

PPG-FAU UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: TECNOLOGIA

A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA LUZ NATURAL
APLICADA AO PROJETO DE ARQUITETURA

EVANGELOS DIMITRIOS CHRISTAKOU

BRASÍLIA, DF
DEZEMBRO DE 2004

PPG-FAU UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
MESTRADO EM ARQUITETURA E URBANISMO
AREA DE CONCETRAÇÃO: TECNOLOGIA

A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA LUZ NATURAL
APLICADA AO PROJETO DE ARQUITETURA

EVANGELOS DIMITRIOS CHRISTAKOU

ORIENTADOR:

PROF. DRA. CLAUDIA NAVES DAVID AMORIM

Dissertação apresentada ao Programa e Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo da Faculdade de Arquitetura e
Urbanismo da Universidade de Brasília, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Mestre em Arquitetura
e Urbanismo.

Brasília, DF
06 de dezembro de 2004

FOLHA DE APROVAÇÃO

Candidato: Evangelos Dimitrios Christakou

Dissertação defendida e aprovada

Profa. Dra. CLAUDIA NAVES DAVID AMORIM (orientadora)
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de Brasília

Prof. Dr. NEANDER FURTADO SILVA
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade de Brasília

Prof. Dr. HEITOR DA COSTA SILVA
Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Brasília, DF
06 de Dezembro de 2004

Aos meus pais, Fotini e Dimitri (em memória)
e aos meus filhos Olívia, Gabriel Dimitrios e Lucas
Dimitrios.

AGRADECIMENTOS

À Claudia Amorim pela amizade e paciência;

Ao Programa de Pós-Graduação da FAU-UnB, por ter-me dado a oportunidade de voltar a estudar a Arquitetura;

À Secretaria da Pós, especialmente ao João e Junior;

Ao Valmor pelo apoio no uso dos computadores do LEPAC;

Aos colegas e amigos Darja, Delaize, Grillo, Juliana, Liza, e Valério, pela amizade e agradável convivência ao longo do curso;

Ao Arq. Silvano Pereira pela amizade e solidariedade;

Aos meus amigos e colegas de trabalho na Prefeitura do Campus da UnB;

A todos os meus amigos daqui e de lá, não citados aqui por absoluta falta de espaço;

À minha filha Olívia pela ajuda na digitação, e etc.;

À minha irmã Helena, pelo apoio e paciência em ler este trabalho;

À Joyce ajuda na organização da bibliografia;

À Fernanda pela compreensão e solidariedade.

RESUMO

Este trabalho estuda a **Simulação Computacional da Luz Natural aplicada ao Projeto de Arquitetura**, através de avaliação de 4 softwares de simulação – DESKTOP RADIANCE, LIGHTSCAPE, RAYFRONT e RELUX VISION. Estes softwares foram avaliados levando-se em conta, quesitos como Interface com o usuário, Geometria, Output, Parâmetros da Luz Natural, Descrição ótica dos materiais, Processamento, Validação e Suporte ao usuário. A interação com a interface, em especial, é extremamente importante para o arquiteto, pois é a melhor forma de superar as barreiras naturais para a utilização destes processos digitais, no processo de projeção arquitetônica visando alcançar o conforto ambiental e a eficiência energética. A metodologia empregada inclui um grande número de simulações que objetivam testar os softwares nas diversas condições da Luz Natural. Os resultados desta avaliação mostram bom potencial para um maior uso dos softwares de simulação por parte dos arquitetos, através da melhor compreensão das ferramentas e da utilização de material produzido para complementação dos manuais, os tutoriais.

PALAVRAS CHAVE: Iluminação natural, simulação computacional e projeto de arquitetura.

ABSTRACT

This work studies Daylighting Simulation in the Architectural Project, through the evaluation of 4 simulation tools - DESKTOP RADIANCE, LIGHTSCAPE, RAYFRONT and RELUX VISION. The evaluation have been performed taking into account criteria like User Interface, Geometry, Output, Daylight Parameters, Materials Description, Processing, Validation and User Support. Among these criteria, User Interface is especially important to the architect, as it is the best form to surpass the natural barriers to the use of digital processes in architectural design, aiming to reach environmental comfort and energy efficiency. The used methodology includes a large number of simulations, aiming to test the simulation tools in different conditions of daylight. The results of this evaluation shows a large potential for a better use of simulation tools by architects, through the best understanding of the tools and the use of material produced for complementation of manuals, the tutorials.

