06
III	0.0	-1.00	3	5	-2.5	0.30	Tipo 07
III	0.0	-1.00	4	10	-3.0	0.45	Tipo 08
IV	-1.0	-0.55	2	2	-1.5	0.15	Tipo 09
IV	-1.0	-0.55	3	5	-2.5	0.30	Tipo 10
IV	-1.0	-0.55	4	10	-3.0	0.45	Tipo 11
V	-1.0	-0.32	4	10	-3.0	0.45	Tipo 12
V	-1.0	-0.32	5	16	-3.0	0.30	Tipo 13
VI	-1.0	-0.15	5	16	-3.0	0.30	Tipo 14
VI	-1.0	-0.15	6	24	-2.8	0.15	Tipo 15

Na Tabela 5 são mostradas, segundo a escala de luminâncias da Figura 4, as imagens dos tipos de céu com e sem a trajetória solar, além da descrição (tradução livre) de cada tipo (Obs.: as imagens dos tipos de céu e a escala de luminâncias foram geradas no programa APOLUX).



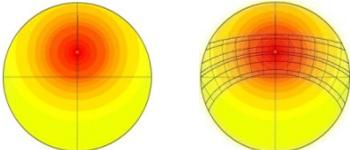
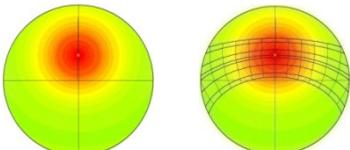
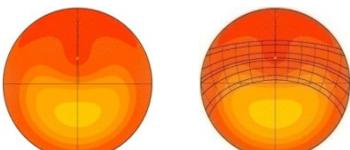
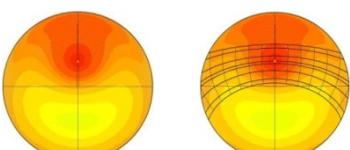
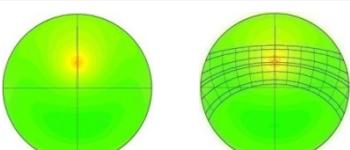
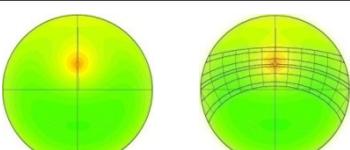
**Figura 4:** Escala de Luminâncias  $\text{cd/m}^2$  (Fonte: APOLUX).

**Tabela 5:** Tipos de céu para a latitude de 19,5° (Colatina-ES) com  $\gamma_s=60^\circ$  e  $\alpha_s=0^\circ$ , apresentados com e sem as trajetórias solares. Fonte: APOLUX

TIPOS DE CÉU (Distribuição de Luminâncias)	DESCRIÇÃO [tradução livre de Kittler (2002)]
	<p><b>Tipo 01 (I.1):</b> Céu encoberto padrão, graduação intensa de luminâncias em direção ao Zênite, com uniformidade nos Azimutes.</p>
	<p><b>Tipo 2 (I.2):</b> Céu encoberto, graduação intensa de luminâncias em direção ao Zênite, com suave brilho em direção ao Sol.</p>
	<p><b>Tipo 3 (II.1):</b> Céu encoberto, moderadamente graduado, com uniformidade nos Azimutes.</p>
	<p><b>Tipo 4 (II.2):</b> Céu encoberto, moderadamente graduado, com suave brilho em direção ao Sol.</p>
	<p><b>Tipo 5 (III.1):</b> Céu de Luminância Uniforme.</p>
	<p><b>Tipo 6 (III.2):</b> Parcialmente nublado, sem graduação de luminâncias em direção ao Zênite, com suave brilho em direção ao Sol.</p>

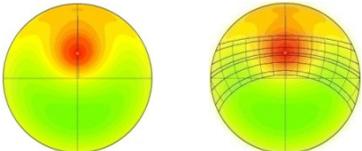
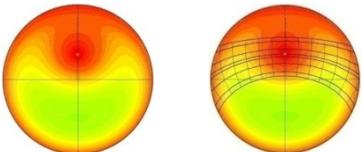
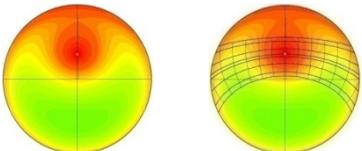
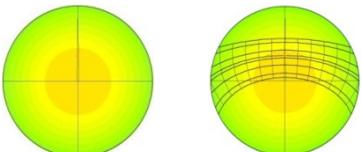
Continua

Continuação da Tabela 5

TIPOS DE CÉU (Distribuição de Luminâncias)	DESCRIÇÃO [tradução livre de Kittler (2002)]
	<p><b>Tipo 7 (III.3):</b> Parcialmente nublado, sem graduação de luminâncias em direção ao Zênite, com região circunsolar brilhante.</p>
	<p><b>Tipo 8 (III.4):</b> Parcialmente nublado, sem graduação de luminâncias em direção ao Zênite, com coroa solar distinta.</p>
	<p><b>Tipo 9 (IV.2):</b> Parcialmente nublado, com o Sol obscurecido.</p>
	<p><b>Tipo 10 (IV.3):</b> Parcialmente nublado, com região circunsolar brilhante.</p>
	<p><b>Tipo 11 (IV.4):</b> Céu Branco-Azul, com coroa solar distinta.</p>
	<p><b>Tipo 12 (V.4):</b> Padrão Céu Claro CIE, com luminâncias de baixo turvamento.</p>

Continua

Continuação da Tabela 5

TIPOS DE CÉU (Distribuição de Luminâncias)	DESCRIÇÃO [tradução livre de Kittler (2002)]
	<p><b>Tipo 13 (V.5):</b> Padrão Céu Claro CIE, com atmosfera poluída.</p>
	<p><b>Tipo 14 (VI.5):</b> Céu Turvado Sem Nuvens, com ampla coroa solar.</p>
	<p><b>Tipo 15 (VI.6):</b> Céu Turvado Branco-Azul, com ampla coroa solar.</p>
	<p><b>Tipo 16:</b> Céu encoberto padrão (anterior).</p> $\frac{L_p}{L_z} = \frac{(1 + 2 \sin \gamma)}{3}$

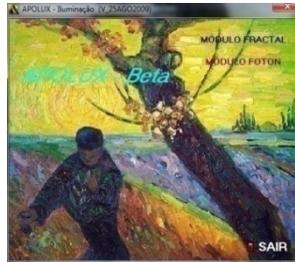
## 2.5- O SOFTWARE APOLUX

O software APOLUX<sup>4</sup> foi desenvolvido para simulação da iluminação natural em espaços arquitetônicos e urbanos com o objetivo de auxiliar os profissionais nas tomadas de decisões em projeto visando o melhor aproveitamento da iluminação natural.

Este software foi desenvolvido a partir da tese de Claro (1998) que apresenta uma solução para o algoritmo da radiosidade baseado no Modelo Vetorial Esférico.

---

<sup>4</sup> Versão pública disponível em: <http://www.labcon.ufsc.br/foton/>

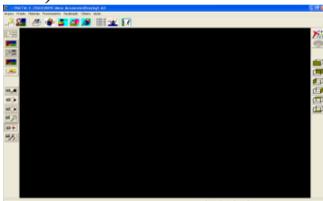


**Figura 5:** Janela de apresentação do software APOLUX.

Fonte: APOLUX

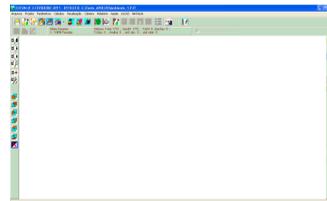
O APOLUX calcula e representa a luz natural em espaços arquitetônicos e urbanos, usando arquivos em 3D gerados por editores gráficos em formato DXF (Data Exchange File), gerados no modo texto (código ASCII), que são interpretados para uma estrutura de dados compatível com o processamento do programa.

O programa é constituído de dois módulos: **Fractal** (Figura 6): importação do arquivo em DXF e tratamento da geometria e; **Fóton** (Figura 7): configuração das características dos materiais, condições abóbada e de céu e realização das simulações (CLARO, 1998 e 2005).



**Figura 6:** Interface do modo Fractal.

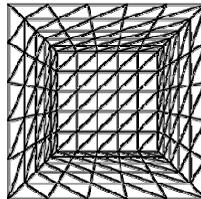
Fonte: APOLUX



**Figura 7:** Interface do modo Foton.

Fonte: APOLUX

O processo de simulação começa no módulo Fractal, onde se define o fracionamento: a divisão, por um fator, de todas as superfícies do modelo em triângulos cuja área máxima não será maior que este fator de fracionamento (Figura 8).



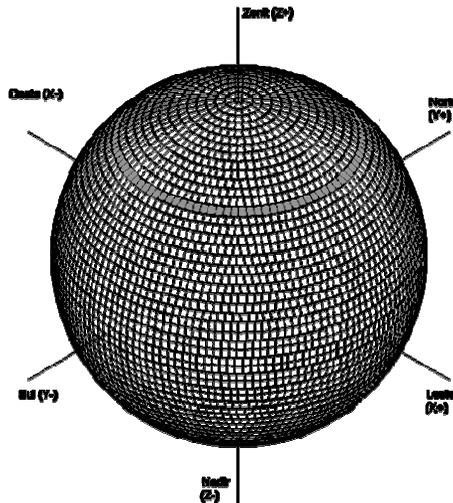
**Figura 8:** Divisão das superfícies (planos) do modelo em triângulos (fracionamento). Fonte: APOLUX

Se o fator de fracionamento é 0,5 e a unidade é metro, significa que as superfícies serão fracionadas em triângulos com áreas máximas de  $0,5 \text{ m}^2$ .

A seguir importa-se o modelo para o módulo Fóton onde serão definidos os materiais a serem aplicados nas superfícies e a refletância média do solo.

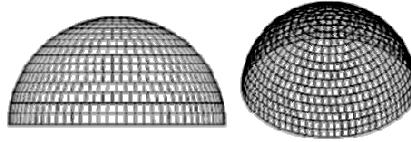
Definem-se, então, as propriedades óticas dos materiais das superfícies: opaco difuso, transmissor especular, transmissor difuso, planos de luminância uniforme relativa (calculada como plano exposto à abóbada segundo sua posição) e absoluta (valor de luminância determinado pelo usuário), assim como a refletância média do solo (piso externo desobstruído).

Estando definidos o fracionamento da geometria e os materiais, define-se a resolução da visibilidade. Esta resolução é um referencial de cálculo que pode ser descrito como uma esfera dividida em faixas homogêneas de coroas esféricas de um mesmo ângulo sólido em relação ao centro da esfera. Todas as faixas são divididas em parcelas de tamanhos semelhantes. O globo tem orientação fixa para todos os vértices do projeto (Figura 9). Cada parcela define, a partir do centro, um ângulo sólido pré-calculado.

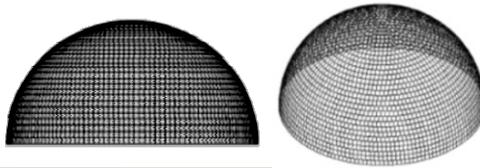


**Figura 9:** Globo dividido em 60 faixas (destaque, do autor, de uma faixa na cor cinza). Fonte: CLARO (1998).

O número de faixas que identifica cada globo corresponde a metade da esfera, que representa a abóbada (Figuras 10 e 11).

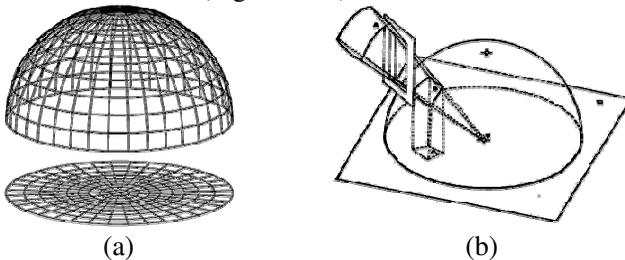


**Figura 10:** Vista frontal e vista perspectivada da resolução de visibilidade de 15 faixas, em 745 parcelas no hemisfério superior (meio globo). Fonte: CARVALHO (2009), p. 23.



**Figura 11:** Vista frontal e vista perspectivada da resolução de visibilidade de 30 faixas, em 2951 parcelas no hemisfério superior (meio globo). Fonte: CARVALHO (2009), p. 23.

O globo é colocado em cada vértice de cada plano e todas as demais superfícies são projetadas no globo a partir do centro para o cálculo do fator de forma (Figura 12-a).



**Figura 12:** (a) Hemisfera projetada no plano e (b) ângulo sólido projetado. Fonte: ABNT (2004).

O significado físico do fator de forma entre duas superfícies, conforme Siegel (1972) e Incropera (1990), é representar a fração de energia radiante emitida por uma superfície que incide diretamente na outra superfície. Pode ser entendido, conforme Pizzarro (2007), como o Fator de Visão do Céu – área visível de céu na malha urbana ou por uma abertura (Figura 12-b). No APOLUX, o fator de forma é o que permite relacionar o quanto de luz uma determinada porção de uma superfície emissora envia para um determinado ponto de uma superfície receptora. É obtido projetando-se a superfície emissora no globo tendo como centro

da projeção o ponto receptor e calculando o ângulo sólido correspondente.

Na Figura 13 temos um hemisfério de visibilidade (máscara) gerado para um vértice, que serve ao entendimento das projeções no globo. A máscara representa, para um vértice, a projeção obtida no hemisfério superior do globo a partir de um plano horizontal que passa pelo vértice.

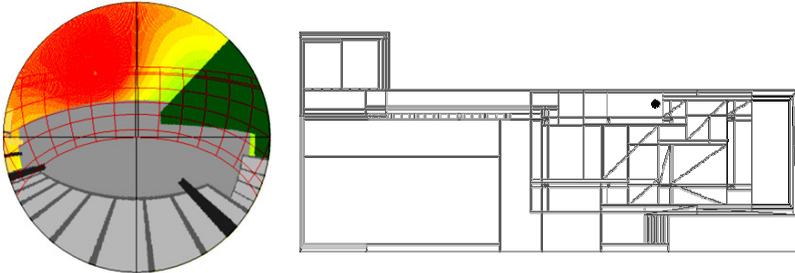


Figura 13: Exemplo de máscara gerada pelo APOLUX.

Fonte: APOLUX

Estando concluído o cálculo do fator de forma, segue-se para o cálculo da radiosidade, na caixa de diálogo de definição dos parâmetros da abóbada (Figura 14), onde são definidos os parâmetros de iluminação e o tipo de céu a serem utilizados.

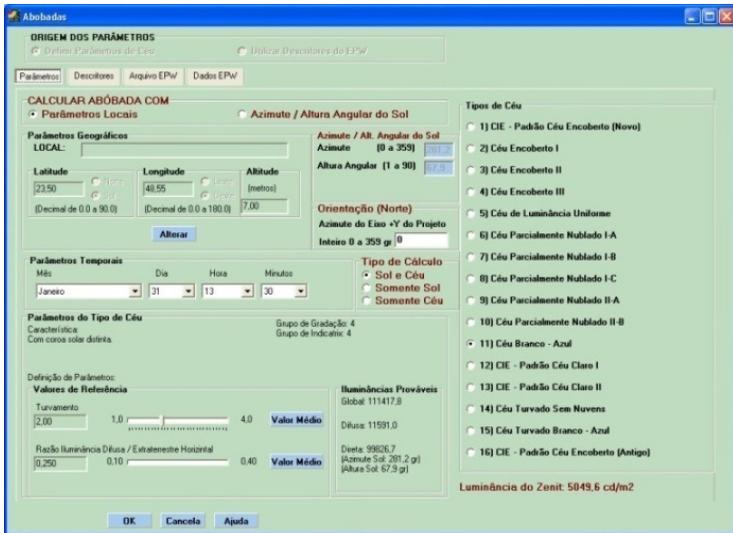


Figura 14: Caixa de definição dos parâmetros da abóbada. Fonte: APOLUX.

Para este cálculo o programa permite a visualização da distribuição de luminâncias de diferentes pontos da abóbada de acordo com a localização geográfica (ou pela altura angular do Sol e Azimute) e as condições meteorológicas em qualquer dia e horário do ano, isolando-se ou não a luz do Sol.

O programa ainda permite a flexibilização dos valores de turvamento para os céus limpo e parcialmente encobertos (tipo 7 ao tipo 15) e a razão entre a iluminância difusa e a iluminância horizontal extraterrestre para os céus encobertos e parcialmente nublados (tipo 1 ao tipo 6), permitindo uma faixa de ajuste da iluminância difusa e direta do Sol.

Nas máscaras de obstrução solar para qualquer ponto do ambiente simulado, seja interno ou externo, pode-se obter, para um ponto, a iluminância inicial do céu e da luz solar, o componente direto do Fator de Luz do Dia (FLD) e a fração visível da abóbada com as trajetórias solares anuais, obstruídas ou não.

O software ainda calcula o nível de luminância em cada vértice das superfícies divididas e pode gerar imagens semi-realistas de qualidade, gráficos de iluminância e luminância em todos os planos, gráficos de FLD e, ainda, uma grade de dados com visualização dos valores calculados na imagem ativa, através de uma malha definida pelo usuário.

Além dos gráficos para a avaliação qualitativa, ainda apresenta um relatório dos resultados obtidos para cada solução da radiosidade, possibilitando a análise quantitativa do modelo e exportação de tabelas.

## **2.6- VALIDAÇÃO DE SOFTWARES**

Segundo Delbin (2006) a validação de softwares consiste na combinação de validação empírica, analítica e técnicas comparativas de análise (ver Tabela 6).

Maamari et. al. (2006) e Maamari (2000), apud Pereira (2009), mostram que a confiabilidade nos softwares de simulação é fundamental quando se deseja analisar o conforto visual dos usuários ou a eficiência energética do edifício.

De acordo com Carvalho (2009), devido ao grande número de softwares e as formas de avaliar a confiabilidade dos dados simulados, fica difícil estabelecer um padrão de validação que garanta esta confiabilidade dos programas de simulação.

A **validação empírica (ou experimental)** é feita pelo confronto dos resultados de cálculos gerados pelo programa com dados reais coletados em uma célula teste, edifício real, ou experimento

laboratorial, e que, conforme Pereira (2009), considera as incertezas inerentes ao processo de medição.

A **validação analítica** é baseada em referências analíticas, comparando os valores obtidos com a simulação com os valores calculados por método analítico conhecido. Segundo Pereira (2009) este tipo de validação cobre domínios limitados da propagação da luz e são aplicados, em geral, em casos simplificados para avaliar uma suposição teórica ou para testar um determinado parâmetro.

A **validação comparativa** é feita a partir de comparações entre resultados de simulação de diferentes programas de simulação. Pereira (2009) diz que esse tipo de validação é o mais realizado e pode ser feito se houver uma referência analítica ou um software de referência já validado experimentalmente e ainda coloca:

*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.*

(PEREIRA, 2009, p. 41)

**Tabela 6:** Comparação entre os métodos de validação de software<sup>5</sup>.

Técnica	Vantagens	Desvantagens
<p><i>Empírica (Experimental):</i></p> <p>Testes do modelo e do processo de solução.</p>	<p>- Padrão de verdade aproximado dentro da precisão do experimento.</p> <p>- Algum nível de complexidade.</p>	<p>- Incertezas experimentais: (i) Calibração de instrumentos; não há controle sobre os fatores climáticos; (ii) Conhecimento e especificação imperfeitos a respeito do modelo a ser simulado.</p> <p>- Medições detalhadas de alta qualidade são caras e consomem muito tempo.</p> <p>- Limitado o número de locais para obtenção dos dados de entrada que são economicamente práticos.</p>

Continua

<sup>5</sup>Fonte: Adaptado de NREL NATIONAL RENEABLE ENERGY LABORATORY, 1995, p. xxii; JUDKOFF, 2006, p. 3; DELBIN, 2006, p. 59.

Continuação da Tabela 6

Técnica	Vantagens	Desvantagens
<p><b>Análítica:</b></p> <p>Testes da solução numérica.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não há incertezas dos dados de entrada.</li> <li>- Padrão de verdade exato, dada a simplicidade do modelo.</li> <li>- Não é caro, poucos recursos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Sem testes do modelo.</li> <li>- Limitada aos casos em que cada solução analítica pode ser aplicada.</li> </ul>
<p><b>Comparativa:</b></p> <p>Relativa ao testes do modelo e do processo de solução.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não há incertezas dos dados de entrada.</li> <li>- Algum nível de complexidade.</li> <li>- Não é caro, poucos recursos necessários.</li> <li>- É rápido, com muitas possibilidades de comparação.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Não existe um padrão de verdade absoluta (é possível uma faixa de aceitação com base estatística).</li> <li>- Requer o máximo de transparência na comparação dos resultados obtidos, principalmente em relação a complexidade de cada procedimento.</li> </ul>

Alguns softwares de simulação da iluminação já foram testados e validados conforme as tipologias da Tabela 6, tais como o Radiance (MARDALJEVIC, 1995) e o brasileiro Troplux (CABÚS, 2005)

Em 2006 a Comissão Internacional de Iluminação (CIE) desenvolveu um relatório técnico com procedimentos para validação de softwares de simulação da iluminação: *Estudos de Caso para avaliar a precisão de programas de simulação de iluminação*. Este relatório apresenta uma metodologia e define diretrizes para avaliação de softwares através da validação analítica e também se baseando em avaliações experimentais.

## 2.7- O RELATÓRIO TÉCNICO CIE 171:2006

A falta de informação independente e confiável sobre a exatidão de softwares de simulação computacional de iluminação pode levar os usuários a não ter informações suficientes para selecionar a ferramenta apropriada e que supra as suas necessidades, podendo levar a falta de confiança (ou confiança indevida) na ferramenta de simulação.

Baseando-se neste panorama o CIE desenvolveu um conjunto de estudos de casos para referência com a qual os usuários podem avaliar a precisão de um programa de iluminação. Estes estudos de casos, compilados no Relatório Técnico CIE 171:2006, abordam diferentes aspectos da propagação da luz e permitem, também, comparações

objetivas entre diferentes programas em relação aos diferentes domínios da simulação da iluminação.

O Relatório Técnico preocupa-se principalmente com o desenvolvimento dos referenciais de validação (referencial dos estudos de casos). Uma grande parte dos estudos de caso foi desenvolvida no âmbito da tese de doutorado de Maamari, de 2004, na ENTPE, França.

Os estudos de caso foram projetados de forma a destacar a influência de um determinado aspecto da propagação da luz com o intuito de identificar fraquezas e consistências do software com mais facilidade.

Estes parâmetros são assim identificados:

- a. Descrição da fonte luminosa e os cálculos da propagação da luz;
- b. Transferência da iluminação por aberturas e seus componentes (ou obstruções);
- c. Inter-reflexões entre os diferentes tipos de materiais com diferentes propriedades fotométricas.

Objetivando a obtenção de dados confiáveis na simulação, o Relatório Técnico ainda direciona a escolha e descrição de cenários, para precauções de protocolo experimental, para estimar fontes de erro e para apresentar dados de referência, que são:

- a. Cenários simples destacando determinado aspecto da propagação da luz;
- b. Protocolos robustos para minimizar as potenciais fontes de erro;
- c. Identificação das fontes de erros para apresentação de objetivos.

São apresentados diversos protocolos, cada um com objetivo específico e fornece dois grupos de estudos de caso:

1. Os casos experimentais,
2. Os estudos de caso analíticos

O primeiro é relativo a análises de iluminação artificial com 6 protocolos, e o segundo, com 13 protocolos e os referenciais analíticos, aos estudos de caso para iluminação de forma geral.

### **2.7.1- CASOS EXPERIMENTAIS: PROTOCOLOS PARA ANÁLISE DA LUZ ARTIFICIAL**

Os protocolos que constam nos casos experimentais são:

Protocolo 4.1 – Cenário de Iluminação Artificial – CFL, parede cinza;

- Protocolo 4.2 – Cenário de Iluminação Artificial – Luminária opaca, parede cinza;
- Protocolo 4.3 – Cenário de Iluminação Artificial – Luminária de refletor semi-especular, parede cinza;
- Protocolo 4.4 – Cenário de Iluminação Artificial – CFL, parede preta;
- Protocolo 4.5 – Cenário de Iluminação Artificial – luminária opaca, parede preta;
- Protocolo 4.6 – Cenário de Iluminação Artificial – Luminária de refletor semi-especular, parede preta.

### **2.7.2- CASOS COM REFERENCIAIS ANALÍTICOS: PROTOCOLOS PARA ANÁLISE DA ILUMINAÇÃO DE FORMA GERAL.**

Os protocolos dos casos com referenciais analíticos iniciam-se no item 5.2, pois o item 5.1 trata da descrição da estrutura dos cenários analíticos dos estudos de caso, não sendo propriamente um protocolo. São eles:

- Protocolo 5.2 – Simulação com Fonte de Luz Pontual;
- Protocolo 5.3 – Simulação com Fonte de Luz Superficial;
- Protocolo 5.4 – Conservação de Fluxo Luminoso;
- Protocolo 5.5 – Transmitância Direta em Vidros Claros;
- Protocolo 5.6 – Reflexão da Luz Sobre Superfícies Difusas;
- Protocolo 5.7 – Reflexão Difusa com Obstruções Internas;
- Protocolo 5.8 – Componente Refletida Interna (CRI) calculada para Superfícies Difusas;
- Protocolo 5.9 – Componente Celeste (CC) para Abertura Zenital sem Vidro e Tipos Gerais de Céu CIE;
- Protocolo 5.10 – Componente Celeste (CC) sobre uma Abertura Zenital Envidraçada;
- Protocolo 5.11 – Componente Celeste (CC) e Componente Refletida Externa (CRE) para uma Abertura sem Vidro na Fachada;
- Protocolo 5.12 – Componente Celeste (CC) + Componente Refletida Externa (CRE) para uma Abertura com Vidro na Fachada;
- Protocolo 5.13 – Componente Celeste (CC) + Componente Refletida Externa (CRE) para uma Abertura sem Vidro na Fachada com uma Máscara Horizontal Externa Contínua;
- Protocolo 5.14 – Componente Celeste (CC) + Componente Refletida Externa (CRE) para uma Abertura sem Vidro

na Fachada com uma Máscara Vertical Externa Contínua.

Conforme Maamari (2004), as referências foram calculadas analiticamente para os céus tipo 5 (luminância uniforme) e tipo 16 (nublado anterior) e para os outros tipos de céu por um modelo numérico (programa Skylux)<sup>6</sup>, desenvolvido para este propósito.

Além destes protocolos, existe mais um conjunto de testes (Propostas de estudos de casos analíticos adicionais) e um outro com informações de como utilizar os estudos de casos propostos.

## **2.8- VALIDAÇÕES DE SOFTWARE PELO RELATÓRIO TÉCNICO CIE 171:2006**

Alguns softwares de simulação computacional da iluminação foram testados e validados utilizando-se como referência o Relatório Técnico CIE 171:2006, entre eles estão o VELUX Daylight Visualizer 2<sup>7</sup> e o AGi32 V1.94<sup>8</sup>.

### **2.8.1- SOFTWARE VELUX DAYLIGHT VISUALIZER 2 (GRATUITO)**

O VELUX Daylight Visualizer 2, hoje na versão 2.5.9, é uma ferramenta de simulação computacional da iluminação natural. Permite a geração de modelos 3D em que as aberturas zenitais e janelas fachada são facilmente inseridas. As configurações também incluem a localização e orientação dos modelos, a data e a hora da simulação, bem como o tipo de céu. Além de renderização foto-realística, gera também gráficos de iluminância, luminância e do daylight factor. O software também gera animações do modelo virtual onde se possibilita ver o comportamento diário da iluminação natural no ambiente.

Conforme Labayrade (2009), o software foi avaliado pelos protocolos 5.4, 5.5, 5.6, 5.7, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13 e 5.14 nos 15 tipos de céu, excluindo o céu nublado do padrão anterior (céu tipo 16), obtendo resultados bem satisfatórios.

---

<sup>6</sup> Ver item 3.5.2.

<sup>7</sup> O relatório de validação do software foi disponibilizado pelo prof. Fawaz Maamari no e-mail de 28 de fevereiro de 2011.

<sup>8</sup> Disponível em <http://www.agi32.com/>, acessado em 11 dezembro 2010, 11:11. Software também disponível no site <http://www.hnluz.com.br/agi32.htm>, acessado em 25 março 2011, 23:43.

## **2.8.2- SOFTWARE AGI32 V. 1.94 (COMERCIAL).**

Conforme o fabricante, o AGI32 é uma ferramenta de simulação da iluminação artificial e natural que pode calcular a iluminância em qualquer situação, auxiliando no posicionamento de luminárias, possibilitando adicioná-las a qualquer momento. Os modelos podem ser gerados no próprio software ou nos programas gráficos como o CAD em 2D ou 3D e exportados em dxf ou dwg, entre outras extensões, para o software ou vice-versa. Possibilita cálculos de Daylight Factor, CIE Unified Glare Rating (UGR), CIE Glare Rating (GR) – avaliação de iluminação para áreas ao ar livre, luminâncias de superfícies reflexivas e de obstrução, luminâncias, iluminâncias, entre outros. O programa também é capaz de gerar imagens renderizadas foto-realísticas de boa qualidade e, também, animações e exportá-las na extensão AVI.

Conforme Dau Design and Consulting Inc. (2007), o AGI32 V. 1.94, hoje na versão 2.2, foi avaliado pelos protocolos da seção 4 (4.1, 4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 4.6), Seção 5 (5.2, 5.3, 5.4, 5.5, 5.6, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14) e seção 6 (6.1, 6.2, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11, 6.12 e 6.13).

O relatório informa ainda que, como não é possível para a versão avaliada do software separar a componente solar direta da componente celeste, as avaliações foram feitas usando apenas os céus nublados (tipo 1 ao 5 e o tipo 16 - nublado) devido a não ter a componente direta do sol. Desta forma a iluminação obtida é através da componente celeste.

## **2.9- VALIDAÇÕES DO SOFTWARE APOLUX**

Vários estudos (artigos, dissertações e teses) sobre o programa APOLUX já foram desenvolvidos pelo Laboratório de Conforto Ambiental (LabCon) da UFSC. Dentre eles destacam-se Pereira (2009) e Carvalho (2009).

### **2.9.1- ESTUDO DE VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

Pereira (2009) desenvolveu uma metodologia de avaliação de desempenho de ferramentas de simulação computacional de iluminação natural caracterizando a fonte de luz natural, tanto no ambiente virtual como no ambiente real.

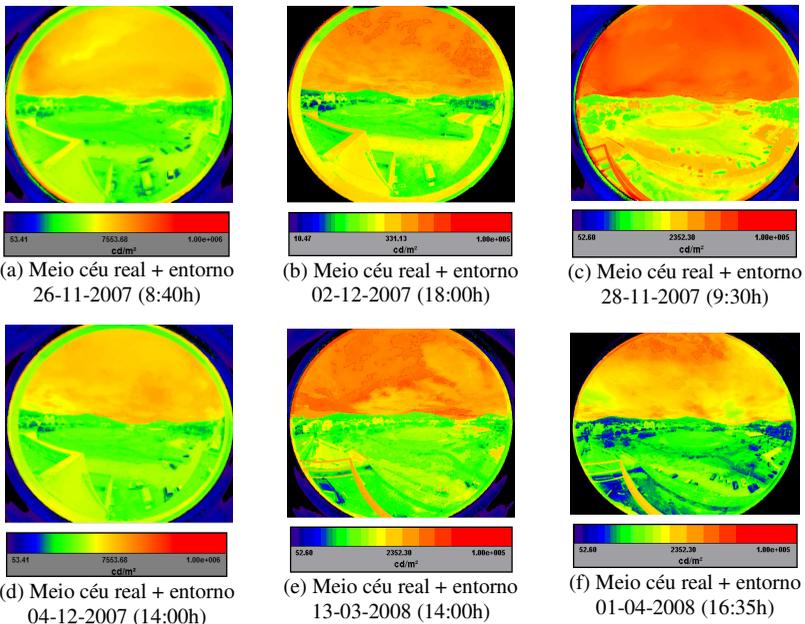
Utilizou o APOLUX importando arquivos de luminâncias gerados a partir de imagens de céu captadas por uma câmera digital IQCam<sup>9</sup> (ver

---

<sup>9</sup> A câmera apresenta uma lente olho de peixe com abertura angular de, aproximadamente, 186° e permite, através do cenário digitalizado, identificar a distribuição de luminâncias em cd/m<sup>2</sup>

Figura 15), mapeando digitalmente as luminâncias do ambiente de exposição, possibilitando a geração de dados para simulação computacional no APOLUX, criando, também, contexto para comparação do comportamento da luz entre o modelo experimental e o virtual e a verificação de discrepâncias e validação dos procedimentos de validação. Desta forma puderam-se utilizar as luminâncias de céu medidas *in loco*. Esta função foi disponibilizada somente para esta pesquisa, não faz parte da versão pública para download no site.

**Figura 15:** Imagens fotometradas do céu de Florianópolis com o uso da IQCam 300. (fonte: PEREIRA, 2009).



Nas simulações onde se caracterizava a contribuição do entorno, combinando-se os planos horizontal (abóbada) e vertical (entorno), os resultados foram bem próximos aos de Mardaljevic (2000) na validação do Radiance, conforme mostra a comparação na Tabela 7:

---

para cada *pixel* da imagem. A câmera utilizada na pesquisa foi a IQC 300, fabricada pela empresa canadense Lumetrix (fonte: PEREIRA, 2009, p. 57-58).

**Tabela 7:** Resultados dos procedimentos de validação dos programas Radiance e APOLUX. Fonte: Adaptado de PEREIRA (2009), p. 109.

<b>RADIANCE</b>	<b>APOLUX</b>
Fonte: Abóbada (68% medido + 32% interpolado) <sup>10</sup>	Fonte: ½ Abóbada + entorno (100%) <sup>11</sup>

**DISCREPÂNCIAS ENTRE ILUMINÂNCIAS MEDIDAS E SIMULADAS**

De 4.524 registros de iluminâncias avaliados:		De 125 registros de iluminâncias avaliados	
<b>Ocorrências</b>	<b>Discrepâncias</b>	<b>Ocorrências</b>	<b>Discrepâncias</b>
2.885 (64%)	Até 10%	68 (54,4%)	Até 10%
1.557 (34%)	Entre 10% e 25%	54 (43,2%)	Entre 10% e 25%
82 (2%)	Acima de 50%	3 (2,4%)	Acima de 50%

**2.9.2- VALIDAÇÃO COM OS PROTOCOLOS 5.3, 5.4, 5.6 E 5.7 DO RELATÓRIO TÉCNICO CIE 171:2006**

Carvalho (2009) submeteu o APOLUX a uma avaliação através dos protocolos da seção 5 (5.3, 5.4, 5.6 e 5.7), do Relatório Técnico CIE 171:2006, aplicados para os modelos opaco difuso e transmissor difuso.

Os resultados obtidos mostraram alto grau de convergência entre o simulado e o calculado, comprovando que o software tem confiabilidade no cálculo do fator de forma (86,8% dos resultados apresentaram-se dentro da faixa limite de  $\pm 5\%$ ) e na avaliação da conservação do fluxo luminoso (77% dos resultados apresentaram-se dentro da faixa limite de  $\pm 5\%$ ), com erros bastante reduzidos nos cálculos com elevada resolução de visibilidade.

No protocolo 5.7 foram encontradas discrepâncias muito significativas na comparação entre os resultados simulados e os valores apresentados como solução analítica pelo Relatório, na ordem de 25,03% a 53,90%. Então foram calculados analiticamente os valores dos fatores de forma, através das equações apresentadas pelo protocolo 5.3. A comparação dos resultados calculados com os resultados simulados mostraram erros dentro da faixa limite, comprovando a existência de equívocos nos cálculos apresentados pelo Relatório.

<sup>10</sup> 54.600 registros de luminâncias medidas. Gerando informações para avaliar a luminância em seis posições (medidas simultâneas) em um ano (364 análises). Fonte: Mardaljevic (2000)

<sup>11</sup>  $1,33 \times 10^6$  registros de luminâncias mapeadas digitalmente para cada imagem, em um total de 25 imagens fotometradas. Avaliações de medições de luminâncias em cinco posições (medidas simultâneas) totalizando 125 avaliações.

Carvalho (2009) e Carvalho et. al. (2010) ainda demonstraram alguns erros sistemáticos, que são inerentes aos algoritmos que descrevem o espaço com elementos finitos, presentes no APOLUX, que são descritos como erro de resolução de visibilidade, erro de resolução de geometria e erro periférico. Carvalho (2009) também demonstrou o que denomina “erro de pulso”, onde uma visibilidade mais precisa (maior resolução) pode ter erro maior que uma menos precisa (menor resolução).

## **2.10- CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Conforme visto, as simulações computacionais estão fazendo, cada vez mais, parte da tomada de decisão em projeto. A contribuição da pesquisa científica, para o entendimento do fenômeno da iluminação natural, depende também da confiabilidade de softwares de simulação mais precisos para avaliações, qualitativa e quantitativa, do espaço arquitetônico e urbano com mais rapidez.

A preocupação com a qualidade da iluminação natural no ambiente construído vem produzindo ferramentas mais precisas para avaliação dos programas de simulação.



### 3- METODOLOGIA

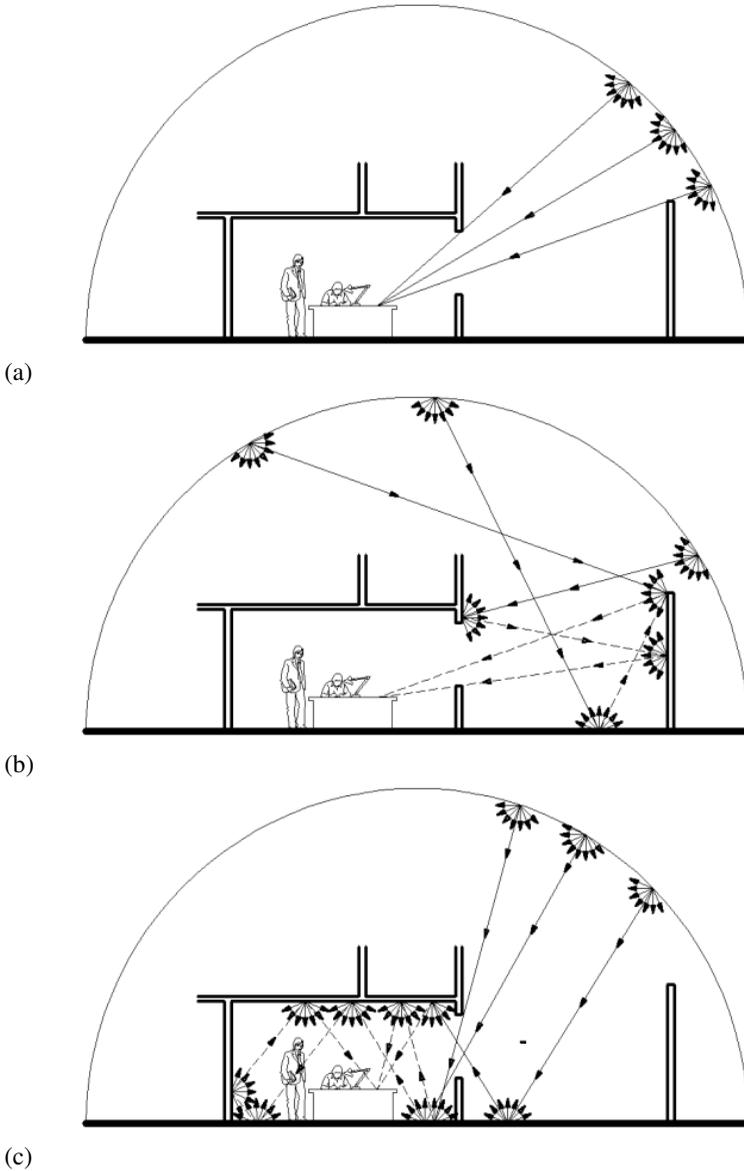
Foi utilizado nesta pesquisa como instrumento de avaliação de software de simulação de iluminação o Relatório Técnico CIE 171:2006, para avaliar o software APOLUX, desenvolvido pelo prof. Dr. Anderson Claro no Laboratório de Conforto (LabCon) da UFSC com a colaboração do prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD.

Foram selecionados os protocolos que verificam apenas o comportamento dos modelos de céu, tipificados pela norma CIE-ISO 15469:2004, avaliando os cálculos das componentes celeste e refletida externa. Também foi selecionado o protocolo que avalia o cálculo da componente refletida interna. Foram excluídos os protocolos relativos a superfícies envidraçadas (transmissor especular), as quais não são objetos desta pesquisa.

