



AValiação DO PROGRAMA COMPUTACIONAL APOLUX SEGUNDO OS PROTOCOLOS 5.13 E 5.14 DA CIE 171:2006

Agostinho de Vasconcelos Leite da Cunha (1); Anderson Claro (2)

(1) Mestre, Professor do IFES Campus Colatina, agostinhoc@ifes.edu.br

(2) Doutor, professor do Departamento de Arquitetura e Urbanismo, UFSC, LabCon.

RESUMO

Atualmente a ferramenta de maior potencial para análise da iluminação natural é a simulação computacional, mas com o surgimento de tantos programas computacionais de simulação de iluminação fica a dúvida sobre quais têm resultados confiáveis. Com objetivo de verificar a precisão destes programas computacionais de simulação, 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 programas computacionais de simulação de iluminação. Este artigo mostra os resultados da avaliação do programa computacional de simulação APOLUX segundo os protocolos de validação 5.13 e 5.14, selecionados do Relatório Técnico CIE 171:2006, utilizando os modelos de céu da norma CIE-ISO 15469:2004 e considerando obstruções externas. A metodologia, para cada protocolo, constituiu-se da construção de uma modelagem em 3D, do tratamento da geometria do modelo de estudo, da simulação computacional e dos resultados dos cálculos analíticos e a comparação com as referências analíticas. Para avaliação dos resultados definiu-se como limite aceitável, para o erro simulado e calculado, uma faixa entre $\pm 5\%$. Constataram-se, então, alguns equívocos nos protocolos e o alto grau de convergência entre os resultados simulados e calculados para as avaliações da Componente Refletida Externa (CRE) e a Componente Celeste (CC). O APOLUX mostra-se, então, como uma ferramenta 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 programa computacional de simulação.

ABSTRACT

Currently, the greatest potential tool for analysis of daylighting is the computer simulation, but with the emergence of so many softwares it remains the doubt about which of them have reliable results. In order to verify the accuracy of these softwares, the *Commission Internationale de l'Eclairage* (CIE) has published the Technical Report CIE 171:2006 with analysis protocols for case studies, with simple scenarios that highlight certain aspects of light propagation, parameterized as quantitative validators of software lighting. This article shows the results of the evaluation of the software APOLUX, according to the validation protocols 5.13 and 5.14, selected from the Technical Report CIE 171:2006, using the model of the standard CIE sky-ISO 15469:2004 and considering external obstructions. The methodology for each protocol consisted of the 3D construction and the processing of geometry of the proposed model, computer simulation and the analytical calculations results and comparison with analytical references. For evaluation of the results, a range of $\pm 5\%$ was defined as acceptable limit for the simulated and calculated error. It was found then some misconceptions in the protocols and the high degree of convergence between the simulated and calculated results for assessments of External Component Reflected (ERC) and Sky Component (SC). The APOLUX shows up, thus, as a tool 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.

1. INTRODUÇÃO

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. Face às necessidades crescentes, é cada vez maior o número de programas computacionais de simulação que estão sendo desenvolvidos em todo o mundo e sem informação suficiente sobre as potencialidades, limites e exatidão. Esta falta de informação afeta consideravelmente a confiança de potenciais usuários nas simulações de iluminação em geral. Percebeu-se, então, a necessidade de avaliar a precisão das simulações realizadas pelos programas computacionais de simulação.

A CIE, através do Relatório Técnico CIE 171:2006, propôs uma metodologia de validação de programa computacional de simulação baseada no conceito de testar separadamente os diferentes aspectos da propagação da luz através de 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, avaliando a capacidade dos programas computacionais de simulação em respeitar as leis físicas relacionadas a esses parâmetros, comparando os resultados de simulação para referências analíticas ou experimentais.

Este trabalho é uma parte de Cunha (2011), onde o programa computacional de simulação APOLUX foi avaliado conforme os critérios dos protocolos 5.8, 5.9, 5.11, 5.13 e 5.14, nas resoluções de visibilidade dos globos 60, 90 e 150.

1.1. Modelos Numéricos

Conforme Pereira (2009, p. 16-17), a procura pelo entendimento da disponibilidade de luz natural é antiga. Nos séculos XVIII e XIX, a hemisfera uniforme de Lambert, com luminância unitária, era o modelo de céu simplificado utilizado e permitiu o desenvolvimento dos primeiros métodos de cálculo de iluminação natural baseados nos conceitos de projeção do ângulo sólido de aberturas. 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*, sendo: (i) 4 tipos de céu encoberto; (ii) céu luminância uniforme; (iii) 5 tipos de céu parcialmente nublado; (iv) 3 tipos de céu claro e; (v) 2 tipos de céu turvado.