KEY WORDS: daylighting, computer simulation, architectural design.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xii
Siglas e Abreviaturas	xiii
Capítulo 1 – Introdução	1
1.1 Justificativa	3
1.2 Objetivos	5
1.3 Procedimentos Metodológicos	6
1.4 Estrutura do Trabalho	6
Capítulo 2 – A Simulação e o Projeto de Arquitetura	8
2.1 A Simulação Computacional da LN e o Projeto de Arquitetura	10
2.2 A Simulação Computacional nas Diversas Fases do Projeto Arquitetônico	13
2.3 O Uso da Simulação Computacional da Luz Natural na Prática da Arquitetura	15
2.4 As Ferramentas da Simulação	16
2.5 A Ferramenta Ideal: A Integração da Simulação ao Projeto do Edifício	22
Capítulo 3 – Luz Natural e Arquitetura	25
3.1 Referencial teórico da Luz Natural	26
3.2 A Luz Natural no Projeto de Arquitetura	29
3.3. Avaliação da Luz Natural na Arquitetura	35
Capítulo 4 – A Simulação Computacional da Luz Natural	36
4.1 O desenvolvimento da Simulação Computacional da Luz Natural	37
4.2 Procedimentos Computacionais de Simulação da Luz Natural (Algoritmos e Métodos)	37
4.3 A Imagem Sintética e o problema da transformação dos resultados	41
4.4 Os Softwares de Simulação da Luz Natural: softwares avaliados	41
4.5 Validação da Simulação Computacional	46
Capítulo 5 – Metodologia Proposta para Avaliação dos Softwares de Simulação	48
5.1 Metodologia Proposta e Sua Aplicação	50
5.2 Os Critérios para Avaliação dos Softwares de Simulação	53
Capítulo 6 – As Simulações Realizadas	68
6.1 Descrição dos parâmetros das simulações	69
6.2 Detalhamento das simulações	74
6.3 Resultados das Simulações	75
6.4 Avaliação dos Softwares	76
6.5 As Interfaces dos Softwares	77

Capítulo 7 – Discussão e Conclusões	80
7.1 Discussão	81
7.2 Conclusões	91
7.3 Desdobramentos e Trabalhos Futuros	94
Referencias Bibliográficas	95
Glossário	101
Anexo I – Principais Softwares de Simulação da LN	109
Anexo II – Principais Algoritmos	112
Anexo III – Simulações Realizadas	117
Anexo IV – Tutoriais dos softwares RAYFRONT e DESKTOP RADIANCE	132

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2

Figura 01 – Fluxograma de fatores envolvidos em uma simulação computacional - entrada e saída	11
Figura 02 – Fluxograma de procedimentos de entrada em uma simulação	12
Figura 03 – Fluxograma de procedimentos de cálculo e saídas em uma simulação	13
Figura 04 – Fluxograma de Projeto Arquitetônico apoiado por simulação computacional	15

Capítulo 3

Figura 05 – A Luz Natural no espaço interior do edifício	26
--	----

Capítulo 4

Figura 06 – LS - Simulação da LN no espaço-padrão	42
Figura 07 – DR - Simulação da LN no espaço-padrão	44
Figura 08 – RF - Simulação da LN no espaço-padrão	45
Figura 09 – RL - Simulação da LN no espaço-padrão	46

Capítulo 5

Figura 10 – Metodologia proposta	50
Figura 11 – Regra da mão-direita	56

Capítulo 6

Figura 12 – Planta, Elevação e Perspectiva Isométrica do espaço-padrão	71
Figura 13 – Ficha com os parâmetros da simulação	75
Figura 14 – Análise de Contornos de isolux gerada no DR	75
Figura 15 – Gráfico analítico dos resultados da avaliação dos softwares de simulação	76
Figura 16 – Interface do DESKTOP RADIANCE para ajuste dos dados geográficos, da simulação e propriedades óticas dos materiais.	77
Figura 17 – Janela DOS que transfere os dados da interface do DESKTOP RADIANCE para o cálculo no RADIANCE.	77
Figura 18 – Interface do RAYFRONT, ajustando parâmetros geográficos, atribuindo materiais, criando novos materiais e a janela de simulação.	78
Figura 19 – Interface do LIGHTSCAPE – Ajuste da câmera sintética,	78

ajuste das propriedades óticas dos materiais, recurso *wizard* para o *set-up* final da simulação.