As componentes são assim definidas por Vianna (2001):

- **Componente Celeste/de Céu (CC)** – quantidade de luz proveniente da abóbada celeste (Figura 16-a). Depende da latitude do lugar, da época do ano, da hora do dia, da orientação da fachada, do tipo de céu e da área do céu visualizada pelo ponto em questão. Unidade em (%);
- **Componente Refletida/de Reflexão Externa (CRE)** – quantidade de luz proveniente das reflexões de obstruções externas (Figura 16-b). Depende do tamanho, posição e distância da obstrução e de sua capacidade de reflexão da luz dada por suas cores e texturas. Unidade em (%);
- **Componente Refletida/de Reflexão Interna (CRI)** – quantidade de luz proveniente das reflexões das superfícies internas - parede, piso e teto (Figura 16-c). Depende das áreas das superfícies internas com suas respectivas cores e texturas. Unidade em (%).

O somatório dessas componentes é que determina (em %, em relação ao total da iluminação externa) o total de luz que atinge determinado ponto no ambiente, sendo definido como Fator de Luz do Dia (FLD) – *Daylight Factor* (DF). A contribuição dessas variáveis depende da localização do ponto em estudo.



**Figura 16:** (a) Componente Celeste - CC; (b) Componente Refletida Externa - CRE; (c) Componente Refletida Interna - CRI. Todas na unidade de (%).  
Desenho do autor.

A definição dos protocolos aplicáveis nesta pesquisa estão destacados na Tabela 8.

**Tabela 8:** Protocolos aplicáveis nesta pesquisa.

Protocolo 5.2	Este estudo de caso apresenta a análise para fonte de luz pontual (uso de luminárias). Não aplicado.
Protocolo 5.3	Este estudo de caso para avaliar o fator de forma da simulação. Validado por Carvalho (2009).
Protocolo 5.4	Estudo de caso para avaliar a conservação do fluxo luminoso. Validado por Carvalho (2009).
Protocolo 5.5	Não aplicado, por utilizar superfície envidraçada.
Protocolo 5.6	Visa avaliar a influência de piso externo. Validado por Carvalho (2009).
Protocolo 5.7	Visa avaliar a simulação com geometria complexa e influência de sombras internas, avaliando o fator de forma da simulação. Validado por Carvalho (2009).
<b>Protocolo 5.8</b>	<b>Avaliação de Componente Refletida Interna calculada para superfícies difusas. Aplicado a esta pesquisa.</b>
<b>Protocolo 5.9</b>	<b>Avaliação da Componente Celeste. Aplicado a esta pesquisa.</b>
Protocolo 5.10	Não aplicado por utilizar superfície envidraçada.
<b>Protocolo 5.11</b>	<b>Avaliação da Componente Celeste e Componente Refletida Externa. Aplicado a esta pesquisa.</b>
Protocolo 5.12	Não aplicado por utilizar superfície envidraçada.
<b>Protocolo 5.13</b>	<b>Avaliação da Componente Celeste e Componente Refletida Externa com máscara horizontal externa contínua. Aplicado a esta pesquisa.</b>
<b>Protocolo 5.14</b>	<b>Avaliação da Componente Celeste e Componente Refletida Externa com máscara vertical externa contínua. Aplicado a esta pesquisa.</b>

A seguir os objetivos e a importância de cada protocolo selecionado:

**Protocolo 5.8: Componente Refletida Interna calculada para superfícies difusas**

O objetivo deste teste é avaliar a precisão das inter-reflexões difusas dentro de um cômodo. A importância deste ensaio está

relacionada com a contribuição qualitativa e quantitativa das inter-reflexões para a iluminância global dentro de um cômodo. Neste protocolo é variado o fracionamento do modelo, a quantidade de ciclos da radiosidade e a resolução de visibilidade (globos 60, 90 e 150), além das refletâncias internas do modelo de referência.

### **Protocolo 5.9: Componente Celeste para Abertura Zenital sem Vidro e Tipos Gerais de Céu CIE**

Este estudo de caso visa testar a capacidade do programa de iluminação para o cálculo da componente celeste sob diferentes condições de céu padronizados pelo CIE. A importância deste ensaio está relacionada com o cálculo do Fator de Luz do Dia (*daylight factor*), que é um parâmetro comumente utilizado para determinar a disponibilidade de luz natural no interior de um edifício.

### **Protocolo 5.11: Componente Celeste e Componente Refletida Externa para uma Abertura sem Vidro na Fachada**

O que diferencia uma abertura na fachada de uma abertura na cobertura é a influência do piso externo na distribuição da luminância interna através da reflexão da luz no teto e nas paredes.

O objetivo deste estudo de caso é verificar a capacidade do programa para calcular corretamente a contribuição do piso externo e da distribuição de luminâncias do céu na iluminância interna de um cômodo com abertura na fachada.

### **Protocolo 5.13: Componente Celeste + Componente Refletida Externa para uma Abertura sem Vidro na Fachada com uma Máscara Horizontal Externa Contínua**

O objetivo deste estudo de caso é verificar a capacidade do programa de iluminação de simular a influência de uma máscara horizontal externa na iluminância direta interna. Este estudo de caso considera que a máscara externa e o piso têm luminância uniforme a fim de calcular a solução analítica.

### **Protocolo 5.14: Componente Celeste + Componente Refletida Externa para uma Abertura sem Vidro na Fachada com uma Máscara Vertical Externa Contínua**

O objetivo deste teste é verificar a capacidade do programa de iluminação para simular a influência de uma máscara externa vertical na iluminância direta interna. Este estudo de caso também considera que a máscara externa e o piso tem luminância uniforme a fim de calcular a solução analítica.

### 3.1- PROCEDIMENTOS ADOTADOS

Para a realização das simulações foi utilizado um notebook Acer-Aspire 5630-6288, Intel Core 2 Duo processor T5500 (1.66 Ghz, 667 MHz, 2 MB L2 cache) e 2GB DDR2.

Para esta pesquisa adotaram-se os seguintes procedimentos para cada protocolo:

- 1- Construção em 3D do modelo proposto em CAD e gravado no formato DXF (Data Exchange File);
- 2- Tratamento no módulo Fractal do arquivo DXF estabelecendo os fracionamentos e as propriedades dos materiais;
- 3- Simulação do modelo em diferentes condições de resolução de visibilidade e tipos de céu (quando o protocolo exigia) no módulo Fóton;
- 4- Comparação entre os resultados simulados e do protocolo;
- 5- Cálculo analítico dos modelos e suas relações quando a verificação assim o exigiu. Verificaram-se, no desenvolvimento do trabalho, inconsistências nos valores de referência de alguns protocolos. Nesses casos, foi utilizado o cálculo analítico, utilizando as fórmulas básicas do relatório.
- 6- Comparação entre os resultados simulados e calculados, quando exigido;
- 7- Análise das comparações dos resultados da simulação do protocolo.

Os fracionamentos utilizados no protocolo 5.8 foram 0,5, 0,05 e 0,005. A variação no fracionamento é necessária em alguns protocolos pois, conforme demonstrou CARVALHO (2009), tem influência na precisão do resultado final. Nos outros protocolos, conforme será comentado, o fracionamento não influencia.

As resoluções de visibilidade utilizadas foram: 23.450 parcelas (globo 60); 52.670 parcelas (globo 90) e 146.198 parcelas (globo 150), pois conforme Carvalho (2009) mostrou, estas são suficientes para representar o conjunto disponibilizado pelo software.

### 3.2- MÉTODOS APLICADOS PARA ANÁLISE

A estrutura dos métodos aplicados para análise de cada protocolo é descrita a seguir:

- a) **Escopo do teste:** aspecto da propagação da luz que se deseja avaliar;

- b) **Referência analítica:** fundamentação teórica da lei física que rege o aspecto a ser avaliado. Todas as equações foram extraídas do Relatório Técnico CIE 171:2006;
- c) **Descrição geométrica do modelo do estudo de caso:** dimensões do cenário do estudo de caso, posicionamento dos pontos de medição, propriedades fotométricas dos materiais (refletância, transmitância, etc.), posição e fotometria da fonte de luz.
- d) **Solução analítica:** tabelas com os valores de referência calculados com as equações das referências analíticas, para comparação dos resultados obtidos. Essas tabelas encontram-se no Apêndice A (*compact disc* que acompanha este trabalho).
- e) **Simulação:** como o cenário do estudo de caso foi tratado para a simulação no APOLUX.

Há uma interação entre os procedimentos de verificação dos protocolos e a atualização do APOLUX, pois certos procedimentos não existiam no software e foram criados, pelo autor, com a finalidade da verificação dos protocolos, como por exemplo, as superfícies de luminância uniforme atribuídas pelo usuário e o efeito solo, que passaram a integrar o software.

### 3.3- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA METODOLOGIA

A metodologia é resumida de forma esquemática na Figura 17. A representação mostra o caminho seguido para as simulações e obtenção dos resultados.

Os protocolos, referentes a iluminação natural, aplicáveis a este trabalho são selecionados do Relatório Técnico CIE 171:2006 para simulação e comparação dos resultados com as referências analíticas.

Para o protocolo 5.8 variou-se o fracionamento (F.0,5, F.0,05 e F.0,005) em metro quadrado (m<sup>2</sup>), a resolução de visibilidade para os globos 60, 90 e 150 e a quantidade de ciclos de iterações da radiosidade em 20 e 60 ciclos. No caso do fracionamento 0,005 com o globo 150, os ciclos foram: 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 200, 250 e 300.

Para o protocolo 5.9 o relatório prevê duas aberturas zenitais (AZ) para cada cenário de simulação: 1m x 1m e 4m x 4m. Variou-se cada

tipo de céu (do tipo 01 ao 16 – nublado) para cada resolução de visibilidade dos globos 60, 90 e 150.

Para o protocolo 5.11 o relatório prevê duas aberturas laterais (AL) para cada cenário de simulação: 2m x 1m e 4m x 3m. Variou-se o tipo de céu (do tipo 01 ao 16 – nublado) para cada resolução de visibilidade dos globos 60, 90 e 150.

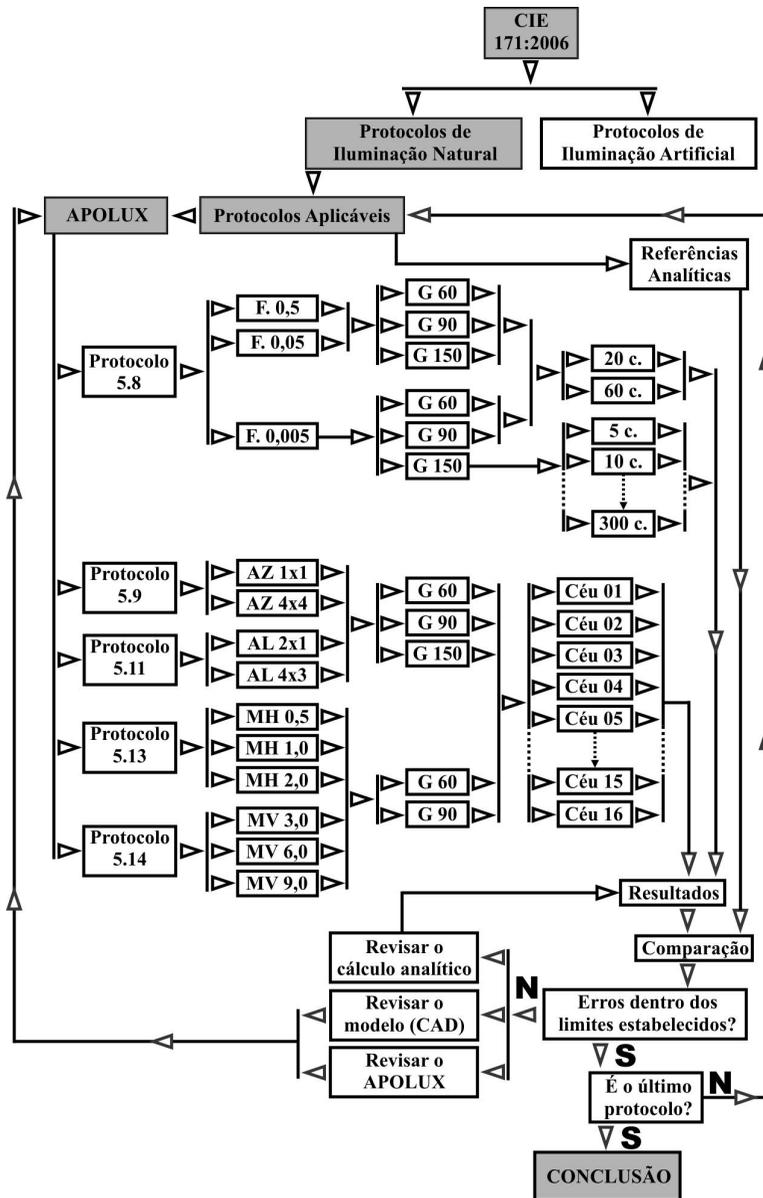
Para o protocolo 5.13 o relatório prevê três máscaras horizontais (MH) para cada cenário de simulação: 0,5m, 1,0m e 2,0m. Variou-se o tipo de céu (do tipo 01 ao 16 – nublado) para cada resolução de visibilidade dos globos 60 e 90.

Para o protocolo 5.14 o relatório prevê três máscaras verticais (MV) para cada cenário de simulação: 3m, 6m e 9m. Variou-se o tipo de céu (do tipo 01 ao 16 – nublado) para cada resolução de visibilidade dos globos 60 e 90.

Quando houve dúvidas quanto aos dados a serem utilizados em alguns protocolos, foram feitas consultas ao prof. Fawaz Maamari que gentilmente, na medida do possível, nos atendeu.

Se os erros não se encontravam dentro dos limites estabelecidos como aceitáveis, então três caminhos foram tomados: (i) revisar os cálculos das referências analíticas e comparar com os dados da solução dada pelo protocolo e com os resultados das simulações no APOLUX; (ii) revisar os modelos tridimensionais em eventuais equívocos na modelagem e (iii) revisar a programação do APOLUX.

A pesquisa conclui-se ao finalizar as simulações e comparações do último protocolo.



**Figura 17:** Representação esquemática da metodologia (os ciclos para o globo 150 com fracionamento de 0,005m<sup>2</sup> são: 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 200, 250 e 300).

### 3.4- PROTOCOLO 5.8: COMPONENTE REFLETIDA INTERNA (CRI) CALCULADA PARA SUPERFÍCIES DIFUSAS

#### 3.4.1- ESCOPO DO TESTE

O protocolo 5.8 apresenta uma geometria simplificada a fim de verificar a precisão das inter-reflexões dentro de um cômodo cúbico variando-se as refletâncias das superfícies internas.

#### 3.4.2- REFERÊNCIA ANALÍTICA

Conforme o protocolo, analiticamente, no caso de uma esfera fechada com superfícies difusas, o fluxo incidente indireto sobre um ponto interno da esfera é dado pela Equação 7:

$$\phi_i = \rho\phi + \rho^2\phi + \rho^3\phi + \dots = \frac{\rho\phi}{1-\rho} \dots\dots\dots \text{Equação 7}$$

Onde:

- $\phi_i$  = Fluxo incidente indireto (lm);
- $\phi$  = Fluxo luminoso direto entrando na esfera (lm);
- $\rho$  = Refletância da superfície interna da esfera.

A iluminância indireta em qualquer ponto da esfera é dada pela Equação 8:

$$E = \frac{1}{S_t} \cdot \frac{\rho\phi}{1-\rho} \dots\dots\dots \text{Equação 8}$$

Onde:

- $E$  = Iluminância indireta (lx)
- $\phi$  = Fluxo luminoso direto entrando na esfera (lm);
- $\rho$  = Refletância da superfície interna da esfera;
- $S_t$  = Superfície interna da esfera (m<sup>2</sup>).

No caso de um cômodo cúbico com uma refletância uniforme da superfície interna ( $\rho$ ), a Equação 9 é usada para dar a média aproximada da iluminância indireta:

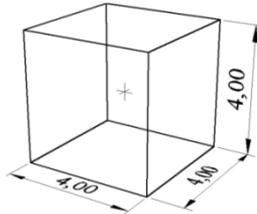
$$E_{av} = \frac{1}{S_t} \cdot \frac{\rho\phi}{1-\rho} \dots\dots\dots \text{Equação 9}$$

Onde:

- $E_{av}$  = Média da iluminância indireta no cômodo (lx)
- $\phi$  = Fluxo luminoso direto entrando no cômodo (lm);
- $\rho$  = Refletância da superfície interna do cômodo;
- $S_t$  = Superfície interna do cômodo.

### 3.4.3- DESCRIÇÃO DO MODELO DO ESTUDO DE CASO

A geometria utilizada (Figura 18) é um cômodo quadrado de dimensões 4,00m x 4,00m x 4,00m (área total  $S= 96,00\text{m}^2$ ), com todas as superfícies sendo uniformemente difusoras e espectralmente neutras, com uma fonte pontual de luz isotrópica posicionada no centro do cômodo ( $x = y = z = 2,00\text{m}$ ) com um fluxo de saída ( $\phi$ ) de 10.000 lm. A refletância  $\rho$  é a mesma para toda a superfície interior e varia de 0% a 95% (0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 e 95).



**Figura 18:** Geometria do modelo com a fonte de luz isotrópica posicionada no centro do cômodo ( $x = y = z = 2,00\text{m}$ ).

## 3.5- PROTOCOLO 5.9: COMPONENTE CELESTE (CC) PARA ABERTURA ZENITAL SEM VIDRO E TIPOS GERAIS DE CÉU CIE

### 3.5.1- ESCOPO DO TESTE

O protocolo 5.9 apresenta uma geometria simplificada, um cômodo quadrado com uma abertura zenital, a fim de verificar a capacidade de cálculo da Componente Celeste sob as diferentes condições de céu, principalmente aqueles padronizados pela CIE. As referências são dadas pelo Fator de Luz do Dia (Daylight Factor).

### 3.5.2- REFERÊNCIA ANALÍTICA

Conforme o protocolo, analiticamente, o Fator de Luz do Dia é dado pela Equação 10:

$$FLD = CC + CRE + CRI = \frac{E_p}{E_{hz}} \cdot 100 \dots\dots\dots \text{Equação 10}$$

Onde:

- $FLD$ =Fator de Luz do Dia (%)
- $CC$ = Componente Celeste (%);
- $CRE$ = Componente Refletida Externa (%);
- $CRI$ =Componente Refletida Interna (%);
- $E_p$ = Iluminância no ponto P (lux);
- $E_{hz}$ = Iluminância horizontal da abóbada (lux).

A Componente Celeste do Fator de Luz do Dia considera a iluminância direta recebida no interior do cômodo através da “abertura” da zona de céu visível. Esta iluminância varia para um determinado ponto de acordo com a distribuição de luminâncias do céu e da porção que é vista pelo ponto.

Conforme Maamari (2004), para os tipos gerais de céu do CIE, a CC pode ser calculada analiticamente para o tipo 16 (céu nublado antigo) e para o céu tipo 5 (céu de luminância uniforme). As soluções propostas pelo protocolo para análise dos outros tipos de céu foram calculadas com o programa Skylux, especialmente desenvolvido para esta finalidade, e validadas através de comparações com as soluções analíticas para os céus 5 e 16.

*Para outros tipos de céu CIE, usamos um modelo numérico (Skylux) desenvolvido em nosso laboratório por D. E. F. Dumortier Van Roy. A superfície da abertura é dividida com uma malha fina, e para cada célula é calculada uma luminância média que é a área de céu coberto por esta malha para um determinado ponto. A iluminância direta em um determinado ponto é obtida através da integração das contribuições de cada malha.*

*Este modelo foi validado comparando seus resultados com os calculados pelos algoritmos existentes para céu nublado e uniforme. Usando uma malha fina o suficiente, a precisão dos resultados obtidos está perto 1 / 1000, permitindo adotá-lo como solução de referência.*

Maamari (2004), p. 75 (tradução livre)

Segundo o Relatório Técnico CIE 171:2006 e Maamari (2004), a diferença entre os resultados do Skylux e da solução analítica, para os céus 5 e 16, é inferior a 0,1%.

### **3.3.2.1- COMPONENTE CELESTE (CC) PARA O CÉU TIPO 5**

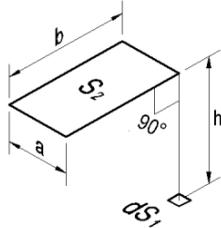
Conforme o protocolo, a Componente Celeste pode ser calculada usando os fatores de forma entre a superfície de abertura e o ponto de medição ( $CC=F_{12}$ ).

No caso de uma abertura paralela à superfície receptora (quando os pontos de medição posicionam-se no chão), o fator de forma  $F_{12}$  entre o plano de análise  $dS_1$ , que representa o ponto de medição e a superfície

de abertura  $S_2$ , através da qual é visível o céu uniforme, é dada na Equação 11:

$$F_{12} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \cdot \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \cdot \arctan \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right] \dots\dots\dots \text{Equação 11}^{12}$$

Onde:  $X = \frac{a}{h}$  e  $Y = \frac{b}{h}$  ( $a$ ,  $b$  e  $h$  são mostrados na Figura 19)

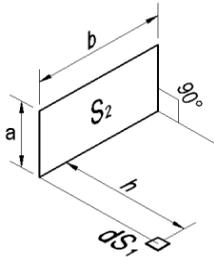


**Figura 19:** Cálculo do fator de forma para superfícies paralelas<sup>13</sup>.

No caso de uma abertura perpendicular à superfície receptora (no caso, os pontos de medição posicionam-se na parede), o fator de forma  $F_{12}$  entre o plano de análise  $dS_1$  representa o ponto de medição e a superfície de abertura  $S_2$ , através da qual é visível o céu uniforme, é dada na Equação 12:

$$F_{12} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \arctan Y - \frac{1}{\sqrt{1+X^2}} \cdot \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right] \dots\dots\dots \text{Equação 12}$$

Onde:  $X = \frac{a}{h}$  e  $Y = \frac{b}{h}$  ( $a$ ,  $b$  e  $h$  são mostrados na Figura 20)



**Figura 20:** Cálculo do fator de forma para superfícies perpendiculares<sup>14</sup>.

<sup>12</sup> O Relatório Técnico CIE 171:2006, na página 21, apresenta a Equação desta forma:

$$F_{12} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[ \frac{X}{\sqrt{1+X^2}} \cdot \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} + \frac{Y}{\sqrt{1+Y^2}} \cdot \arctan \frac{X}{\sqrt{1+Y^2}} \right].$$

<sup>13</sup> Fontes: CIE 171:2006, p. 21; TREGENZA, 1993, p. 3.15 (1); SIEGEL, 1972, p. 784

Estes fatores de forma aplicam-se no cálculo, conforme o Relatório Técnico CIE 171:2006, multiplicado com o valor da excitância<sup>15</sup>. No APOLUX o fator de forma, usado nas simulações, multiplica o valor da luminância<sup>16</sup>.

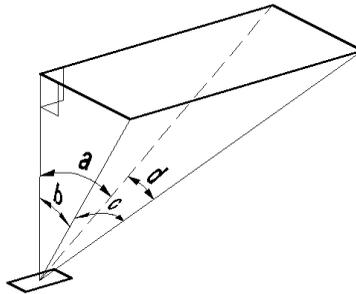
**3.3.2.2- COMPONENTE CELESTE (CC) PARA O CÉU TIPO 16**

Conforme o protocolo, a Componente Celeste em um ponto horizontal logo abaixo do canto de uma abertura retangular sem vidro sob o céu nublado CIE é dada pela Equação 13, a seguir.

$$CC = \{1,5 \cdot z \cdot (d \cdot \text{sen}a + c \cdot \text{sen}b) + z \cdot \pi + z \cdot [\text{sen}(2b) \cdot \text{sen}(2a) \cdot \text{sen}d] - 2 \cdot z \cdot [\arcsen(\text{cosa} \cdot \text{cosa}) + \arcsen(\text{sen}a \cdot \text{cos}b)]\} \cdot 100 \dots \dots \dots \text{Equação 13}$$

Onde:  $z = \frac{1}{7\pi}$  e  $\alpha = \arctan\left(\frac{\text{tana}}{\text{tan}b}\right)$

(a, b, c e d são em radianos como mostrados na Figura 21)



**Figura 21:** Cálculo da Componente Celeste sob o céu nublado CIE (ponto no chão e abertura horizontal). Fonte: CIE 171:2006, p. 34 e Tregenza, 1993, p. 2.33(1). Desenho do autor.

**3.5.3- DESCRIÇÃO DO MODELO DO ESTUDO DE CASO**

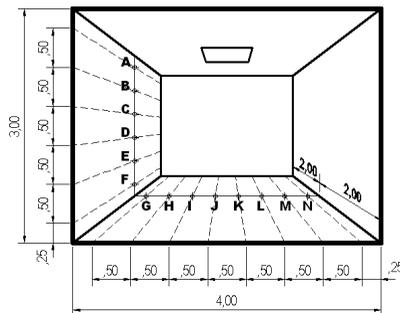
A geometria simplificada utilizada é um cômodo quadrado de dimensões 4,00m x 4,00m x 3,00m, com uma abertura no centro do teto com dimensões 1,00m x 1,00m ou 4,00m x 4,00m. A espessura do teto não é levada em consideração. As superfícies internas são refletoras

<sup>14</sup>Fontes: CIE 171:2006, p. 22; TREGENZA, 1993, p. 3.14 (1); SIEGEL, 1972, p. 784

<sup>15</sup> Corresponde ao produto da iluminância com a refletância (ou a transmitância) da superfície.

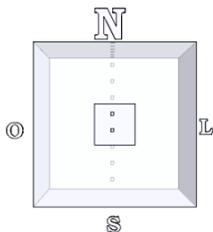
<sup>16</sup> Sendo a luminância  $L = \frac{E \cdot \rho}{\pi}$ , se estabelece uma relação onde:  $F_{CIE} = \frac{F_{APOLUX}}{\pi}$ , conforme demonstrou Carvalho (2009).

difusas ideais com 0% de refletância. Os pontos de medição são posicionados conforme a Figura 22.

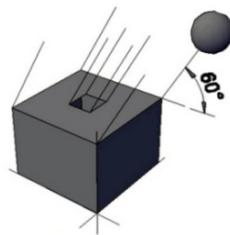


**Figura 22:** Geometria do estudo de caso com abertura zenital de 1,00m x 1,00m e posicionamento dos pontos de medição. Fonte: CIE 171:2006, p. 34. Desenho do autor.

A distribuição de luminâncias do céu é obtida através das equações dos céus da norma CIE-ISO 15469:2004 com o azimute do Sol em  $180^\circ$  (face para o lado interno da parede com os pontos de referência, conforme a Figura 23 e de acordo com as informações do e-mail do prof. Fawaz Maamari)<sup>17</sup> e  $60^\circ$  de de altura solar (Figura 24). A iluminância direta do Sol não é considerada.



**Figura 23:** Posição dos pontos de medição em relação aos pontos cardeais em vista superior e em perspectiva. Desenho do autor.



**Figura 24:** Posicionamento do Sol a  $60^\circ$  ao Sul. Desenho do autor.

Os eixos positivos de X e Y coincidem com as direções Leste e Norte, respectivamente.

<sup>17</sup> Em função de omissões de dados verificados inicialmente em alguns protocolos, bem como de resultados divergentes inesperados em algumas simulações, entrou-se em contato com o prof. Fawaz Maamari, que forneceu informações complementares (neste protocolo a dúvida estava na posição do Sol em relação aos pontos de medição). O e-mail está no Apêndice A.

### **3.6- PROTOCOLO 5.11: COMPONENTE CELESTE (CC) E COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA (CRE) PARA UMA ABERTURA SEM VIDRO NA FACHADA**

#### **3.6.1- ESCOPO DO TESTE**

O protocolo 5.11 apresenta uma geometria simplificada, um cômodo quadrado com uma abertura na fachada Sul, a fim de verificar a capacidade de cálculo da Componente Celeste e da Componente Refletida Externa sob as diferentes condições de céu padronizados pela CIE.

O que diferencia uma abertura na fachada de uma abertura na cobertura, conforme mostrado no protocolo 5.9, é a influência do piso externo na distribuição da iluminância interna através da reflexão da luz no teto e nas paredes.

O objetivo deste estudo de caso é verificar a capacidade do programa para calcular corretamente a contribuição do piso externo e da distribuição de luminâncias do céu na iluminância interna de um cômodo com abertura na fachada. As referências são dadas pelo Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor*).

#### **3.6.2- REFERÊNCIA ANALÍTICA**

De acordo com o protocolo, os valores analíticos de referência foram calculados com o Skylux e validados pela comparação dos resultados com o referencial analítico para o céu uniforme (tipo 5) e céu nublado CIE (tipo 16), assim como no protocolo 5.9.

#### **3.4.2.1- COMPONENTE CELESTE (CC) E COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA (CRE) SOB O CÉU TIPO 5**

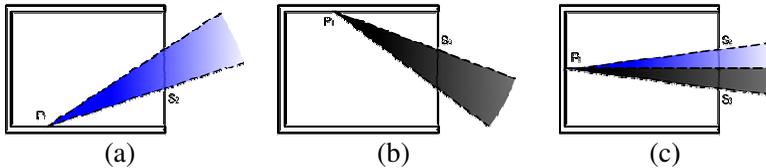
Conforme o protocolo, para os pontos de medição no piso, apenas a Componente Celeste é considerada conforme a Equação 14.

$$CC = F_{12} \dots\dots\dots \text{Equação 14}$$

Onde:

$CC$  = Componente Celeste;

$F_{12}$  = Fator de forma entre a superfície receptora  $dS_1$  representada pelo ponto  $P_1$  e a zona  $S_2$  da abertura (Figura 25-a e c), através da qual o céu uniforme é visível. Para um ponto no piso,  $S_2$  é igual à superfície total de abertura.



**Figura 25:** Componente celeste (a) e componente refletida externa (b) para pontos no piso (a), no teto (b) e na parede (c) para uma abertura na fachada. Adaptado de: CIE 171:2006, p. 36. Desenhos do autor.

Para os pontos de medição no teto, apenas a Componente Refletida Externa é considerada. A luminância do piso externo é assumida como uniforme e a Componente Refletida Externa pode ser calculada com a Equação 15.

$$CRE = F_{13} \cdot \rho_{\text{Piso Externo}} \dots\dots\dots \text{Equação 15}$$

Onde:

$CRE$  = Componente Refletida Externa;

$\rho_{\text{Piso Externo}}$  = Refletância uniforme do piso externo;

$F_{13}$  = Fator de forma entre a superfície receptora  $dS_1$  representada pelo ponto  $P_1$  e a zona  $S_3$  da abertura (Figura 25-b e c), através da qual o solo é visível. Para um ponto no teto,  $S_3$  é igual à superfície total de abertura.

Para os pontos de medição na parede interna frente a abertura (Figura 25-c), assumindo que a Componente Refletida Interna é igual a zero, o Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor*) pode ser, segundo o protocolo, calculado pela Equação 16:

$$FLD = CC + CRE = F_{12} + F_{13} \cdot \rho \dots\dots\dots \text{Equação 16}$$

### 3.4.2.2- COMPONENTE CELESTE (CC) NO PISO SOB O CÉU TIPO 16

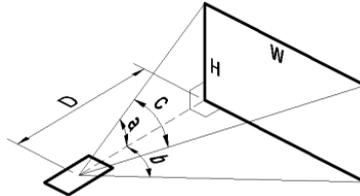
Conforme o protocolo, a Componente Celeste em um ponto de referência horizontal sob o céu nublado CIE e uma abertura retangular sem vidro na fachada a qual o lado inferior está no mesmo plano horizontal do ponto de referência, e do qual um lado vertical está em um plano perpendicular à superfície da abertura e passando pelo ponto de medição, é dada pela Equação 17 (Tregenza, 1993, p. 2.32(1)):

$$CC = \frac{1,5 \cdot (b - c \cdot \cos a) + 2 \cdot \arcsen(\text{sen} b \cdot \text{sen} a) - \text{sen } 2a \cdot \text{sen} c}{7\pi} \cdot 100 \dots \text{Equação 17}$$

Onde:

$$a = \arctan\left(\frac{H}{D}\right); \quad b = \arctan\left(\frac{W}{D}\right); \quad c = \arctan\left(\frac{W}{\sqrt{H^2 - D^2}}\right)$$

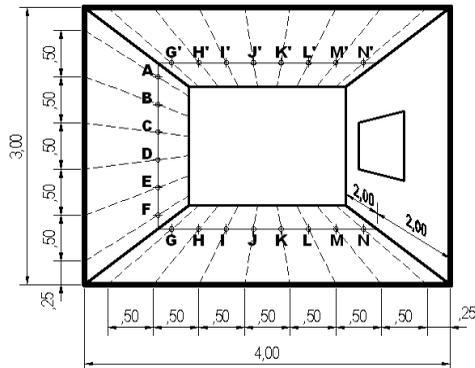
Os ângulos  $a$ ,  $b$  e  $c$  são medidos em radianos conforme mostrado na Figura 26:



**Figura 26:** Cálculo da Componente celeste sob céu nublado CIE (ponto no piso e abertura vertical). Fonte: CIE 171:2006, p. 38 e Tregenza, 1993. Desenho do autor.

### 3.6.3- DESCRIÇÃO DO MODELO DO ESTUDO DE CASO

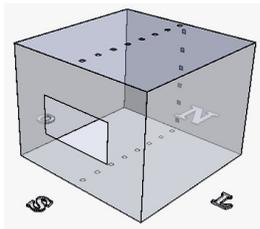
A geometria simplificada utilizada é um cômodo quadrado de dimensões 4,00m x 4,00m x 3,00m, com uma abertura na fachada Sul com dimensões 2,00m x 1,00m ou 4,00m x 3,00m. A espessura da parede não é levada em consideração. As superfícies internas são refletoras difusas ideais com 0% de refletância. Os pontos de referência são posicionados conforme a Figura 27.



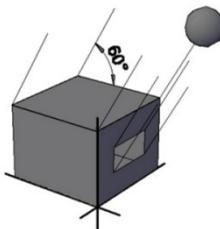
**Figura 27:** Descrição da geometria e localização dos pontos de medição. Fonte: CIE 171:2006, p. 38. Desenho do autor.

A distribuição de luminâncias do céu é obtida através das equações dos céus do CIE-ISO 15469:2004 com o azimute do Sol em 180° (face para o lado interno da parede com os pontos de referência,

conforme Figura 28) e com 60° de elevação (Figura 29). A iluminância direta do Sol não é considerada.



**Figura 28:** Posição dos pontos de medição em relação aos pontos cardiais. Desenho do autor.



**Figura 29:** Posicionamento do Sol a 60° ao Sul. Desenho do autor.

Considera-se o piso externo como sendo de luminância uniforme e esta luminância é calculada a partir da iluminância horizontal externa e da refletância de 30% do piso externo.

### **3.7- PROTOCOLO 5.13: COMPONENTE CELESTE(CC) + COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA (CRE) PARA UMA ABERTURA SEM VIDRO NA FACHADA COM UMA MÁSCARA HORIZONTAL EXTERNA CONTÍNUA**

#### **3.7.1- ESCOPO DO TESTE**

O estudo de caso do protocolo 5.13 apresenta uma geometria simplificada com o objetivo de avaliar a influência de uma máscara externa horizontal na iluminância direta interna. A máscara externa pode influenciar consideravelmente a distribuição de luminâncias dentro de um edifício. Este estudo de caso considera que a máscara externa e o piso têm luminância uniforme a fim de calcular a solução analítica.

A avaliação é feita através do Fator de Luz do Dia (daylight factor) no piso de um cômodo negro (refletância de superfície de 0%) com uma abertura na fachada e uma máscara horizontal externa contínua de luminância uniforme.

#### **3.7.2- REFERÊNCIA ANALÍTICA**

Segundo o protocolo 5.13, o Fator de Luz do Dia (daylight factor) no piso de um cômodo preto (0% de refletância na superfície) com uma abertura na fachada e uma máscara horizontal externa de luminância uniforme é definido pela Equação 18:

$$FLD = CC + CRE \dots \dots \dots \text{Equação 18}$$

Onde:

$FLD$ =Fator de Luz do Dia (%);

$CC$ = Componente Celeste (%);

$CRE$ = Componente Refletida Externa (%);

Conforme o protocolo, a Componente Refletida Externa é dada pela Equação 19:

$$CRE = F_{14} \cdot \pi \cdot \frac{L_{masc}}{E_{hz}} \dots\dots\dots \text{Equação 19}$$

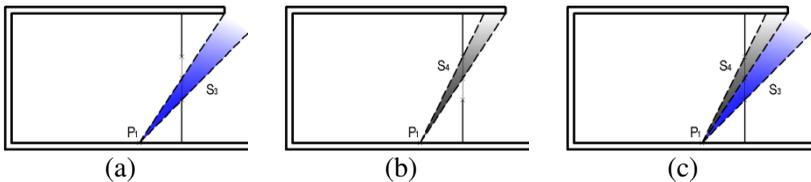
Onde:

$F_{14}$ =Fator de forma entre o ponto de referência  $P_1$  e a zona  $S_4$  da abertura através da qual a máscara é visível para  $P_1$  (Figura 30-b e c)

$L_{masc}$  = Luminância uniforme da máscara;

$E_{hz}$  = Iluminância horizontal externa.

De acordo com o protocolo, os valores de referência da Componente Refletida Externa (CRE) são calculados com o Skylux levando em consideração o tamanho da zona  $S_4$  da abertura para cada ponto (ver Figura 30-b). O cálculo da componente refletida externa é baseado na simplificação exposta no tópico a seguir.



**Figura 30:** Cálculo do Componente Celeste (a) e da Componente Refletida Externa (b) para uma abertura na fachada e uma máscara horizontal externa. Adaptado de: CIE 171:2006, p. 40. Desenho do autor.

### 3.5.2.1 CÁLCULO SIMPLIFICADO DA COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA (CRE).

Supondo que a máscara e o piso externo têm luminâncias uniformes, a luminância da máscara é dada pela Equação 20:

$$L_{masc} = \frac{1}{2} \cdot L_{solo} \cdot \rho_{masc} \dots\dots\dots \text{Equação 20}$$

Onde:

$L_{masc}$ = Luminância uniforme da máscara horizontal;

$L_{solo}$ = Luminância uniforme do piso externo;

$\rho_{masc}$ = Refletância da máscara horizontal.

Devido a porcentagens muito altas nos erros ao simular com os resultados da fórmula do Relatório Técnico 171:2006, foi observado que a equação 20, mostrada acima, estava diferente da equação na p. 41 do Relatório, que a mostra forma:  $CRE = (1/2) \cdot (L_{solo}/\rho_{masc})$ .

Comparando com a Equação 25 no protocolo 5.14 (na p. 84 deste trabalho e na p. 43 do Relatório Técnico 171:2006), onde se apresenta da mesma forma conforme a Equação 20, se fez necessário revisar as equações do item 5.13.1.1 do Relatório Técnico e refazer a álgebra para confirmação do equívoco.

Considerando que a iluminância do solo é igual a iluminância horizontal ( $E_{solo} = E_{hz}$ ), a luminância uniforme do piso externo é (Equação 21):

$$L_{solo} = \frac{E_{hz} \cdot \rho_{solo}}{\pi} \dots\dots\dots \text{Equação 21}$$

Onde:

- $L_{solo}$  = Luminância uniforme do piso externo;
- $E_{hz}$  = Iluminância horizontal;
- $\rho_{solo}$  = Refletância do piso externo.

Substituindo a Equação 21 na Equação 20 e a equação resultante na Equação 19, temos:

$$CRE = F_{14} \cdot \pi \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \left( \frac{E_{hz} \cdot \rho_{solo}}{\pi} \right) \cdot \rho_{masc}}{E_{hz}} = F_{14} \cdot \pi \cdot \frac{\frac{1}{2} \cdot \frac{E_{hz} \cdot \rho_{solo}}{\pi} \cdot \rho_{masc}}{E_{hz}}$$

$$CRE = F_{14} \cdot \pi \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{E_{hz} \cdot \rho_{solo} \cdot \rho_{masc}}{\pi \cdot E_{hz}}$$

Então, após as simplificações, a Equação 19 torna-se:

$$CRE = F_{14} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_{solo} \cdot \rho_{masc} \dots\dots\dots \text{Equação 22}$$

### 3.5.2.2 CÁLCULO DA COMPONENTE CELESTE (CC) SOB O CÉU TIPO 5

Conforme o protocolo, a Componente Celeste pode ser calculada pela Equação 23:

$$CC = F_{13} \dots\dots\dots \text{Equação 23}$$

Onde:

- CC= Componente Celeste;
- $F_{13}$ = Fator de forma entre a superfície receptora  $dS_1$  representada pelo ponto  $P_1$  e a zona  $S_3$  da abertura (Figura 30-a e c).

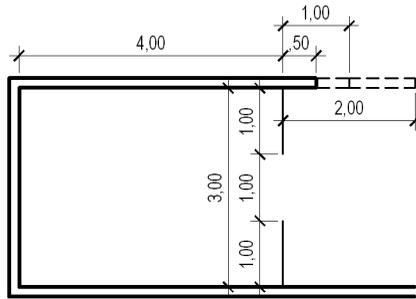
### 3.5.2.3 CÁLCULO DA COMPONENTE CELESTE (CC) SOB O CÉU TIPO 16

Segundo o protocolo, no caso de um céu nublado do CIE, a Componente Celeste no piso pode ser calculada com a Equação 17, p. 76, considerando o tamanho de  $S_3$  para cada ponto.