1.2. O programa computacional de simulação APOLUX

O programa computacional de simulação APOLUX foi desenvolvido a partir da tese de Claro (1998), apresentando uma solução para o algoritmo da radiação baseado no Modelo Vetorial Esférico, sendo utilizado para simulação da iluminação natural e artificial, em espaços arquitetônicos e urbanos com o objetivo de auxiliar os profissionais nas tomadas de decisões em projeto.

O programa computacional de simulação calcula e representa a luz natural e artificial em espaços arquitetônicos e urbanos, usando arquivos em 3D gerados por editores gráficos. É constituído de dois módulos: (i) Fractal: importação do DXF e tratamento da geometria com a definição do fator de fracionamento¹ e configuração das características dos materiais; (ii) Fóton: resolução de visibilidade², condições da abóbada, tipos de céu e realização das simulações (CLARO, 1998 e 2005).

1.3. Validação de programa computacional de simulações

Segundo Delbin (2006) a validação de programa computacional de simulações consiste na combinação de validação empírica, analítica e técnicas comparativas de análise, conforme descritas a seguir: (i) **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; (ii) **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

¹ Divisão de todas as superfícies do modelo em triângulos cuja área máxima não será maior que este fator e que, quanto menor o fator maior é a quantidade de triângulos e, conseqüentemente, maior número de vértices a serem analisados.

² 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. Cada parcela define, a partir do centro, um ângulo sólido pré-calculado.

teórica ou para testar um determinado parâmetro; (iii) **validação comparativa** é feita a partir de comparações entre resultados de simulação de diferentes programas de simulação.

1.4. O Relatório Técnico CIE 171:2006

O CIE desenvolveu um conjunto de estudos de casos para referência com a qual os usuários podem avaliar a precisão de um programa computacional de simulação 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. 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 programa computacional de simulação com mais facilidade. Estes parâmetros são assim identificados: (i) Descrição da fonte luminosa e os cálculos da propagação da luz; (ii) Transferência da iluminação por aberturas e seus componentes (ou obstruções) e (iii) 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: (i) Cenários simples destacando determinado aspecto da propagação da luz; (ii) Protocolos robustos para minimizar as potenciais fontes de erro e (iii) identificação das fontes de erros para apresentação de objetivos.

2. OBJETIVO

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

3. METODOLOGIA

Foram selecionados os protocolos que verificam o comportamento dos modelos de céu, tipificados pela norma CIE-ISO 15469:2004, avaliando os cálculos da componente refletida externa e da componente celeste por abertura na fachada, todas sem vidro. Os protocolos selecionados, com seus objetivos e descrição do modelo são:

Protocolo 5.13: O objetivo deste estudo de caso é verificar a capacidade do programa computacional de simulação 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 (50% e 20%, respectivamente) a fim de calcular a solução analítica. 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.

Protocolo 5.14: O objetivo deste teste é verificar a capacidade do programa computacional de simulação 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 (50% e 20%, respectivamente) a fim de calcular a solução analítica. 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. A descrição geométrica dos protocolos é mostrada na Figura 1.

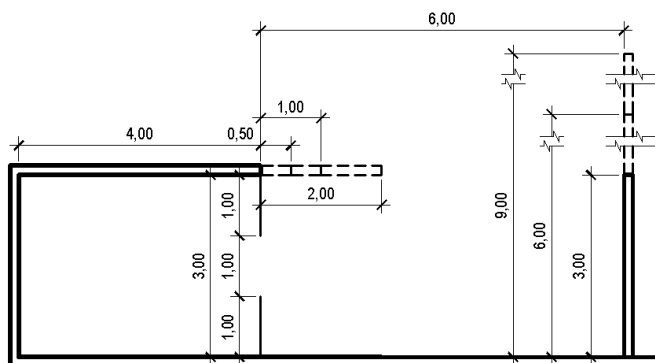


Figura 1: Descrição geométrica dos protocolos 5.13 e 5.14. Fonte: CIE 171:2006, p. 41 e 44. Desenho do autor.