Figura 20 – Interface do RELUX PRO + VISION – Atribuição de propriedades óticas dos materiais, Barra de Progresso, com tempo decorrido e o restante para o termino da simulação. 79

Anexo II

Figura 21 – Imagens do CORNELL BOX produzidas por diversas técnicas 114

Figura 22 – Imagem1, comparada com imagem 4 (vídeo-câmera) 115

Figura 23 – Imagem 2, comparada com imagem 4 (vídeo-câmera) 115

Figura 24 – Imagem 3, comparada com imagem 4 (vídeo-câmera) 116

Anexo III

Figura 25 – LS, dia típico de Inverno. 118

Figura 26 – DR, dia típico de Inverno. 119

Figura 27 – RF, dia típico de Inverno. 120

Figura 28 – RL, dia típico de Inverno. 121

Figura 29 – LS, dia típico de Primavera. 122

Figura 30 – DR, dia típico de Primavera. 123

Figura 31 – RF, dia típico de Primavera. 124

Figura 32 – RL, dia típico de Primavera. 125

Figura 33 – LS, dia típico de Verão. 126

Figura 34 – DR, dia típico de Verão. 127

Figura 35 – RF, dia típico de Verão. 128

Figura 36 – RL, dia típico de Verão 129

Anexo IV

Figura 37 – Sitio WWW desenvolvido para os tutoriais. 133

Figura 38 – Pagina inicial dos tutoriais. 134

LISTA DE TABELAS

Capítulo 2

Tabela 01 – Listagem dos principais softwares disponíveis	19
---	----

Capítulo 5

Tabela 02 – Base para os critérios de avaliação adotados e seus respectivos pesos	53
---	----

Tabela 03 – Critérios de avaliação detalhados	65/66
---	-------

Capítulo 6

Tabela 04 – Dados da LN em Brasília	72
-------------------------------------	----

Tabela 05 – Dados de iluminância global em plano vertical e horizontal para Brasília nos dias típicos	72
---	----

Tabela 06 – Parâmetros adotados nas variações	75
---	----

Tabela 07 – Resultado da avaliação dos softwares de simulação	76
---	----

Anexo I

Tabela 08 – Listagem dos principais softwares de simulação	110
--	-----

Tabela 09 – Quadro completo da avaliação dos softwares de simulação.	130/131
--	---------

SIGLAS E ABREVIATURAS

3D –	Tridimensional
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CAD	<i>Computer Aided Design</i> - Projeto Assistido por Computador
CG	Computação Gráfica
CIE	<i>Comission Internationale d'Éclairage</i>
FLD/DLF	<i>Daylight Factor</i> – Fator de Luz do dia
DR	DESKTOP RADIANCE
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IES	<i>Illuminating Engineering Society</i>
IESNA	<i>Illuminating Engineering Society of North America</i>
IRC	Institute for Research in Construction
LBNL	<i>Lawrence Berkeley National Laboratory</i>
LN	Luz Natural
LS	LIGHTSCAPE
PAC	Projeto Assistido por Computador
RF	RAYFRONT
RL	RELUX
VCP	<i>Visual Comfort Probability</i>
VRML	<i>Virtual Reality Markup Language</i>

Em seus primórdios tinham olhos mas não viam, tinham os seus ouvidos mas não escutavam, e como imagens dessas que vemos em sonhos viviam ao acaso em plena confusão. Eles desconheciam as casas bem-feitas com tijolos endurecidos pelo sol, e não tinham noção do uso da madeira; como formigas ágeis levavam a vida no fundo das cavernas onde a luz do sol jamais chegava, e não faziam distinção entre o inverno e a florida primavera e o verão fértil;....

Ésquilo – Prometeu Acorrentado.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A possibilidade de simular visualmente o espaço interno antes de sua efetiva construção sempre foi um desejo do arquiteto. A visualização computacional através da imagem sintetizada é uma ferramenta poderosa que pode contribuir de diversas formas ao trabalho de projeção do arquiteto. Entre estas formas, pode-se citar a possibilidade de melhor compreender e assim melhorar a proposta arquitetônica do ponto de vista da Luz Natural (LN). A predição do comportamento da LN pode contribuir para a otimização do conforto ambiental e eficiência energética do projeto de arquitetura.

EHRlich (2002) afirma que somente visualizações do espaço que se apóiam em modelos de iluminação fundamentados na natureza, e que contenham valores radiométricos¹ do mundo real, são relevantes, quando se pensa em projeto arquitetônico que considera a LN.

A maioria dos softwares de visualização não é precisa do ponto de vista matemático, ou seja, gera falsas impressões ao invés de uma imagem que represente precisamente o espaço arquitetônico. Uma razão para essa imprecisão é a representação incorreta da luz, em especial a da LN, no espaço arquitetônico.