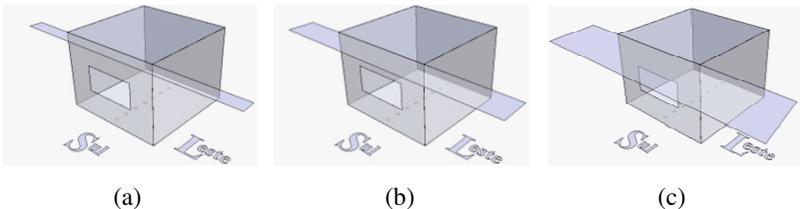
#### 3.7.3- DESCRIÇÃO DO MODELO DO ESTUDO DE CASO

A geometria simplificada utilizada é um cômodo quadrado de dimensões 4,00m x 4,00m x 3,00m, com uma abertura na fachada Sul com dimensões 2,00m x 1,00m. A espessura da parede não é levada em consideração. As superfícies internas são refletoras difusoras ideais com 0% de refletância.

A máscara externa é contínua a 3,00m de altura e com 0,50m, 1,00m ou 2,00m de largura (Figuras 31 e 32). Consideram-se como uniformes as luminâncias da máscara e do piso externo.



**Figura 31:** Descrição geométrica da máscara horizontal externa e do estudo de caso. Fonte: CIE 171:2006, p. 41.



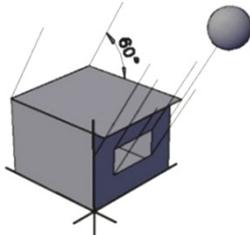
(a) (b) (c)

**Figura 32:** Diferentes dimensões da máscara horizontal externa (a) 0,50m, (b) 1,00m e (c) 2,00m. Desenhos do autor.

Devido à indefinição das refletâncias do piso externo e da máscara horizontal, entrou-se em contato com o prof. Fawaz Maamari, por e-mail, em 01 de fevereiro de 2011, solicitando os valores das refletâncias. Este e-mail foi respondido em 28 de fevereiro de 2011 com

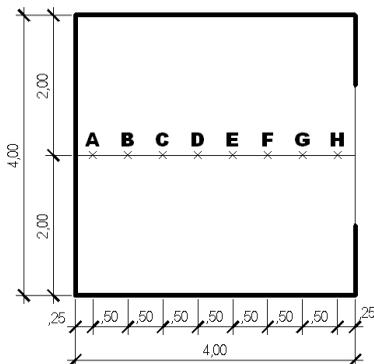
os valores solicitados: a refletância do piso externo de 20% e da máscara de 50%.

O protocolo 5.13 não especifica, mas por analogia aos outros protocolos, adotou-se a distribuição de luminâncias do céu sendo obtida através das equações dos céus do CIE-ISO 15469:2004 com o azimute do Sol em  $180^\circ$  e com  $60^\circ$  de elevação conforme mostra a Figura 33. A iluminância direta do Sol não foi considerada.



**Figura 33:** Posicionamento do Sol a  $60^\circ$  ao Sul.  
Desenho do autor.

Os pontos de referência são posicionados conforme a Figura 34.



**Figura 34:** Posicionamento dos pontos de referência no piso. Fonte: CIE 171:2006, p. 42. Desenho do autor.

### **3.8- PROTOCOLO 5.14: COMPONENTE CELESTE (CC) + COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA (CRE) PARA UMA ABERTURA SEM VIDRO NA FACHADA COM UMA MÁSCARA VERTICAL EXTERNA CONTÍNUA**

#### **3.8.1- ESCOPO DO TESTE**

O estudo de caso do protocolo 5.14 apresenta uma geometria simplificada com o objetivo de avaliar a influência de uma máscara externa vertical na iluminância direta interna.

A avaliação é feita através do Fator de Luz do Dia (*daylight factor*) no piso de um cômodo negro (refletância de superfície de 0%) com uma abertura na fachada e uma máscara vertical externa de luminância uniforme.

Parte da luz admitida no ambiente é refletida da máscara vertical contínua com luminância uniforme.

### 3.8.2- REFERÊNCIA ANALÍTICA

Segundo o protocolo 5.14, o Fator de Luz do Dia (*daylight factor*) no piso de um cômodo preto (0% de refletância na superfície) com uma abertura na fachada e uma máscara vertical externa de luminância uniforme é definido pela Equação 15. E também, segundo o protocolo:

$$CRE = F_{13} \cdot \pi \cdot \frac{L_{masc}}{E_{hz}} \dots\dots\dots \text{Equação 24}$$

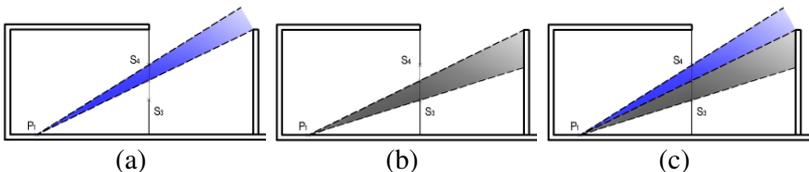
Onde:

$F_{13}$ =Fator de forma entre o ponto de referência  $P_1$  e a zona  $S_3$  da abertura através da qual a máscara é visível para  $P_1$  (Figura 35-b e c)

$L_{masc}$ = Luminância uniforme da máscara;

$E_{hz}$ = Iluminância horizontal externa.

De acordo com o protocolo, os valores de referência da Componente Celeste são calculados com o Skylux levando em consideração o tamanho da zona  $S_4$  da abertura para cada ponto de medição (ver Figura 35-a e c). O cálculo da componente refletida externa é baseado na simplificação exposta no tópico a seguir.



**Figura 35:** Cálculo da Componente Celeste (a) e da Componente Refletida Externa (b) para uma abertura na fachada e uma máscara vertical externa. Adaptado de: CIE 171:2006, p. 42. Desenho do autor.

### 3.6.2.1 CÁLCULO SIMPLIFICADO DA CRE.

Supondo que a máscara e o piso externo têm luminâncias uniformes, pode-se, então, escrever que luminância da máscara é dada pela Equação 25<sup>18</sup>:

$$L_{masc} = \left(\frac{1}{2} \cdot L_{solo} \cdot \rho_{masc}\right) + \left(\frac{E_v \cdot \rho_{masc}}{\pi}\right) \dots\dots\dots \text{Equação 25}$$

Onde:

$L_{solo}$  = Luminância uniforme do piso externo;

$\rho_{masc}$  = Refletância da máscara horizontal;

$E_v$  = Iluminância vertical externa.

Supondo-se que a iluminância do solo é igual à iluminância horizontal ( $E_{solo} = E_{hz}$ ), pode-se dizer que a luminância uniforme do piso externo é (Equação 26):

$$L_{solo} = \frac{\rho_{solo} \cdot E_{hz}}{\pi} \dots\dots\dots \text{Equação 26}$$

Então, substituindo a Equação 26 na Equação 25 e a equação resultante na Equação 24 e fazendo as simplificações, temos (Equação 27):

$$CRE = F_{13} \cdot \rho_{masc} \cdot \left(\frac{\rho_{solo}}{2} + \frac{E_v}{E_{hz}}\right) \dots\dots\dots \text{Equação 27}$$

### 3.6.2.2 CÁLCULO DA COMPONENTE REFLETIDA EXTERNA (CRE) SOB O CÉU TIPO 5

Conforme o protocolo, no caso de um céu de luminância uniforme, temos que a iluminância horizontal externa é (Equação 28):

$$E_{hz} = \pi \cdot L \dots\dots\dots \text{Equação 28}$$

Onde:

$L$  = Luminância da abóbada.

Temos, também, que a iluminância vertical é (Equação 29):

$$E_v = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot L \dots\dots\dots \text{Equação 29}$$

---

<sup>18</sup> Esta fórmula é que confirma o equívoco apontado no protocolo 5.13 (na p. 82 deste trabalho e na p. 43 do Relatório Técnico) e nos fez rever todos os procedimentos de cálculo.

Então, a Equação 24 torna-se (Equação 30):

$$CRE = \frac{1}{2} \cdot F_{13} \cdot \rho_{masc} \cdot (\rho_{solo} + 1) \dots\dots\dots \text{Equação 30}$$

**3.6.2.3 CÁLCULO DA COMPONENTE CELESTE (CC) SOB O CÉU TIPO 5**

Conforme o protocolo, no caso de um céu de luminância uniforme, a Componente Celeste é dada pela relação (Equação 31):

$$CC = F_{14} \dots\dots\dots \text{Equação 31}$$

Onde:

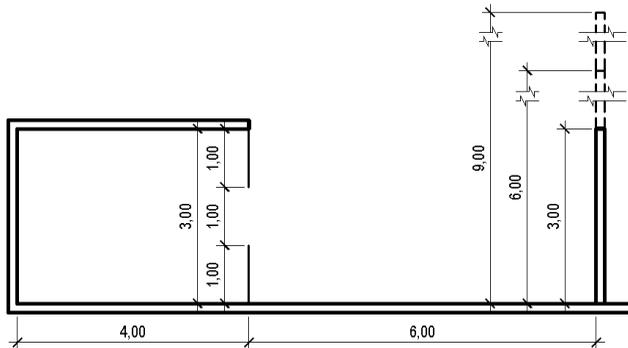
$F_{14}$  = Fator de forma entre o ponto de referência  $P_I$  e a zona  $S_4$  da abertura através da qual o céu é visível para  $P_I$  (Figura 35-a e c).

**3.8.3- DESCRIÇÃO DO MODELO DO ESTUDO DE CASO**

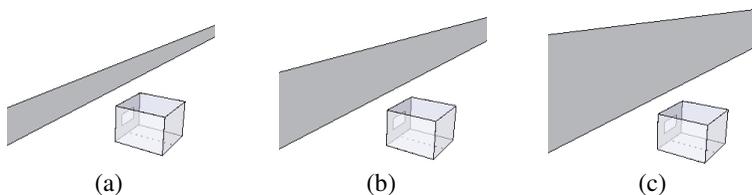
A geometria simplificada utilizada é um cômodo quadrado de dimensões 4,00m x 4,00m x 3,00m, com uma abertura na fachada Sul com dimensões 2,00m x 1,00m. A espessura da parede não é levada em consideração. As superfícies internas são refletoras difusas ideais com 0% de refletância.

A máscara externa é contínua a 6,00m de distância da face Sul do modelo e com 3,00m, 6,00m ou 9,00m de altura (Figuras 36 e 37). Consideram-se como uniformes as luminâncias da máscara e do piso externo.

Como o protocolo também não define as refletâncias do piso externo e da máscara vertical, semelhante ao protocolo 5.13, utilizou-se as informações dos e-mails com o prof. Maamari, conforme comentado no item 3.7.3.

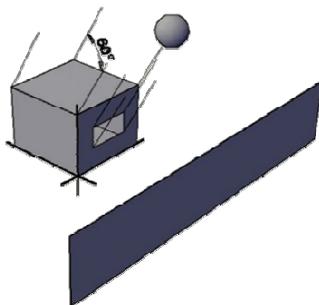


**Figura 36:** Descrição geométrica, vista em corte, da máscara vertical externa do estudo de caso. Fonte: CIE 171:2006, p. 44.



**Figura 37:** Diferentes dimensões da máscara vertical externa (a) 3,00m, (b) 6,00m e (c) 9,00m. Desenhos do autor.

O protocolo 5.14, assim como o 5.13, não especifica, mas por analogia aos outros protocolos, adotou-se a distribuição de luminâncias do céu sendo obtida através das equações dos céus do CIE com a posição do Sol definida no Sul e com  $60^\circ$  de elevação (Figura 38). A iluminância direta do Sol não foi considerada.



**Figura 38:** Protocolo 5.14 - Posicionamento do Sol a  $60^\circ$  ao Sul. Desenho do autor.

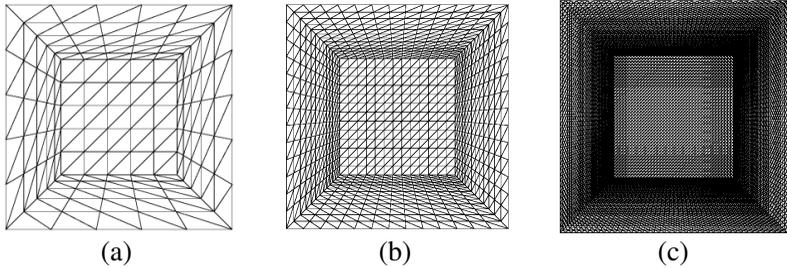
Os pontos de medição são posicionados conforme a Figura 34, mostrada no protocolo 5.13, pois são os mesmos pontos de análise no mesmo ambiente.

### 3.9- SIMULAÇÕES

Para a realização das simulações no APOLUX foram observadas características comuns e particulares entre os protocolos. Os procedimentos são descritos a seguir.

#### 3.9.1- PROTOCOLO 5.8

Para simular a iluminação, dividiram-se os planos das superfícies, no módulo Fractal, em triângulos menores definidos pela área máxima. Foram utilizados, então, três divisões distintas:  $0,5\text{m}^2$ ,  $0,05\text{m}^2$  e  $0,005\text{m}^2$  (Figura 39), para verificar como o programa processa os dados e o quanto isso interfere nos resultados finais.



**Figura 39:** Fracionamentos de (a) 0,5m<sup>2</sup>, (b) 0,05m<sup>2</sup> e (c) 0,005m<sup>2</sup> do modelo. Fonte: APOLUX

No módulo Fóton foi calculado o fator de forma para cada resolução de visibilidade nos globos 60, 90 e 150.

Conforme o protocolo, a posição do fluxo luminoso é definida no centro do cômodo ( $x=y=z=2,00m$ ) e a sua intensidade de ( $\Phi$ ) 10.000lm para cada fracionamento. O APOLUX, atualmente, não utiliza fontes artificiais e o teste verifica as iluminâncias indiretas geradas pelas inter-reflexões, foi criada uma função de cálculo para fontes pontuais, utilizando o método da intensidade luminosa para definir a iluminância inicial de cada ponto do ambiente.

Na seqüência foram definidas as propriedades óticas das superfícies internas como opaco difusas. As refletâncias variaram, para cada simulação, entre 0% e 95%.

Para o cálculo da radiossidade variou-se a quantidade de ciclos de iterações. Iniciou-se com 20 ciclos e depois com 60 ciclos para todos os fracionamentos e resoluções de visibilidade. Finalizou-se fixando o fracionamento em 0,005m<sup>2</sup> e a resolução no globo 150 para, então, variar de 5 a 100 ciclos para todas as refletâncias, até 200 ciclos para as refletâncias de 90% e 95% e até 300 ciclos para a refletância de 95% (foram usados os seguintes ciclos de iterações da radiossidade: 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120, 130, 140, 150, 200, 250 e 300). Estas variações foram feitas devido a necessidade de verificar o quanto estes fatores influenciariam no resultado final.

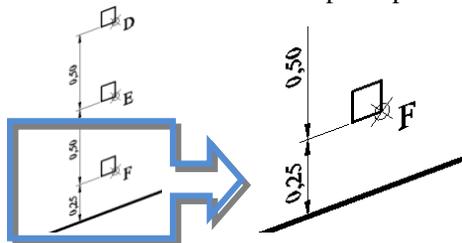
### **3.9.2- PROTOCOLOS 5.9 AO 5.14**

Para realização das simulações dos protocolos 5.9 ao 5.14 foi observado que os cenários eram modelos com configurações comuns a todos e alguns pontos característicos de cada um. São eles:

### 3.9.2.1- ITENS EM COMUM

No módulo Fractal os modelos foram fracionados com valor 1, pois o fracionamento não interfere no cálculo porque todas as refletâncias internas são definidas com o valor de 0%.

Os ambientes foram modelados de forma que não houvesse coincidência entre os pontos de análise e os pontos das superfícies fracionadas. Como o APOLUX calcula iluminâncias em pontos de planos, foram criados no ambiente pequenos planos quadrangulares, dos quais foram considerados para análise apenas os vértices que coincidiam com os pontos especificados nos protocolos (Figura 40). Estes planos são definidos como análise e não são computados nas interreflexões<sup>19</sup>, tendo a função de apenas receber os dados finais de iluminância em seus pontos (das fontes ou refletidas/transmitida pelos planos do modelo).



**Figura 40:** Formato dos planos de análise e ponto considerado para medição.

Também foram definidas três diferentes resoluções de visibilidade: globos 60, 90 e 150 para os protocolos 5.9 e 5.11 e os globos 60 e 90 para os protocolos 5.13 e 5.14. Para cada resolução foi calculado o fator de forma.

Para todas as geometrias foram adotados, conforme define o protocolo, os seguintes parâmetros de configuração de abóbada celeste no APOLUX:

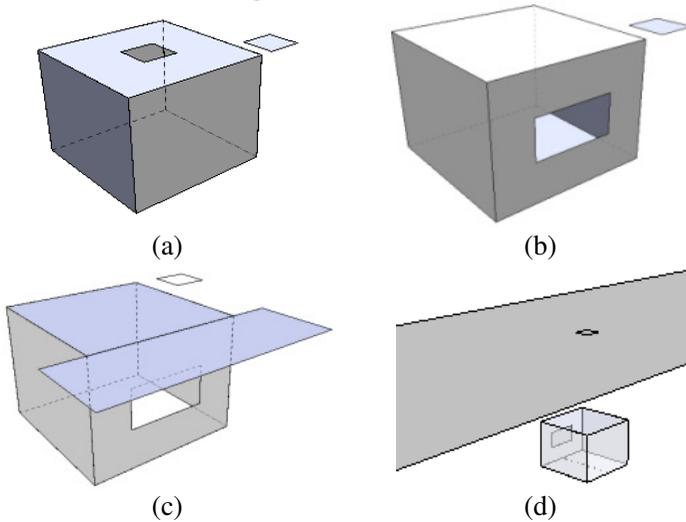
- Azimute do Sol: 180°
- Altura angular: 60°
- Orientação (Norte): 0°
- Tipo de Cálculo: Somente céu (sem considerar a luz direta do Sol).
- Tipo de céu: todos os 16 tipos, um por vez.

---

<sup>19</sup> Em termos práticos, os planos de análise seriam como planos transmissores espaciais com 100% de transmitância, 0% de absorvância e 0% de refletância.

Para o cálculo da radiossidade a quantidade de ciclos de iterações, devido às refletâncias serem de 0%, foi definida com 1 ciclo.

Para calcular a iluminância horizontal externa ( $E_{hz}$ ) foi previsto um plano de análise horizontal posicionado na mesma cota do teto para os protocolos 5.9, 5.11 e 5.13 e para o 5.14 foi posicionado na mesma cota da altura da maior máscara (9,00m), de forma que não sofressem interferência do modelo (Figura 41).



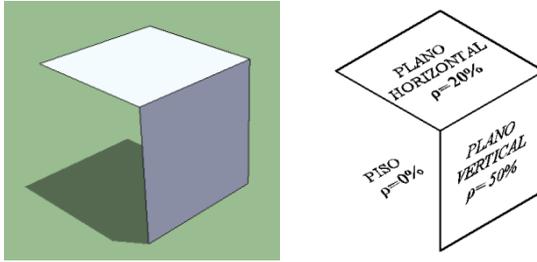
**Figura 41:** Posicionamento do plano de análise horizontal nos modelos dos protocolos (a) 5.9, (b) 5.11, (c) 5.13 e (d) 5.14.

### 3.9.2.2- ÍTENS PARTICULARES

A refletância do solo no protocolo 5.11, conforme exige o protocolo, foi definida em 30%.

Nos protocolos 5.13 e 5.14 as refletâncias dos planos das paredes, teto e piso foram definidas em 0%.

Com o objetivo de calcular as luminâncias uniformes das máscaras horizontal e vertical relativas a cada tipo de céu, para os protocolos 5.13 (Equação 20) e 5.14 (Equação 25) foram modelados dois planos de 1,00m x 1,00m, um vertical com  $\rho = 50\%$  e outro horizontal com  $\rho = 20\%$ , mantendo o piso com  $\rho = 0\%$ , conforme mostra a Figura 42 (resultados no Apêndice A).

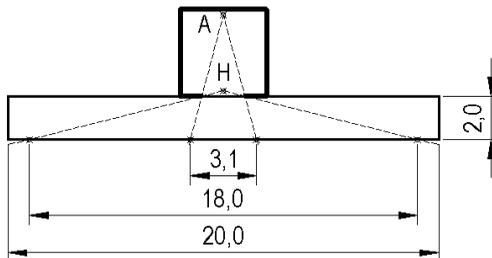


**Figura 42:** Modelagem dos planos vertical e horizontal para cálculo das luminâncias uniformes das máscaras horizontais. Desenho do autor.

Embora o algoritmo calcule a influência externa de geometrias complexas (PEREIRA, 2009), este procedimento dificulta a obtenção de superfícies de luminância uniforme, como o protocolo especifica. Assim, foi introduzida no algoritmo a possibilidade de definir um “Plano de Luminância Uniforme”, cujo valor é considerado apenas como influência inicial, sendo descartado quando da realização da equação da radiosidade. Como a refletância das superfícies internas é de 0%, este procedimento atende plenamente às condições do protocolo.

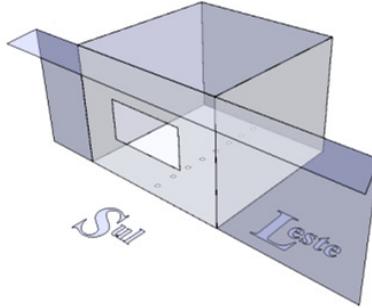
Para definição da luminância uniforme das máscaras horizontal e vertical, calculou-se analiticamente o valor da luminância absoluta, conforme a Equação 20 para o protocolo 5.13 e Equação 25 para o 5.14, a partir dos dados de iluminância horizontal e vertical dado pelo APOLUX, apresentados no Apêndice A.

No protocolo 5.13 para que a máscara horizontal tivesse um comportamento de continuidade, seu comprimento foi definido em 20,00m (sendo suficiente 18,00m), de forma a ocupar todo o campo de visão do ponto mais próximo a abertura (ponto H), conforme mostra a Figura 43.



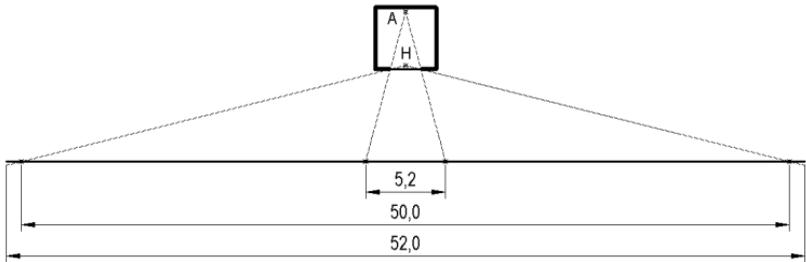
**Figura 43:** Definição do comprimento da máscara horizontal. Desenho do autor.

A hipótese de luminância uniforme da máscara externa leva a definir as paredes externas também contínuas (Figura 44) com refletância igual a 0%, para atender à Equação 20, isto apenas para efeito de representação, dado que luminância da máscara é dada no protocolo e não calculada em decorrência do exterior.



**Figura 44:** Modelo com as paredes externas e com a máscara horizontal externa. Desenho do autor.

No protocolo 5.14 para que a máscara vertical tivesse um comportamento de continuidade, seu comprimento foi definido em 52,00m (sendo suficientes 50,00m), de forma a ocupar todo o campo de visão do ponto mais próximo a abertura (ponto H), conforme mostra a Figura 45.



**Figura 45:** Protocolo 5.14 - Definição do comprimento da máscara vertical. Desenho do autor.

### 3.10- RESUMO DOS ESTUDOS DE CASO

A Tabela 9 reúne a quantidade de simulações previstas para este trabalho.

**Tabela 9:** Resumo da previsão de simulações a serem realizadas neste trabalho.

Protocolo	Fracionam.	Visibilidade (globos)	Ciclos de iterações da radiostidade	Refletância	Abertura (metro)	Máscara (metro)	Tipos de Céu	Número de simulações	Total
5.8	0,5	60, 90 e 150	20 e 60	Superf. Internas 0%	xx	xx	xx	72	420
	0,05	60, 90 e 150	20 e 60		xx	xx	xx	72	
	0,005	60 e 90	20 e 60	a	xx	xx	xx	48	
		150	5 a 300	95%	xx	xx	xx	228	
5.9	1	60, 90 e 150	1	Paredes 0%	1x 1	xx	16	48	96
	1	60, 90 e 150	1		4 x 4	xx	16	48	
5.11	1	60, 90 e 150	1	Piso Externo: 30%	2 x 1	xx	16	48	96
	1	60, 90 e 150	1		4 x 3	xx	16	48	
5.13	1	60 e 90	1	MH: 50% Piso ext. 20%	2 x 1	0,50	16	32	96
	1	60 e 90	1		2 x 1	1,00	16	32	
	1	60 e 90	1		2 x 1	2,00	16	32	
5.14	1	60 e 90	1	MV: 50% Piso ext. 20%	2 x 1	3,00	16	32	96
	1	60 e 90	1		2 x 1	6,00	16	32	
	1	60 e 90	1		2 x 1	9,00	16	32	
<b>Total 804</b>									

A Tabela 10 a seguir apresenta de forma resumida as principais características dos protocolos aplicados a este trabalho, sendo que, em todos os casos, o tipo de cálculo não leva em consideração a luz direta do Sol (apenas céu).

**Tabela 10:** Características dos protocolos aplicados neste trabalho.

Prot.	Avaliar	Abert.	Másc.	$\gamma_s$	$\alpha_s$	Norte	$\rho$	L
5.8	CRI	xx	xx	xx	xx	xx	Toda superfície interna varia de 0% a 95%	xx
5.9	CC	Zenital 1m x 1m	xx	60°	180°	0°	Paredes 0%	xx
	CC	Zenital 4m x4m	xx	60°	180°	0°	Paredes 0%	xx
5.11	CC+CRE	Lateral 1m x 1m	xx	60°	180°	0°	Piso Ext. 30%	Unif.
	CC+CRE	Lateral 4m x4m	xx	60°	180°	0°	Piso Ext. 30%	Unif.
5.13	CC + CRE	Lateral 2m x 1m	Horiz. 0,50m	60°	180°	0°	Piso Ext. 20%	Unif.
							Máscara 50%	Unif.
	CC + CRE	Lateral 2m x 1m	Horiz. 1,00m	60°	180°	0°	Piso Ext. 20%	Unif.
							Máscara 50%	Unif.
	CC + CRE	Lateral 2m x 1m	Horiz. 2,00m	60°	180°	0°	Piso Ext. 20%	Unif.
							Máscara 50%	Unif.
5.14	CC + CRE	Lateral 2m x 1m	Vertical 3,00m	60°	180°	0°	Piso Ext. 20%	Unif.
							Máscara 50%	Unif.
	CC + CRE	Lateral 2m x 1m	Vertical 6,00m	60°	180°	0°	Piso Ext. 20%	Unif.
							Máscara 50%	Unif.
	CC + CRE	Lateral 2m x 1m	Vertical 9,00m	60°	180°	0°	Piso Ext. 20%	Unif.
							Máscara 50%	Unif.



#### 4- RESULTADOS

Este capítulo apresenta e discute os resultados obtidos da comparação entre as simulações realizadas, a partir da aplicação da metodologia proposta no capítulo anterior, e as referências analíticas do Relatório Técnico CIE 171:2006.

Após os dados simulados serem comparados com os resultados dos cálculos analíticos ou com os resultados apresentados pelo relatório técnico, pode-se analisar o erro estimado para cada situação.

Os erros, oriundos da diferença entre o valor obtido na simulação e referência do protocolo, foram calculados através da Equação 32:

$$\text{Erro}(\%) = \left[ \left( \frac{\text{Simulação}}{\text{Referência}_{CIE}} \right) - 1 \right] \cdot 100 \dots\dots\dots \text{Equação 32}$$

Para comparação dos valores obtidos entre simulações, Carvalho (2009) considerou como aceitável uma faixa de discrepâncias entre 5% e -5%. Como o Relatório Técnico 171:2006 não especifica qual é a margem aceitável de erros e este trabalho é uma continuidade de Carvalho (2009), considera-se, também, como aceitável a mesma faixa de erros.

Considerando o tempo gasto nas simulações, as que consumiram mais tempo foram realizadas no protocolo 5.8, com grandes ciclos de iteração da radiosidade, sendo que a de 300 ciclos demandou aproximadamente 40 minutos, diminuindo o tempo conforme diminuía a quantidade de ciclos. Para os outros protocolos as simulações foram de apenas alguns segundos para o cálculo do fator de forma e da radiosidade, considerando também que poucos ciclos eram suficientes.

#### 4.1- PROTOCOLO 5.8: CRI CALCULADA PARA SUPERFÍCIES DIFUSAS

O protocolo 5.8 verifica a precisão das inter-reflexões dentro de um cômodo cúbico variando-se as refletâncias das superfícies internas.

Após a simulação no módulo Fóton, o APOLUX gera um relatório, solicitado pelo usuário, com vários dados. Entre eles, os que interessam para o cálculo são: (i) a área de cada triângulo gerado no fracionamento, (ii) a iluminância total e (iii) a iluminância inicial no vértice.

Com esses dados, calcula-se a ponderação do acréscimo da radiosidade multiplicado pela diferença das iluminâncias, sendo o fator de ponderação a área do triângulo, então a iluminância do triângulo é dada conforme a Equação 33:

$$E_{\Delta} = S_{\Delta} \cdot (E_{total} - E_{inicial}) \dots\dots\dots \text{Equação 33}$$

Onde:

- $E_{\Delta}$  – Iluminância do triângulo, em lux;
- $S_{\Delta}$  – Área do triângulo, em m<sup>2</sup>;
- $E_{total}$  – Iluminância Total do triângulo, em lux;
- $E_{inicial}$  – Iluminância Inicial do triângulo, em lux;

O cálculo da média ponderada da iluminância indireta se faz então pela Equação 34:

$$E_{av} = \frac{\sum[S_{\Delta} \cdot (E_{total} - E_{inicial})]}{\sum S_{\Delta}} \dots\dots\dots \text{Equação 34}$$

A comparação dos valores obtidos nas simulações do protocolo 5.8 não configura como erro do programa APOLUX e sim como uma limitação da Equação 9, pois é levada em consideração a quantidade de interreflexões. Quanto maior é a refletância, maior a quantidade de interreflexões necessárias para a energia ser absorvida e mais preciso o valor da média de luminância indireta no cômodo.

Analisando os valores de erros dentro da faixa aceitável resumidos na Tabela 11, foram destacados os que estão acima da faixa limite. Os valores negativos ocorrem quando a simulação apresenta valores abaixo aos apresentados pelo protocolo; e os valores positivos quando estão acima.

**Tabela 11:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para os fracionamentos de 0,5, 0,05 e 0,005 nos globos 60, 90 e 150 com 20 ciclos de iterações da radiosidade.

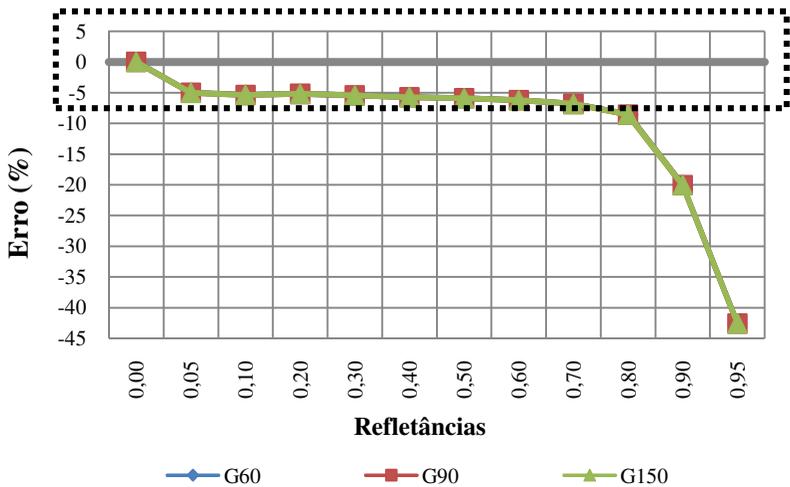
$\rho$	Frac. 0,5			Frac. 0,05			Frac. 0,005		
	G 60	G 90	G 150	G 60	G 90	G 150	G 60	G 90	G 150
<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.05</b>	-5.02	-5.04	-5.03	-0.86	-0.86	-0.85	-0.05	-0.05	-0.05
<b>0.10</b>	-5.36	-5.38	-5.37	-1.16	-1.15	-1.14	-0.32	-0.32	-0.32
<b>0.20</b>	-5.18	-5.20	-5.20	-0.83	-0.83	-0.82	0.05	0.06	0.05
<b>0.30</b>	-5.45	-5.48	-5.47	-0.96	-0.96	-0.94	-0.02	-0.02	-0.02
<b>0.40</b>	-5.72	-5.74	-5.74	-1.07	-1.07	-1.05	-0.07	-0.06	-0.06
<b>0.50</b>	-5.90	-5.93	-5.92	-1.07	-1.06	-1.04	0.01	0.02	0.02
<b>0.60</b>	-6.22	-6.24	-6.24	-1.18	-1.17	-1.15	-0.01	0.00	0.00
<b>0.70</b>	-6.81	-6.84	-6.83	-1.55	-1.54	-1.51	-0.28	-0.27	-0.27
<b>0.80</b>	-8.56	-8.59	-8.58	-3.10	-3.09	-3.06	-1.74	-1.72	-1.72
<b>0.90</b>	-20.04	-20.07	-20.06	-14.99	-14.98	-14.94	-13.68	-13.66	-13.66
<b>0.95</b>	-42.60	-42.62	-42.61	-38.88	-38.86	-38.84	-37.90	-37.88	-37.88

Com a refletância igual a 0% não há a Componente Refletida Interna, então os resultados serão sempre 0,00. As simulações feitas com fracionamento de 0,5 não obtiveram valores aceitáveis, mas ao aumentar a precisão do fracionamento, tanto no 0,05 como no 0,005, os valores aceitáveis ficaram entre as refletâncias 0% a 80%. Para os erros para refletâncias a partir de 90% a justificativa é a insuficiência de ciclos de iterações.

Pelos Gráficos 1, 2 e 3 observa-se a tendência a convergência mais próximo de 0 e dentro do limite estabelecido quando o fracionamento está em 0,05 e 0,005 entre as refletâncias 10% a 80%. Quando o fracionamento é de 0,5 o erro fica mais afastado do eixo 0 a partir de 5% de refletância, mas mantém a mesma curva dos fracionamentos anteriores.

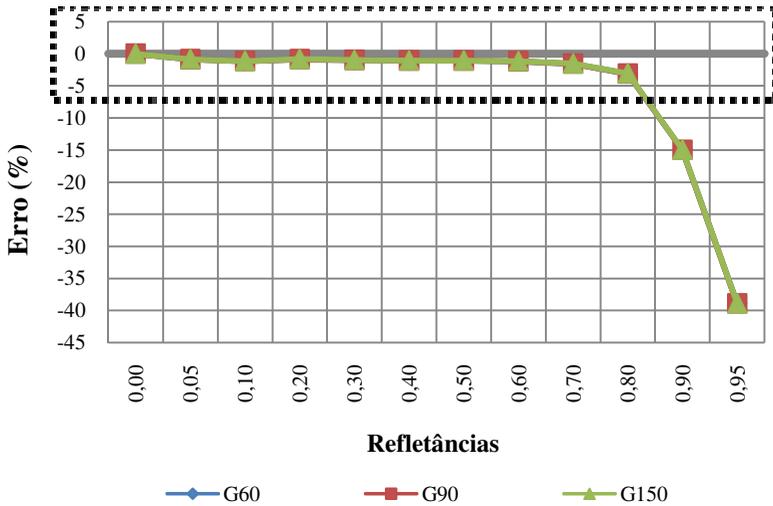
Observa-se também que, independente da resolução da visibilidade (Globos 60, 90 e 150), os resultados ficaram muito próximos dentro de cada grupo de fracionamento<sup>20</sup>, resultando praticamente em superposição dos gráficos.

**Gráfico 1:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,5 nos globos 60, 90 e 150 com 20 ciclos de iterações da radiosidade.

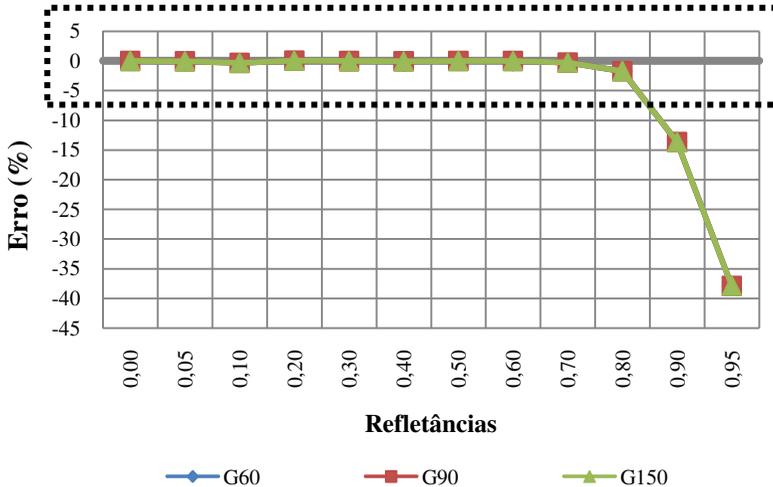


<sup>20</sup> Com a geometria simplificada do ambiente (todos os pontos vêem todos os pontos), os fatores de forma se compensam. Em ambientes de geometria mais complexa, no entanto, as resoluções do globo certamente fazem diferença.

**Gráfico 2:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,05 nos globos 60, 90 e 150 com 20 ciclos de iterações da radiosidade.



**Gráfico 3:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,005 nos globos 60, 90 e 150 com 20 ciclos de iterações da radiosidade.



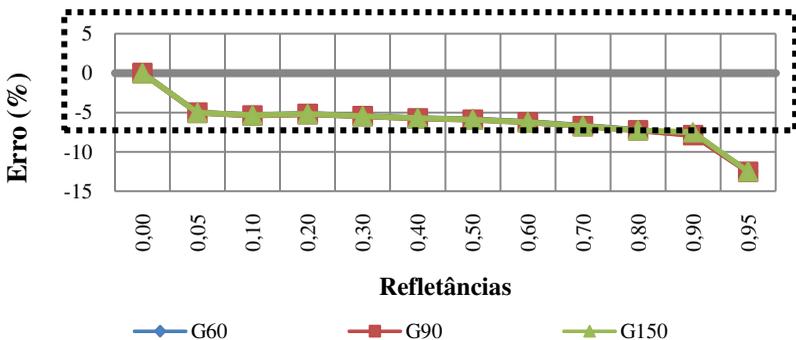
Na Tabela 12 são apresentados os resultados para as três variações de fracionamento das simulações com 60 ciclos de iterações da radiosidade.

**Tabela 12:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para os fracionamentos de 0,5, 0,05 e 0,005 nos globos 60, 90 e 150 com 60 ciclos de iterações da radiosidade.

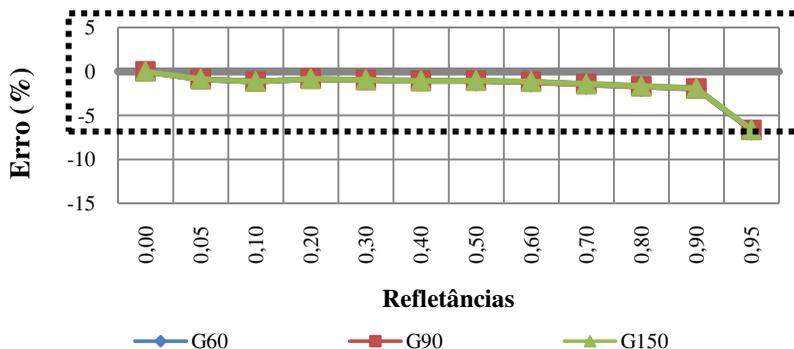
$\rho$	Frac. 0,5			Frac. 0,05			Frac. 0,005		
	G 60	G 90	G 150	G 60	G 90	G 150	G 60	G 90	G 150
<b>0.00</b>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<b>0.05</b>	-5.02	-5.04	-5.03	-0.86	-0.86	-0.85	-0.05	-0.05	-0.05
<b>0.10</b>	-5.36	-5.38	-5.37	-1.16	-1.15	-1.14	-0.32	-0.32	-0.32
<b>0.20</b>	-5.18	-5.20	-5.20	-0.83	-0.83	-0.82	0.05	0.06	0.05
<b>0.30</b>	-5.45	-5.48	-5.47	-0.96	-0.96	-0.94	-0.02	-0.02	-0.02
<b>0.40</b>	-5.72	-5.74	-5.74	-1.07	-1.07	-1.05	-0.07	-0.06	-0.06
<b>0.50</b>	-5.90	-5.93	-5.92	-1.07	-1.06	-1.04	0.01	0.02	0.02
<b>0.60</b>	-6.21	-6.24	-6.23	-1.17	-1.17	-1.14	-0.01	0.01	0.00
<b>0.70</b>	-6.71	-6.73	-6.73	-1.43	-1.43	-1.40	-0.17	-0.15	-0.16
<b>0.80</b>	-7.24	-7.27	-7.26	-1.69	-1.68	-1.65	-0.30	-0.28	-0.29
<b>0.90</b>	-7.86	-7.88	-7.52	-1.95	-1.93	-1.89	-0.42	-0.39	-0.39
<b>0.95</b>	-12.50	-12.52	-12.50	-6.68	-6.65	-6.60	-5.13	-5.09	-5.09

Com a refletância igual a 0% não há a Componente Refletida Interna, então os resultados serão sempre 0,00. Nas refletâncias de 5% a 90%, vale frisar, os erros se encontram abaixo de 10%. Ao aumentar a precisão do fracionamento, tanto no 0,05 como no 0,005, os valores aceitáveis ficaram entre as refletâncias 0% a 90%, sendo que diminuíram consideravelmente do 0,05 para 0,005. Nota-se, ainda, que a variação dos globos não altera significativamente os resultados, pois apresentam variações menores que 0,1%. A seguir os Gráficos 4, 5 e 6 resumem a Tabela 12.