3.1. Procedimentos metodológicos

Adotaram-se, então, os seguintes procedimentos: (i) Construção em 3D do modelo proposto em CAD e gravado no formato DXF (Data Exchange File); (ii) Tratamento no módulo Fractal do arquivo DXF estabelecendo os fracionamentos e as propriedades dos materiais; (iii) Simulação do modelo na resolução de visibilidade do globo 90 e diferentes tipos de céu no módulo Fóton; (iv) Comparação entre os resultados simulados e do protocolo; (v) Cálculo analítico dos modelos e suas relações; (vi) Comparação entre os resultados simulados e calculados e (vii) Análise das comparações dos resultados da simulação do protocolo.

Para calcular as luminâncias uniformes das máscaras horizontal e vertical relativas a cada tipo de céu 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 2

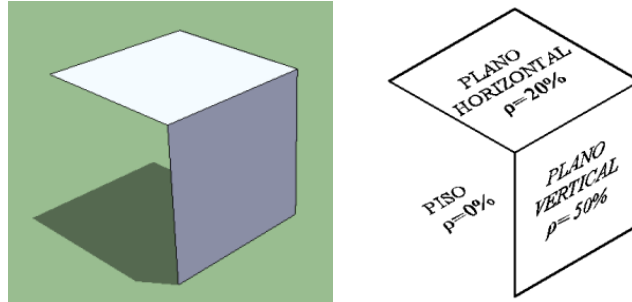


Figura 2: Modelagem dos planos vertical e horizontal para cálculo das luminâncias uniformes das máscaras horizontais. Desenho do autor.

Foi observado um equívoco na fórmula apresentada no protocolo 5.13: $L_{máscara} = (1/2) \cdot (L_{solo} / \rho_{máscara})$, sendo a correta $L_{máscara} = (1/2) \cdot (L_{solo} \cdot \rho_{máscara})$, sendo $L_{máscara}$: luminância uniforme da máscara horizontal; L_{solo} : luminância uniforme do piso externo e $\rho_{máscara}$: refletância da máscara horizontal. Com isso se fez necessário revisar as equações do item 5.13.1.1 do Relatório Técnico e refazer a álgebra para confirmação do equívoco. Os valores da iluminância vertical e das luminâncias das máscaras horizontal e vertical são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Valores da iluminância vertical e das luminâncias das máscaras horizontal e vertical, conforme as suas referências analíticas.

	Plano Horizontal		Plano Vertical		Prot. 5.13		Prot. 5.14		
	E_{ht}	L_{ph}	E_{vt}	L_{pv}	L_{solo}	L_{masc}	E_v	L_{solo}	L_{masc}
CIE Tipo 01	23 180.18	1 476	8 788.47	1 399	1 475.70	369	8 788.47	1 475.70	1 768
CIE Tipo 02	34 151.47	2 174	9 067.51	1 443	2 174.15	544	9 067.50	2 174.15	1 987
CIE Tipo 03	39 394.97	2 508	17 594.92	2 800	2 507.96	627	17 594.92	2 507.96	3 427
CIE Tipo 04	51 179.50	3 258	15 919.30	2 534	3 258.19	815	15 919.29	3 258.19	3 348
CIE Tipo 05	39 399.89	2 508	19 698.36	3 135	2 508.27	627	19 698.36	2 508.27	3 762
CIE Tipo 06	49 212.46	3 133	17 159.05	2 731	3 132.96	783	17 159.04	3 132.96	3 514
CIE Tipo 07	51 813.70	3 299	14 722.38	2 343	3 298.59	825	14 722.37	3 298.59	3 168
CIE Tipo 08	38 943.84	2 479	8 858.21	1 410	2 479.16	620	8 858.21	2 479.16	2 030
CIE Tipo 09	60 735.16	3 867	27 244.71	4 336	3 866.48	967	27 244.68	3 866.48	5 303
CIE Tipo 10	47 796.04	3 043	17 800.55	2 833	3 042.76	761	17 800.54	3 042.76	3 594
CIE Tipo 11	11 028.04	702	3 327.08	530	702.16	176	3 327.08	702.16	705
CIE Tipo 12	13 783.29	877	4 772.32	760	877.35	219	4 772.31	877.35	979
CIE Tipo 13	28 224.59	1 797	7 803.87	1 242	1 796.82	449	7 803.87	1 796.82	1 691
CIE Tipo 14	42 582.75	2 711	14 319.82	2 279	2 711.03	678	14 319.82	2 711.03	2 957
CIE Tipo 15	35 909.54	2 286	8 848.73	1 408	2 286.02	572	8 848.73	2 286.02	1 980
CIE Tipo 16	28 956.52	1 843	11 471.22	1 826	1 843.43	461	11 471.22	1 843.43	2 287