Os modelos matemáticos utilizados na Computação Gráfica (CG) para gerar imagens sintéticas a partir de modelos 3D com a intenção de predição da LN baseiam-se nos modelos de Iluminação Local ou de Iluminação Global. A Iluminação Local não considera a inter-reflexão da luz entre as superfícies, considerando somente a contribuição das fontes de luz diretas. A Iluminação Global, por outro lado, busca avaliar todas as contribuições das fontes diretas e indiretas no transporte da luz. Entre os modelos de Iluminação Global que são fisicamente fundamentados, existem basicamente duas vertentes. Os métodos baseados na cena² e que são *independentes* do ponto de vista do observador – ou simplesmente “scene-based” como o *Radiosity*³. E os métodos baseados na imagem e que são *dependentes* do ponto de vista do observador – “image-

¹ Radiometria é a disciplina que estuda a quantificação da energia eletromagnética no espectro ótico infravermelho, visível e ultravioleta.

² Na geometria da cena.

³ O método de Radiosity se baseia na discretização das superfícies em retalhos de tamanho extremamente uniforme e a energia trocada entre estes retalhos é computada de uma maneira totalmente independente do ponto de vista do observador.

based” como o *Ray Tracing*⁴. Ambos são capazes de produzir resultados numéricos além de imagens de alta qualidade, ou seja, avaliações quantitativas e qualitativas da LN.

Atualmente, a partir das vertentes originais, estes métodos se multiplicam e se conjugam em diversos outros que buscam fundamentalmente a simulação da LN no espaço arquitetônico. A natureza inerentemente difusa do modelo *Radiosity* e a natureza inerentemente especular do *Ray Tracing* têm sido expandidas a partir do desenvolvimento de algoritmos que incorporam tanto os componentes difusos como os especulares da luz, em softwares de simulação.

Alguns softwares de simulação da LN utilizam estes algoritmos inovadores e têm ênfase na precisão exigida pela simulação do espaço arquitetônico sob diversas condições de iluminação. Segundo PAPST et al (1998), o conhecimento da quantidade de luz que será admitida através da edificação e como está distribuída pode auxiliar na tomada de decisões de projeto. O conhecimento da distribuição espacial e temporal da iluminação natural dentro de um ambiente é importante para o projeto arquitetônico.

No entanto, os arquitetos normalmente encontram dificuldades para utilizar estes instrumentos, devido à complexidade dos mesmos, interfaces não amigáveis, manuais de usuário incompletos etc. Desta maneira, o grande potencial de utilização dos softwares de simulação no projeto de arquitetura não é suficientemente aproveitado, principalmente na realidade brasileira.

1.1 Justificativa

Desde os primórdios, os pontos positivos associados ao desfrute da LN, em oposição às trevas, colocaram-se como a antítese fundamental: a alternância entre o dia e a noite. A luz tornou-se então o símbolo das divindades benignas: o sol criador (CREMONINI, 1962). Ao habitar seu espaço próprio, as cavernas, o homem deparou-se com outro paradigma – as aberturas que permitem a entrada da luz do dia, elemento indispensável à vida,

⁴ Refere-se ao Ray Tracing na sua concepção atual que adota uma estratégia Monte Carlo no traçado dos raios por amostragens. Estando distante da definição inicial de WHITTED que era uma solução determinística à equação de rendering de Kajiyama em 1986. (WATT, 2000) e que se baseia em calcular a interação no trajeto dos raios de luz com a geometria. Ou seja, buscando estabelecer quais faces são visíveis ou invisíveis para o observador.

também delimitam a conexão entre o espaço interior e o exterior, entre o espaço seguro e o perigo dos inimigos. Estes arquétipos estimulam o comportamento das pessoas ao ocupar um determinado ambiente – há uma busca consciente ou não, do controle pela visão da luz do dia, do exterior – restabelecendo a referência da pré-história.

CREMONINI (1962), afirmava que o arquiteto tem a **necessidade** de contribuir para integrar o homem através da luz, com os recursos e a obra da natureza no objeto arquitetônico. No que diz respeito ao projeto arquitetônico, a potencial economia de recursos energéticos no uso da iluminação natural – energia renovável que reduz o consumo de energia ao substituir, de forma integrada, o uso da luz artificial pela natural – pode fazer parte da estratégia de uma edificação que busca minimizar o próprio impacto ambiental. Apesar disto, o objetivo principal de uma arquitetura tecnicamente adequada no uso da LN diz respeito não tão somente à eficiência energética, mas principalmente, à obtenção das vantagens do uso da LN ao iluminar um ambiente, tornando-o mais confortável e menos estressante.