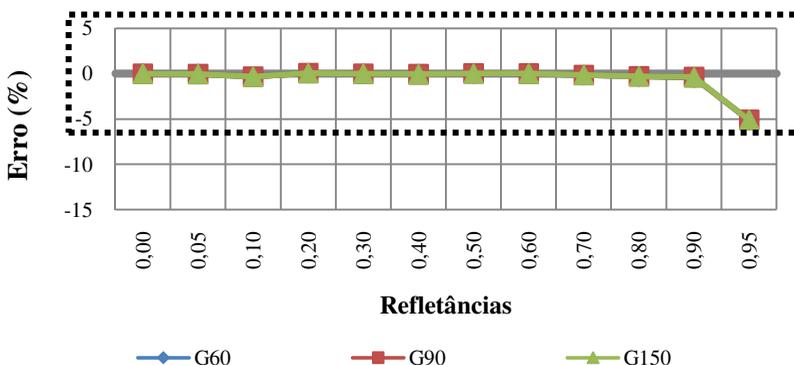
**Gráfico 4:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,5 nos globos 60, 90 e 150 com 60 ciclos de iterações da radiosidade.



**Gráfico 5:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,05 nos globos 60, 90 e 150 com 60 ciclos de iterações da radiosidade.



**Gráfico 6:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para o fracionamento de 0,05 nos globos 60, 90 e 150 com 60 ciclos de iterações da radiosidade.



Pelos Gráficos 4, 5 e 6 observa-se que a tendência a convergência de resultados próxima de 0% se mantém nos fracionamentos de 0,05 e 0,005 e que os erros estão entre 0% e -15% no geral. Observa-se ainda que nas refletâncias de 90% e 95% o erro diminuiu consideravelmente em relação às simulações com 20 ciclos.

Então, ao comparar os Gráficos 1 ao 6, percebe-se que quanto mais ciclos de iteração da radiosidade e quanto menor o fracionamento das superfícies do modelo, mais precisos são os resultados obtidos. Isto é devido a fórmula de cálculo apresentada no relatório, que induz a estes resultados. Refletâncias elevadas exigem número elevado de inter-reflexões (ciclos).

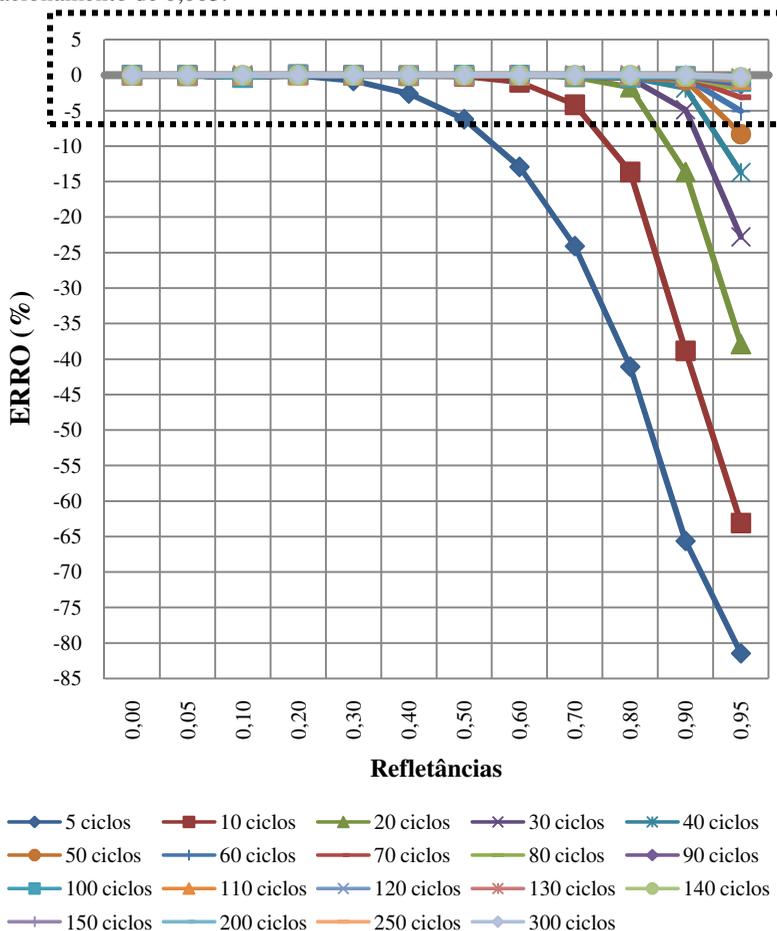
Para confirmar esta afirmação foram feitas simulações, com os parâmetros mais precisos, fixando o fracionamento em 0,005 e a resolução de visibilidade no globo 150 e variando as iterações da radiosidade de 5 a 300 ciclos. Na Tabela 13 são apresentados os resultados destas simulações.

**Tabela 13:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para as variações de ciclos de iterações da radiosidade na resolução de visibilidade do globo 150 com fracionamento de 0,005.

CICLOS	REFLETÂNCIAS											
	0.00	0.05	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50	0.60	0.70	0.80	0.90	0.95
5	0.00	-0.05	-0.33	-0.10	-0.83	-2.62	-6.22	-12.94	-24.11	-41.10	-65.65	-81.48
10	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.09	-0.18	-1.00	-4.18	-13.66	-38.84	-63.10
20	<b>0.00</b>	<b>-0.05</b>	<b>-0.32</b>	<b>0.05</b>	<b>-0.02</b>	<b>-0.06</b>	<b>0.02</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.27</b>	<b>-1.72</b>	<b>-13.66</b>	<b>-37.88</b>
30	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.44	-4.89	-22.78
40	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.30	-1.83	-13.74
50	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.76	-8.33
60	<b>0.00</b>	<b>-0.05</b>	<b>-0.32</b>	<b>0.05</b>	<b>-0.02</b>	<b>-0.06</b>	<b>0.02</b>	<b>0.00</b>	<b>-0.16</b>	<b>-0.29</b>	<b>-0.39</b>	<b>-5.09</b>
70	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.26	-3.15
80	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.21	-1.99
90	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.20	-1.29
100	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.19	-0.88
110	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.19	-0.63
120	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.19	-0.48
130	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.19	-0.39
140	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.19	-0.33
150	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.19	-0.30
200	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.19	-0.26
250	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.19	-0.26
300	0.00	-0.05	-0.32	0.05	-0.02	-0.06	0.02	0.00	-0.16	-0.29	-0.19	-0.26

Ao analisar a Tabela 13, tendo como referência os valores abaixo da linha tracejada, e o Gráfico 7, nota-se que os erros tendem a constante a partir de um número específico de ciclos, conforme o valor da refletância. Observa-se também que, para que os erros fiquem dentro do limite considerado aceitável nas maiores refletâncias, a quantidade de ciclos deve ser superior a 60.

**Gráfico 7:** Protocolo 5.8 - Erros (em %) calculados para as variações de ciclos de iterações da radiosidade na resolução de visibilidade do globo 150 com fracionamento de 0,005.



As Tabelas 14, 15, 16 e 17 a seguir, apresentam o resumo das ocorrências de erros, em %, de todas as simulações realizadas no protocolo 5.8, sendo resumidas no Gráfico 8, confirmando que os resultados são mais precisos ao aumentar a quantidade de ciclos de iterações e ao diminuir o fator de fracionamento das superfícies do modelo. Cada ocorrência é resultado da simulação em uma refletância, um globo e um ciclo

**Tabela 14:** Ocorrência de erros (em %) no protocolo 5.8 para os fracionamentos de 0,5 e 0,005 para todos as resoluções de visibilidade simuladas.

	Fracionamento 0,5						Fracionamento 0,05					
	G 60		G 90		G 150		G 60		G 90		G 150	
	20c	60c	20c	60c	20c	60c	20c	60c	20c	60c	20c	60c
Até 1,00%	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	8.3	33.3	33.3	33.3	33.3	33.3	33.3
De 1,01% até 5,00%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	50.0	58.3	50.0	58.3	50.0	58.3
De 5,01% até 10,00%	75.0	83.3	75.0	83.3	75.0	83.3	0.0	8.3	0.0	8.3	0.0	8.3
Maior que 10,01%	16.7	8.3	16.7	8.3	16.7	8.3	16.7	0.0	16.7	0.0	16.7	0.0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

**Tabela 15:** Ocorrência de erros (em %) no protocolo 5.8 para o fracionamento de 0,005 para todos as resoluções de visibilidade simuladas.

	Fracionamento 0,005											
	G 60		G 90		G 150							
	20c	60c	20c	60c	5c	10c	20c	30c	40c	50c	60c	70c
Até 1,00%	75.0	91.7	75.0	91.7	41.7	58.3	75.0	83.3	83.3	91.7	91.7	91.7
De 1,01% até 5,00%	8.3	0.0	8.3	0.0	8.3	16.7	8.3	8.3	8.3	0.0	0.0	8.3
De 5,01% até 10,00%	0.0	8.3	0.0	8.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	8.3	8.3	0.0
Maior que 10,01%	16.7	0.0	16.7	0.0	41.7	25.0	16.7	8.3	8.3	0.0	0.0	0.0
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>

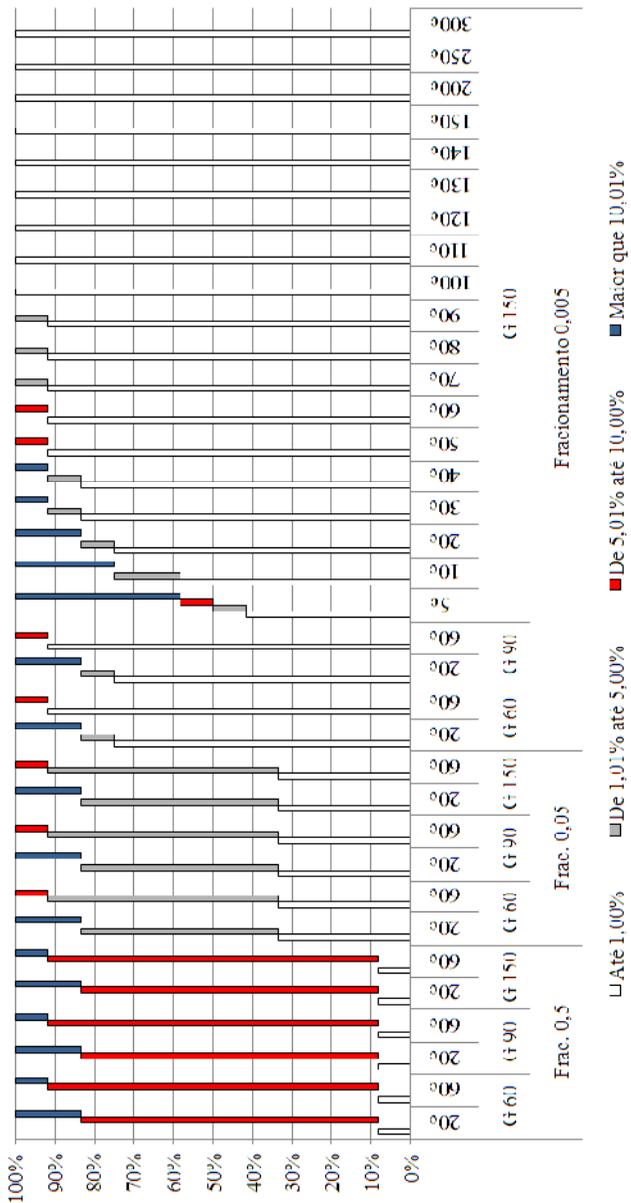
**Tabela 16:** Ocorrência de erros (em %) no protocolo 5.8 para o fracionamento de 0,005 para a resolução de visibilidade do globo 150.

	Fracionamento 0,005											
	G 150											
	80c	90c	100c	110c	120c	130c	140c	150c	200c	250c	300c	
Até 1,00%	91.7	91.7	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
De 1,01% até 5,00%	8.3	8.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
De 5,01% até 10,00%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
Maior que 10,01%	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	

**Tabela 17:** Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.8, para todos os fracionamentos e média geral.

	0,5		0,05		0,005		Geral	
	Oc.	%	Oc.	%	Oc.	%	Oc.	%
Até 1,00%	6	8.33	24	33.33	244	88.41	274	65.24
De 1,01% até 5,00%	0	0.00	39	54.17	11	3.99	50	11.90
De 5,01% até 10,00%	57	79.17	3	4.17	5	1.81	65	15.48
Maior que 10,01%	9	12.50	6	8.33	16	5.80	31	7.38
<b>Total</b>	<b>72</b>	<b>100</b>	<b>72</b>	<b>100</b>	<b>276</b>	<b>100</b>	<b>420</b>	<b>100</b>

Gráfico 8: Protocolo 5.8 – Resumo geral dos erros (em %).



## 4.2- PROTOCOLO 5.9: CC PARA ABERTURA ZENITAL SEM VIDRO E TIPOS GERAIS DE CÉU CIE

O protocolo 5.9 verifica a capacidade de cálculo da Componente Celeste sob as diferentes condições de céu padronizados pela CIE.

Após a simulação foram extraídos do relatório, gerado pelo software, os valores: (i) da iluminância horizontal –  $E_{hz}$ , determinada no plano horizontal e (ii) da iluminância no vértice que corresponde ao ponto de análise –  $E_p$ . Com esses dados calculou-se o Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor*) conforme a Equação 10 e comparou-se com a tabela de referência do CIE. Os resultados são apresentados a seguir.

### 4.2.1- ABERTURA ZENITAL DE 1,00M X 1,00M

A Tabela 18 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos na parede no cenário com abertura de 1,00m x 1,00m. Os valores destacados são aqueles que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 18:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos na parede.

Tipos de Céu	Pontos na parede						
	A	B	C	D	E	F	
CIE 01	G60	-20.17	2.97	-0.48	1.00	0.99	-1.30
	G90	-13.19	-0.32	-0.11	0.35	-0.57	-0.67
	G150	0.57	-1.40	0.05	0.12	-0.16	-0.25
CIE 02	G60	-20.06	2.14	-0.44	0.30	0.67	-1.48
	G90	-12.80	-0.81	-0.22	0.09	-0.76	-0.59
	G150	1.16	-1.99	-0.06	-0.06	-0.26	-0.17
CIE 03	G60	-53.10	18.17	10.19	-8.82	-12.23	70.52
	G90	-49.13	13.84	10.82	-9.52	-13.60	71.54
	G150	-41.11	13.09	11.14	-9.69	-13.23	72.37
CIE 04	G60	-20.30	2.54	-0.59	0.27	0.94	-1.18
	G90	-13.29	-0.87	-0.19	-0.05	-0.51	-0.32
	G150	0.49	-1.67	0.09	-0.19	-0.01	0.13
CIE 05	G60	-19.42	3.00	-0.84	1.07	1.23	-0.79
	G90	-12.64	-1.02	-0.13	0.19	-0.37	-0.23
	G150	1.12	-1.45	0.27	0.04	0.07	0.30
CIE 06	G60	-19.61	2.47	-0.89	0.57	0.90	-1.40
	G90	-12.58	-1.16	-0.33	0.14	-0.56	-0.58
	G150	1.29	-1.76	0.03	0.02	-0.06	-0.10

Continua

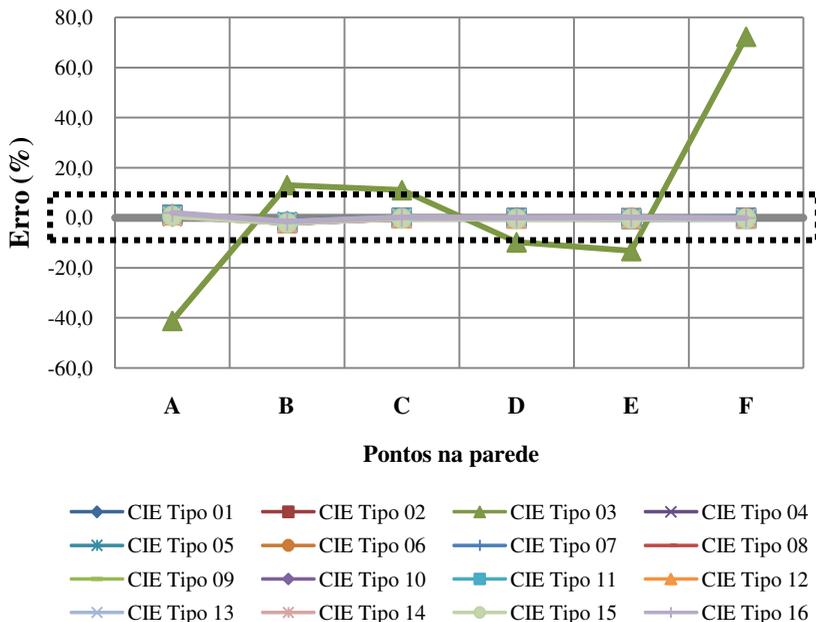
Continuação da Tabela 18

Tipos de Céu		Pontos na parede					
		A	B	C	D	E	F
CIE 07	G60	-19.67	2.21	-0.87	0.02	0.56	-2.25
	G90	-12.52	-1.22	-0.48	-0.05	-0.83	-0.75
	G150	1.41	-1.93	-0.16	-0.15	-0.30	-0.06
CIE 08	G60	-20.22	2.20	-0.89	-0.39	0.49	-2.59
	G90	-12.99	-1.05	-0.62	-0.19	-0.85	-0.90
	G150	0.92	-1.87	-0.32	-0.28	-0.30	-0.22
CIE 09	G60	-19.86	2.56	-1.23	0.60	0.79	-2.20
	G90	-13.01	-1.52	-0.39	-0.07	-0.71	-1.09
	G150	0.72	-1.77	0.13	-0.16	-0.24	-0.33
CIE 10	G60	-19.78	2.29	-1.17	0.07	0.67	-2.29
	G90	-12.80	-1.56	-0.49	-0.23	-0.75	-0.91
	G150	1.02	-1.92	-0.01	-0.29	-0.23	-0.17
CIE 11	G60	-19.86	2.23	-1.05	-0.09	0.37	-2.57
	G90	-12.76	-1.42	-0.50	-0.12	-1.00	-1.00
	G150	1.11	-1.89	-0.04	-0.17	-0.46	-0.27
CIE 12	G60	-19.61	2.15	-1.30	-0.15	0.49	-2.50
	G90	-12.80	-1.72	-0.66	-0.22	-0.88	-0.95
	G150	1.02	-2.02	-0.16	-0.27	-0.34	-0.21
CIE 13	G60	-20.09	2.07	-1.28	-0.23	0.43	-2.57
	G90	-13.20	-1.64	-0.72	-0.18	-0.92	-0.97
	G150	0.59	-2.02	-0.24	-0.21	-0.38	-0.23
CIE 14	G60	-19.69	2.24	-1.34	-0.34	0.40	-2.54
	G90	-13.24	-1.70	-0.71	-0.33	-0.96	-0.96
	G150	0.61	-1.91	-0.19	-0.36	-0.41	-0.22
CIE 15	G60	-19.74	2.05	-1.33	-0.36	0.51	-2.51
	G90	-13.17	-1.77	-0.73	-0.33	-0.84	-0.94
	G150	0.73	-2.03	-0.21	-0.36	-0.29	-0.20
CIE 16	G60	-19.13	2.93	-0.51	0.88	1.27	-1.16
	G90	-11.95	-0.65	-0.07	0.19	-0.30	-0.54
	G150	1.95	-1.46	0.16	0.00	0.12	-0.10

A seguir são apresentados os Gráficos 9, 10 e 11, separados por resolução de visibilidade, que representam a Tabela 18.



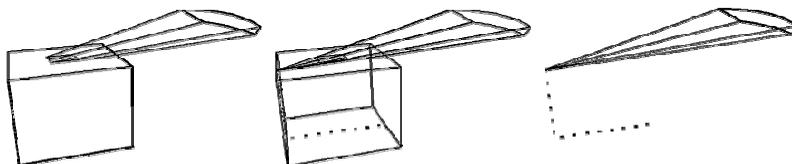
**Gráfico 11:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos na parede



Após a análise da Tabela 18 e dos Gráficos 9, 10 e 11, os erros mais discrepantes foram observados:

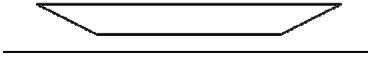
- Ponto A, nos globos 60 e 90;
- Céu tipo 3, para todos os pontos.

Os erros no ponto A são justificados devido ao erro de resolução de visibilidade aliado ao erro de geometria, ambos já definidos por Carvalho (2009). O ponto está tão perto do teto do modelo que os raios visuais traçados através da abertura para a abóbada configuram um ângulo sólido muito pequeno (Figura 46).

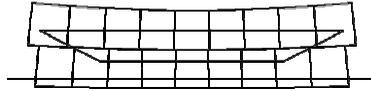


**Figura 46:** Ângulo de visão do ponto A para a abertura zenital 1,00 x 1,00m e a parcela visível da abóbada celeste

Percebe-se que só ocorre nos globos 60 e 90, onde a resolução de visibilidade é menos precisa do que o globo 150, onde este tipo de erro é em menos influente (Figuras 47 a 50).



**Figura 47:** Visualização, a partir do ponto A, da abertura 1,00m x 1,00m.



**Figura 48:** Visualização, a partir do ponto A, de influência do globo dividido em 15 faixas



**Figura 49:** Visualização, a partir do ponto A, de influência do globo dividido em 30 faixas.



**Figura 50:** Visualização, a partir do ponto A, de influência do globo dividido em 60 faixas.

Os valores dos erros no céu tipo 3 são semelhante nos relatórios de validação do software Velux Daylight Visualizer 2, conforme Labayrade et al. (2009) e do AGi32, conforme *Dau Design and Consulting Inc.* (2007), mostrado na Tabela 19 (Estes erros não são computados na contabilidade final).

**Tabela 19:** Comparação dos erros no céu tipo 3 no APOLUX, VELUX e AGi32.

Softwares	Pontos na parede					
	A	B	C	D	E	F
<b>APOLUX G60</b>	-53.10	18.17	10.19	-8.82	-12.23	70.52
<b>APOLUX G90</b>	-49.13	13.84	10.82	-9.52	-13.60	71.54
<b>APOLUX G150</b>	-41.11	13.09	11.14	-9.69	-13.23	72.37
<b>Velux</b>	-43.23	15.22	10.76	-9.77	-12.78	72.99
<b>AGi32</b>	-41.18	13.48	11.26	-9.35	-14.15	72.15

Observando-se a tabela de referência e os resultados obtidos no APOLUX, percebe-se que os valores de referência fornecidos pelo Relatório Técnico estão invertidos, pois os valores obtidos para o ponto A estão bem próximos dos valores de referencia do ponto F, de B com E e de C com D, conforme mostra a graduação na Tabela 20:

**Tabela 20:** Protocolo 5.9 - Comparações dos valores de referência com os obtidos nos softwares APOLUX, VELUX e AGi32 no céu tipo 03.

Softwares		Pontos na parede					
		A	B	C	D	E	F
<b>Referência CIE</b>		<b>1.36</b>	<b>1.78</b>	<b>2.22</b>	<b>2.46</b>	<b>2.05</b>	<b>0.79</b>
APOLUX	<b>Globo 60</b>	0.64	2.10	2.45	2.24	1.80	1.35
	<b>Globo 90</b>	0.69	2.03	2.46	2.23	1.77	1.36
	<b>Globo 150</b>	0.80	2.01	2.47	2.22	1.78	1.36
<b>Velux</b>		0.77	2.05	2.46	2.22	1.79	1.37
<b>AGi32</b>		0.80	2.02	2.47	2.23	1.76	1.36

Reposicionando os valores de referência do céu tipo 3 de acordo com a graduação da Tabela 20, temos:

**Tabela 21:** Valores de referência do céu tipo 3 reposicionados.

		Pontos na parede					
		A	B	C	D	E	F
<b>Referência CIE</b>		<b>0.79</b>	<b>2.05</b>	<b>2.46</b>	<b>2.22</b>	<b>1.78</b>	<b>1.36</b>

A Tabela 22 mostra os erros, em %, recalculados com os valores de referência do céu tipo 03 reposicionados, obtendo-se assim resultados diferentes dos apresentados na Tabela 19 e mais próximos do esperado. Os valores destacados são aqueles que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

Os resultados da Tabela 22 serão considerados como válidos na contabilidade final, substituindo os valores da Tabela 19.

**Tabela 22:** Protocolo 5.9 – Erros em %, no APOLUX, recalculados com os valores de referência do céu tipo 03 reposicionados.

		Pontos na parede					
		A	B	C	D	E	F
<b>CIE</b>		<b>0.79</b>	<b>2.05</b>	<b>2.46</b>	<b>2.22</b>	<b>1.78</b>	<b>1.36</b>
APOLUX	<b>Globo 60</b>	-19.27	2.61	-0.56	1.04	1.09	-0.95
	<b>Globo 90</b>	-12.43	-1.15	0.00	0.26	-0.49	-0.35
	<b>Globo 150</b>	1.37	-1.80	0.30	0.08	-0.07	0.13

A seguir, a Tabela 23 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos no piso no cenário com abertura de 1,00m x 1,00m. Não houve valores que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 23:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos no piso.

Tipos de Céu		Pontos no piso							
		G	H	I	J	K	L	M	N
CIE 01	G60	-2.62	1.11	0.42	1.26	1.26	0.42	1.11	-2.62
	G90	1.77	-1.08	-1.60	-0.32	-0.32	-1.60	-1.08	1.77
	G150	0.09	-0.22	-0.22	-0.28	-0.28	-0.22	-0.22	0.09
CIE 02	G60	-2.87	1.11	0.75	1.19	1.49	0.63	1.24	-2.44
	G90	1.42	-1.04	-1.53	-0.28	-0.30	-1.33	-1.13	1.81
	G150	-0.17	-0.30	-0.16	-0.31	-0.31	-0.02	-0.25	0.16
CIE 03	G60	-2.79	1.05	0.47	1.08	1.08	0.47	1.05	-2.79
	G90	1.62	-1.14	-1.57	-0.51	-0.51	-1.57	-1.14	1.62
	G150	-0.05	-0.27	-0.16	-0.45	-0.45	-0.16	-0.27	-0.05
CIE 04	G60	-2.88	1.24	0.70	1.21	1.54	0.42	1.21	-2.65
	G90	1.44	-0.91	-1.59	-0.26	-0.26	-1.55	-1.15	1.61
	G150	-0.17	-0.18	-0.22	-0.30	-0.27	-0.25	-0.28	-0.06
CIE 05	G60	-2.62	1.20	0.63	1.08	1.08	0.63	1.20	-2.62
	G90	1.82	-0.99	-1.43	-0.52	-0.52	-1.43	-0.99	1.82
	G150	0.15	-0.10	0.01	-0.44	-0.44	0.01	-0.10	0.15
CIE 06	G60	-2.96	1.19	0.92	1.23	1.49	0.54	1.50	-2.71
	G90	1.39	-0.94	-1.40	-0.25	-0.31	-1.45	-0.86	1.57
	G150	-0.24	-0.22	-0.02	-0.28	-0.33	-0.14	0.01	-0.11
CIE 07	G60	-3.74	0.55	1.30	1.42	1.86	0.72	1.55	-2.45
	G90	1.00	-1.16	-1.31	0.01	-0.13	-1.26	-0.94	1.76
	G150	-0.34	-0.38	0.02	-0.14	-0.23	-0.04	-0.10	0.05
CIE 08	G60	-3.67	0.67	1.54	1.48	2.32	0.81	1.67	-2.03
	G90	1.03	-1.00	-1.28	0.13	0.17	-1.16	-0.93	2.12
	G150	-0.26	-0.30	0.03	-0.10	0.01	0.00	-0.10	0.38
CIE 09	G60	-3.70	0.49	1.02	1.22	1.66	0.59	1.62	-2.78
	G90	1.19	-1.23	-1.37	-0.28	-0.17	-1.46	-0.72	1.57
	G150	-0.26	-0.34	0.02	-0.33	-0.19	-0.14	0.11	-0.17
CIE 10	G60	-3.64	0.57	1.23	1.53	1.86	0.88	1.73	-2.58
	G90	1.19	-1.09	-1.44	0.11	-0.14	-1.15	-0.73	1.69
	G150	-0.20	-0.33	-0.09	-0.05	-0.25	0.08	0.08	-0.07
CIE 11	G60	-3.63	0.64	1.52	1.63	2.25	1.10	2.14	-1.91
	G90	1.15	-0.99	-1.36	0.26	0.09	-0.93	-0.45	2.31
	G150	-0.20	-0.31	-0.05	0.01	-0.08	0.24	0.35	0.52

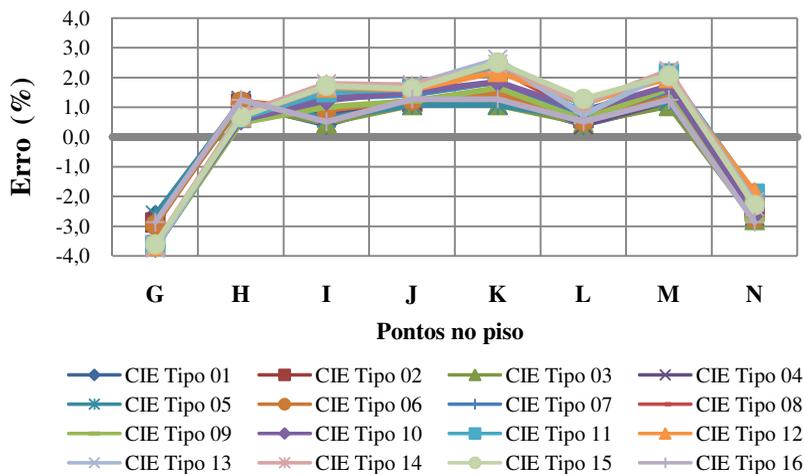
Continua

Continuação da Tabela 23

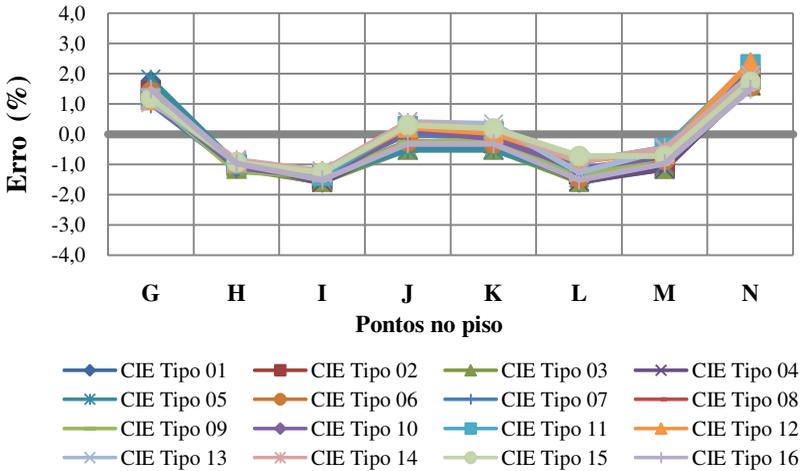
Tipos de Céu	Pontos no piso								
	G	H	I	J	K	L	M	N	
CIE 12	G60	-3.67	0.69	1.67	1.59	2.19	1.14	1.99	-1.86
	G90	1.13	-0.94	-1.22	0.22	0.03	-0.90	-0.59	2.37
	G150	-0.24	-0.27	0.10	-0.03	-0.15	0.27	0.20	0.58
CIE 13	G60	-3.73	0.74	1.70	1.75	2.61	0.75	2.17	-2.19
	G90	1.05	-0.88	-1.28	0.41	0.34	-1.26	-0.51	1.95
	G150	-0.30	-0.24	0.02	0.11	0.12	-0.16	0.26	0.14
CIE 14	G60	-3.62	0.77	1.79	1.74	2.45	1.13	2.24	-2.34
	G90	1.18	-0.84	-1.21	0.40	0.18	-0.90	-0.45	1.79
	G150	-0.18	-0.21	0.10	0.09	-0.04	0.21	0.32	-0.02
CIE 15	G60	-3.61	0.68	1.73	1.62	2.51	1.29	2.06	-2.29
	G90	1.19	-0.94	-1.27	0.29	0.19	-0.73	-0.72	1.73
	G150	-0.17	-0.29	0.04	-0.02	-0.06	0.34	0.04	-0.09
CIE 16	G60	-2.86	1.25	0.52	1.28	1.28	0.52	1.25	-2.86
	G90	1.49	-0.97	-1.51	-0.32	-0.32	-1.51	-0.97	1.49
	G150	-0.15	-0.08	-0.11	-0.25	-0.25	-0.11	-0.08	-0.15

A seguir são apresentados os Gráficos 12, 13 e 14, separados por resolução de visibilidade, que representam os resultados da Tabela 23.

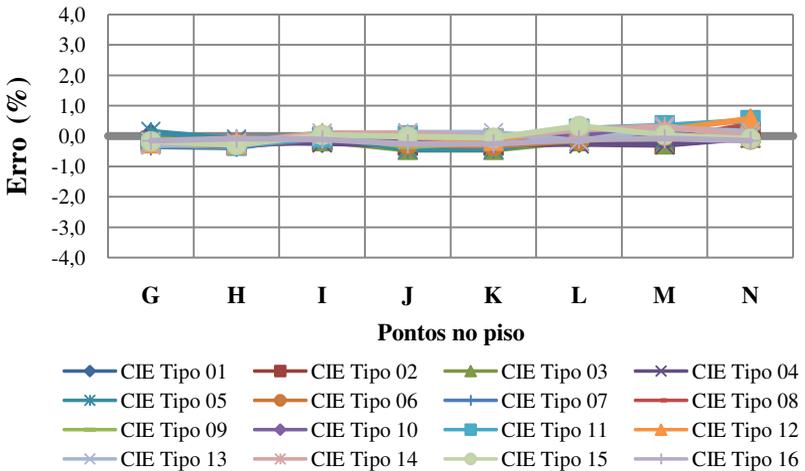
**Gráfico 12:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos no piso.



**Gráfico 13:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos no piso.



**Gráfico 14:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura zenital de 1,00m x 1,00m – Pontos no piso.



Conforme mostrado na Tabela 23 e nos Gráficos 12, 13 e 14, para os pontos no piso, todos os erros ficaram abaixo da faixa de  $\pm 5\%$ , sendo que os resultados mais precisos são observados no globo 150.

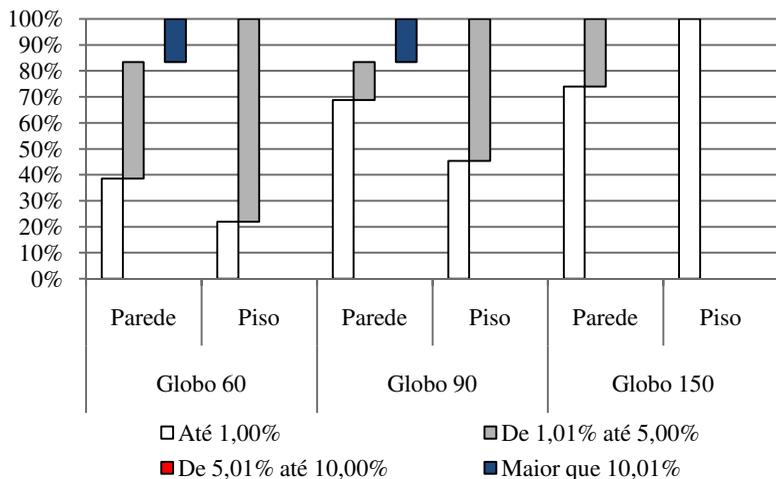
A Tabela 24 mostra a faixa de ocorrência de erros (cada ocorrência é um resultado da simulação de um ponto em um tipo de

céu), para o cenário com abertura 1,00m x 1,00m, considerando os resultados do céu tipo 3 mostrados na Tabela 22, e encontra-se resumida no Gráfico 15.

**Tabela 24:** Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.9, abertura zenital de 1,00m x 1,00m.

		Parede		Piso	
		Ocor.	%	Ocor.	%
Globo 60	Até 1,00%	37	38.54	28	21.88
	De 1,01% até 5,00%	43	44.79	100	78.13
	De 5,01% até 10,00%	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	16	16.67	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>
Globo 90	Até 1,00%	66	68.75	58	45.31
	De 1,01% até 5,00%	14	14.58	70	54.69
	De 5,01% até 10,00%	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	16	16.67	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>
Globo 150	Até 1,00%	71	73.96	128	100.00
	De 1,01% até 5,00%	25	26.04	0	0.00
	De 5,01% até 10,00%	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>

**Gráfico 15:** Protocolo 5.9 – Abertura 1,00m x 1,00m: Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60, 90 e 150 para os pontos no piso e na parede.



A Tabela 24 mostra que 83,33% dos erros nos pontos na parede, nos globos 60 e 90, ficaram abaixo de 5% sendo que abaixo de 1% no globo 60 são 38,54% e 68,75% no globo 90. Os erros acima de 10,01%, relativos ao ponto A, são os mesmos tanto para globo 60 como para o globo 90, justificados anteriormente. Para os resultados no globo 150, todos ficaram abaixo de 5%, sendo que 73,96% estão abaixo de 1%.

Os resultados para os pontos no piso mostraram-se todos abaixo da faixa limite, sendo mais precisos ao aumento da resolução de visibilidade.

#### 4.2.2- ABERTURA ZENITAL DE 4,00M X 4,00M

A Tabela 25 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos na parede. Os valores destacados são aqueles que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 25:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos na parede.