E_{ht} : Iluminância Horizontal Total [cd/m^2]; E_v : Iluminância Vertical Total [cd/m^2]; E_v : Iluminância Vertical [cd/m^2]; L_{ph} : Luminância no Plano Horizontal [cd/m^2]; L_{pv} : Luminância no Plano Vertical [cd/m^2]; L_{solo} : Luminância do Solo [cd/m^2]; L_{masc} : Luminância da Máscara [cd/m^2].

Os modelos foram fracionados, no módulo Fractal, 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 referência e os pontos das superfícies fracionadas (a distribuição dos pontos de referência é mostrada na Figura 3).

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 4-a. A hipótese de luminância uniforme da máscara externa leva a definir as paredes externas também contínuas com refletância igual a 0%, isto apenas para efeito de representação, dado que a luminância da máscara é dada no protocolo e não calculada em decorrência do exterior. 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 4-b.

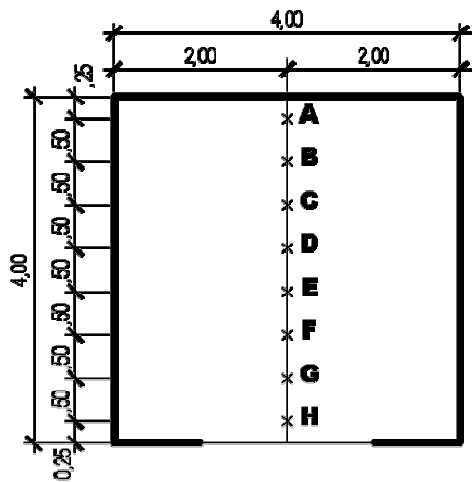


Figura 3: Posicionamento dos pontos de referência no piso. Fonte: CIE 171:2006, p. 42.

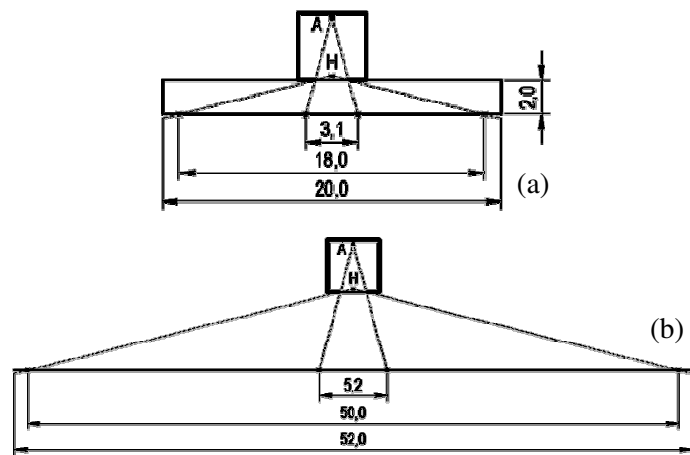


Figura 4: Definição do comprimento das máscaras horizontal (protocolo 5.13 - a) e vertical (protocolo 5.14 - b). Desenho do autor

A distribuição de luminâncias do céu é obtida através das equações dos céus do CIE-ISO 15469:2004. Foram adotados, conforme definem os protocolos, os seguintes parâmetros de configuração de abóbada celeste no APOLUX: (i) **Azimute do Sol:** 180°; (ii) **Altura angular:** 60°; (iii) **Orientação (Norte):** 0°; (iv) **Tipo de Cálculo:** Somente céu (sem considerar a luz direta do Sol) e (v) **Tipo de céu:** todos os 16 tipos, um por vez. Para o cálculo da radiosidade a quantidade de ciclos de iterações, devido às refletâncias serem de 0%, foi definida com 1 ciclo. Para calcular a iluminância horizontal externa foi previsto um plano de análise horizontal posicionado na mesma cota do teto para o protocolo 5.13 e na cota da maior máscara (9,00m) no protocolo 5.14.

Neste trabalho foram realizadas, no total, 96 simulações.