Ao projetar o espaço arquitetônico considerando a LN, temos que considerar também outros aspectos relacionados a ela, como a carga térmica recebida nos ambientes. A disponibilidade de LN nas regiões tropicais é grande, e esta deve ser usada de forma criteriosa, equilibrando sabiamente o ingresso de luz difusa, bloqueando o calor gerado pela luz solar direta, que pode criar problemas de conforto térmico e luminoso. A eficiência luminosa da LN é maior do que quase todas as fontes; isto significa que mesmo a luz natural direta, se bem distribuída, é mais eficiente, e gera menos calor do que a luz artificial. [AMORIM, 2002].

O principal desafio com relação à eficiência energética e o conforto ambiental é encontrar o equilíbrio entre a otimização da LN e a redução da carga de refrigeração, no contexto do clima brasileiro, predominantemente quente. [LAMBERTS, 1996]

Outra questão importante é que avaliar o comportamento da LN em ambientes internos é, muitas vezes, tarefa complexa, usando apenas os métodos tradicionais de visualização, modelos físicos, sistemas

computadorizados simplificados. Nesse sentido, a utilização de softwares de simulação pode simplificar a tarefa de ajustar idéias alternativas em diversas fases do projeto.

Para vencer esses desafios, o arquiteto necessita utilizar-se de ferramentas precisas e interativas para avaliar as escolhas ou soluções de iluminação, durante o processo de elaboração do projeto arquitetônico. A complexidade dos cálculos envolvida na análise da LN requer poder computacional de processador numérico, para atingir o grau de precisão necessário ao calcular o comportamento da luz.

Neste sentido, os softwares de simulação são capazes de oferecer essas facilidades e devem apoiar o arquiteto nas várias decisões a serem tomadas, da concepção à implantação de estratégias de iluminação natural e de técnicas inovadoras em espaços reais. (IEA, 2000).

1.2 Objetivos

Diante do exposto, este trabalho estuda a **simulação computacional da LN aplicada ao projeto de arquitetura**, através de avaliação de 4 softwares de simulação – DESKTOP RADIANCE, LIGHTSCAPE, RAYFRONT e RELUX VISION. Desta forma, busca contribuir no melhor entendimento da simulação computacional da LN através da análise e avaliação das ferramentas sob o enfoque do arquiteto.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Estabelecer um quadro geral dos softwares de simulação da LN e sua aplicação nas diversas fases do projeto de arquitetura;
- Estabelecer metodologia de avaliação para softwares de simulação da LN, do ponto de vista do arquiteto;
- Precisar as diferenças e avaliar os softwares escolhidos, considerando os parâmetros adequados para avaliar a LN e o uso por parte do arquiteto;
- Identificar pontos problemáticos destas ferramentas no contexto da simulação da LN no projeto arquitetônico;

- Adaptar as ferramentas estudadas ao uso por parte de arquitetos, através da criação de complementações aos manuais existentes, denominados tutoriais;
- Contribuir para estimular o uso da simulação computacional da LN no Brasil.

1.3 Procedimentos Metodológicos

A metodologia adotada no trabalho seguiu as seguintes etapas:

1. Estudo dos principais softwares de simulação da LN existentes e sua aplicabilidade no projeto de arquitetura;
2. Seleção de 4 softwares de simulação para serem avaliados;
3. Definição dos critérios de avaliação dos softwares escolhidos;
4. Definição do modelo geométrico para a realização das simulações, denominado espaço-padrão;
5. Definição das condições de contorno das simulações e pontuação para os mesmos;
6. Planejamento e realização das simulações;
7. Análise das simulações através de matriz com os critérios de avaliação estabelecidos;
8. Elaboração de tutoriais, complementações dos manuais dos softwares, considerando as necessidades de cada um destes e o uso dos mesmos por parte dos arquitetos.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho estrutura-se da seguinte forma:

O capítulo 2 introduz a representação da luz através da CG e a síntese de imagens, ou seja, a representação visual dos componentes geométricos de uma cena. Apresenta a simulação e sua integração ao projeto do edifício e os principais softwares de simulação computacional da LN, disponíveis na atualidade.

O capítulo 3 aborda a iluminação natural, estudando o fenômeno físico do ponto de vista do arquiteto e suas decorrências no projeto de arquitetura.