Tipos de Céu	Pontos na Parede						
	A	B	C	D	E	F	
CIE 01	G60	-5.05	-0.57	-0.35	-0.15	-0.30	0.34
	G90	-5.35	-0.62	0.00	-0.12	0.12	-0.08
	G150	-5.37	-0.58	-0.17	0.05	-0.01	-0.04
CIE 02	G60	-3.97	-0.62	-0.55	-0.31	-0.35	0.00
	G90	-4.12	-0.58	-0.19	-0.21	0.07	-0.30
	G150	-4.06	-0.48	-0.26	0.00	0.02	-0.20
CIE 03	G60	-3.78	-0.48	-0.39	-0.16	-0.33	0.36
	G90	-4.25	-0.56	0.08	-0.14	0.13	-0.09
	G150	-4.27	-0.48	-0.13	0.08	0.00	-0.03
CIE 04	G60	-3.10	-0.56	-0.60	-0.35	-0.40	0.02
	G90	-3.39	-0.55	-0.14	-0.26	0.07	-0.31
	G150	-3.34	-0.43	-0.26	-0.02	0.00	-0.21
CIE 05	G60	-2.93	-0.40	-0.45	-0.22	-0.37	0.44
	G90	-3.50	-0.51	0.11	-0.21	0.14	-0.05
	G150	-3.51	-0.39	-0.12	0.07	0.01	0.02
CIE 06	G60	-2.43	-0.51	-0.62	-0.38	-0.44	0.10
	G90	-2.80	-0.51	-0.08	-0.29	0.07	-0.26
	G150	-2.76	-0.37	-0.24	-0.02	0.00	-0.16

Continua

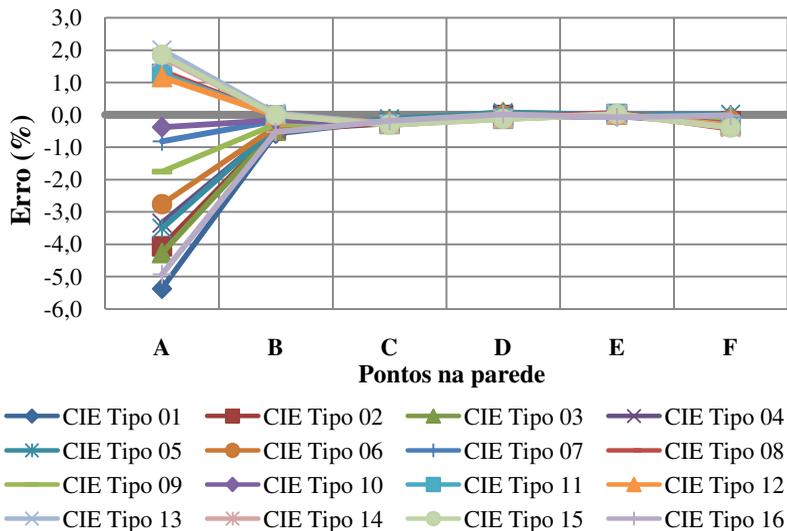
Continuação da Tabela 25

Tipos de Céu		Pontos na Parede					
		A	B	C	D	E	F
CIE 07	G60	-0.65	-0.41	-0.71	-0.50	-0.49	-0.24
	G90	-0.90	-0.35	-0.19	-0.35	0.04	-0.48
	G150	-0.82	-0.19	-0.27	-0.06	0.02	-0.33
CIE 08	G60	1.40	-0.30	-0.78	-0.56	-0.47	-0.43
	G90	1.24	-0.19	-0.28	-0.38	0.04	-0.60
	G150	1.36	-0.01	-0.31	-0.09	0.07	-0.43
CIE 09	G60	-1.20	-0.43	-0.73	-0.47	-0.59	0.15
	G90	-1.80	-0.47	0.02	-0.38	0.05	-0.26
	G150	-1.76	-0.29	-0.22	-0.02	-0.05	-0.14
CIE 10	G60	0.01	-0.36	-0.79	-0.56	-0.60	-0.11
	G90	-0.45	-0.35	-0.10	-0.42	0.01	-0.42
	G150	-0.38	-0.16	-0.27	-0.07	-0.04	-0.27
CIE 11	G60	1.51	-0.29	-0.83	-0.64	-0.57	-0.27
	G90	1.16	-0.23	-0.18	-0.47	0.03	-0.51
	G150	1.27	-0.02	-0.28	-0.12	0.02	-0.34
CIE 12	G60	1.59	-0.29	-0.83	-0.64	-0.59	-0.24
	G90	1.07	-0.25	-0.12	-0.47	0.03	-0.49
	G150	1.17	-0.02	-0.25	-0.10	0.01	-0.32
CIE 13	G60	2.31	-0.27	-0.89	-0.66	-0.59	-0.35
	G90	1.89	-0.19	-0.20	-0.47	0.02	-0.57
	G150	2.01	0.04	-0.30	-0.11	0.02	-0.39
CIE 14	G60	2.45	-0.32	-0.92	-0.69	-0.62	-0.32
	G90	1.68	-0.26	-0.17	-0.50	0.01	-0.56
	G150	1.78	0.00	-0.30	-0.13	0.00	-0.38
CIE 15	G60	2.40	-0.35	-0.94	-0.70	-0.61	-0.35
	G90	1.72	-0.27	-0.21	-0.51	0.02	-0.58
	G150	1.85	0.00	-0.31	-0.13	0.02	-0.39
CIE 16	G60	-4.59	-0.52	-0.40	-0.20	-0.38	0.35
	G90	-4.92	-0.59	0.00	-0.18	0.04	-0.08
	G150	-4.93	-0.53	-0.18	0.02	-0.07	-0.02

A seguir os Gráficos 16, 17 e 18 resumem a Tabela 25, separados por resolução de visibilidade.



**Gráfico 18:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos na parede.



Nos Gráficos 16, 17 e 18 e na Tabela 25 acima, os erros mais discrepantes foram observados no céu tipo 1, ponto A, em todas as resoluções de visibilidade. Estas discrepâncias também aconteceram de forma semelhante em Labayrade et al. (2009), mostrado na Tabela 26 abaixo:

**Tabela 26:** Comparação dos erros (em %) no céu tipo 1 no APOLUX e no Velux Daylight Visualizer 2.

	A	B	C	D	E	F
<b>APOLUX G60</b>	<b>-5.05</b>	-0.57	-0.35	-0.15	-0.30	0.34
<b>APOLUX G90</b>	<b>-5.35</b>	-0.62	0.00	-0.12	0.12	-0.08
<b>APOLUX G150</b>	<b>-5.37</b>	-0.58	-0.17	0.05	-0.01	-0.04
<b>Velux</b>	<b>-5.20</b>	-0.59	-0.27	-0.02	-0.09	-0.08

O valor da referência do Relatório Técnico pode estar equivocado para o ponto A no céu CIE tipo 1. A Tabela 27 a seguir mostra os valores de referência dos protocolos 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 para comparação. Observa-se que há uma grande variação na seqüência dos valores, pois para os outros pontos o APOLUX convergiu para abaixo de  $\pm 1\%$  sem alteração significativa entre as resoluções de visibilidade. Estes erros do ponto A não são computados na contabilidade final.

**Tabela 27:** Comparação dos valores de referência entre os protocolos 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 nos pontos A, B e C no céu tipo 1 e no APOLUX com o globo 150.

Pontos	Protocolos								
	5.9			5.10		5.11		5.12	
	1x1	4x4	Apolux	1x1	4x4	2x1	4x3	2x1	4x3
A	0.46	37.84	35.81	0.15	28.64	0,95	5.25	0.84	4.62
B	1.64	31.72	31.54	1.17	25.36	1.06	6.11	0.94	5.38
C	2.34	26.85	26.81	1.91	22.25	1.25	6.98	1.10	6.15

A seguir, a Tabela 28 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos no piso no cenário com abertura de 4,00m x 4,00m. Os valores destacados são aqueles que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 28:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos no piso.

Tipos de Céu		Pontos no piso							
		G	H	I	J	K	L	M	N
CIE 01	G60	0.12	0.18	0.27	0.00	-0.09	0.10	-0.07	0.03
	G90	0.42	0.34	0.27	0.28	0.27	0.17	0.12	0.10
	G150	0.29	0.31	0.24	0.17	0.14	0.17	0.21	0.15
CIE 02	G60	0.02	0.21	0.20	0.14	-0.01	0.33	-0.01	0.24
	G90	0.23	0.31	0.15	0.40	0.27	0.28	0.15	0.20
	G150	0.16	0.31	0.15	0.23	0.11	0.24	0.18	0.21
CIE 03	G60	0.10	0.17	0.26	0.00	-0.09	0.09	-0.08	0.01
	G90	0.41	0.33	0.26	0.29	0.28	0.17	0.11	0.11
	G150	0.30	0.31	0.24	0.18	0.16	0.17	0.22	0.17
CIE 04	G60	0.00	0.19	0.19	0.13	-0.01	0.32	0.00	0.24
	G90	0.22	0.29	0.14	0.40	0.27	0.28	0.16	0.21
	G150	0.14	0.29	0.13	0.22	0.10	0.23	0.19	0.21
CIE 05	G60	0.11	0.20	0.29	0.02	-0.07	0.12	-0.05	0.02
	G90	0.42	0.35	0.27	0.31	0.31	0.19	0.14	0.13
	G150	0.33	0.36	0.27	0.21	0.20	0.21	0.27	0.22
CIE 06	G60	0.01	0.24	0.24	0.15	0.01	0.35	0.02	0.26
	G90	0.24	0.34	0.18	0.43	0.30	0.31	0.18	0.25
	G150	0.17	0.34	0.18	0.24	0.12	0.26	0.22	0.26
CIE 07	G60	-0.06	0.23	0.18	0.24	0.10	0.66	0.15	0.50
	G90	0.14	0.32	0.10	0.54	0.35	0.46	0.26	0.37
	G150	0.10	0.34	0.13	0.31	0.14	0.36	0.22	0.31

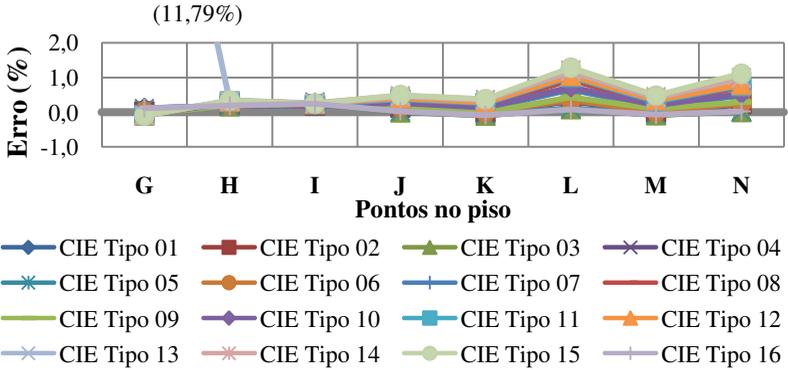
Continua

Continuação da Tabela 28

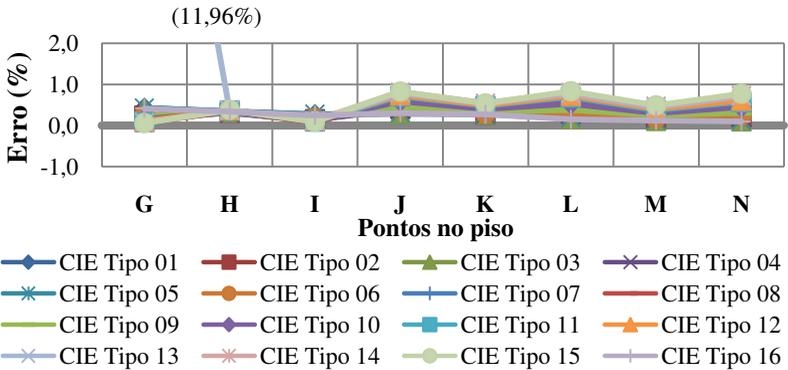
Tipos de Céu		Pontos no piso							
		G	H	I	J	K	L	M	N
CIE 08	G60	-0.08	0.27	0.18	0.33	0.21	0.93	0.25	0.73
	G90	0.07	0.34	0.08	0.64	0.40	0.61	0.31	0.51
	G150	0.05	0.37	0.12	0.37	0.15	0.47	0.21	0.39
CIE 09	G60	-0.06	0.21	0.24	0.12	-0.01	0.43	0.10	0.30
	G90	0.23	0.32	0.17	0.44	0.33	0.38	0.24	0.31
	G150	0.18	0.36	0.20	0.26	0.15	0.32	0.28	0.31
CIE 10	G60	-0.07	0.26	0.22	0.26	0.14	0.72	0.20	0.53
	G90	0.15	0.34	0.12	0.59	0.40	0.52	0.29	0.44
	G150	0.12	0.38	0.15	0.34	0.17	0.41	0.26	0.39
CIE 11	G60	-0.09	0.31	0.23	0.38	0.27	1.02	0.31	0.76
	G90	0.08	0.37	0.10	0.71	0.48	0.69	0.37	0.57
	G150	0.07	0.42	0.15	0.41	0.20	0.54	0.27	0.46
CIE 12	G60	-0.08	0.32	0.26	0.41	0.28	1.05	0.35	0.79
	G90	0.10	0.38	0.12	0.74	0.49	0.72	0.40	0.61
	G150	0.09	0.44	0.18	0.44	0.22	0.57	0.30	0.50
CIE 13	G60	11.79	0.34	0.24	0.45	0.36	1.19	0.42	0.98
	G90	11.96	0.39	0.10	0.79	0.53	0.77	0.45	0.71
	G150	11.95	0.44	0.15	0.46	0.23	0.59	0.29	0.55
CIE 14	G60	-0.09	0.32	0.26	0.48	0.37	1.22	0.45	1.00
	G90	0.07	0.36	0.11	0.82	0.54	0.80	0.47	0.73
	G150	0.07	0.43	0.17	0.48	0.24	0.62	0.32	0.57
CIE 15	G60	-0.09	0.34	0.25	0.49	0.38	1.28	0.48	1.10
	G90	0.05	0.37	0.09	0.82	0.54	0.83	0.48	0.77
	G150	0.06	0.44	0.15	0.48	0.22	0.63	0.30	0.57
CIE 16	G60	0.12	0.19	0.25	0.03	-0.08	0.08	-0.07	0.03
	G90	0.41	0.34	0.25	0.30	0.27	0.15	0.12	0.10
	G150	0.30	0.32	0.23	0.20	0.15	0.15	0.22	0.16

A seguir os Gráficos 19, 20 e 21 resumem a Tabela 28, separados por resolução de visibilidade.

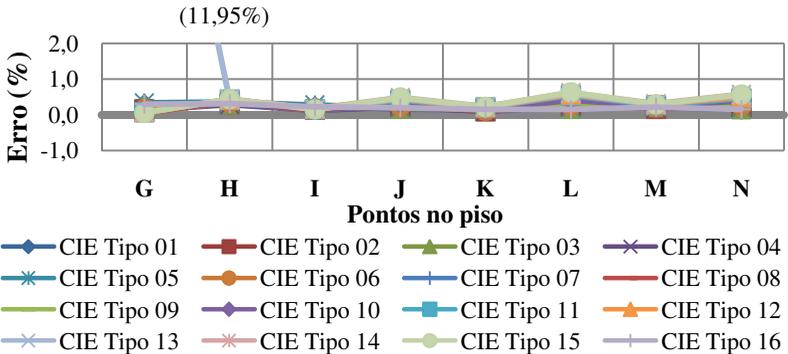
**Gráfico 19:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos no piso.



**Gráfico 20:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos no piso.



**Gráfico 21:** Protocolo 5.9 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura zenital de 4,00m x 4,00m – Pontos no piso.



Nos Gráficos 19, 20 e 21 e Tabela 28 acima, os erros mais discrepantes foram observados no céu tipo 13, ponto G, em todas as resoluções de visibilidade. Estas discrepâncias também foram notadas por Labayrade et al. (2009), mostrado na Tabela 29 a seguir.

**Tabela 29:** Comparação dos erros (em %) no céu tipo 13 no APOLUX e no Velux Daylight Visualizer 2.

	G	H	I	J	K	L	M	N
<b>APOLUX G60</b>	<b>11.79</b>	0.34	0.24	0.45	0.36	1.19	0.42	0.98
<b>APOLUX G90</b>	<b>11.96</b>	0.39	0.10	0.79	0.53	0.77	0.45	0.71
<b>APOLUX G150</b>	<b>11.95</b>	0.44	0.15	0.46	0.23	0.59	0.29	0.55
<b>Velux</b>	<b>11.59</b>	0.17	-0.19	0.19	-0.11	0.08	-0.22	-0.17

O valor da referência do Relatório Técnico também pode estar equivocada para o ponto G no céu CIE tipo 13. A Tabela 30 a seguir mostra os valores de referência dos protocolos 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 para comparação. Observa-se que há uma variação muito grande na seqüência dos valores, pois para os outros pontos o APOLUX convergiu para abaixo de  $\pm 1\%$  sem alteração significativa entre as resoluções de visibilidade. Estes erros do ponto G não serão computados na contabilidade final.

**Tabela 30:** Comparação dos valores de referência entre os protocolos 5.9, 5.10, 5.11 e 5.12 nos pontos G, H e I no céu tipo 13 e no APOLUX com o globo 150.

Pontos	Protocolos								
	5.9			5.10		5.11		5.12	
	1x1	4x4	Apolux	1x1	4x4	2x1	4x3	2x1	4x3
<b>G</b>	6.76	<b>42.07</b>	<b>47.10</b>	5.91	41.10	2.00	9.38	1.76	8.21
<b>H</b>	7.01	48.25	48.46	6.16	42.22	2.85	12.66	2.50	11.05
<b>I</b>	5.80	47.47	47.54	5.10	41.60	4.21	17.43	3.69	15.15

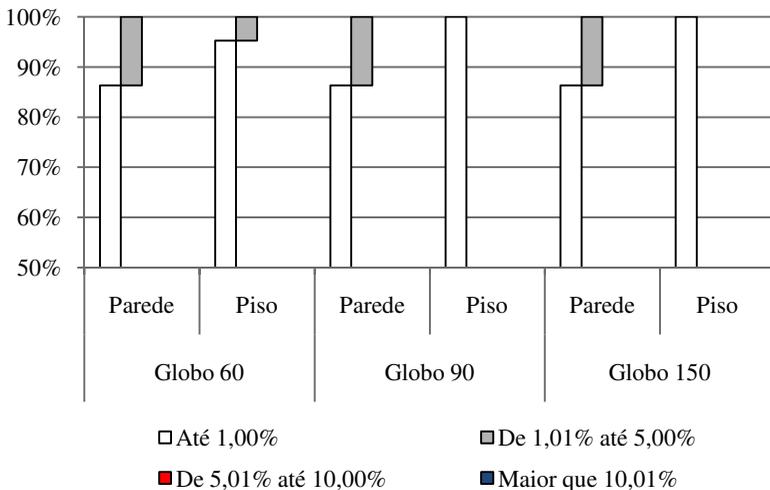
A seguir, a Tabela 31 mostra as ocorrências de erros (cada ocorrência é um resultado da simulação de um ponto em um tipo de céu). A totalidade das ocorrências, exceto as não contabilizadas devido a equívocos do relatório, ficaram abaixo de 5%.

A Tabela 31 encontra-se resumida no Gráfico 22.

**Tabela 31:** Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.9, abertura zenital de 4,00m x 4,00m.

		Parede		Piso	
		Ocor.	%	Ocor.	%
Globo 60	Até 1,00%	82	86.32	121	95.28
	De 1,01% até 5,00%	13	13.68	6	4.72
	De 5,01% até 10,00%	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>95</b>	<b>100.00</b>	<b>127</b>	<b>100.00</b>
Globo 90	Até 1,00%	82	86.32	127	100.00
	De 1,01% até 5,00%	13	13.68	0	0.00
	De 5,01% até 10,00%	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>95</b>	<b>100.00</b>	<b>127</b>	<b>100.00</b>
Globo 150	Até 1,00%	82	86.32	127	100.00
	De 1,01% até 5,00%	13	13.68	0	0.00
	De 5,01% até 10,00%	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>95</b>	<b>100.00</b>	<b>127</b>	<b>100.00</b>

**Gráfico 22:** Protocolo 5.9 – Abertura 4,00m x 4,00m: Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60, 90 e 150 para os pontos no piso e na parede.



### 4.3- PROTOCOLO 5.11: CC E CRE PARA UMA ABERTURA SEM VIDRO NA FACHADA

O protocolo 5.11 verifica a capacidade de cálculo da Componente Celeste e da Componente Refletida Externa, proveniente do solo, sob as diferentes condições de céu padronizados pela CIE.

Após a simulação foram extraídos do relatório, gerado pelo software, os valores: (i) da iluminância horizontal –  $E_{hz}$ , medida pelo plano horizontal e (ii) da iluminância no vértice que corresponde ao ponto de análise –  $E_p$ . Com esses dados calculou-se o Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor*) conforme a Equação 10 e comparou-se com a tabela de referência do CIE. Os resultados são apresentados a seguir.

#### 4.3.1- ABERTURA LATERAL DE 2,00M X 1,00

A Tabela 32 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos na parede. Os valores destacados são aqueles que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 32:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos na parede.

Tipo de Céu		Pontos na parede					
		A	B	C	D	E	F
CIE 01	G60	3.55	5.40	-8.26	-6.37	5.25	3.62
	G90	-0.70	-4.49	3.43	2.28	-4.84	-0.60
	G150	-0.66	0.20	0.49	0.38	-0.05	-0.95
CIE 02	G60	3.56	5.40	-8.03	-6.96	4.55	3.60
	G90	-0.70	-4.49	2.81	2.53	-5.31	-0.49
	G150	-0.64	0.21	0.19	0.44	-0.43	-0.89
CIE 03	G60	3.56	5.40	-10.06	-5.21	4.99	3.57
	G90	-0.69	-4.48	4.83	1.63	-4.92	-0.68
	G150	-0.64	0.21	0.79	0.37	-0.21	-0.74
CIE 04	G60	3.56	5.40	-10.11	-5.69	4.88	3.33
	G90	-0.69	-4.48	3.90	1.77	-4.79	-0.76
	G150	-0.65	0.21	0.18	0.39	-0.01	-0.89
CIE 05	G60	3.55	5.39	-11.16	-4.78	5.18	3.43
	G90	-0.70	-4.48	5.35	1.43	-4.67	-0.81
	G150	-0.64	0.22	0.75	0.41	0.03	-0.74

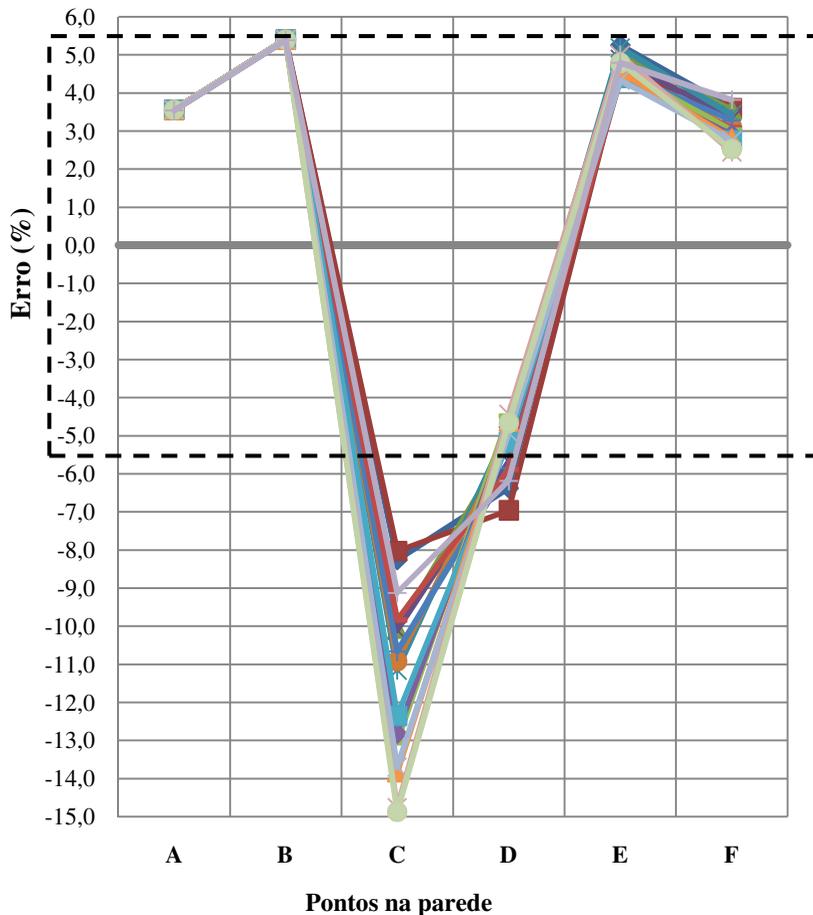
Continua

Continuação da Tabela 32

Tipo de Céu		Pontos na parede					
		A	B	C	D	E	F
CIE 06	G60	3.56	5.40	-10.92	-5.14	4.65	3.07
	G90	-0.69	-4.48	4.86	1.59	-4.91	-1.01
	G150	-0.65	0.21	0.53	0.47	-0.18	-1.02
CIE 07	G60	3.56	5.40	-10.67	-5.85	4.55	3.28
	G90	-0.69	-4.48	4.17	1.30	-4.93	-0.76
	G150	-0.65	0.21	0.17	0.05	-0.17	-0.83
CIE 08	G60	3.56	5.40	-9.84	-5.89	4.35	3.09
	G90	-0.70	-4.48	4.15	1.78	-5.05	-0.88
	G150	-0.65	0.21	0.45	0.39	-0.26	-1.00
CIE 09	G60	3.56	5.40	-13.06	-4.49	4.62	3.03
	G90	-0.70	-4.48	6.04	1.13	-4.90	-1.11
	G150	-0.64	0.21	0.56	0.39	-0.22	-0.90
CIE 10	G60	3.56	5.40	-12.82	-4.76	4.38	2.91
	G90	-0.70	-4.48	5.56	1.16	-5.01	-1.14
	G150	-0.65	0.21	0.33	0.34	-0.32	-1.00
CIE 11	G60	3.56	5.40	-12.35	-5.17	4.40	2.75
	G90	-0.70	-4.48	5.30	1.07	-4.91	-1.23
	G150	-0.65	0.21	0.33	0.17	-0.18	-1.13
CIE 12	G60	3.56	5.40	-13.84	-4.63	4.55	2.80
	G90	-0.70	-4.48	5.85	0.86	-5.10	-1.25
	G150	-0.65	0.21	0.19	0.24	-0.26	-1.00
CIE 13	G60	3.56	5.40	-13.70	-4.93	4.33	2.75
	G90	-0.69	-4.48	5.48	0.79	-5.19	-1.24
	G150	-0.65	0.21	0.00	0.12	-0.34	-1.04
CIE 14	G60	3.56	5.40	-14.76	-4.44	5.00	2.46
	G90	-0.69	-4.48	6.34	0.23	-5.93	-1.62
	G150	-0.65	0.21	0.31	-0.04	-0.62	-1.25
CIE 15	G60	3.56	5.40	-14.88	-4.66	4.79	2.53
	G90	-0.70	-4.48	6.10	0.18	-5.91	-1.50
	G150	-0.64	0.21	0.13	-0.10	-0.62	-1.15
CIE 16	G60	3.54	5.38	-9.12	-6.18	4.79	3.82
	G90	-0.71	-4.49	3.32	2.13	-4.58	-0.39
	G150	-0.64	0.21	0.09	0.33	-0.04	-0.59

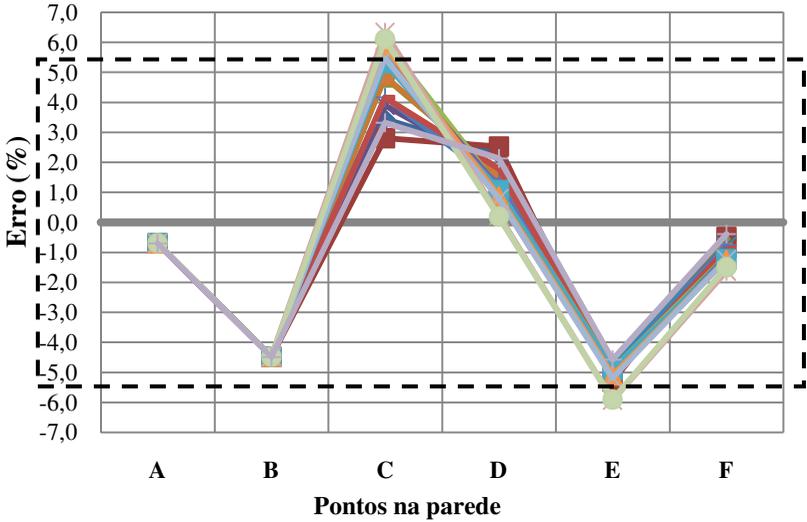
A seguir os Gráficos 23, 24 e 25 resumem a Tabela 32, separados por resolução de visibilidade.

**Gráfico 23:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos na parede.

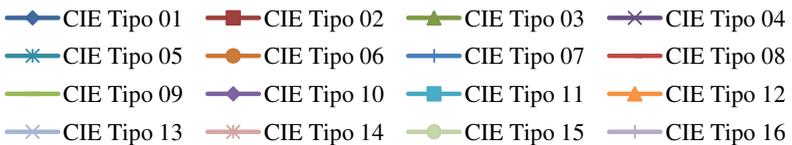
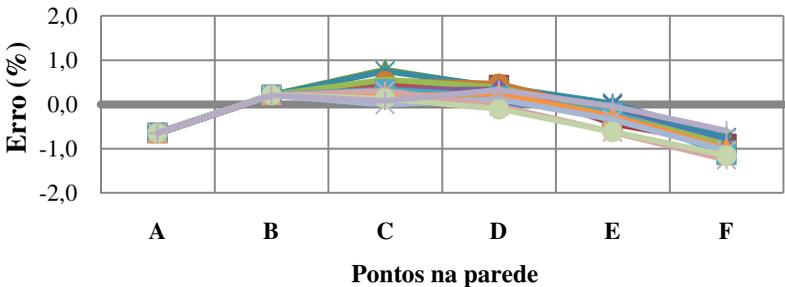


- ◆ CIE Tipo 01    ■ CIE Tipo 02    ▲ CIE Tipo 03    ✕ CIE Tipo 04
- ✱ CIE Tipo 05    ● CIE Tipo 06    + CIE Tipo 07    — CIE Tipo 08
- CIE Tipo 09    ◆ CIE Tipo 10    ■ CIE Tipo 11    ▲ CIE Tipo 12
- ✕ CIE Tipo 13    ✱ CIE Tipo 14    ● CIE Tipo 15    ✕ CIE Tipo 16

**Gráfico 24:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos na parede.



**Gráfico 25:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos na parede.



As maiores discrepâncias, para os pontos na parede, foram observadas nos pontos B, C, D e E com a resolução de visibilidade do globo 60 (55,21% dentro da faixa limite), seguindo com menor intensidade pelo globo 90 (84,38% dentro da faixa limite). Sendo que nenhuma ocorrência de erros menores do que 1% para o globo 60.

Para as simulações no globo 150, todos os resultados estão dentro do limite aceitável, sendo que 92,71% dos resultados encontram-se abaixo de 1%.

Estes erros são justificados pela precisão das resoluções de visibilidade aliado ao erro de geometria, conforme já comentado no protocolo 5.9.

A Tabela 33 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos no piso. Não houve valores que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 33:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no piso.

Tipos de Céu	Pontos no piso								
	G	H	I	J	K	L	M	N	
CIE 01	G60	2.32	2.24	0.92	-0.09	0.31	0.16	-0.56	0.58
	G90	-0.08	0.72	-0.33	0.38	0.12	-0.49	0.30	0.90
	G150	0.84	0.27	0.12	-0.05	0.06	-0.06	0.03	-0.03
CIE 02	G60	1.49	2.01	0.42	-0.41	-0.08	-0.09	-0.57	0.59
	G90	-0.98	1.01	-0.59	0.12	-0.26	-0.87	0.35	1.03
	G150	0.09	0.61	-0.04	-0.21	-0.24	-0.23	0.02	0.06
CIE 03	G60	2.02	3.03	1.16	-0.24	0.22	0.11	-0.57	1.05
	G90	-0.13	1.02	-0.23	0.27	0.08	-0.48	0.31	1.36
	G150	0.79	0.65	0.27	-0.13	0.07	-0.06	0.04	0.43
CIE 04	G60	1.13	1.84	0.32	-0.49	-0.12	-0.21	-0.58	0.55
	G90	-1.08	0.38	-0.82	0.08	-0.24	-0.92	0.36	0.96
	G150	-0.03	0.04	-0.24	-0.26	-0.20	-0.32	0.02	-0.01
CIE 05	G60	1.14	3.17	0.98	-0.09	-0.01	0.14	-0.51	0.59
	G90	-0.86	0.89	-0.48	0.46	-0.10	-0.37	0.41	0.87
	G150	0.06	0.57	0.05	0.07	-0.07	0.04	0.15	-0.03
CIE 06	G60	1.26	2.00	0.36	-0.54	-0.11	-0.18	-0.53	0.67
	G90	-0.82	0.27	-0.86	0.06	-0.20	-0.83	0.43	1.05
	G150	0.22	-0.02	-0.26	-0.26	-0.13	-0.25	0.09	0.09

Continua

Continuação da Tabela 33

Tipos de Céu	Pontos no piso								
	G	H	I	J	K	L	M	N	
CIE 07	G60	1.38	1.63	0.04	-0.56	-0.36	-0.27	-0.75	0.78
	G90	-0.80	0.25	-1.04	0.05	-0.48	-1.08	0.39	1.22
	G150	0.31	-0.04	-0.40	-0.24	-0.38	-0.34	0.06	0.17
CIE 08	G60	1.23	1.37	-0.19	-0.85	-0.47	-0.44	-0.79	0.77
	G90	-1.03	0.31	-1.14	-0.23	-0.62	-1.37	0.40	1.25
	G150	0.16	0.03	-0.46	-0.48	-0.49	-0.50	0.03	0.15
CIE 09	G60	0.90	2.55	0.85	-0.52	-0.28	-0.19	-0.76	0.81
	G90	-0.96	0.28	-0.56	0.12	-0.29	-0.71	0.36	1.10
	G150	0.05	0.05	0.08	-0.19	-0.18	-0.18	0.09	0.14
CIE 10	G60	0.76	2.25	0.37	-0.72	-0.45	-0.35	-0.73	0.91
	G90	-1.17	0.36	-0.88	-0.07	-0.49	-1.03	0.45	1.27
	G150	-0.09	0.13	-0.21	-0.35	-0.34	-0.34	0.10	0.22
CIE 11	G60	0.98	1.94	0.12	-0.79	-0.53	-0.41	-0.72	0.88
	G90	-1.03	0.36	-0.99	-0.12	-0.59	-1.20	0.49	1.29
	G150	0.12	0.15	-0.28	-0.36	-0.42	-0.39	0.11	0.19
CIE 12	G60	0.70	1.86	0.19	-0.81	-0.49	-0.39	-0.70	0.91
	G90	-1.22	0.06	-0.99	-0.13	-0.53	-1.15	0.53	1.30
	G150	-0.06	-0.12	-0.26	-0.36	-0.35	-0.35	0.14	0.21
CIE 13	G60	0.87	1.62	0.13	-0.92	-0.54	-0.46	-0.72	1.03
	G90	-1.10	0.05	-0.96	-0.23	-0.59	-1.27	0.51	1.46
	G150	0.10	-0.14	-0.21	-0.45	-0.40	-0.43	0.10	0.32
CIE 14	G60	0.59	1.89	0.13	-0.90	-0.65	-0.43	-0.68	0.99
	G90	-1.29	0.11	-1.02	-0.20	-0.67	-1.23	0.56	1.41
	G150	-0.08	-0.05	-0.26	-0.41	-0.48	-0.39	0.15	0.27
CIE 15	G60	0.50	1.70	-0.01	-0.85	-0.65	-0.45	-0.67	0.93
	G90	-1.39	0.05	-1.11	-0.15	-0.68	-1.25	0.57	1.35
	G150	-0.16	-0.09	-0.33	-0.35	-0.48	-0.40	0.15	0.22
CIE 16	G60	1.27	2.27	0.74	-0.11	0.16	0.22	-0.47	0.53
	G90	-0.96	0.48	-0.58	0.37	-0.02	-0.43	0.39	0.86
	G150	-0.05	0.08	-0.10	-0.04	-0.05	0.01	0.12	-0.06

A seguir os Gráficos 26, 27 e 28 resumem a Tabela 33, separados por resolução de visibilidade.



Os resultados das simulações, em todos os globos para os pontos no piso, estão dentro do limite aceitável, sendo que, para o globo 150, 100% dos resultados encontram-se abaixo de 1%.

A Tabela 34 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos no teto. Não houve valores que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

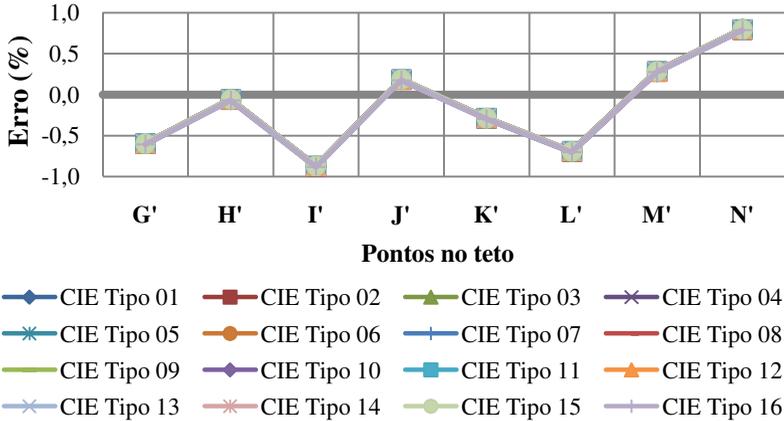
**Tabela 34:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no teto.

Tipos de Céu	Pontos no teto								
	G'	H'	I'	J'	K'	L'	M'	N'	
CIE 01	G60	1.42	2.21	0.59	-0.35	-0.19	-0.17	-0.62	0.52
	G90	-0.60	-0.06	-0.88	0.18	-0.29	-0.70	0.28	0.79
	G150	0.30	-0.39	-0.37	-0.23	-0.28	-0.30	0.01	-0.13
CIE 02	G60	1.42	2.21	0.60	-0.35	-0.19	-0.17	-0.62	0.53
	G90	-0.60	-0.06	-0.87	0.18	-0.29	-0.70	0.28	0.79
	G150	0.31	-0.38	-0.35	-0.21	-0.27	-0.29	0.02	-0.12
CIE 03	G60	1.42	2.21	0.60	-0.35	-0.19	-0.17	-0.62	0.53
	G90	-0.60	-0.05	-0.87	0.19	-0.28	-0.69	0.29	0.80
	G150	0.32	-0.38	-0.35	-0.21	-0.27	-0.29	0.02	-0.12
CIE 04	G60	1.42	2.21	0.60	-0.35	-0.19	-0.17	-0.62	0.53
	G90	-0.60	-0.06	-0.87	0.19	-0.29	-0.69	0.29	0.80
	G150	0.31	-0.39	-0.36	-0.22	-0.27	-0.30	0.02	-0.12
CIE 05	G60	1.41	2.20	0.59	-0.36	-0.20	-0.18	-0.63	0.52
	G90	-0.60	-0.06	-0.87	0.18	-0.29	-0.69	0.28	0.79
	G150	0.32	-0.38	-0.35	-0.21	-0.26	-0.29	0.03	-0.11
CIE 06	G60	1.42	2.21	0.60	-0.35	-0.19	-0.17	-0.62	0.53
	G90	-0.60	-0.06	-0.87	0.19	-0.29	-0.69	0.29	0.80
	G150	0.31	-0.38	-0.36	-0.21	-0.27	-0.29	0.02	-0.12
CIE 07	G60	1.42	2.21	0.60	-0.35	-0.19	-0.17	-0.62	0.53
	G90	-0.60	-0.06	-0.87	0.19	-0.29	-0.69	0.29	0.80
	G150	0.31	-0.39	-0.36	-0.22	-0.27	-0.29	0.02	-0.12
CIE 08	G60	1.42	2.21	0.60	-0.35	-0.19	-0.17	-0.62	0.53
	G90	-0.60	-0.06	-0.87	0.19	-0.29	-0.69	0.29	0.80
	G150	0.31	-0.39	-0.36	-0.22	-0.27	-0.30	0.01	-0.12
CIE 09	G60	1.42	2.21	0.60	-0.35	-0.19	-0.17	-0.62	0.52
	G90	-0.60	-0.06	-0.87	0.19	-0.29	-0.69	0.29	0.80
	G150	0.31	-0.38	-0.36	-0.21	-0.27	-0.29	0.02	-0.12

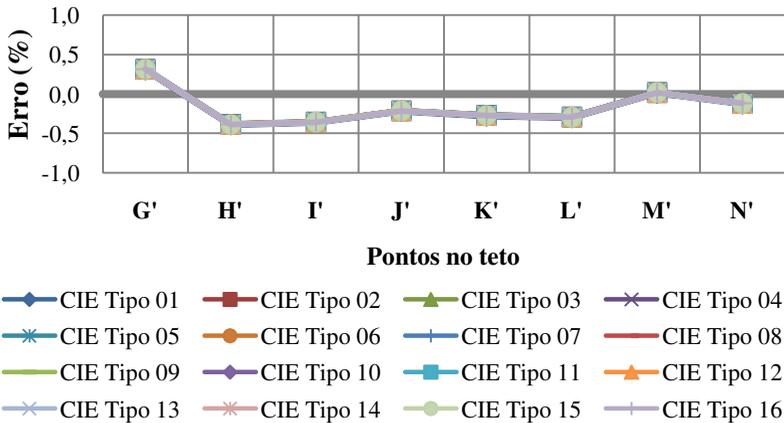
Continua



**Gráfico 30:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no teto.



**Gráfico 31:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura lateral de 2,00m x 1,00m – Pontos no teto.

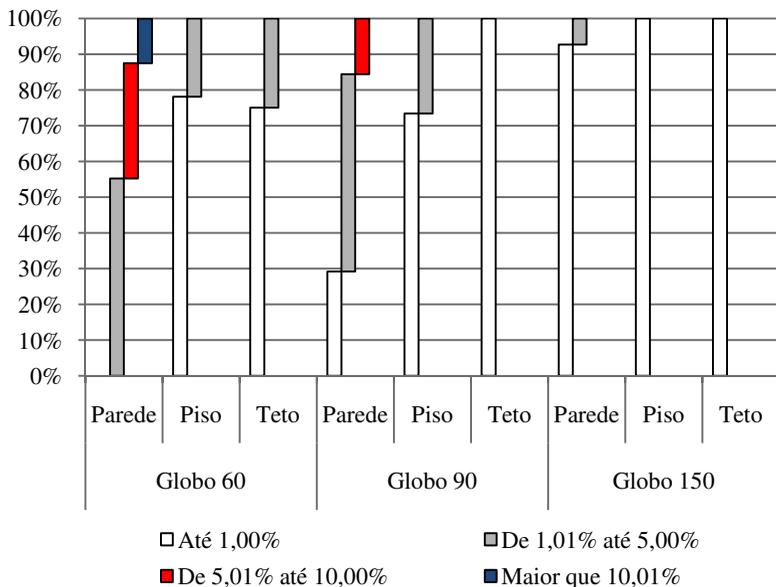


Os resultados das simulações, em todos os globos para os pontos no teto, estão dentro do limite aceitável, sendo que, para o globo 90 e 150, 100% dos resultados encontram-se abaixo de 1%. Observa-se nestes gráficos a superposição das curvas devido aos valores obtidos, pois são variações entre 0,02% e 0,01%.