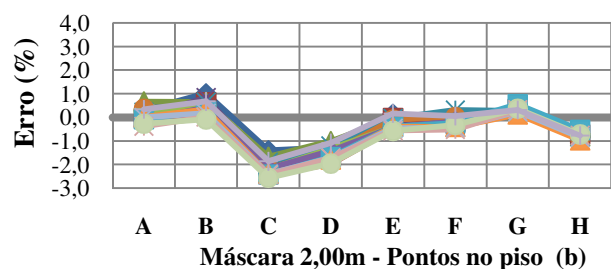
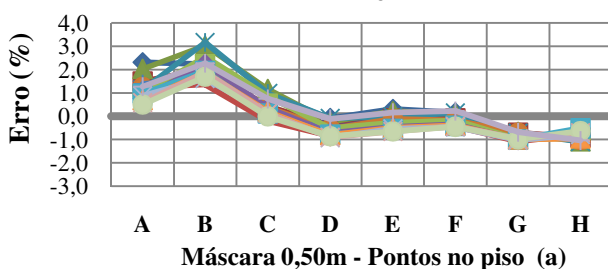
4. ANÁLISE DE RESULTADOS

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. Como o Relatório Técnico 171:2006 não especifica qual é a margem aceitável de erros, considera-se, então, a faixa entre ±5%. Os erros, oriundos da diferença entre o valor obtido na simulação e referência do protocolo, foram calculados através da Equação 01, mostrada abaixo.

$$\text{Erro (\%)} = [(\text{Simulação} / \text{Referência}_{\text{CIE}}) - 1] \times 100 \quad [\text{Eq. 01}]$$

4.1. Protocolo 5.13

Abaixo são mostrados os gráficos dos resultados das simulações com as máscaras horizontais de 0,50m, 1,00m e 2,00m na resolução de visibilidade do globo 90.



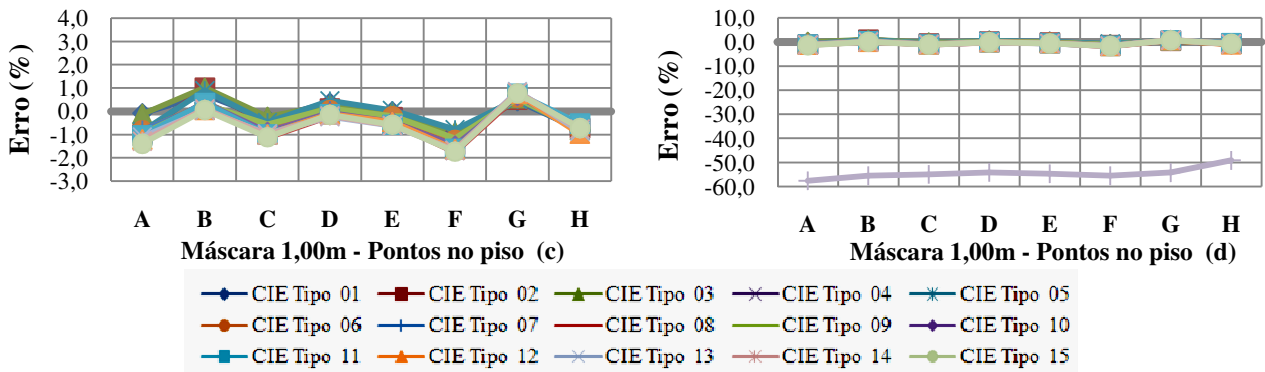


Figura 5: Erros (em %) para dos resultados das simulações no protocolo 5.13.

Os resultados das simulações mantiveram-se dentro do limite estabelecido, exceto nas simulações com a máscara de 1,00m para o céu tipo 16 (nublado), apresentando erros entre 50% e 60%, conforme mostra a figura 5 (c e d). A justificativa para este comportamento é o equívoco nos dados fornecidos pelo protocolo, pois deveriam estar próximos dos valores do céu tipo 1 (nublado), no entanto os valores se apresentam próximos ao céu tipo 15 (turvado), conforme mostra a Tabela 2. Os erros do céu 16 não são computados na contabilidade final.

Tabela 2: Comparação das referências entre os céus 01, 15 e 16.

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
	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

4.2. Protocolo 5.14

Abaixo são mostrados os gráficos dos resultados das simulações com as máscaras verticais de 3,00m, 6,00m e 9,00m na resolução de visibilidade do globo 90.