A seguir, a Tabela 35 mostra as ocorrências de erros (cada ocorrência é um resultado da simulação de um ponto em um tipo de céu) sendo resumida no Gráfico 32 abaixo.

**Tabela 35:** Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.11, abertura lateral de 2,00m x 1,00m.

		Parede		Piso		Teto	
		Ocor.	%	Ocor.	%	Ocor.	%
Globo 60	Até 1,00%	0	0.00	100	78.13	96	75.00
	De 1,01% até 5,00%	53	55.21	28	21.88	32	25.00
	De 5,01% até 10,00%	31	32.29	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	12	12.50	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>
Globo 90	Até 1,00%	28	29.17	94	73.44	128	100.00
	De 1,01% até 5,00%	53	55.21	34	26.56	0	0.00
	De 5,01% até 10,00%	15	15.63	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>
Globo 150	Até 1,00%	89	92.71	128	100.00	128	100.00
	De 1,01% até 5,00%	7	7.29	0	0.00	0	0.00
	De 5,01% até 10,00%	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>

**Gráfico 32:** Protocolo 5.11 – Abertura lateral 2,00m x 1,00m: Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60, 90 e 150 para os pontos na parede, piso e no teto.

### 4.3.2- ABERTURA LATERAL DE 4,00M X 3,00

A Tabela 36 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos na parede. Os valores destacados são aqueles que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 36:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos na parede.

Tipo de Céu	Pontos na parede						
	A	B	C	D	E	F	
CIE 01	G60	-2.71	0.73	1.60	0.43	0.74	-0.46
	G90	-0.66	0.32	0.18	-0.36	0.05	0.53
	G150	-0.48	0.27	0.64	-0.51	0.22	0.54
CIE 02	G60	-2.04	0.43	1.04	0.65	0.40	-1.11
	G90	-0.25	0.07	-0.36	-0.11	-0.30	0.09
	G150	-0.10	0.07	0.17	-0.23	0.00	0.16
CIE 03	G60	-5.63	0.80	2.68	-0.66	0.54	0.67
	G90	-2.47	0.43	1.22	-1.29	-0.04	1.37
	G150	-2.16	0.30	1.78	-1.45	0.12	1.40
CIE 04	G60	-4.62	0.43	2.03	-0.45	0.23	-0.15
	G90	-1.77	0.13	0.57	-1.03	-0.34	0.75
	G150	-1.52	0.04	1.21	-1.17	-0.06	0.83
CIE 05	G60	-7.43	0.80	3.12	-1.10	0.50	1.17
	G90	-3.60	0.46	1.62	-1.66	-0.03	1.74
	G150	-3.21	0.30	2.24	-1.82	0.14	1.79
CIE 06	G60	-6.35	0.47	2.52	-0.87	0.22	0.36
	G90	-2.83	0.21	1.01	-1.36	-0.30	1.12
	G150	-2.51	0.08	1.72	-1.52	-0.03	1.20
CIE 07	G60	-5.26	0.32	2.14	-0.63	0.07	-0.13
	G90	-2.10	0.07	0.63	-1.13	-0.47	0.75
	G150	-1.83	-0.04	1.36	-1.28	-0.15	0.85
CIE 08	G60	-4.34	0.32	1.74	-0.48	-0.05	-0.57
	G90	-1.51	0.09	0.24	-0.99	-0.61	0.44
	G150	-1.28	0.01	0.97	-1.13	-0.24	0.57
CIE 09	G60	-10.19	0.49	3.45	-1.74	0.16	1.25
	G90	-5.13	0.28	1.90	-2.12	-0.28	1.75
	G150	-4.65	0.07	2.68	-2.28	-0.04	1.85

Continua

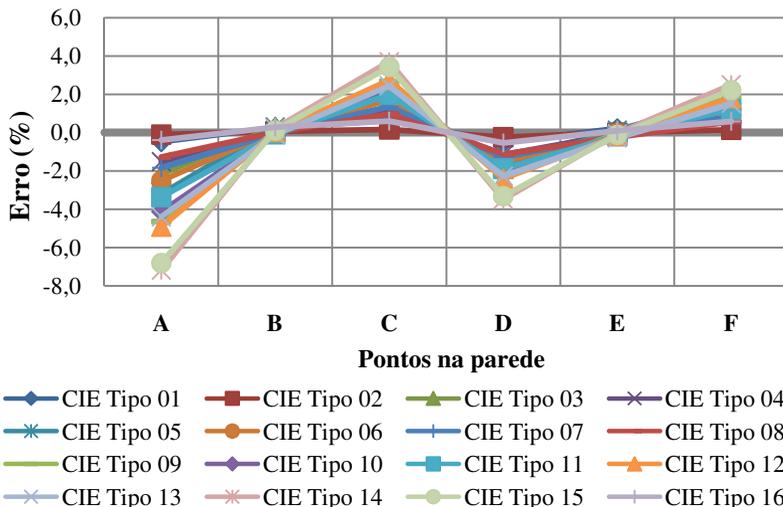
Continuação da Tabela 36

Tipo de Céu		Pontos na parede					F
		A	B	C	D	E	
CIE 10	G60	-9.23	0.32	3.11	-1.54	-0.02	0.78
	G90	-4.53	0.15	1.55	-1.91	-0.47	1.40
	G150	-4.11	-0.05	2.36	-2.08	-0.17	1.52
CIE 11	G60	-8.08	0.24	2.70	-1.36	-0.08	0.34
	G90	-3.74	0.09	1.12	-1.72	-0.55	1.08
	G150	-3.36	-0.08	1.98	-1.88	-0.20	1.21
CIE 12	G60	-10.79	0.34	3.39	-1.98	-0.09	1.03
	G90	-5.39	0.19	1.91	-2.30	-0.51	1.64
	G150	-4.91	0.02	2.74	-2.41	-0.17	1.79
CIE 13	G60	-9.96	0.17	3.07	-1.86	-0.23	0.65
	G90	-4.83	0.06	1.57	-2.16	-0.65	1.35
	G150	-4.40	-0.10	2.44	-2.27	-0.27	1.52
CIE 14	G60	-14.33	0.43	4.18	-3.19	-0.06	1.75
	G90	-7.82	0.28	2.85	-3.47	-0.44	2.28
	G150	-7.18	0.23	3.70	-3.48	-0.05	2.51
CIE 15	G60	-13.83	0.25	3.86	-3.06	-0.19	1.38
	G90	-7.42	0.15	2.52	-3.31	-0.55	1.98
	G150	-6.81	0.11	3.43	-3.32	-0.12	2.22
CIE 16	G60	-2.86	0.77	1.55	0.35	0.58	-0.31
	G90	-0.58	0.40	0.09	-0.37	-0.05	0.59
	G150	-0.39	0.29	0.60	-0.54	0.10	0.59

A seguir os Gráficos 33, 34 e 35 resumem a Tabela 36, separados por resolução de visibilidade.



**Gráfico 35:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos na parede.



Para as simulações com o cenário de abertura lateral 4,00 x 3,00m, conforme esperado, as maiores discrepâncias foram observadas nos pontos na parede na resolução do globo 60, tendo 11,46% das ocorrências acima de 5% e diminuem com o aumento da resolução de visibilidade.

A Tabela 37 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos no piso. Não houve valores que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 37:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no piso.

Tipos de Céu	Pontos no piso								
	G	H	I	J	K	L	M	N	
CIE 01	G60	0.41	0.57	0.44	0.03	-0.03	-0.11	-0.10	-0.08
	G90	0.44	0.28	0.23	-0.35	-0.12	-0.07	-0.10	-0.03
	G150	0.16	-0.11	-0.11	-0.16	-0.03	-0.04	-0.18	0.03
CIE 02	G60	0.08	0.28	0.07	-0.21	-0.43	-0.35	-0.22	0.53
	G90	0.24	0.10	0.05	-0.66	-0.36	-0.17	-0.19	0.62
	G150	0.03	-0.28	-0.25	-0.25	-0.15	-0.08	-0.20	0.71

Continua

Continuação da Tabela 37

Tipos de Céu		Pontos no piso							
		G	H	I	J	K	L	M	N
CIE 03	G60	0.33	0.48	0.46	-0.03	-0.06	-0.14	-0.17	-1.13
	G90	0.36	0.21	0.24	-0.33	-0.14	-0.13	-0.16	-1.10
	G150	0.13	-0.11	-0.06	-0.18	-0.05	-0.09	-0.24	-1.04
CIE 04	G60	-0.09	0.15	0.06	-0.26	-0.45	-0.38	-0.31	-0.24
	G90	0.07	-0.01	0.01	-0.62	-0.37	-0.22	-0.27	-0.16
	G150	-0.10	-0.34	-0.26	-0.27	-0.18	-0.14	-0.28	-0.08
CIE 05	G60	0.18	0.39	0.42	-0.03	-0.09	-0.13	-0.23	-1.85
	G90	0.23	0.13	0.19	-0.27	-0.16	-0.15	-0.23	-1.83
	G150	0.04	-0.14	-0.08	-0.13	-0.07	-0.10	-0.29	-1.76
CIE 06	G60	-0.10	0.09	0.08	-0.34	-0.41	-0.35	-0.31	-0.81
	G90	0.07	-0.06	0.02	-0.64	-0.35	-0.23	-0.27	-0.74
	G150	-0.08	-0.34	-0.22	-0.33	-0.17	-0.14	-0.28	-0.67
CIE 07	G60	-0.18	-0.01	-0.12	-0.45	-0.61	-0.55	-0.41	0.24
	G90	0.05	-0.12	-0.08	-0.86	-0.45	-0.28	-0.33	0.34
	G150	-0.09	-0.43	-0.34	-0.39	-0.19	-0.15	-0.30	0.44
CIE 08	G60	-0.31	-0.05	-0.31	-0.53	-0.82	-0.63	-0.43	1.21
	G90	-0.02	-0.13	-0.17	-1.04	-0.57	-0.27	-0.35	1.34
	G150	-0.14	-0.46	-0.44	-0.42	-0.25	-0.13	-0.29	1.43
CIE 09	G60	-0.18	0.06	0.10	-0.35	-0.40	-0.41	-0.45	-2.42
	G90	-0.03	-0.09	-0.01	-0.53	-0.36	-0.32	-0.39	-2.37
	G150	-0.14	-0.29	-0.21	-0.31	-0.22	-0.22	-0.40	-2.30
CIE 10	G60	-0.27	-0.07	-0.14	-0.48	-0.57	-0.51	-0.46	-1.13
	G90	-0.06	-0.17	-0.14	-0.75	-0.44	-0.31	-0.38	-1.05
	G150	-0.15	-0.39	-0.35	-0.38	-0.22	-0.19	-0.35	-0.97
CIE 11	G60	-0.46	-0.17	-0.26	-0.61	-0.75	-0.59	-0.46	0.01
	G90	-0.19	-0.24	-0.17	-0.96	-0.53	-0.31	-0.37	0.11
	G150	-0.26	-0.47	-0.38	-0.46	-0.26	-0.17	-0.31	0.20
CIE 12	G60	-0.39	-0.17	-0.26	-0.58	-0.74	-0.58	-0.52	-0.61
	G90	-0.12	-0.23	-0.19	-0.88	-0.53	-0.32	-0.43	-0.52
	G150	-0.18	-0.44	-0.38	-0.42	-0.26	-0.18	-0.37	-0.43

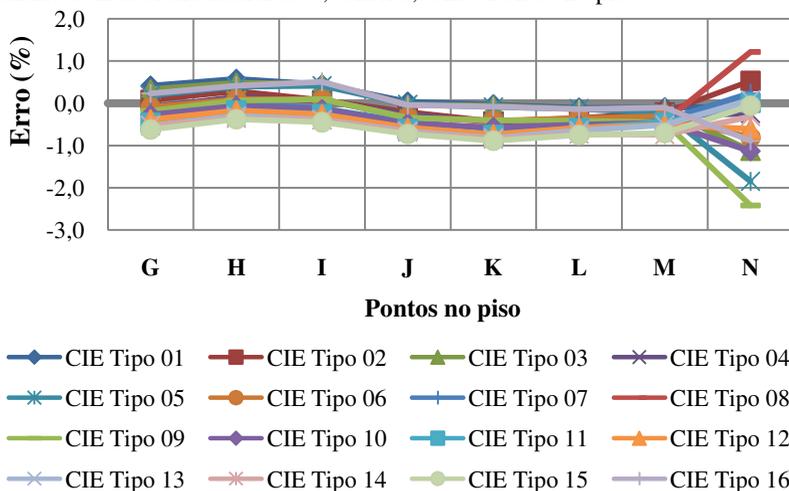
Continua

Continuação da Tabela 37

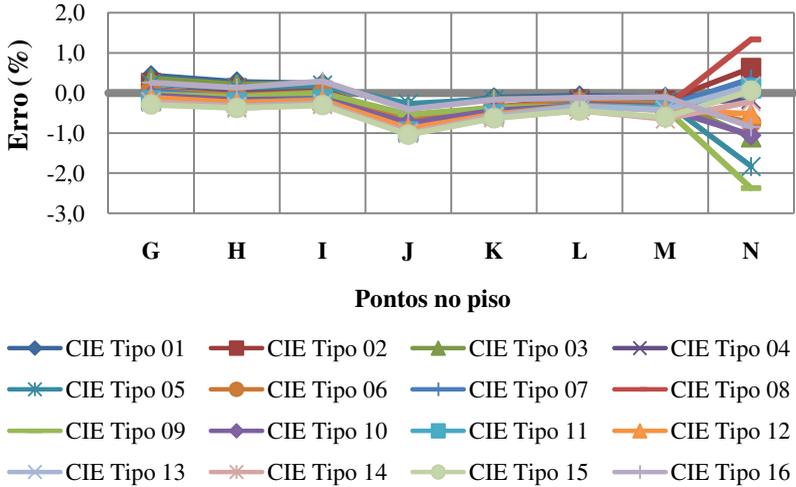
Tipos de Céu	Pontos no piso								
	G	H	I	J	K	L	M	N	
CIE 13	G60	-0.53	-0.30	-0.39	-0.66	-0.82	-0.64	-0.52	0.08
	G90	-0.22	-0.33	-0.26	-1.01	-0.58	-0.33	-0.42	0.18
	G150	-0.27	-0.55	-0.45	-0.48	-0.28	-0.19	-0.35	0.27
CIE 14	G60	-0.53	-0.36	-0.40	-0.69	-0.85	-0.73	-0.74	-0.31
	G90	-0.22	-0.37	-0.29	-0.99	-0.61	-0.43	-0.65	-0.21
	G150	-0.25	-0.56	-0.46	-0.49	-0.32	-0.29	-0.58	-0.12
CIE 15	G60	-0.62	-0.38	-0.45	-0.73	-0.89	-0.75	-0.71	-0.06
	G90	-0.29	-0.37	-0.30	-1.04	-0.63	-0.44	-0.60	0.05
	G150	-0.30	-0.56	-0.47	-0.51	-0.32	-0.28	-0.52	0.15
CIE 16	G60	0.23	0.42	0.50	-0.05	-0.08	-0.14	-0.11	-0.89
	G90	0.26	0.13	0.29	-0.41	-0.16	-0.12	-0.10	-0.85
	G150	0.02	-0.23	-0.03	-0.22	-0.06	-0.07	-0.18	-0.78

A seguir os Gráficos 36, 37 e 38, resumem a Tabela 37, separados por resolução de visibilidade.

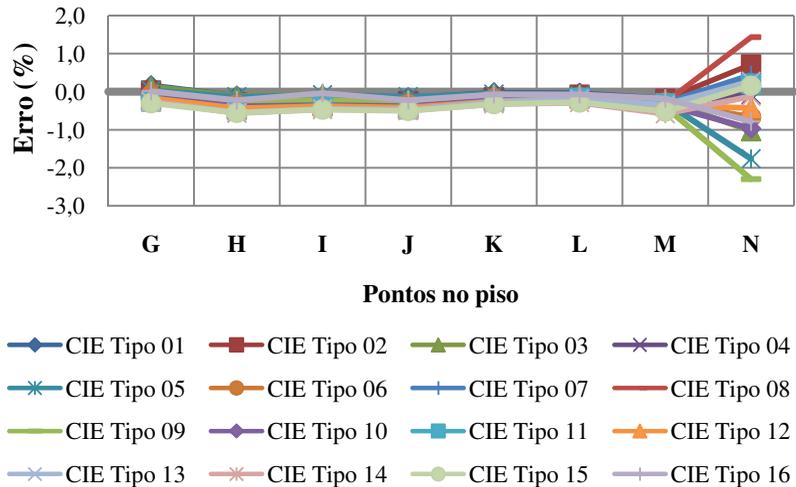
**Gráfico 36:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos globo 60 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no piso.



**Gráfico 37:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos globo90 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no piso.



**Gráfico 38:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos globo150 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no piso.



Para as simulações com o cenário de abertura lateral 4,00 x 3,00m para os pontos no piso todas as ocorrências se apresentam dentro da faixa limite. O ponto N foi o que apresentou a maior discrepância, enquanto que os outros tendem a linearidade próximo a 0%, conforme mostram os Gráficos 36, 37 e 38.

A Tabela 38 apresenta os resultados dos erros (em %) para os pontos no teto. Não houve valores que superaram o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 38:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações nos três globos (60, 90 e 150) para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no teto.

Tipos de Céu		Pontos no teto							
		G'	H'	I'	J'	K'	L'	M'	N'
CIE 01	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.12	-0.20	-1.86
	G90	0.06	0.09	0.19	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.15	-0.20	-0.10	-0.30	-0.13	-0.11	-0.29	-1.80
CIE 02	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.11	-0.20	-1.85
	G90	0.06	0.09	0.19	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.18	-0.08	-0.29	-0.11	-0.10	-0.28	-1.79
CIE 03	G60	0.03	0.37	0.44	-0.16	-0.10	-0.11	-0.20	-1.85
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.18	-0.14	-0.20	-1.84
	G150	-0.14	-0.18	-0.08	-0.29	-0.11	-0.10	-0.28	-1.79
CIE 04	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.11	-0.20	-1.85
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.19	-0.09	-0.29	-0.12	-0.10	-0.28	-1.80
CIE 05	G60	0.02	0.36	0.43	-0.17	-0.11	-0.12	-0.21	-1.86
	G90	0.06	0.09	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.13	-0.18	-0.08	-0.28	-0.11	-0.09	-0.27	-1.79
CIE 06	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.11	-0.20	-1.85
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.19	-0.08	-0.29	-0.11	-0.10	-0.28	-1.80
CIE 07	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.10	-0.11	-0.20	-1.86
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.19	-0.09	-0.29	-0.11	-0.10	-0.28	-1.79
CIE 08	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.11	-0.20	-1.85
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.19	-0.09	-0.29	-0.12	-0.10	-0.28	-1.80
CIE 09	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.11	-0.20	-1.86
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.84
	G150	-0.14	-0.19	-0.09	-0.29	-0.11	-0.10	-0.28	-1.80

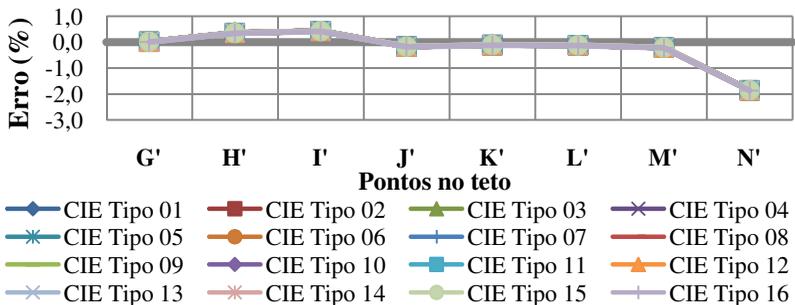
Continua

Continuação da Tabela 38

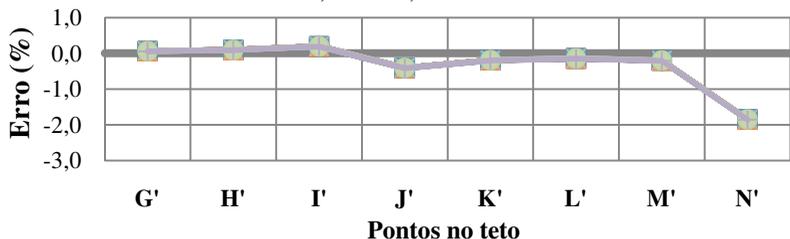
Tipos de Céu		Pontos no teto							
		G'	H'	I'	J'	K'	L'	M'	N'
CIE 10	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.11	-0.20	-1.85
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.19	-0.09	-0.29	-0.12	-0.10	-0.28	-1.80
CIE 11	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.11	-0.20	-1.85
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.18	-0.08	-0.29	-0.12	-0.10	-0.28	-1.80
CIE 12	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.11	-0.20	-1.85
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.19	-0.09	-0.29	-0.11	-0.10	-0.28	-1.79
CIE 13	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.11	-0.20	-1.86
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.19	-0.09	-0.29	-0.12	-0.10	-0.28	-1.80
CIE 14	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.12	-0.20	-1.86
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.19	-0.09	-0.29	-0.12	-0.10	-0.28	-1.79
CIE 15	G60	0.03	0.36	0.43	-0.16	-0.11	-0.12	-0.20	-1.86
	G90	0.07	0.10	0.20	-0.41	-0.19	-0.14	-0.20	-1.85
	G150	-0.14	-0.18	-0.08	-0.29	-0.11	-0.10	-0.28	-1.79
CIE 16	G60	0.01	0.35	0.42	-0.18	-0.12	-0.13	-0.22	-1.87
	G90	0.06	0.09	0.19	-0.42	-0.20	-0.15	-0.21	-1.86
	G150	-0.14	-0.19	-0.09	-0.29	-0.12	-0.10	-0.28	-1.80

A seguir os Gráficos 39, 40 e 41 resumem a Tabela 38, separados por resolução de visibilidade.

**Gráfico 39:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no teto.

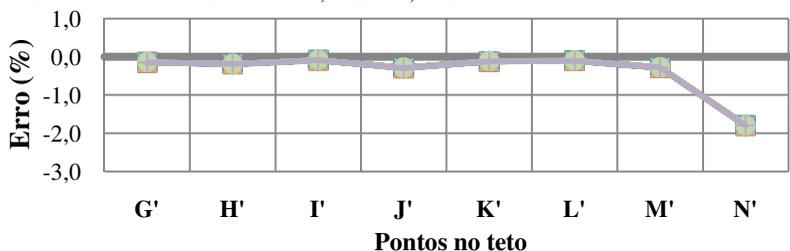


**Gráfico 40:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no teto.



- ◆ CIE Tipo 01    ■ CIE Tipo 02    ▲ CIE Tipo 03    ✕ CIE Tipo 04
- ✱ CIE Tipo 05    ● CIE Tipo 06    + CIE Tipo 07    — CIE Tipo 08
- CIE Tipo 09    ◆ CIE Tipo 10    ■ CIE Tipo 11    ▲ CIE Tipo 12
- ✕ CIE Tipo 13    ✱ CIE Tipo 14    ● CIE Tipo 15    ✕ CIE Tipo 16

**Gráfico 41:** Protocolo 5.11 - Erros (em %) das simulações no globo 150 para o cenário com abertura lateral de 4,00m x 3,00m – Pontos no teto.



- ◆ CIE Tipo 01    ■ CIE Tipo 02    ▲ CIE Tipo 03    ✕ CIE Tipo 04
- ✱ CIE Tipo 05    ● CIE Tipo 06    + CIE Tipo 07    — CIE Tipo 08
- CIE Tipo 09    ◆ CIE Tipo 10    ■ CIE Tipo 11    ▲ CIE Tipo 12
- ✕ CIE Tipo 13    ✱ CIE Tipo 14    ● CIE Tipo 15    ✕ CIE Tipo 16

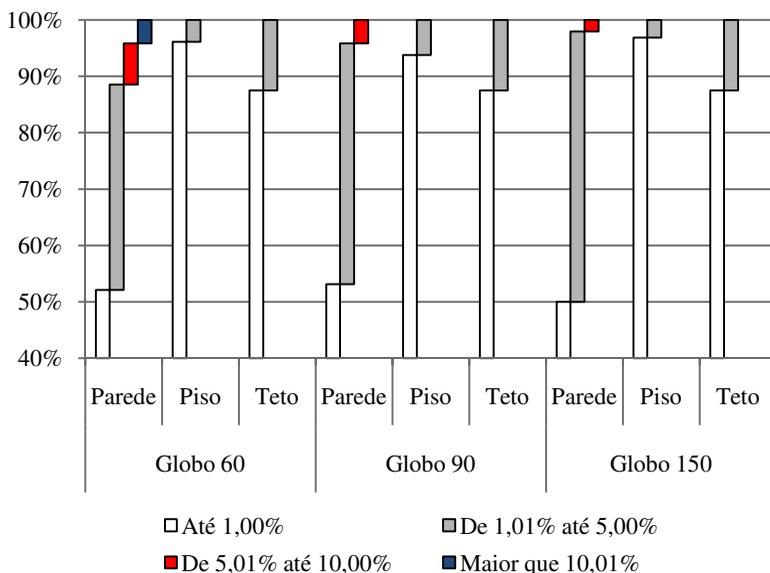
Para as simulações com o cenário de abertura lateral 4,00 x 3,00m para os pontos no piso todas as ocorrências se apresentam dentro da faixa limite. O ponto N' foi o que apresentou a maior discrepância, de forma semelhante com o seu simétrico no piso, enquanto que os outros tendem a linearidade próxima a 0%, conforme mostram os Gráficos 39, 40 e 41.

A seguir, a Tabela 39 mostra as ocorrências de erros (cada ocorrência é um resultado da simulação de um ponto em um tipo de céu) sendo resumida no Gráfico 42 abaixo.

**Tabela 39:** Faixa de ocorrências dos erros no protocolo 5.11, abertura lateral de 4,00m x 3,00m.

		Parede		Piso		Teto	
		Ocor.	%	Ocor.	%	Ocor.	%
Globo 60	Até 1,00%	50	52.08	123	96.09	112	87.50
	De 1,01% até 5,00%	35	36.46	5	3.91	16	12.50
	De 5,01% até 10,00%	7	7.29	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	4	4.17	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>
Globo 90	Até 1,00%	51	53.13	120	93.75	112	87.50
	De 1,01% até 5,00%	41	42.71	8	6.25	16	12.50
	De 5,01% até 10,00%	4	4.17	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>
Globo 150	Até 1,00%	48	50.00	124	96.88	112	87.50
	De 1,01% até 5,00%	46	47.92	4	3.13	16	12.50
	De 5,01% até 10,00%	2	2.08	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>96</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>

**Gráfico 42:** Protocolo 5.11 – Abertura lateral 4,00m x 3,00m: Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60, 90 e 150 para os pontos na parede, piso e no teto.



#### 4.4- PROTOCOLO 5.13: CC + CRE PARA UMA ABERTURA SEM VIDRO NA FACHADA COM UMA MÁSCARA HORIZONTAL EXTERNA CONTÍNUA

O protocolo 5.13 avalia a influência de uma máscara externa horizontal na iluminância direta interna sob as diferentes condições de céu padronizadas pela CIE.

Após a simulação foram extraídos do relatório gerado pelo software os valores: (i) da iluminância horizontal –  $E_{hz}$ , medida no plano horizontal e (ii) da iluminância no vértice que corresponde ao ponto de análise –  $E_p$ . Com esses dados calculou-se o Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor*) conforme a Equação 10 e comparou-se com a tabela de referência do CIE. Os resultados são apresentados a seguir.

##### 4.4.1- MÁSCARA HORIZONTAL DE 0,50M

A Tabela 40 apresenta os resultados dos erros (em %) para o cenário com a Máscara Externa Horizontal (MH) de 0,50m. Os valores não superaram a faixa limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 40:** Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara horizontal de 0,50m.

Tipos de Céu		Pontos no piso							
		A	B	C	D	E	F	G	H
CIE 01	G 60	2.32	2.24	0.92	-0.09	0.31	0.16	-0.74	-1.05
	G 90	-0.08	0.72	-0.33	0.38	0.12	-0.49	0.45	-0.78
CIE 02	G 60	1.49	2.01	0.42	-0.41	-0.08	-0.09	-0.71	-0.91
	G 90	-0.98	1.01	-0.59	0.12	-0.26	-0.87	0.58	-0.72
CIE 03	G 60	2.02	3.03	1.16	-0.24	0.22	0.11	-0.68	-1.07
	G 90	-0.13	1.02	-0.23	0.27	0.08	-0.48	0.53	-0.80
CIE 04	G 60	1.13	1.84	0.32	-0.49	-0.12	-0.21	-0.73	-0.94
	G 90	-1.08	0.38	-0.82	0.08	-0.24	-0.92	0.57	-0.75
CIE 05	G 60	1.14	3.17	0.98	-0.09	-0.01	0.14	-0.71	-1.09
	G 90	-0.86	0.89	-0.48	0.46	-0.10	-0.37	0.53	-0.81
CIE 06	G 60	1.26	2.00	0.36	-0.54	-0.11	-0.18	-0.71	-1.02
	G 90	-0.82	0.27	-0.86	0.06	-0.20	-0.83	0.61	-0.83
CIE 07	G 60	1.38	1.63	0.04	-0.56	-0.36	-0.27	-1.02	-0.84
	G 90	-0.80	0.25	-1.04	0.05	-0.48	-1.08	0.54	-0.76
CIE 08	G 60	1.23	1.37	-0.19	-0.85	-0.47	-0.44	-1.07	-0.78
	G 90	-1.03	0.31	-1.14	-0.23	-0.62	-1.37	0.56	-0.77
CIE 09	G 60	0.90	2.55	0.85	-0.52	-0.28	-0.19	-1.00	-0.93
	G 90	-0.96	0.28	-0.56	0.12	-0.29	-0.71	0.48	-0.76

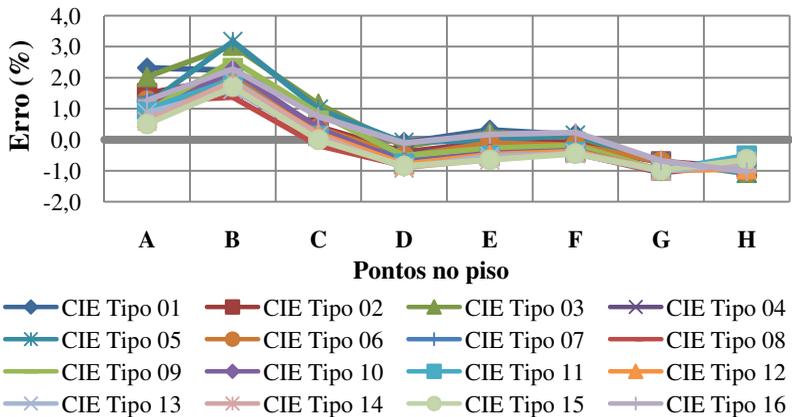
Continua

Continuação da Tabela 40

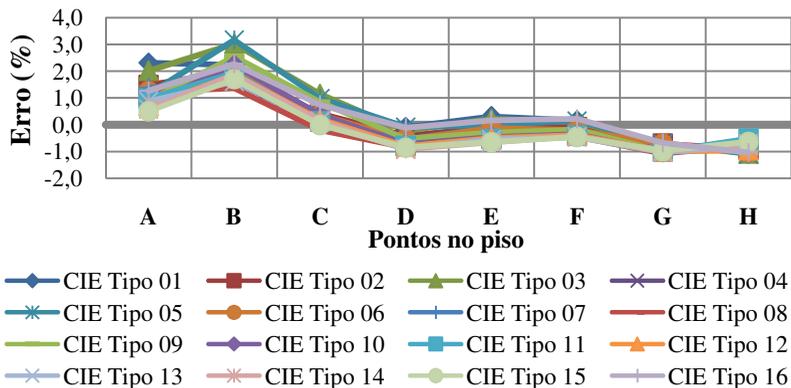
Tipos de Céu		Pontos no piso							
		A	B	C	D	E	F	G	H
CIE 10	G 60	0.76	2.25	0.37	-0.72	-0.45	-0.35	-1.02	-0.83
	G 90	-1.17	0.36	-0.88	-0.07	-0.49	-1.03	0.55	-0.76
CIE 11	G 60	0.98	1.94	0.12	-0.79	-0.53	-0.41	-1.00	-0.52
	G 90	-1.03	0.36	-0.99	-0.12	-0.59	-1.20	0.65	-0.53
CIE 12	G 60	0.70	1.86	0.19	-0.81	-0.49	-0.39	-0.99	-0.96
	G 90	-1.22	0.06	-0.99	-0.13	-0.53	-1.15	0.66	-0.97
CIE 13	G 60	0.87	1.62	0.13	-0.92	-0.54	-0.46	-1.02	-0.79
	G 90	-1.10	0.05	-0.96	-0.23	-0.59	-1.27	0.65	-0.85
CIE 14	G 60	0.59	1.89	0.13	-0.90	-0.65	-0.43	-0.97	-0.70
	G 90	-1.29	0.11	-1.02	-0.20	-0.67	-1.23	0.71	-0.76
CIE 15	G 60	0.50	1.70	-0.01	-0.85	-0.65	-0.45	-0.98	-0.64
	G 90	-1.39	0.05	-1.11	-0.15	-0.68	-1.25	0.69	-0.72
CIE 16	G 60	1.27	2.27	0.74	-0.11	0.16	0.22	-0.68	-1.04
	G 90	-0.96	0.48	-0.58	0.37	-0.02	-0.43	0.51	-0.77

A seguir os Gráficos 43 e 44 resumem a Tabela 40, separados por resolução de visibilidade.

**Gráfico 43:** Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara horizontal de 0,50m.



**Gráfico 44:** Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara horizontal de 0,50m.



Conforme observado na Tabela 40 e nos Gráficos 43 e 44, os resultados das simulações mantiveram-se no limite estabelecido, não havendo discrepância entre eles.

#### 4.4.2- MÁSCARA HORIZONTAL DE 1,00M

A Tabela 41 apresenta os resultados dos erros (em %) para o cenário com a Máscara Horizontal (MH) de 1,00m. Os valores destacados são aqueles que superaram a faixa limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 41:** Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara horizontal de 1,00m.

Tipos de céu		Pontos no piso							
		A	B	C	D	E	F	G	H
CIE 01	G 60	2.32	2.24	0.92	-0.09	-0.42	-0.48	-1.93	-1.05
	G 90	-0.08	0.72	-0.33	0.38	0.01	-0.96	0.44	-0.78
CIE 02	G 60	1.49	2.01	0.42	-0.41	-0.80	-0.61	-2.08	-0.91
	G 90	-0.98	1.01	-0.59	0.12	-0.25	-1.24	0.51	-0.72
CIE 03	G 60	2.02	3.03	1.16	-0.24	-0.51	-0.49	-1.82	-1.07
	G 90	-0.13	1.02	-0.23	0.27	-0.06	-0.90	0.57	-0.80
CIE 04	G 60	1.13	1.84	0.32	-0.49	-0.85	-0.68	-2.06	-0.94
	G 90	-1.08	0.38	-0.82	0.08	-0.29	-1.24	0.55	-0.75
CIE 05	G 60	1.14	3.17	0.98	-0.09	-0.43	-0.44	-1.89	-1.09
	G 90	-0.86	0.89	-0.48	0.46	0.04	-0.78	0.52	-0.81
CIE 06	G 60	1.26	2.00	0.36	-0.54	-0.77	-0.72	-2.02	-1.02
	G 90	-0.82	0.27	-0.86	0.06	-0.20	-1.23	0.59	-0.83

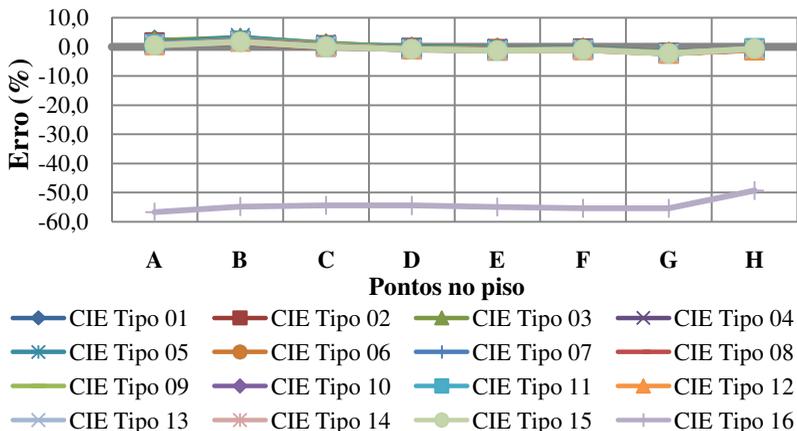
Continua

Continuação da Tabela 41

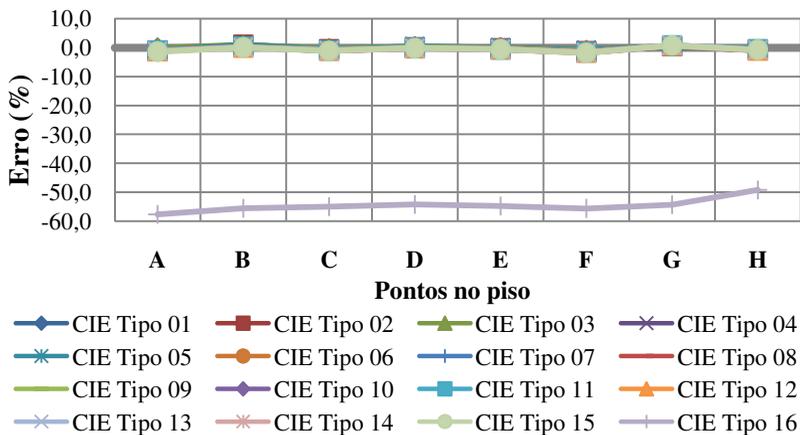
Tipos de céu		Pontos no piso							
		A	B	C	D	E	F	G	H
CIE 07	G 60	1.38	1.63	0.04	-0.56	-1.09	-0.83	-2.09	-0.84
	G 90	-0.80	0.25	-1.04	0.05	-0.47	-1.53	0.71	-0.76
CIE 08	G 60	1.23	1.37	-0.19	-0.85	-1.18	-0.91	-2.29	-0.78
	G 90	-1.03	0.31	-1.14	-0.23	-0.51	-1.76	0.67	-0.77
CIE 09	G 60	0.90	2.55	0.85	-0.52	-0.78	-0.79	-2.06	-0.93
	G 90	-0.96	0.28	-0.56	0.12	-0.20	-1.17	0.55	-0.76
CIE 10	G 60	0.76	2.25	0.37	-0.72	-1.09	-0.90	-2.15	-0.83
	G 90	-1.17	0.36	-0.88	-0.07	-0.45	-1.47	0.66	-0.76
CIE 11	G 60	0.98	1.94	0.12	-0.79	-1.25	-0.89	-2.19	-0.52
	G 90	-1.03	0.36	-0.99	-0.12	-0.57	-1.61	0.76	-0.53
CIE 12	G 60	0.70	1.86	0.19	-0.81	-1.13	-0.96	-2.20	-0.96
	G 90	-1.22	0.06	-0.99	-0.13	-0.45	-1.64	0.75	-0.97
CIE 13	G 60	0.87	1.62	0.13	-0.92	-1.33	-0.93	-2.16	-0.79
	G 90	-1.10	0.05	-0.96	-0.23	-0.62	-1.68	0.86	-0.85
CIE 14	G 60	0.59	1.89	0.13	-0.90	-1.32	-0.95	-2.21	-0.70
	G 90	-1.29	0.11	-1.02	-0.20	-0.60	-1.68	0.81	-0.76
CIE 15	G 60	0.50	1.70	-0.01	-0.85	-1.30	-0.99	-2.24	-0.64
	G 90	-1.39	0.05	-1.11	-0.15	-0.58	-1.73	0.77	-0.72
CIE 16	G 60	-56.66	-54.76	-54.37	-54.41	-54.92	-55.37	-55.34	-49.31
	G 90	-57.62	-55.56	-54.97	-54.19	-54.73	-55.58	-54.27	-49.18

A seguir os Gráficos 45 e 46 resumem a Tabela 41, separados por resolução de visibilidade.

**Gráfico 45:** Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara horizontal de 1,00m.



**Gráfico 46:** Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara horizontal de 1,00m.



Os resultados das simulações com a máscara de 1,00m mantiveram-se dentro do limite estabelecido, exceto para o céu 16 (Nublado), conforme mostram os Gráficos 45 e 46, apresentando erros entre 50% e 60%.

A justificativa para este comportamento é o equívoco nos dados fornecidos pelo protocolo, pois deveriam estar próximos dos valores do céu tipo 1, no entanto os valores se apresentam próximos ao céu tipo 15, conforme mostra a Tabela 42.

Os erros do céu 16 não são computados na contabilidade final.

**Tabela 42:** Comparação das referências entre os céus 01, 15 e 16 dos protocolos 5.13 e 5.14.

Prot.	Másc.	Céu	Pontos no piso							
			A	B	C	D	E	F	G	H
5.13	0,50	Tipo 01	0.87	1.31	2.02	3.20	5.07	7.64	8.27	0.21
		Tipo 16	0.95	1.38	2.07	3.19	4.97	7.42	8.07	0.21
	1,00	Tipo 01	0.87	1.31	2.02	3.20	4.68	5.69	4.08	0.21
		Tipo 15	2.22	3.12	4.57	6.99	11.08	17.18	17.29	0.21
		Tipo 16	2.22	3.12	4.57	6.99	10.13	12.33	8.73	0.41
	2,00	Tipo 01	0.83	1.09	1.44	1.88	2.22	1.72	0.40	0.21
Tipo 16		0.90	1.16	1.50	1.90	2.20	1.68	0.40	0.21	
5.14	3,00	Tipo 01	0.82	1.28	2.02	3.20	5.07	7.64	9.33	5.09
		Tipo 16	0.88	1.34	2.07	3.19	4.97	7.42	9.11	5.04
	6,00	Tipo 01	0.41	0.47	0.79	1.79	3.73	7.40	9.33	5.09
		Tipo 16	0.42	0.48	0.81	1.78	3.65	7.19	9.11	5.04
	9,00	Tipo 01	0.77	0.90	1.04	1.19	1.27	3.97	9.33	5.09
		Tipo 16	0.80	0.93	1.08	1.23	1.32	3.93	9.11	5.04

#### 4.4.1- MÁSCARA HORIZONTAL DE 2,00M

A Tabela 43 apresenta os resultados dos erros (em %) para o cenário com a Máscara Horizontal (MH) de 2,00m. Os valores não superaram a faixa limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 43:** Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara horizontal de 2,00m.

Tipos de céu		Pontos no piso							
		A	B	C	D	E	F	G	H
CIE 01	G 60	-2.81	4.35	3.03	0.34	-0.14	-2.15	-0.60	-1.05
	G 90	0.30	1.02	-1.40	-1.27	0.15	-0.19	0.31	-0.78
CIE 02	G 60	-3.52	3.62	2.47	0.16	-0.43	-1.96	-0.45	-0.91
	G 90	-0.04	0.64	-2.03	-1.62	-0.02	-0.18	0.37	-0.72
CIE 03	G 60	-2.20	4.35	2.70	0.43	-0.37	-2.01	-0.62	-1.07
	G 90	0.66	0.65	-1.66	-1.00	-0.04	0.05	0.29	-0.80
CIE 04	G 60	-3.24	4.19	2.26	0.01	-0.74	-2.19	-0.48	-0.94
	G 90	-0.03	0.84	-2.16	-1.59	-0.31	-0.32	0.34	-0.75

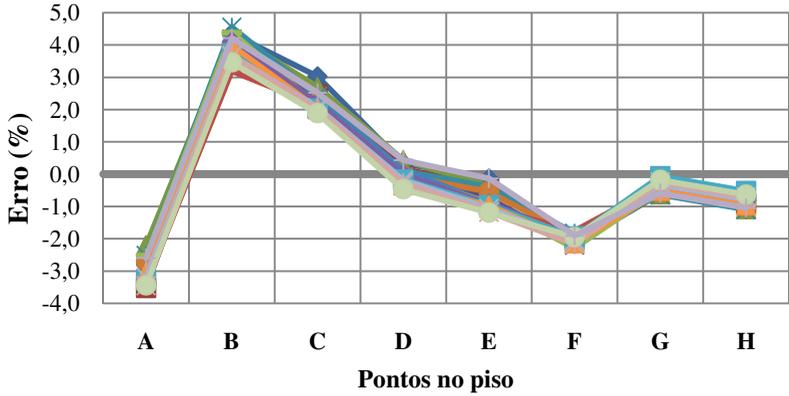
Continua

Continuação da Tabela 43

Tipos de céu		Pontos no piso							
		A	B	C	D	E	F	G	H
CIE 05	G 60	-2.51	4.55	2.42	0.09	-0.40	-1.83	-0.64	-1.09
	G 90	0.22	0.65	-1.89	-1.21	-0.04	0.31	0.28	-0.81
CIE 06	G 60	-2.71	3.73	2.21	-0.05	-0.54	-1.95	-0.57	-1.02
	G 90	0.37	0.21	-2.17	-1.52	-0.09	0.01	0.26	-0.83
CIE 07	G 60	-2.99	3.47	2.27	0.13	-0.90	-1.91	-0.39	-0.84
	G 90	0.30	0.17	-2.21	-1.51	-0.41	-0.19	0.33	-0.76
CIE 08	G 60	-3.40	3.18	2.12	-0.21	-1.05	-1.76	-0.32	-0.78
	G 90	0.07	0.08	-2.43	-1.98	-0.50	-0.22	0.32	-0.77
CIE 09	G 60	-2.53	4.39	2.11	-0.07	-0.89	-2.29	-0.48	-0.93
	G 90	0.28	0.46	-2.21	-1.32	-0.42	-0.19	0.32	-0.76
CIE 10	G 60	-3.15	4.10	2.20	-0.02	-0.93	-2.06	-0.38	-0.83
	G 90	-0.14	0.42	-2.19	-1.42	-0.41	-0.18	0.33	-0.76
CIE 11	G 60	-3.28	3.74	2.02	-0.16	-0.97	-1.93	-0.06	-0.52
	G 90	-0.08	0.27	-2.42	-1.68	-0.39	-0.24	0.56	-0.53
CIE 12	G 60	-3.06	3.99	2.04	-0.34	-0.97	-2.13	-0.50	-0.96
	G 90	0.01	0.34	-2.38	-1.78	-0.39	-0.41	0.12	-0.97
CIE 13	G 60	-3.20	3.67	2.06	-0.20	-1.06	-2.06	-0.33	-0.79
	G 90	0.01	0.18	-2.40	-1.72	-0.46	-0.43	0.24	-0.85
CIE 14	G 60	-3.45	3.67	2.00	-0.27	-1.17	-2.16	-0.25	-0.70
	G 90	-0.37	0.02	-2.44	-1.72	-0.56	-0.51	0.33	-0.76
CIE 15	G 60	-3.45	3.46	1.89	-0.47	-1.19	-1.95	-0.18	-0.64
	G 90	-0.27	-0.08	-2.56	-1.95	-0.57	-0.32	0.37	-0.72
CIE 16	G 60	-2.60	4.21	2.52	0.44	-0.14	-1.91	-0.59	-1.04
	G 90	0.35	0.68	-1.86	-1.09	0.17	0.06	0.32	-0.77

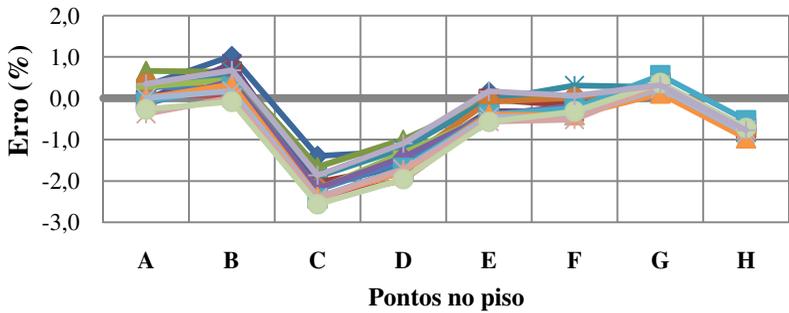
A seguir os Gráficos 47 e 48 resumem a Tabela 43, separados por resolução de visibilidade.

**Gráfico 47:** Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara horizontal de 2,00m.



- ◆ CIE Tipo 01    ■ CIE Tipo 02    ▲ CIE Tipo 03    ✕ CIE Tipo 04
- ✱ CIE Tipo 05    ● CIE Tipo 06    + CIE Tipo 07    — CIE Tipo 08
- ◆ CIE Tipo 09    ◆ CIE Tipo 10    ■ CIE Tipo 11    ▲ CIE Tipo 12
- ✱ CIE Tipo 13    ✱ CIE Tipo 14    ● CIE Tipo 15    ✕ CIE Tipo 16

**Gráfico 48:** Protocolo 5.13 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara horizontal de 2,00m.



- ◆ CIE Tipo 01    ■ CIE Tipo 02    ▲ CIE Tipo 03    ✕ CIE Tipo 04
- ✱ CIE Tipo 05    ● CIE Tipo 06    + CIE Tipo 07    — CIE Tipo 08
- ◆ CIE Tipo 09    ◆ CIE Tipo 10    ■ CIE Tipo 11    ▲ CIE Tipo 12
- ✱ CIE Tipo 13    ✱ CIE Tipo 14    ● CIE Tipo 15    ✕ CIE Tipo 16

Para o cenário com a máscara horizontal de 2,00m todos os valores se apresentam dentro da faixa limite, sendo que para a resolução do globo 60, 42,97% são abaixo de 1% e para o globo 90, 74,22% são abaixo de 1%.

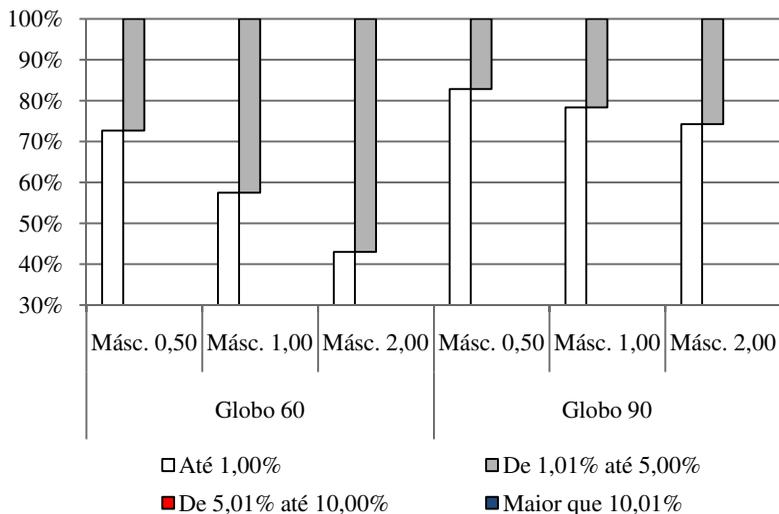
No geral, considerando que os valores de referência do céu 16 (nublado) para o cenário com a máscara horizontal de 1,00 são equivocados, todos os resultados estão dentro da faixa limite de 5% e os mais precisos foram observados na resolução do globo 90.

A seguir, a Tabela 44 mostra as ocorrências de erros (cada ocorrência é um resultado da simulação de um ponto em um tipo de céu) sendo resumida no Gráfico 49 abaixo.

**Tabela 44:** Faixa de ocorrências para máscaras horizontais dos erros no protocolo 5.13.

		Másc. 0,50		Másc. 1,00		Másc. 2,00	
		Ocor.	%	Ocor.	%	Ocor.	%
Globo 60	Até 1,00%	93	72.66	69	57.50	55	42.97
	De 1,01% até 5,00%	35	27.34	51	42.50	73	57.03
	De 5,01% até 10,00%	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>	<b>120</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>
Globo 90	Até 1,00%	106	82.81	94	78.33	95	74.22
	De 1,01% até 5,00%	22	17.19	26	21.67	33	25.78
	De 5,01% até 10,00%	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00	0	0.00
	<b>Total</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>	<b>120</b>	<b>100.00</b>	<b>128</b>	<b>100.00</b>

**Gráfico 49:** Protocolo 5.13 – Ocorrências dos erros (em %) nos globos 60 e 90 para as máscaras horizontais de 0,50m, 1,00m e 2,00m.



#### 4.5- PROTOCOLO 5.14: CC + CRE PARA UMA ABERTURA SEM VIDRO NA FACHADA COM UMA MÁSCARA VERTICAL EXTERNA CONTÍNUA

O protocolo 5.14 avalia a influência de uma máscara externa vertical, cuja refletância é 50%, na iluminância direta interna sob as diferentes condições de céu padronizadas pela CIE.

Após a simulação foram extraídos do relatório, gerado pelo software, os valores: (i) da iluminância horizontal –  $E_{hz}$ , medida pelo plano horizontal e (ii) da iluminância no vértice que corresponde ao ponto de análise –  $E_p$ . Com esses dados calculou-se o Fator de Luz do Dia (*Daylight Factor*) conforme a Equação 10 e comparou-se com a tabela de referência do CIE. Os resultados são apresentados a seguir.

##### 4.5.1- MÁSCARA VERTICAL DE 3,00M

A Tabela 45 apresenta os resultados dos erros (em %) para o cenário com a Máscara Vertical (MV) de 3,00m. Os valores não superaram a faixa limite de  $\pm 5\%$ . Para cada ponto de medição é mostrado, em %, o quanto da abertura lateral “vê” a máscara vertical (100% equivalem à visão da máscara vertical, pelo ponto em questão, por toda abertura lateral).

**Tabela 45:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara vertical de 3,00m.

Tipo de céu	Pontos no piso								
	A	B	C	D	E	F	G	H	
Área visível da MV (%)	15.40	5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CIE 01	G 60	4.10	0.93	0.92	-0.09	0.31	0.16	-0.56	0.58
	G 90	-0.08	0.74	-0.33	0.38	0.12	-0.49	0.30	0.90
CIE 02	G 60	3.86	0.39	0.42	-0.41	-0.08	-0.09	-0.57	0.59
	G 90	-0.54	0.77	-0.59	0.12	-0.26	-0.87	0.35	1.03
CIE 03	G 60	4.09	0.88	1.16	-0.24	0.22	0.11	-0.57	1.05
	G 90	-0.33	0.67	-0.23	0.27	0.08	-0.48	0.31	1.36
CIE 04	G 60	4.39	-0.04	0.32	-0.49	-0.12	-0.21	-0.58	0.55
	G 90	-0.25	0.31	-0.82	0.08	-0.24	-0.92	0.36	0.96
CIE 05	G 60	4.67	0.61	0.98	-0.09	-0.01	0.14	-0.51	0.59
	G 90	0.09	0.39	-0.48	0.46	-0.10	-0.37	0.41	0.87
CIE 06	G 60	4.73	0.14	0.36	-0.54	-0.11	-0.18	-0.53	0.67
	G 90	-0.04	0.46	-0.86	0.06	-0.20	-0.83	0.43	1.05

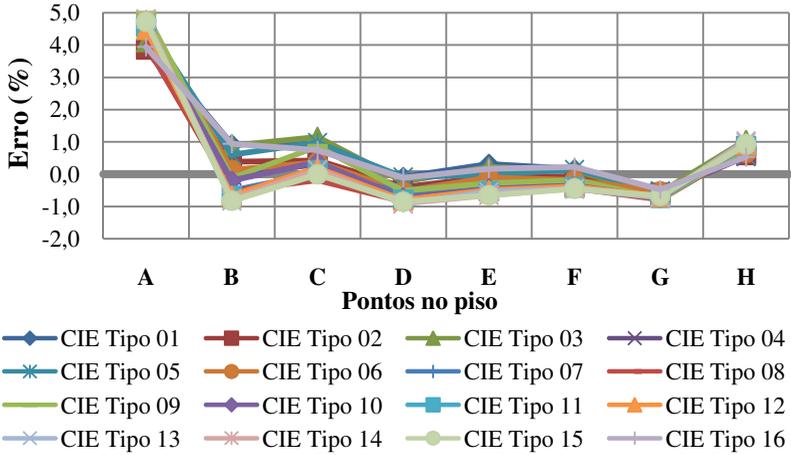
Continua

Continuação da Tabela 45

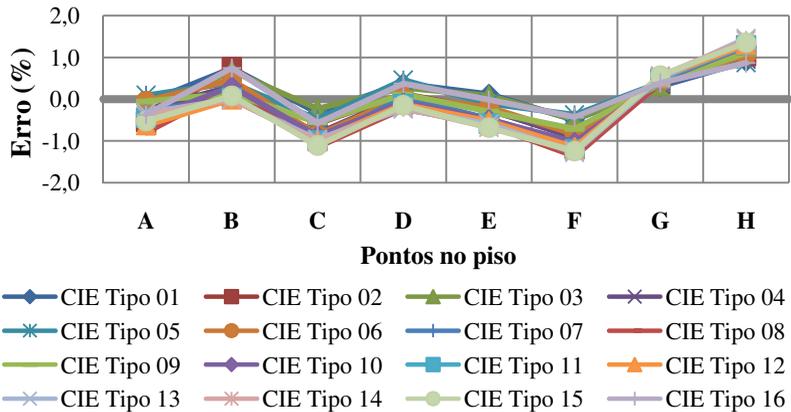
Tipo de céu	Pontos no piso								
	A	B	C	D	E	F	G	H	
Área visível da MV (%)	15.40	5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
CIE 07	G 60	4.51	-0.51	0.04	-0.56	-0.36	-0.27	-0.75	0.78
	G 90	-0.30	0.06	-1.04	0.05	-0.48	-1.08	0.39	1.22
CIE 08	G 60	4.01	-0.52	-0.19	-0.85	-0.47	-0.44	-0.79	0.77
	G 90	-0.80	0.27	-1.14	-0.23	-0.62	-1.37	0.40	1.25
CIE 09	G 60	4.97	-0.12	0.85	-0.52	-0.28	-0.19	-0.76	0.81
	G 90	-0.05	0.14	-0.56	0.12	-0.29	-0.71	0.36	1.10
CIE 10	G 60	4.52	-0.20	0.37	-0.72	-0.45	-0.35	-0.73	0.91
	G 90	-0.49	0.30	-0.88	-0.07	-0.49	-1.03	0.45	1.27
CIE 11	G 60	4.57	-0.68	0.12	-0.79	-0.53	-0.41	-0.72	0.88
	G 90	-0.45	0.03	-0.99	-0.12	-0.59	-1.20	0.49	1.29
CIE 12	G 60	4.48	-0.67	0.19	-0.81	-0.49	-0.39	-0.70	0.91
	G 90	-0.62	-0.01	-0.99	-0.13	-0.53	-1.15	0.53	1.30
CIE 13	G 60	4.81	-0.83	0.13	-0.92	-0.54	-0.46	-0.72	1.03
	G 90	-0.32	0.00	-0.96	-0.23	-0.59	-1.27	0.51	1.46
CIE 14	G 60	4.80	-0.76	0.13	-0.90	-0.65	-0.43	-0.68	0.99
	G 90	-0.39	0.01	-1.02	-0.20	-0.67	-1.23	0.56	1.41
CIE 15	G 60	4.72	-0.83	-0.01	-0.85	-0.65	-0.45	-0.67	0.93
	G 90	-0.53	0.08	-1.11	-0.15	-0.68	-1.25	0.57	1.35
CIE 16	G 60	3.94	0.94	0.74	-0.11	0.16	0.22	-0.47	0.53
	G 90	-0.37	0.74	-0.58	0.37	-0.02	-0.43	0.39	0.86

A seguir os Gráficos 50 e 51 resumem a Tabela 45, separados por resolução de visibilidade.

**Gráfico 50:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara vertical de 3,00m.



**Gráfico 51:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara vertical de 3,00m.



Conforme mostram os Gráficos 50 e 51 e a Tabela 45, os erros se apresentam dentro da faixa limite sendo que os mais discrepantes são observados no ponto A na resolução do globo 60. Para a resolução do globo 90, os resultados apresentam-se mais precisos.

#### 4.5.2- MÁSCARA VERTICAL DE 6,00M

A Tabela 46 apresenta os resultados dos erros (em %) para o cenário com a Máscara Vertical (MV) de 6,00m. Os valores destacados são aqueles que superaram a faixa limite de  $\pm 5\%$ . Para cada ponto de

medição é mostrado, em %, o quanto da abertura lateral “vê” a máscara vertical (100% equivalem à visão da máscara vertical, pelo ponto em questão, por toda abertura lateral).

**Tabela 46:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara vertical de 6,00m.

Tipos de céu		Pontos no piso							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Área visível da MV (%)		100	100	88.60	63,60	35.50	3.40	0.00	0.00
CIE 01	G 60	-24.92	-7.94	2.45	0.29	1.83	0.06	-0.56	0.58
	G 90	-26.41	-9.98	-0.32	0.94	0.30	-0.62	0.30	0.90
CIE 02	G 60	-24.27	-8.34	2.34	0.09	1.73	-0.16	-0.57	0.59
	G 90	-25.76	-10.35	-0.95	0.78	0.02	-0.95	0.35	1.03
CIE 03	G 60	-25.31	-6.89	1.57	0.04	1.73	-0.04	-0.57	1.05
	G 90	-26.79	-8.95	-1.05	0.70	0.29	-0.66	0.31	1.36
CIE 04	G 60	-24.55	-7.21	2.06	0.18	1.67	-0.23	-0.58	0.55
	G 90	-24.39	-7.22	0.11	1.40	0.19	-0.95	0.36	0.96
CIE 05	G 60	-24.45	-8.20	1.47	-0.07	1.63	-0.11	-0.51	0.59
	G 90	-25.94	-10.23	-1.08	0.62	0.27	-0.67	0.41	0.87
CIE 06	G 60	-24.17	-7.94	2.09	0.23	1.69	-0.19	-0.53	0.67
	G 90	-25.67	-9.98	-1.09	0.96	0.03	-0.87	0.43	1.05
CIE 07	G 60	-25.23	-8.72	2.18	0.11	1.56	-0.31	-0.75	0.78
	G 90	-26.71	-10.75	-1.28	0.83	-0.19	-1.14	0.39	1.22
CIE 08	G 60	-24.85	-7.57	1.98	-0.17	1.42	-0.42	-0.79	0.77
	G 90	-26.36	-9.64	-1.72	0.54	-0.38	-1.35	0.40	1.25
CIE 09	G 60	-25.02	-8.26	2.55	0.07	1.66	-0.26	-0.76	0.81
	G 90	-26.52	-10.31	-0.54	0.82	0.06	-0.82	0.36	1.10
CIE 10	G 60	-24.13	-7.26	1.72	0.02	1.55	-0.42	-0.73	0.91
	G 90	-25.64	-9.32	-1.63	0.77	-0.16	-1.12	0.45	1.27
CIE 11	G 60	-24.12	-7.01	2.40	-0.17	1.47	-0.45	-0.72	0.88
	G 90	-25.63	-9.07	-1.24	0.58	-0.32	-1.25	0.49	1.29
CIE 12	G 60	-24.58	-8.45	2.48	0.01	1.45	-0.42	-0.70	0.91
	G 90	-26.06	-10.46	-1.03	0.77	-0.30	-1.20	0.53	1.30
CIE 13	G 60	-24.41	-8.11	1.66	-0.14	1.43	-0.48	-0.72	1.03
	G 90	-25.94	-10.18	-2.12	0.61	-0.39	-1.30	0.51	1.46
CIE 14	G 60	-24.24	-8.36	2.00	0.01	1.40	-0.54	-0.68	0.99
	G 90	-25.76	-10.42	-1.60	0.76	-0.38	-1.34	0.56	1.41

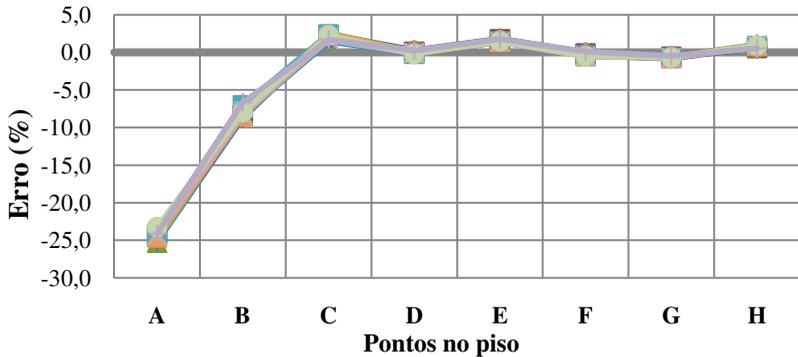
Continua

Continuação da Tabela 46

Tipos de céu		Pontos no piso							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Área visível da MV (%)		100	100	88.60	63,60	35.50	3.40	0.00	0.00
CIE 15	G 60	-23.23	-7.96	2.29	-0.21	1.48	-0.49	-0.67	0.93
	G 90	-24.79	-10.04	-1.70	0.56	-0.38	-1.29	0.57	1.35
CIE 16	G 60	-24.11	-6.66	1.70	0.26	1.78	0.13	-0.47	0.53
	G 90	-25.62	-8.73	-0.98	0.91	0.30	-0.56	0.39	0.86

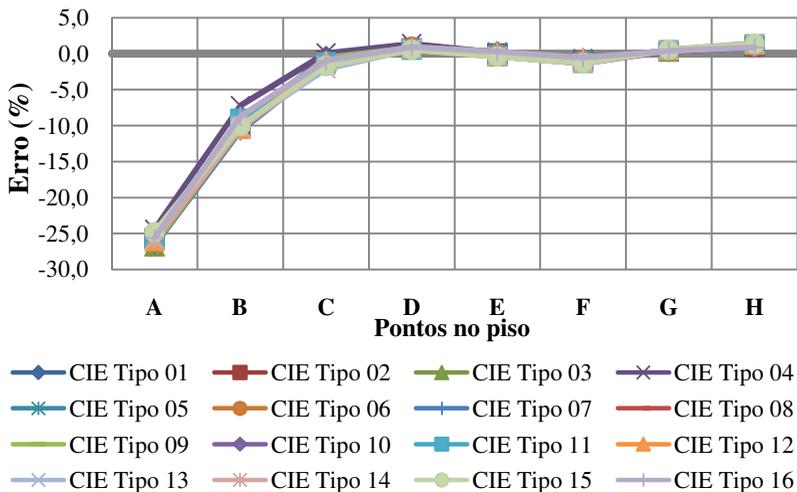
A seguir os Gráficos 52 e 53 resumem a Tabela 46, separados por resolução de visibilidade.

**Gráfico 52:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara vertical de 6,00m (visualização de todos os pontos).



- ◆ CIE Tipo 01
- CIE Tipo 02
- ▲ CIE Tipo 03
- ✕ CIE Tipo 04
- ✱ CIE Tipo 05
- CIE Tipo 06
- + CIE Tipo 07
- CIE Tipo 08
- CIE Tipo 09
- ◆ CIE Tipo 10
- CIE Tipo 11
- ▲ CIE Tipo 12
- ✕ CIE Tipo 13
- ✱ CIE Tipo 14
- CIE Tipo 15
- + CIE Tipo 16

**Gráfico 53:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara vertical de 6,00m (visualização de todos os pontos).



Os erros apresentados nos Gráficos 52 e 53 e na Tabela 46, conforme será discutido mais adiante, podem ser justificados devido a um equívoco do protocolo nos dados para comparação, pois sugere que as luminâncias da máscara vertical podem ser diferentes para cada ponto de medição.

#### 4.5.3- MÁSCARA VERTICAL DE 9,00M

A Tabela 47 apresenta os resultados dos erros (em %) para o cenário com a Máscara Vertical (MV) de 9,00m. Os valores destacados são aqueles que superaram a faixa limite de  $\pm 5\%$ . Para cada ponto de medição é mostrado, em %, o quanto da abertura lateral “vê” a máscara vertical (100% equivalem à visão da máscara vertical, pelo ponto em questão, por toda abertura lateral).

**Tabela 47:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações nos dois globos (60 e 90) para o cenário com máscara vertical de 9,00m.

Tipos de céu	Pontos no piso								
	A	B	C	D	E	F	G	H	
Área visível da MV (%)	100	100	100	100	100	52.20	0.00	0.00	
CIE 01	G 60	-60.02	-51.92	-42.06	-27.76	-2.08	1.74	-0.56	0.58
	G 90	-60.82	-52.99	-42.90	-27.38	-2.17	0.07	0.30	0.90

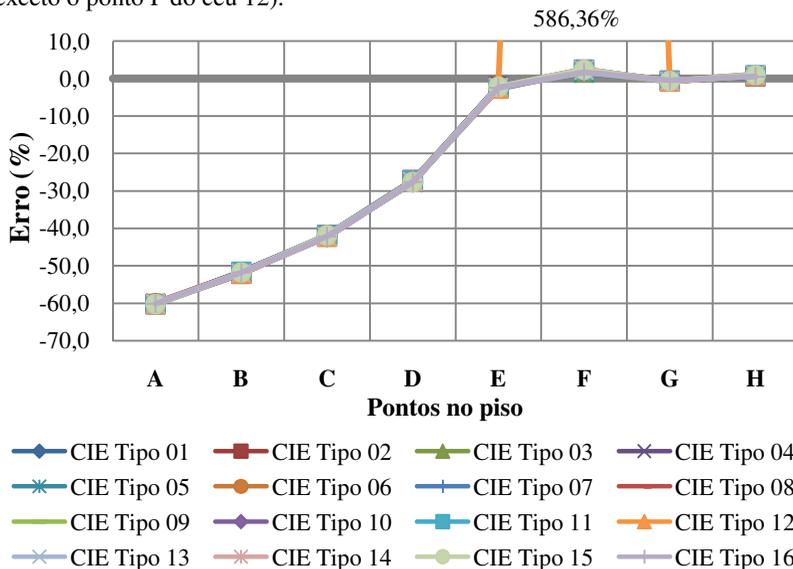
Continua

Continuação da Tabela 47

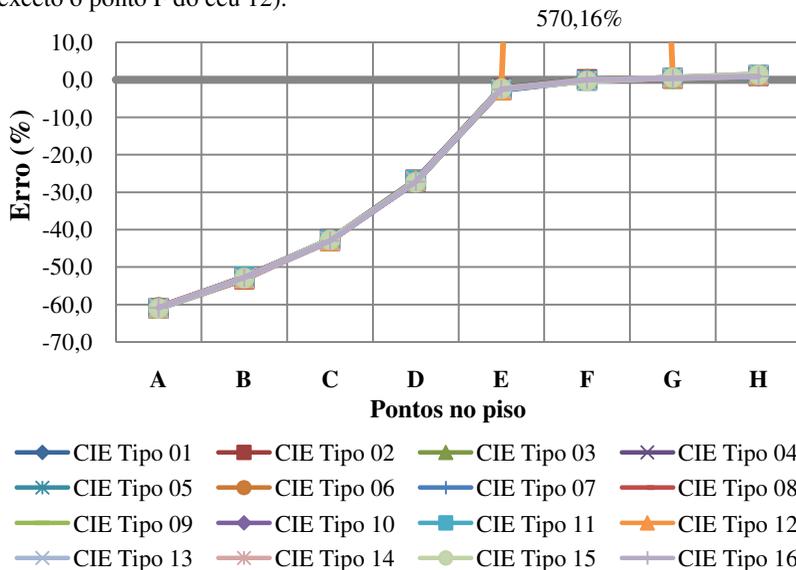
Tipos de céu		Pontos no piso							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Área visível da MV (%)		100	100	100	100	100	52.20	0.00	0.00
CIE 02	G 60	-60.21	-52.17	-41.82	-27.16	-2.22	2.31	-0.57	0.59
	G 90	-60.99	-53.23	-42.66	-26.75	-2.29	0.10	0.35	1.03
CIE 03	G 60	-60.11	-51.62	-42.25	-27.38	-2.18	1.68	-0.57	1.05
	G 90	-60.90	-52.69	-43.09	-26.99	-2.27	0.16	0.31	1.36
CIE 04	G 60	-59.99	-51.80	-41.92	-27.71	-2.13	2.01	-0.58	0.55
	G 90	-60.79	-52.87	-42.77	-27.33	-2.24	-0.08	0.36	0.96
CIE 05	G 60	-60.28	-51.64	-41.98	-27.30	-2.09	1.40	-0.51	0.59
	G 90	-61.06	-52.71	-42.82	-26.90	-2.18	0.02	0.41	0.87
CIE 06	G 60	-59.98	-51.78	-41.84	-27.50	-2.17	1.99	-0.53	0.67
	G 90	-60.77	-52.85	-42.69	-27.11	-2.26	0.01	0.43	1.05
CIE 07	G 60	-60.20	-51.83	-41.80	-27.46	-2.26	2.24	-0.75	0.78
	G 90	-60.99	-52.89	-42.65	-27.07	-2.36	-0.16	0.39	1.22
CIE 08	G 60	-60.30	-51.51	-41.98	-27.46	-2.29	2.43	-0.79	0.77
	G 90	-61.10	-52.60	-42.84	-27.08	-2.40	-0.26	0.40	1.25
CIE 09	G 60	-60.40	-51.91	-42.02	-27.64	-2.48	1.79	-0.76	0.81
	G 90	-61.19	-52.98	-42.87	-27.25	-2.58	0.05	0.36	1.10
CIE 10	G 60	-60.07	-52.07	-42.32	-27.56	-2.69	2.10	-0.73	0.91
	G 90	-60.86	-53.13	-43.16	-27.18	-2.79	-0.07	0.45	1.27
CIE 11	G 60	-60.31	-51.65	-41.95	-27.23	-2.59	2.24	-0.72	0.88
	G 90	-61.10	-52.72	-42.79	-26.83	-2.68	-0.25	0.49	1.29
CIE 12	G 60	-60.20	-52.04	-42.16	-27.24	-2.70	586.36	-0.70	0.91
	G 90	-60.98	-53.10	-42.99	-26.84	-2.77	570.16	0.53	1.30
CIE 13	G 60	-60.35	-52.11	-42.25	-27.37	-2.28	2.29	-0.72	1.03
	G 90	-61.15	-53.19	-43.12	-27.00	-2.41	-0.31	0.51	1.46
CIE 14	G 60	-59.95	-51.95	-42.23	-27.51	-2.37	2.29	-0.68	0.99
	G 90	-60.76	-53.03	-43.09	-27.15	-2.49	-0.22	0.56	1.41
CIE 15	G 60	-60.24	-51.85	-41.89	-27.71	-2.23	2.35	-0.67	0.93
	G 90	-61.05	-52.95	-42.76	-27.35	-2.37	-0.27	0.57	1.35
CIE 16	G 60	-60.16	-51.82	-42.22	-27.63	-2.44	1.68	-0.47	0.53
	G 90	-60.95	-52.89	-43.06	-27.24	-2.53	0.04	0.39	0.86

A seguir os Gráficos 54 e 55 resumem a Tabela 47, separados por resolução de visibilidade.

**Gráfico 54:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 60 para o cenário com a máscara vertical de 9,00m (visualização de todos os pontos, exceto o ponto F do céu 12).



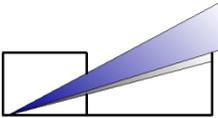
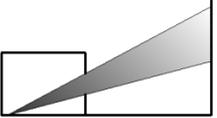
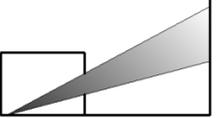
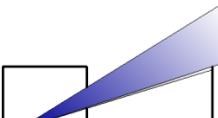
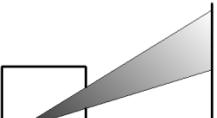
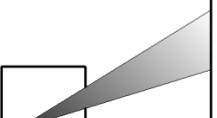
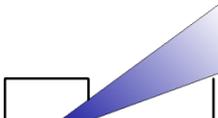
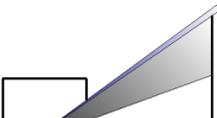
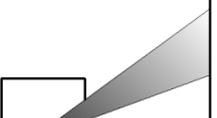
**Gráfico 55:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) das simulações no globo 90 para o cenário com a máscara vertical de 9,00m (visualização de todos os pontos, exceto o ponto F do céu 12).



Observou-se que a ocorrência de erros discrepantes, para o céu 12 no ponto F apresentou-se na faixa de 570% a 580% devido a um possível equívoco na referência do protocolo. A ocorrência de erros na faixa de 20 a 60%, está concentrada nos pontos onde a visão da máscara horizontal é total (100%) - pontos A, B, C e D do cenário com a máscara vertical de 9,0m e pontos A e B para o cenário com a máscara de 6,00m - através da abertura lateral enquanto que, pela visão total do céu pela abertura os erros permaneciam dentro do limite esperado.

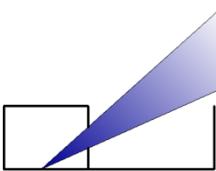
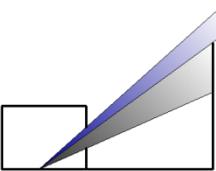
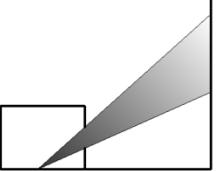
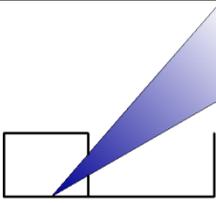
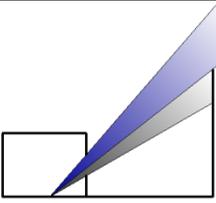
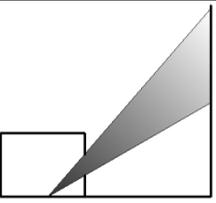
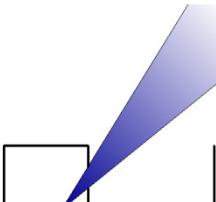
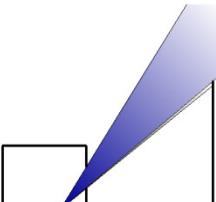
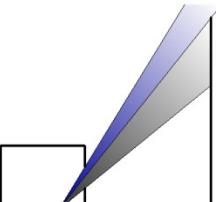
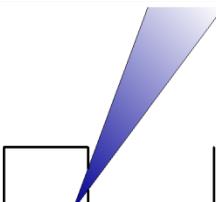
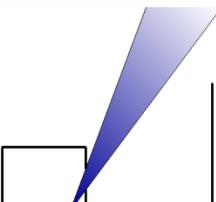
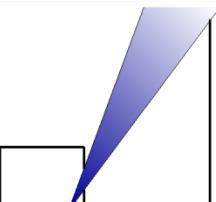
A Tabela 48 mostra, para cada ponto de medição, a área visível, em %, do céu e da máscara vertical através da abertura lateral.

**Tabela 48:** Protocolo 5.14 – Porção visível (em %) do céu e da máscara vertical (MV), vista pela abertura 2,00 x 1,00m, relativa a cada ponto de medição.

		Legenda		
		 CC	 CRE	
		MV 3,00	MV 6,00	MV 9,00
Ponto A				
	Céu	84,60	0,00	0,00
	MV	15,40	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
Ponto B				
	Céu	94,60	0,00	0,00
	MV	5,40	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>
Ponto C				
	Céu	100,00	11,40	0,00
	MV	0,00	88,60	<b>100,00</b>

Continua

Continuação da Tabela 48

	MV 3,00	MV 6,00	MV 9,00
<b>Ponto D</b>			
<b>Céu</b>	100,00	36,40	0,00
<b>MV</b>	0,00	63,60	<b>100,00</b>
<b>Ponto E</b>			
<b>Céu</b>	100,00	64,50	0,00
<b>MV</b>	0,00	35,50	100,00
<b>Ponto F</b>			
<b>Céu</b>	100,00	96,60	44,80
<b>MV</b>	0,00	3,40	55,20
<b>Ponto G</b>			
<b>Céu</b>	100,00	100,00	100,00
<b>MV</b>	0,00	0,00	0,00

Continua

Continuação da Tabela 48

	MV 3,00	MV 6,00	MV 9,00
Ponto H			
Céu	100,00	100,00	100,00
MV	0,00	0,00	0,00

Este comportamento pode ser justificado devido a um possível equívoco do protocolo ao fornecer os dados para comparação, pois sugere que luminância uniforme da máscara vertical não é a mesma para os pontos de medição, conforme também conclui Labayrade et al (2009), p. 63.

Conforme Labayrade et al (2009), o valor da referência do protocolo (*Daylight Factor*) dividido pelo fator de forma, calculado analiticamente com a Equação 12, dos pontos no piso, nos fornece o valor da iluminância da máscara horizontal, como mostra a Equação 35.

$$E_{másc.vertical} = \frac{DF_{CIE}}{FatordeForma} [lx] \dots\dots\dots Equação 35$$

Considerando os valores de referência dos céus Tipo 1 (Céu encoberto) e Tipo 5 (céu de luminância uniforme), ao substituímos os valores na fórmula deveríamos obter resultados de  $E_{másc. vert.}$  iguais para todos os pontos, mas não é o que mostra a Tabela 49, o que comprova o equívoco:

**Tabela 49:** Protocolo 5.14 – Cálculo da iluminância para a região da máscara vertical vista para os pontos no piso, de acordo com as referências CIE para os céus tipo 1 e 5.