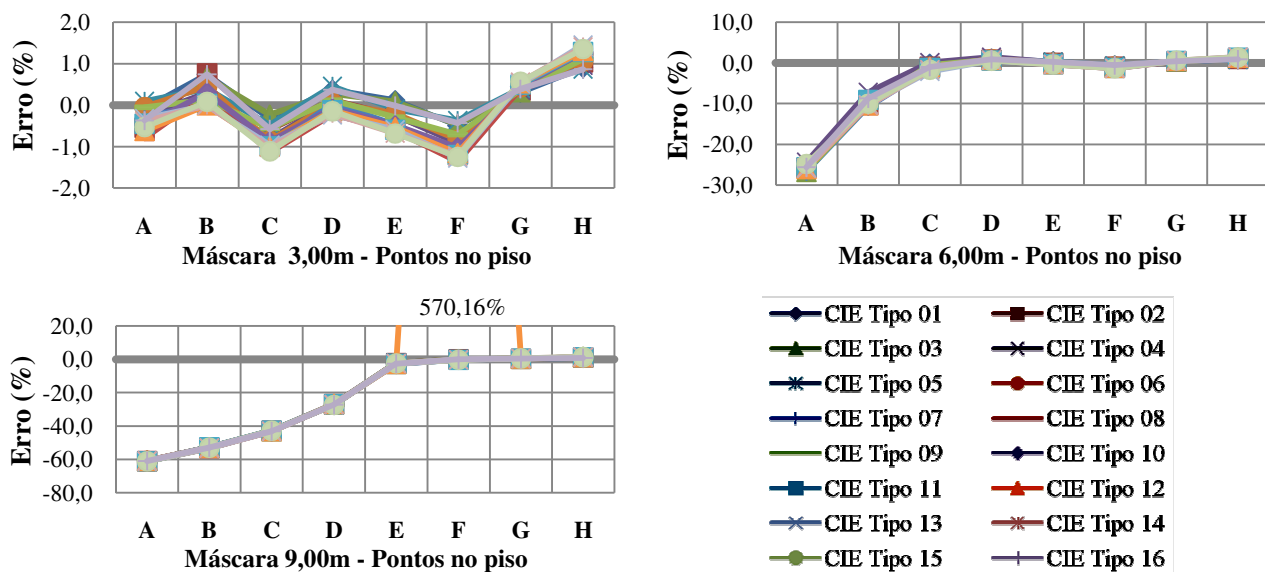


Figura 6: Erros (em %) para dos resultados das simulações no protocolo 5.14.

Os resultados das simulações, com o cenário com a máscara de 3,00m, mantiveram-se dentro do limite estabelecido. Observou-se, no cenário com a máscara de 9,00m, uma ocorrência de um erro de 570,16% no

ponto F para o céu 12, que pode ser justificado devido a mais uma referência equivocada do protocolo. Observou-se ainda que a ocorrência de erros na faixa de 20 a 60% está concentrada nos pontos onde a visão da máscara vertical é total (100%) - pontos A, B, C e D do cenário com a máscara 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 3 mostra, para cada ponto de medição, a área visível (em %) da máscara vertical através da abertura lateral - 100% equivalem à visão da máscara vertical, pelo ponto em questão, por toda abertura lateral.

Tabela 3: Área visível (em %) das máscaras verticais (MV) vistas através da abertura lateral.

	A	B	C	D	E	F	G	H
Área visível da MV 3,00m (%)	15.40	5.40	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Área visível da MV 6,00m (%)	100	100	88.60	63.60	35.50	3.40	0.00	0.00
Área visível da MV 9,00m (%)	100	100	100	100	100	52.20	0.00	0.00

Este comportamento pode ser justificado devido a um 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 02, dos pontos no piso, nos fornece o valor da iluminância da máscara horizontal, como mostra a Equação 03.

$$F_{12} = \frac{1}{2\pi} \cdot \left[\arctan Y - \frac{1}{\sqrt{1+X^2}} \cdot \arctan \frac{Y}{\sqrt{1+X^2}} \right] \quad [\text{Eq. 02}]$$

Onde: $X = \frac{a}{h}$ e $Y = \frac{b}{h}$ (a , b e h são mostrados na Figura 7)