Ponto	Fator de Forma	Céu tipo 1		Céu tipo 5	
		DF <sub>CIE</sub>	E <sub>másc.vert.</sub>	DF <sub>CIE</sub>	E <sub>másc.vert.</sub>
A	0.0126557	0.77	60.84	0.97	76.65
B	0.0175407	0.90	51.31	1.12	63.85
C	0.0248783	1.04	41.80	1.30	52.25
D	0.0359155	1.19	33.13	1.48	41.21
E	0.0518454	1.27	24.50	1.59	30.67
F	0.0459089	3.97	86.48	3.90	84.95
G	0.0000000	9.33	0.00	7.99	0.00
H	0.0000000	5.09	0.00	4.13	0.00

Também foi calculado o fator forma analítico em relação a máscara vertical, com a equação 12, e comparado com os resultados das simulações no APOLUX realizadas com céu tipo 5 (luminância uniforme).

A utilização do céu de luminância uniforme nos cálculos se deve ao fato de que todos os ângulos sólidos tem a mesma luminância, expressando o valor da área visível, o que configura o fator de forma no APOLUX.

O cálculo do fator de forma analítico em relação a máscara vertical de 9,00m é mostrado na Tabela 50 e em relação ao céu na Tabela 51, sendo que  $FF_{masc}$  (ou  $FF_{céu}$ ) =  $2*(FF_2-FF_1)$ .

**Tabela 50:** Protocolo 5.14 – Fator de forma analítico em relação à máscara vertical de 9,00m.

	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>a<sub>1</sub></b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>a<sub>2</sub></b>	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.55	1.00	1.00
<b>b<sub>1</sub> = b<sub>2</sub></b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>h<sub>1</sub> = h<sub>2</sub></b>	3.75	3.25	2.75	2.25	1.75	1.25	0.75	0.25
<b>FF<sub>1</sub></b>	0.00270	0.00400	0.00625	0.01045	0.01898	0.03799	0.08315	0.18128
<b>FF<sub>2</sub></b>	0.00902	0.01277	0.01869	0.02841	0.04491	0.06095	0.08315	0.18128
<b>FF<sub>2</sub>-FF<sub>1</sub></b>	0.00633	0.00877	0.01244	0.01796	0.02592	0.02295	0.00000	0.00000
<b>FF<sub>masc</sub></b>	<b>0.01266</b>	<b>0.01754</b>	<b>0.02488</b>	<b>0.03592</b>	<b>0.05185</b>	<b>0.04591</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.00000</b>

**Tabela 51:** Protocolo 5.14 – Fator de forma analítico em relação ao céu para o cenário com a máscara vertical de 9,00m.

	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>a<sub>1</sub></b>	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	1.55	1.00	1.00
<b>a<sub>2</sub></b>	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
<b>b<sub>1</sub> = b<sub>2</sub></b>	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
<b>h<sub>1</sub> = h<sub>2</sub></b>	3.75	3.25	2.75	2.25	1.75	1.25	0.75	0.25
<b>FF<sub>1</sub></b>	0.00902	0.01277	0.01869	0.02841	0.04491	0.06095	0.08315	0.18128
<b>FF<sub>2</sub></b>	0.00902	0.01277	0.01869	0.02841	0.04491	0.07356	0.12311	0.20192
<b>FF<sub>2</sub>-FF<sub>1</sub></b>	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.01261	0.03996	0.02064
<b>FF<sub>céu</sub></b>	<b>0.00000</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.00000</b>	<b>0.02523</b>	<b>0.07993</b>	<b>0.04128</b>

O fator de forma analítico, para o cenário com a máscara vertical de 9,00m, em relação a abertura lateral (AL) de 2,00m x 1,00m é a soma dos fatores de forma em relação ao céu e a máscara, conforme mostrado na Tabela 52, juntamente com todos os cenários do protocolo 5.14.

**Tabela 52:** Protocolo 5.14 – Quadro resumo do Fator de forma analítico.

	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>3 FF<sub>céu</sub></b>	0.01102	0.01673	0.02488	0.03592	0.05185	0.07114	0.07993	0.04128
<b>3 FF<sub>masc</sub></b>	0.00164	0.00081	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<b>3 FF<sub>AL</sub></b>	<b>0.01266</b>	<b>0.01754</b>	<b>0.02488</b>	<b>0.03592</b>	<b>0.05185</b>	<b>0.07114</b>	<b>0.07993</b>	<b>0.04128</b>
<b>6 FF<sub>céu</sub></b>	0.00000	0.00000	0.00286	0.01253	0.03138	0.06779	0.07993	0.04128
<b>6 FF<sub>masc</sub></b>	0.01266	0.01754	0.02202	0.02339	0.02047	0.00335	0.00000	0.00000
<b>6 FF<sub>AL</sub></b>	<b>0.01266</b>	<b>0.01754</b>	<b>0.02488</b>	<b>0.03592</b>	<b>0.05185</b>	<b>0.07114</b>	<b>0.07993</b>	<b>0.04128</b>
<b>9 FF<sub>céu</sub></b>	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.02523	0.07993	0.04128
<b>9 FF<sub>masc</sub></b>	0.01266	0.01754	0.02488	0.03592	0.05185	0.04591	0.00000	0.00000
<b>9 FF<sub>AL</sub></b>	<b>0.01266</b>	<b>0.01754</b>	<b>0.02488</b>	<b>0.03592</b>	<b>0.05185</b>	<b>0.07114</b>	<b>0.07993</b>	<b>0.04128</b>

Conforme comentado no item 3.3.2.1, na p. 73, a relação entre o fator de forma CIE ( $FF_{CIE}$ ) e o fator de forma calculado no APOLUX ( $FF_{APOLUX}$ ) é  $FF_{CIE} * \pi = FF_{APOLUX}$ , então o fator de forma analítico para comparação com o calculado pelo APOLUX é mostrado na Tabela 53.

**Tabela 53:** Protocolo 5.14 – Quadro resumo do Fator de forma analítico CIE equivalente ao fator de forma calculado pelo APOLUX.

	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>3 FF<sub>céu</sub></b>	0.03462	0.05257	0.07816	0.11283	0.16288	0.22348	0.25110	0.12969
<b>3 FF<sub>masc</sub></b>	0.00514	0.00253	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
<b>3 FF<sub>AL</sub></b>	<b>0.03976</b>	<b>0.05511</b>	<b>0.07816</b>	<b>0.11283</b>	<b>0.16288</b>	<b>0.22348</b>	<b>0.25110</b>	<b>0.12969</b>
<b>6 FF<sub>céu</sub></b>	0.00000	0.00000	0.00898	0.03936	0.09858	0.21297	0.25110	0.12969
<b>6 FF<sub>masc</sub></b>	0.03976	0.05511	0.06918	0.07348	0.06430	0.01051	0.00000	0.00000
<b>6 FF<sub>AL</sub></b>	<b>0.03976</b>	<b>0.05511</b>	<b>0.07816</b>	<b>0.11283</b>	<b>0.16288</b>	<b>0.22348</b>	<b>0.25110</b>	<b>0.12969</b>
<b>9 FF<sub>céu</sub></b>	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07925	0.25110	0.12969
<b>9 FF<sub>masc</sub></b>	0.03976	0.05511	0.07816	0.11283	0.16288	0.14423	0.00000	0.00000
<b>9 FF<sub>AL</sub></b>	<b>0.03976</b>	<b>0.05511</b>	<b>0.07816</b>	<b>0.11283</b>	<b>0.16288</b>	<b>0.22348</b>	<b>0.25110</b>	<b>0.12969</b>

Para calcular o fator de forma no APOLUX, divide-se o valor da iluminância no ponto ( $E_p$ ) pela iluminância horizontal ( $E_{hz} = 12.540,60 \text{ cd/m}^2$ ), válido para a simulação realizada com o céu tipo 5. Foi calculado o fator de forma com a resolução de visibilidade do globo 90.

No primeiro momento, considerando que para o Céu CIE Tipo 5, a Componente Celeste (CC) é igual ao *Daylight Factor* que, também, é

igual ao Fator de Forma ( $CC=DF=FF$ ), a simulação foi realizada com a luminância da máscara vertical como nula ( $L_{obs}=0$ ). Desta forma obteve-se a Componente Celeste em cada ponto de medição e o fator de forma em relação a parte visível do céu, conforme mostra a Tabela 54.

**Tabela 54:** Protocolo 5.14 – Fator de forma ( $CC=DF=FF$ ) obtido no APOLUX.

	MV 3,00		MV 6,00		MV 9,00	
	$E_p$	$FF_{céu}$	$E_p$	$FF_{céu}$	$E_p$	$FF_{céu}$
<b>A</b>	435.28	0.034708	0.00	0.000000	0.00	0.000000
<b>B</b>	662.51	0.052826	0.00	0.000000	0.00	0.000000
<b>C</b>	976.36	0.077851	110.49	0.008810	0.00	0.000000
<b>D</b>	1 420.96	0.113302	501.09	0.039955	0.00	0.000000
<b>E</b>	2 042.80	0.162885	1 241.40	0.098984	0.00	0.000000
<b>F</b>	2 790.93	0.222538	2 656.14	0.211790	999.54	0.079699
<b>G</b>	3 160.80	0.252030	3 160.80	0.252030	3 160.80	0.252030
<b>H</b>	1 641.41	0.130880	1 641.41	0.130880	1 641.41	0.130880

No segundo momento, foi realizada simulação com a luminância da máscara vertical (MV) sendo igual a luminância do Zênite ( $L_{obs}=L_{zen}=12.540,60 \text{ cd/m}^2$ ). Desta forma obteve-se o fator de forma relativo a toda a abertura lateral, que deve ser igual ao valor obtido sem a máscara vertical, conforme mostrado na Tabela 55.

**Tabela 55:** Protocolo 5.14 – Fator de forma relativo a abertura lateral obtido no APOLUX..

	Sem Máscara		$L_{obs}=L_{zen}=12.540,60 \text{ cd/m}^2$					
	$E_p$	$FF_{AL}$	MV 3,00		MV 6,00		MV 9,00	
			$E_p$	$FF_{AL}$	$E_p$	$FF_{AL}$	$E_p$	$FF_{AL}$
<b>A</b>	496.05	0.03955	496.06	0.03955	496.07	0.03955	496.07	0.03955
<b>B</b>	695.63	0.05547	695.63	0.05547	695.65	0.05547	695.65	0.05547
<b>C</b>	976.36	0.07785	976.36	0.07785	976.39	0.07785	976.39	0.07785
<b>D</b>	1 420.96	0.11330	1 420.96	0.11330	1 420.99	0.11330	1 421.01	0.11331
<b>E</b>	2 042.80	0.16288	2 042.80	0.16288	2 042.82	0.16289	2 042.87	0.16289
<b>F</b>	2 790.93	0.22254	2 790.93	0.22254	2 790.93	0.22254	2 790.96	0.22254
<b>G</b>	3 160.80	0.25203	3 160.80	0.25203	3 160.80	0.25203	3 160.80	0.25203
<b>H</b>	1 641.41	0.13088	1 641.41	0.13088	1 641.41	0.13088	1 641.41	0.13088

Fazendo a diferença entre a primeira simulação (Tabela 54) e a segunda (Tabela 55), obtém-se o Fator de Forma relativo a máscara vertical (MV), mostrado na Tabela 56.

**Tabela 56:** Protocolo 5.14 – Quadro resumo dos fatores de forma obtidos no APOLUX relativo a totalidade da abertura lateral, ao céu e a máscara vertical.

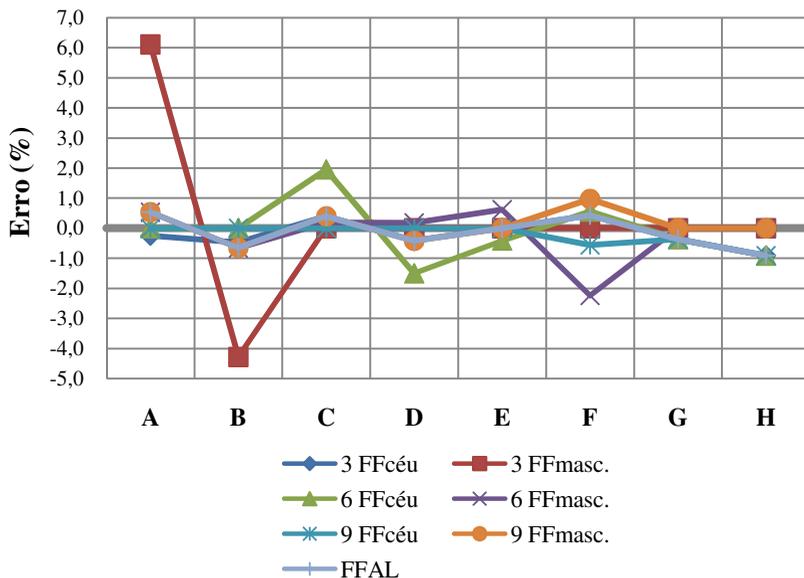
	A	B	C	D	E	F	G	H
<b>3 FF<sub>céu</sub></b>	0.03471	0.05283	0.07785	0.11330	0.16289	0.22254	0.25203	0.13088
<b>3 FF<sub>masc</sub></b>	0.00484	0.00264	0.00000	0.00000	-0.00001	0.00000	0.00000	0.00000
<b>3 FF<sub>AL</sub></b>	<b>0.03955</b>	<b>0.05547</b>	<b>0.07785</b>	<b>0.11330</b>	<b>0.16288</b>	<b>0.22254</b>	<b>0.25203</b>	<b>0.13088</b>
<b>6 FF<sub>céu</sub></b>	0.00000	0.00000	0.00881	0.03996	0.09898	0.21179	0.25203	0.13088
<b>6 FF<sub>masc</sub></b>	0.03955	0.05547	0.06904	0.07335	0.06391	0.01075	0.00000	0.00000
<b>6 FF<sub>AL</sub></b>	<b>0.03955</b>	<b>0.05547</b>	<b>0.07785</b>	<b>0.11330</b>	<b>0.16289</b>	<b>0.22254</b>	<b>0.25203</b>	<b>0.13088</b>
<b>9 FF<sub>céu</sub></b>	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07970	0.25203	0.13088
<b>9 FF<sub>masc</sub></b>	0.03955	0.05547	0.07785	0.11331	0.16289	0.14284	0.00000	0.00000
<b>9 FF<sub>AL</sub></b>	<b>0.03955</b>	<b>0.05547</b>	<b>0.07785</b>	<b>0.11331</b>	<b>0.16289</b>	<b>0.22254</b>	<b>0.25203</b>	<b>0.13088</b>

A Tabela 57 e o Gráfico 56 mostram os erros (em %), observados na comparação, entre os fatores de forma analíticos e simulados. Os valores negativos são aqueles que ficaram abaixo do fator de forma analítico. O valor destacado é aquele que superou o limite de  $\pm 5\%$ .

**Tabela 57:** Protocolo 5.14 – Resumos dos fatores de forma (analíticos e simulados) e dos erros (em %) entre eles.

	A	B	C	D	E	F	G	H	
<b>3 FF<sub>céu</sub></b>	<b>Analítico</b>	0.0346	0.0526	0.0782	0.1128	0.1629	0.2235	0.2511	0.1297
	<b>Apolux</b>	0.0347	0.0528	0.0779	0.1133	0.1629	0.2225	0.2520	0.1309
	<b>Erro (%)</b>	-0.2487	-0.4755	0.3939	-0.4148	-0.0048	0.4233	-0.3679	-0.9115
<b>3 FF<sub>masc</sub></b>	<b>Analítico</b>	0.0051	0.0025	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	<b>Apolux</b>	0.0048	0.0026	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	<b>Erro (%)</b>	<b>6.1021</b>	-4.2736	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
<b>6 FF<sub>céu</sub></b>	<b>Analítico</b>	0.0000	0.0000	0.0090	0.0394	0.0986	0.2130	0.2511	0.1297
	<b>Apolux</b>	0.0000	0.0000	0.0088	0.0400	0.0990	0.2118	0.2520	0.1309
	<b>Erro (%)</b>	0.0000	0.0000	1.9500	-1.4982	-0.4128	0.5572	-0.3679	-0.9115
<b>6 FF<sub>masc</sub></b>	<b>Analítico</b>	0.0398	0.0551	0.0692	0.0735	0.0643	0.0105	0.0000	0.0000
	<b>Apolux</b>	0.0396	0.0555	0.0690	0.0733	0.0639	0.0108	0.0000	0.0000
	<b>Erro (%)</b>	0.5288	-0.6565	0.1968	0.1780	0.6193	-2.2344	0.0000	0.0000
<b>9 FF<sub>céu</sub></b>	<b>Analítico</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0793	0.2511	0.1297
	<b>Apolux</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0797	0.2520	0.1309
	<b>Erro (%)</b>	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	-0.5597	-0.3679	-0.9115
<b>9 FF<sub>masc</sub></b>	<b>Analítico</b>	0.0398	0.0551	0.0782	0.1128	0.1629	0.1442	0.0000	0.0000
	<b>Apolux</b>	0.0396	0.0555	0.0779	0.1133	0.1629	0.1428	0.0000	0.0000
	<b>Erro (%)</b>	0.5288	-0.6565	0.3952	-0.4219	-0.0078	0.9704	0.0000	0.0000
<b>FF<sub>AL</sub></b>	<b>Analítico</b>	0.0398	0.0551	0.0782	0.1128	0.1629	0.2235	0.2511	0.1297
	<b>Apolux</b>	0.0396	0.0555	0.0779	0.1133	0.1629	0.2225	0.2520	0.1309
	<b>Erro (%)</b>	0.5288	-0.6565	0.3952	-0.4219	-0.0078	0.4224	-0.3679	-0.9115

**Gráfico 56:** Protocolo 5.14 - Erros (em %) entre os fatores de forma analítico e simulado.



As Tabelas 58 e 59 mostram que apenas um valor ficou acima do limite estabelecido, que equivale a 1,79% do total de 56 ocorrências, estando no fator de forma do ponto A da máscara vertical de 3,00m. Todos os valores ficaram dentro do limite e a quase totalidade, 91,07%, estão dentro da faixa abaixo ou igual a 1%.

**Tabela 58:** Faixa de ocorrência de erros na comparação entre os fatores de forma analítico e simulado para as máscaras verticais de 3, 6 e 9m e para toda a abertura lateral (AL)

	MV 3,00		MV 6,00		MV 9,00		FF <sub>AL</sub>	
	Ocor.	%	Ocor.	%	Ocor.	%	Ocor.	%
Até 1,00%	14	87.50	13	81.25	16	100.00	8	100.00
De 1,01% até 5,00%	1	6.25	3	18.75	0	0.00	0	0.00
De 5,01% até 10,00%	1	6.25	0	0.00	0	0.00	0	0.00
Maior que 10,01%	0	0.00	0	0.00	0	0.00	0	0.00
<b>Total</b>	<b>16</b>	<b>100.00</b>	<b>16</b>	<b>100.00</b>	<b>16</b>	<b>100.00</b>	<b>8</b>	<b>100.00</b>

**Tabela 59:** Resumo da faixa de ocorrência de erros na comparação entre os fatores de forma analítico e simulado.

	Ocorr.	%
Até 1,00%	51	91.07
De 1,01% até 5,00%	4	7.14
De 5,01% até 10,00%	1	1.79
Maior que 10,01%	0	0.00
<b>Total</b>	<b>56</b>	<b>100.00</b>

#### 4.6- RESUMO DOS RESULTADOS

A Tabela 60 mostra, para efeito de contabilização, a quantidade de ocorrências de erros descartadas, válidas, total de ocorrências, em que globo, qual ponto e em que céu ocorreram, através da compilação dos resultados dos protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14. As ocorrências descartadas são aquelas que são equívocos do Relatório Técnico CIE 171:200 em que não houve a possibilidade de correção.

**Tabela 60:** Relação das ocorrências descartadas e válidas para os protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14, sem computar os resultados do Fator de Forma do 5.14.

	Descartadas	Válidas	Total	Globo	Ponto(s)	Céu	
5.9	AZ 1x1	0	672	672	-	-	
	AZ 4x4	3	666	672	60, 90 e 150	A	1
		3			60, 90 e 150	G	13
5.11	AL 2x1	0	1056	1056	-	-	
	AL 4x3	0	1056	1056	-	-	
5.13	MH 0,50	0	256	256	-	-	
	MH 1,00	16	240	256	60 e 90	A - H	16
	MH 2,00	0	256	256	-	-	
5.14	MV 3,00	0	256	256	-	-	
	MV 6,00	64	192	256	60 e 90	A e B	1 - 16
		MV 9,00	128	126	256	60 e 90	A - D
2	F		12				
<b>Total</b>		<b>216</b>	<b>4776</b>	<b>4992</b>			
<b>%</b>		<b>4.33</b>	<b>95.67</b>	<b>100.00</b>			

A Tabela 61 mostra que a maior ocorrência de erros encontra-se nos resultados das simulações realizadas com o globo 60, onde 96,14% das ocorrências estão na faixa até 5% e mais da metade (64,37%) estão abaixo de 1%. Observa-se ainda que 3,87% estão acima de 5% e que, deste resultado, apenas 1,77 está acima de 10%.

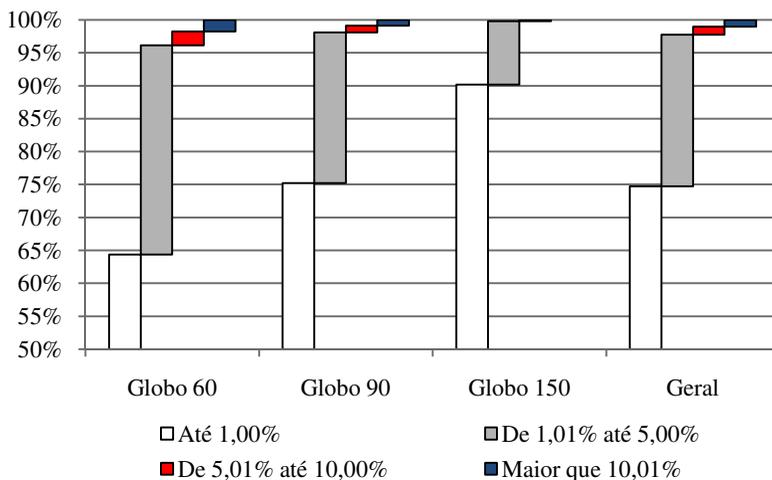
Os resultados com os globos 90 e 150 mostram-se mais apurados, sendo reduzidas significativamente as ocorrências de erros entre 5% e 10% e os acima de 10%.

O total geral dos resultados válidos mostra que 97,76% estão na faixa limite de 5%, que apenas 1,24% estão entre 5% e 10% e que 1,01% está acima de 10%, totalizando 2,24% acima da faixa limite. O Gráfico 57 resume a Tabela 61.

**Tabela 61:** Resumo dos resultados com as ocorrências válidas para os protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14.

	Globo 60		Globo 90		Globo 150		TOTAL	
	Ocor.	%	Ocor.	%	Ocor.	%	Ocor.	%
Até 1,00%	1167	64.37	1364	75.23	1037	90.17	3568	74.71
De 1,01% até 5,00%	576	31.77	414	22.84	111	9.65	1101	23.05
De 5,01% até 10,00%	38	2.10	19	1.05	2	0.17	59	1.24
Maior que 10,01%	32	1.77	16	0.88	0	0.00	48	1.00
<b>Total Válido</b>	<b>1813</b>	<b>100</b>	<b>1813</b>	<b>100</b>	<b>1150</b>	<b>100</b>	<b>4776</b>	<b>100</b>

**Gráfico 57:** Resumo dos resultados com as ocorrências válidas para os protocolos 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14.



## 5- CONCLUSÕES

Neste capítulo apresenta-se as principais conclusões resultantes da pesquisa, seguidas das limitações.

Este trabalho teve como objetivo avaliar o software APOLUX conforme os modelos de céu da norma CIE-ISO 15469:2004 e os protocolos do Relatório Técnico CIE 171:2006 referentes a iluminação natural, para verificar a convergência entre os valores simulados e as referências dos protocolos utilizados.

### 5.1- QUANTO AO RELATÓRIO TÉCNICO E AOS PROTOCOLOS

Conforme visto na apresentação dos resultados, alguns dos protocolos testados neste trabalho continham equívocos. São eles:

- **Protocolo 5.09**, em todos os pontos situados na parede no cenário de abertura 1,00 x 1,00m, no céu CIE tipo 3 – as referências apresentam-se invertidas;
- **Protocolo 5.9**, ponto A no céu CIE tipo 1 e ponto G no céu CIE tipo 13, no cenário de abertura zenital de 4,00 x 4,00m, – os resultados nos outros pontos estão abaixo de 1% para o mesmo tipo de céu;
- **Protocolo 5.13**, na fórmula que define a luminância da máscara horizontal (página 41 do Relatório Técnico). Este equívoco demandou mais uma série de simulações para constatação do erro;
- **Protocolo 5.13**, em todos os pontos no cenário com a máscara horizontal de 1,00m, no céu CIE tipo 16 (nublado) – as referências estão completamente equivocadas;
- **Protocolo 5.14**, nos pontos A e B para o cenário com máscara vertical de 6,00m, para todos os tipos de céu – a refletância da máscara não é uniforme para todos os pontos;
- **Protocolo 5.14**, nos pontos de A a D para o cenário com a máscara vertical de 9,00m, para todos os tipos de céu – a refletância da máscara não é uniforme para todos os pontos;
- **Protocolo 5.14**, no ponto F para o cenário com a máscara vertical de 9,00m, no céu CIE tipo 12 - a referência está completamente equivocada.

É importante, também, observar que a interação entre os resultados dos protocolos e do software APOLUX permitiu, também,

usar o próprio software para encontrar equívocos nos protocolos, o que, inicialmente, não era o objetivo desta pesquisa. A cada resultado discrepante, o modelo era revisado e as simulações refeitas. Persistindo nas discrepâncias, o protocolo era revisto para a confirmação de existência de erros.

Os resultados apresentados nesta pesquisa também convergem com os relatórios de validação dos programas AGi32 (DAU DESIGN AND CONSULTING INC. 2007) e Velux Daylight Visualizer 2 (LABAYRADE, 2009).

## **5.2- QUANTO AOS RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES**

Os resultados das simulações no APOLUX mostraram-se bastante confiáveis e atenderam plenamente aos critérios propostos pelo Relatório Técnico CIE 171:2006 conforme colocado abaixo.

No protocolo 5.8, mesmo com a divergência de DAU Design and Consulting Inc. (2007) a respeito da confiabilidade das referências apresentadas pelo protocolo, o APOLUX atendeu plenamente ao cenário simplificado proposto pelo Relatório. Os melhores resultados, como era esperado, foram obtidos à medida que se diminuía a área máxima no fracionamento das superfícies, juntamente com o aumento de precisão da resolução de visibilidade. O aumento da quantidade de ciclos de interações da radiosidade (interreflexões) se fez necessário de acordo com o aumento do valor da refletância da superfície.

No protocolo 5.9, mesmo com os equívocos apontados nesta pesquisa, os resultados obtidos atenderam precisamente aos critérios propostos pelo Relatório Técnico.

No protocolo 5.11 os resultados também ficaram dentro das expectativas.

No protocolo 5.13, conforme mostraram os resultados, também atenderam precisamente aos critérios propostos pelo Relatório Técnico.

No protocolo 5.14, a precisão dos resultados do software foi comprovada no cálculo do fator de forma analítico que, comparado com o fator de forma calculado pelo APOLUX.

De forma geral, o APOLUX se mostrou confiável para todos protocolos simulados, obtendo resultados bem precisos em relação as referências válidas do Relatório Técnico CIE 171:2006.

Conforme analisado segundo alguns protocolos, os resultados mais precisos nas simulações com o APOLUX são realizados com o globo 150 (maior resolução de visibilidade) e que, quanto mais elevada a refletância, também é maior a quantidade de ciclos de iterações.

Através dos resultados apresentados, podemos concluir que, pelos critérios do Relatório Técnico CIE 171:2006, o software APOLUX mostrou-se, então, como um programa que é capaz de produzir resultados precisos e confiáveis na simulação da iluminação natural, podendo contribuir com pesquisa científica em melhor compreensão do comportamento da iluminação natural e com o profissional, auxiliando-o em tomadas de decisão mais seguras de projetos de forma a direcionar o aproveitamento da iluminação natural em edificações, contribuindo com economia de energia e a eficiência energética.

Para análises de projeto com avaliações mais precisas e mais confiáveis qualitativa e quantitativamente, recomenda-se o uso das resoluções de visibilidade a partir do globo 90. Quanto menor o fracionamento e maior a quantidade de ciclos de iterações, melhores serão os resultados obtidos.

Pode-se concluir também que esta pesquisa referencia os resultados obtidos por Carvalho (2009), já que a precisão dos resultados do fator de forma também foi testada naquele trabalho, em outros protocolos.

### **5.3- LIMITAÇÕES DE ESTUDO**

O Relatório Técnico CIE 171:2006 foi utilizado como norteador desta pesquisa nos protocolos relativos apenas a iluminação natural, pois o APOLUX não tem a sistemática da iluminação artificial, mas para atender ao protocolo 5.08, foi desenvolvida uma função de cálculo para fontes pontuais.

Mais duas funções também foram criadas para atender aos protocolos 5.13 e 5.14: a determinação das luminâncias uniformes relativas ao céu (o quanto é refletido do céu) e absolutas (o quanto de brilho) para superfícies.

### **5.4- CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Por se tratar de um documento para avaliação de softwares de simulação da iluminação reconhecido internacionalmente, é conveniente que o Relatório Técnico CIE 171:2006, conforme o prof. Maamari colocou em seu e-mail, tenha uma revisão apurada para verificação e correção dos equívocos encontrados ao longo desta pesquisa e, também, conforme foi mostrado por CARVALHO (2009).

### **5.5- SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

O software APOLUX mostrou-se confiável em sua proposta de trabalho – simulação da iluminação natural – conforme protocolos

internacionais de avaliação. Aqui ficam algumas sugestões de trabalhos futuros com o software:

- Finalizar a avaliação do APOLUX com os protocolos 5.5, 5.10 e 5.12;
- Estudos de qualificação e quantificação da iluminação natural em edificações, preconizando a eficiência energética e valorizando a iluminação natural.
- Avaliação de estudos de iluminação em modelagens complexas, já que o conjunto de protocolos apresenta apenas ambientes de geometria simplificada.

## 6- REFERÊNCIAS

1. ABNT/CB-02/CE-02:135.02. **NBR15215-3 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, Comissão de Estudos de Iluminação Natural de Edificações. Origem: Projeto 02:135.02-003:2003. 2004. 33p.
2. APOLUX. (2007). **Programa de Simulação Computacional de Iluminação Natural** - versão beta V. Atualizado em 25 janeiro 2010. ([www.labcon.ufsc.br/foton](http://www.labcon.ufsc.br/foton)).
3. BAKER, N.; FANCHIOTTI, A.; STEEMERS, Koen. **Daylighting in Architecture: A European Reference Book.** Commission of European Communities, Directorate – General XII for Science Research and Development, London: James&James Editors, 1993.
4. BARNABÉ, Paulo Marcos Mottos. **A luz natural como diretriz de projeto.** *Arquitextos*, São Paulo, 07.084, Vitruvius, mai 2007 <<http://www.vitruvius.com.br/revistas/read/arquitextos/07.084/244>>. Acessado em 18 outubro 2010, 15:19.
5. BARROS, Anna. **A arte da Percepção. Um namoro entre a luz e o espaço.** São Paulo: Annablume, 1999.
6. BHAVANI, R.G.; KHAN, M.A. **Advanced lighting simulation tools for daylighting purpose – powerful features and related issues.** Trends in Applied Sciences Research, v. 6, n° 4, p. 345-363, 2011.
7. CABÚS, Ricardo C. **TROPLUX: Um Sotaque Tropical na Simulação da Luz Natural em Edificações.** Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2005, Anais ENCAC. Maceió, 2005.
8. CABÚS, Ricardo C. **Validação do Programa TROPLUX.** Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2005, Anais ENCAC. p.250-259. Maceió, 2005.

9. CARVALHO, Carolina R. **Avaliação do programa APOLUX segundo protocolos do relatório CIE 171:2006 referentes à iluminação natural.** Florianópolis, 2009. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósArq, UFSC, 2009.
10. CARVALHO, Carolina R.; CLARO, Anderson; GALAFASSI, Marcelo. **Protocolo do relatório técnico CIE 171:2006 aplicado para avaliar a conservação do fluxo luminoso no programa APOLUX.** In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010 Anais ENTAC, Canela-RS, 2010
11. CHRISTAKOU, Evangelos D. **A Simulação Computacional da Luz Natural Aplicada ao Projeto de Arquitetura.** Brasília. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de Brasília, 2004.
12. CIE STANDARD – COMMISSION INTERNATIONALE DE L’ECLAIRAGE. Technical Report.CIE 171:2006 **“Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs”.** France, 2006.
13. CIE STANDARD – COMMISSION INTERNATIONALE DE L’ECLAIRAGE.**Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky.** in: ISO 15469. 2004.
14. CLARO, Anderson, CUNHA, Agostinho V. L.; DIAZ, Lucas A.; RAMOS, Greici. **Comparação dos níveis de iluminação obtidos através de simulações computacionais no software APOLUX, usando os 15 modelos de céu adotados pela CIE.** In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2010 Anais ENTAC, Canela-RS, 2010
15. CLARO, Anderson. **Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade aplicado à Iluminação Natural.** Florianópolis, 1998. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção e Sistemas) Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção e Sistemas, UFSC, 1998.
16. CLARO, Anderson; PEREIRA, Fernando O. R.; LEDO, Rafael Z. **APOLUX – An Innovative Computer Code for Daylight Design and Analysis in Architecture and Urbanism.** In:

- Building Simulation, Aug. 2005, Montréal. Ninth International IBPSA Conference. Montréal: Canada, p. 199-206, 2005.
17. DARULA, S., KITLER, R. **CIE general sky standard defining luminance distributions.**In: Proc. ESIm, IBPSA Canada, pp. 11–13. 2002
  18. DAU DESIGN AND CONSULTING INC. **Validation of AGi32 against CIE 171:2006.**Calgary, Canadá, 2007. Disponível em:  
[http://www.dau.ca/ddci/files/Download/ReportonAGI32validationofCIE171\\_Compiled\\_070620.pdf](http://www.dau.ca/ddci/files/Download/ReportonAGI32validationofCIE171_Compiled_070620.pdf). Acessado em 11 dezembro 2010, 11:11.
  19. DELBIN, Simone. **Inserção de simulação computacional de conforto ambiental de edifícios em ensino de projeto arquitetônico: proposta de metodologia.** Campinas-SP. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Departamento de Arquitetura e Construção, UNICAMP, 2006.
  20. GRAZIANO JR.; Sigfrido. **Iluminação Natural: Porque é tão importante?**In: Revista Lume Arquitetura.São Paulo – SP, ed. 11, dez 2004 – jan 2005, p. 30-34. Disponível em [http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed11/ed\\_11\\_Ponto.pdf](http://www.lumearquitetura.com.br/pdf/ed11/ed_11_Ponto.pdf), acessado em 20 setembro 2010.
  21. INCROPERA, Frank P.; WITT, David P. de. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 3ª Ed. Editora Guanabara Koogan S/A. Rio de Janeiro-RJ, 1990.
  22. JUDKOFF, R.; J. NEYMARK, J. **Model Validation and Testing: The Methodological Foundation of ASHRAE Standard 140.**Conference Paper NREL/CP-550-40360. Julho, 2006. Apresentado no ASHRAE 2006 Annual Meeting Quebec City, Canadá, 24 a 29 de junho de 2006.
  23. KITLER, Richard; PEREZ, Richard; DARULA, Stanislav.**A new generation of sky standards.**In: Proc. Conf. Lux, Europa, p.359-373, 1997.
  24. KITTLER, Richard.; DARULA, Stanislav. **CIE General sky standard defining luminance distributions.**In: Proceedings of the eSim 2002. The bi-annual conference of IBPSA-Canada. p. 11–13 September Montreal. IBPSA Canada , 2002. Disponível em

<http://www.esim.ca/2002/documents/Proceedings/other2.pdf>.

Acessado em 19 agosto 2010.

25. LABAYRADE, R. et al. **Assessment of Velux Daylight Visualizer 2 against CIE 171:2006 Test Cases**. [s.l.]: Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat (ENTPE), Laboratoire des Sciences de l'Habitat. 2009. Download do relatório completo disponível em: [http://viz.velux.com/Daylight\\_Visualizer/News/Validation.aspx](http://viz.velux.com/Daylight_Visualizer/News/Validation.aspx). Acessado em 06 março 2011.
26. LE CORBUSIER. **Por uma arquitetura**. São Paulo (SP): Perspectiva, 1977.
27. LI, Danny H. W.; CHEUNG, H. L.; TANG, H. L.; CHENG, Charles C. K. **Identifying CIE standard skies using vertical sky component**. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics, Volume 73, Issue 13, p. 1861-1867. 2011.
28. LOMARDO, Louise Land Bittencourt; ALMEIDA, Carla Cristina da Rosa de; BRASIL, Paula de Castro. **Conforto ambiental, sustentabilidade e eficiência energética no espaço construído**. Niterói: A.L. Souto, 2011. CD-ROM. ISBN: 978-85-64773-00-4
29. MAAMARI, F; FONTOYNONT, M. **Application of the CIE test cases to assess the accuracy of lighting computer programs**. Elsevier B.V. Energy and Buildings 38, p. 869-877. 2006.
30. MAAMARI, Fawaz. **La simulation numérique de l'éclairage, limites et potentialités**. Tese de Doutorado. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2004.
31. MARDALJEVIC, J. **Daylight Simulation: Validation, Sky Models and Daylight Coefficients**. thesis submitted in partial fulfilment of the requirements of the De Montfort University for the degree of Doctor of Philosophy. 2000. Disponível em <http://www.iesd.dmu.ac.uk/~jm/doku.php?id=resources:thesis>. Acessado em 13 dezembro 2010, 21:00.
32. MARDALJEVIC, J. **Validation of a Lighting Simulation Program Under Real Sky Conditions**. Lighting Research and Technology, p. 181-188. 1995

33. NREL NATIONAL RENEABLE ENERGY LABORATORY. International energy agency building simulation test (BESTEST) and diagnostic method. Golden: NREL National Renewable Energy Laboratory, Fevereiro. 1995
34. PAPST, Ana L.; PEREIRA, Fernando O. R.; LAMBERTS, Roberto. **Uso de Simulação Computacional para Análise de Iluminação Natural**. In: Encontro Nacional De Tecnologia Do Ambiente Construído, 1998, Anais ENTAC (VII) Florianópolis, Brasil, 1998.
35. 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**. Florianópolis, 2009. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, 2009. 184p.
36. PEREIRA, Roberto C.; PEREIRA, Fernando O. R.; CLARO, Anderson; SOUZA, Luiz P. F. de; **Metodologia Para Avaliação De Ferramentas De Simulação Da Iluminação Natural Através De Mapeamento Digital De Luminâncias**. In: Encontro Nacional e Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído, 2007, Anais ENCAC. Ouro Preto, 2007.
37. PIZARRO, P. R.; SOUZA, L. C. L. **Qualificação da iluminação natural em interiores – aplicação das redes neurais artificiais e 3DSkyView**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 83-96, jan./mar. 2007.
38. PLATÃO. **A república**. São Paulo: Hemus, 1970. 301p
39. ROY, Geoffrey G.; **A Comparative Study of Lighting Simulation Packages Suitable for use in Architectural Design**. School of Engineering, Murdoch University, Rockingham Campus, Perth, Austrália, publicação de relatório técnico, 2000. 43 p. Disponível em <http://www.cadplan.com.au/Reports/LightSim.pdf>, acessado em 18 janeiro 2011.
40. SIEGEL, Robert; HOWELL, John R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. Tokyo: McGraw-Hill, 1972. 814p.

41. TREGENZA, P. R. **Daylighting algorithms**, ETSU S 1350, School of Architecture Studies, University of Sheffield, Crown Publishing, 1993.
42. TSANGRASSOULIS, Aris; BOURDAKIS, Vassilis. **Comparison of Radiosity and Ray-Tracing Techniques With a Practical Desing Procedure for the Prediction of Daylight Levels in Atria**. In: Renewable Energy 28, Issue 13, p. 2157-2162. 2003
43. VIANNA, Nelson S., GOLÇALVES, Joana C. S. **Iluminação e Arquitetura**. Geros s/c Ltda., São Paulo, SP, 2001. 400 p.