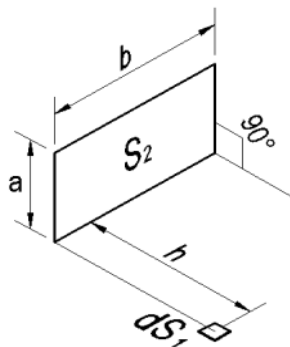


Figura 7: Cálculo do fator de forma para superfícies perpendiculares³.

$$E_{másc.ver} = \frac{DF_{CIE}}{\text{Fator de Forma}} \quad [\text{lx}] \quad [\text{Eq. 03}]$$

No cenário com a máscara de 9,00m, considerando os valores de referência dos céus Tipo 1 (Céu encoberto) e Tipo 5 (céu de luminância uniforme), ao substituirmos os valores na fórmula deveríamos obter resultados de $E_{másc.ver}$ iguais para todos os pontos, mas não é o que mostra a Tabela 4, o que comprova o equívoco:

Tabela 4: Cálculo da iluminância para a região da máscara vertical de 9,00m vista para os pontos no piso, conforme as referências CIE para os céus 1 e 5.

Ponto	Fator de Forma	Céu tipo 1		Céu tipo 5	
		DF _{CIE}	E _{másc.ver.}	DF _{CIE}	E _{másc.ver.}
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

³Fontes: CIE 171:2006, p. 22; TREGENZA, 1993, p. 3.14 (1); SIEGEL, 1972, p. 784

Também foi calculado o fator forma analítico em relação a máscara vertical, com a Equação 2, 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 à máscara vertical de 9,00m e ao céu é mostrado na Tabela 5.

Tabela 5: Fator de forma analítico em relação à máscara vertical de 9,00m

	A	B	C	D	E	F	G	H
FF_{máscara}	0.01266	0.01754	0.02488	0.03592	0.05185	0.04591	0.00000	0.00000
FF_{céu}	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.02523	0.07993	0.04128
FF_{Abertura Lateral}	0.01266	0.01754	0.02488	0.03592	0.05185	0.07114	0.07993	0.04128

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. A relação entre o fator de forma CIE (FF_{CIE}) e o fator de forma calculado no APOLUX (FF_{APOLUX}) é $FF_{CIE} * \pi = FF_{APOLUX}$ ⁴, então o fator de forma analítico para comparação com o calculado pelo APOLUX é mostrado na Tabela 6 para todos os cenários do protocolo 5.14.

Tabela 6: Quadro resumo do Fator de forma analítico CIE equivalente ao fator de forma calculado pelo APOLUX.

	A	B	C	D	E	F	G	H
FF_{AL}*π	0.03976	0.05511	0.07816	0.11283	0.16288	0.22348	0.25110	0.12969
3 FF_{céu}	0.03462	0.05257	0.07816	0.11283	0.16288	0.22348	0.25110	0.12969
3 FF_{masc}	0.00514	0.00253	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
3 FF_{AL}	0.03976	0.05511	0.07816	0.11283	0.16288	0.22348	0.25110	0.12969
6 FF_{céu}	0.00000	0.00000	0.00898	0.03936	0.09858	0.21297	0.25110	0.12969
6 FF_{masc}	0.03976	0.05511	0.06918	0.07348	0.06430	0.01051	0.00000	0.00000
6 FF_{AL}	0.03976	0.05511	0.07816	0.11283	0.16288	0.22348	0.25110	0.12969
9 FF_{céu}	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000	0.07925	0.25110	0.12969
9 FF_{masc}	0.03976	0.05511	0.07816	0.11283	0.16288	0.14423	0.00000	0.00000
9 FF_{AL}	0.03976	0.05511	0.07816	0.11283	0.16288	0.22348	0.25110	0.12969

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.

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 7.

Tabela 7: 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	$FF_{céu}$
A	435.28	0.034708	0.00	0.000000	0.00	0.000000
B	662.51	0.052826	0.00	0.000000	0.00	0.000000
C	976.36	0.077851	110.49	0.008810	0.00	0.000000
D	1 420.96	0.113302	501.09	0.039955	0.00	0.000000
E	2 042.80	0.162885	1 241.40	0.098984	0.00	0.000000
F	2 790.93	0.222538	2 656.14	0.211790	999.54	0.079699
G	3 160.80	0.252030	3 160.80	0.252030	3 160.80	0.252030
H	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 8.

⁴ No APOLUX o cálculo é feito com a luminância enquanto que os protocolos as referências são calculadas pela excitância ($M = \pi \cdot L$)

Tabela 8: Fator de forma relativo à abertura lateral obtido no APOLUX.

	Sem Máscara		$L_{obs}=L_{zen}=12.540,60cd/m^2$					
	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}
A	496.05	0.03955	496.06	0.03955	496.07	0.03955	496.07	0.03955
B	695.63	0.05547	695.63	0.05547	695.65	0.05547	695.65	0.05547
C	976.36	0.07785	976.36	0.07785	976.39	0.07785	976.39	0.07785
D	1 420.96	0.11330	1 420.96	0.11330	1 420.99	0.11330	1 421.01	0.11331
E	2 042.80	0.16288	2 042.80	0.16288	2 042.82	0.16289	2 042.87	0.16289
F	2 790.93	0.22254	2 790.93	0.22254	2 790.93	0.22254	2 790.96	0.22254
G	3 160.80	0.25203	3 160.80	0.25203	3 160.80	0.25203	3 160.80	0.25203
H	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 7) e a segunda (Tabela 8), obtém-se o Fator de Forma relativo a máscara vertical (MV). A Tabela 9 mostra 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 9: Resumos dos fatores de forma (analíticos e simulados) e dos erros (em %) entre eles.

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

5. CONCLUSÕES

Conforme visto na apresentação dos resultados, os protocolos testados neste artigo continham equívocos, resumidos a seguir:

- **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;

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;

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;

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 programa computacional de simulação APOLUX permitiu, também, usar o próprio programa computacional de simulação para encontrar equívocos nos protocolos, o que, inicialmente, não era o objetivo deste trabalho. 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).

Os resultados das simulações no APOLUX mostraram-se bastante confiáveis e atenderam plenamente aos critérios propostos pelo Relatório Técnico CIE 171:2006. A precisão dos resultados do programa computacional de simulação foi comprovada, no protocolo 5.14, no cálculo do fator de forma analítico comparando com o fator de forma calculado pelo APOLUX.

Então, através dos resultados apresentados, podemos concluir que, pelos critérios do Relatório Técnico CIE 171:2006, o programa computacional de simulação APOLUX mostra-se como uma ferramenta que é capaz de produzir resultados precisos e confiáveis na simulação da iluminação natural, podendo contribuir com a pesquisa científica, de forma a compreender melhor o comportamento da iluminação natural, e também com o profissional, auxiliando-o em tomadas de decisão de projeto mais seguras aproveitando da melhor maneira a iluminação natural nas edificações, contribuindo com a economia de energia e a eficiência energética.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APOLUX. (2007). **Programa de Simulação Computacional de Iluminação Natural** - versão beta V. Atualizado em 25 janeiro 2010. (www.labcon.ufsc.br/foton).
- CIE STANDARD – COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. **Spatial distribution of daylight — CIE standard general sky**. in: ISO 15469. 2004.
- CIE STANDARD – COMMISSION INTERNATIONALE DE L'ECLAIRAGE. Technical Report. CIE 171:2006 “**Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs**”. France, 2006.
- 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.
- CUNHA, Agostinho V. L. **Avaliação do programa APOLUX segundo protocolos de modelos de céu do Relatório Técnico CIE 171:2006**. Florianópolis, 2011. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósArq, UFSC, 2011.
- DARULA, S., KITLER, R. **CIE general sky standard defining luminance distributions**. In: Proc. ESIm, IBPSA Canada, pp. 11–13. 2002
- 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. Acessado em 11 dezembro 2010, 11:11.
- 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.
- 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.
- KITLER, Richard; PEREZ, Richard; DARULA, Stanislav. **A new generation of sky standards**. In: Proc. Conf. Lux, Europa, p.359-373, 1997.
- 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.
- 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. Acessado em 06 março 2011.
- 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.
- MAAMARI, Fawaz. **La simulation numérique de l'éclairage, limites et potentialités**. Tese de Doutorado. L'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon. 2004.
- NREL NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. International energy agency building simulation test (BESTEST) and diagnostic method. Golden: NREL National Renewable Energy Laboratory, Fevereiro. 1995
- 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.
- SIEGEL, Robert; HOWELL, John R. **Thermal Radiation Heat Transfer**. Tokyo: McGraw-Hill, 1972. 814p.
- TREGENZA, P. R. **Daylighting algorithms**, ETSU S 1350, School of Architecture Studies, University of Sheffield, Crown Publishing. 1993.