O capítulo 4 estuda a simulação da luz através do cálculo numérico computacional, apresentando o modelo de iluminação global, e os algoritmos “Radiosity” e “Ray tracing”. As propriedades e a classificação dos modelos de simulação são abordadas, assim como as principais técnicas de simulação adotadas.

O capítulo 5 apresenta a metodologia da avaliação dos softwares examinados: os critérios de avaliação dos mesmos, sob a ótica do usuário e a sua utilização na prática profissional do projeto da arquitetura.

O capítulo 6 apresenta o relato das simulações efetuadas, com os 4 softwares examinados, em um modelo, o espaço-padrão, apresentando e discutindo os resultados obtidos.

O capítulo 7 apresenta as discussões, conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

Quanto ao conteúdo dos anexos:

O anexo I apresenta os principais softwares de simulação da LN disponíveis.

O anexo II apresenta os principais enfoques algorítmicos utilizados pelos softwares de simulação da LN.

O anexo III apresenta os dados e as imagens produzidas nas simulações realizadas com os 4 softwares examinados.

O anexo IV apresenta a adaptação dos softwares DESKTOP RADIANCE e RAYFRONT ao uso por parte de arquitetos, através de complementações aos manuais existentes em forma de tutoriais.

CAPÍTULO 2

A SIMULAÇÃO E O PROJETO DE ARQUITETURA

Neste capítulo apresentam-se os aspectos da simulação associados ao processo de projeção do espaço arquitetônico, abordando-se a simulação em geral e, mais especificamente, a simulação da LN.

Os softwares de simulação têm tido um papel destacado na avaliação e previsão das condições de conforto do espaço arquitetônico, seja em nível urbano – de forma menos freqüente – ou do edifício, construídos ou em fase de projeto.

Entende-se o termo “simulação computacional” como referente a qualquer algoritmo que mimetiza um processo físico. (HITCHCOK, 1995)

Segundo LAMBERTS et al (2002), o uso de modelos computadorizados para predição tem se tornado unanimidade na área de projeto e manutenção de edifícios, onde são empregados para auxiliar as decisões relativas ao projeto, operação e manutenção do edifício.

As técnicas e aplicações da simulação no projeto de arquitetura estão sob rápida evolução, acumulando melhorias na capacidade de processamento dos computadores, algoritmos e dados físicos, que têm possibilitado a simulação de processos físicos em níveis de detalhe e tempo inimagináveis há poucos anos.

A simulação computacional tem provado ser uma ferramenta poderosa para estudar o desempenho ambiental dos edifícios, especialmente nas duas últimas décadas. A interação entre os aspectos de projeto, clima, sistemas eletromecânicos e os ocupantes em um edifício é uma tarefa muito complexa. Através dos recursos da simulação é possível compreender melhor esses fatores. As ferramentas de simulação permitem apoiar a prática de projeto da arquitetura, possibilitando a realimentação entre a tomada de decisões e logo em seguida a avaliação de seu impacto ambiental. (CALDAS E NORFORD, 2002).

Durante o processo de projeção arquitetônica, uma das considerações importantes a ser levada em conta diz respeito aos efeitos da LN no ambiente. Predições dos níveis de LN no interior do espaço arquitetônico são, por sua natureza, sujeitas ao compromisso entre a precisão e a complexidade dos números. (TSANGRASSOULIS e SANTAMOURIS, 1997)

2.1 A simulação computacional da LN e o projeto de arquitetura

O projeto de arquitetura é beneficiado com a técnica de simulação da Iluminação Global, com a qual é possível gerar imagens precisas de espaços que ainda não foram construídos. Podem-se avaliar previamente as condições de conforto visual, computando os diversos níveis de iluminação em diferentes pontos do ambiente, possibilitando que se façam os ajustes necessários. Além disso, pode-se simular o projeto de iluminação artificial conjugado ao da LN, possibilitando melhora significativa na eficiência energética do edifício.

Para avaliar um determinado espaço arquitetônico, inicialmente como primeiro passo, deve-se elaborar um modelo 3D que represente o espaço a ser construído. É sabido que existe um compromisso entre a qualidade da saída da simulação e a qualidade da elaboração do modelo 3D inicial.

Um modelo 3D possui informações geométricas que definem a representação¹ da realidade em forma de coordenadas cartesianas, x,y e z. Além destas, o modelo deve conter informações das propriedades óticas do material de cada superfície e sobre as fontes de iluminação da cena. Esta iluminação, no caso da LN, vai depender das condições de céu do sitio.

Abaixo, apresenta-se um fluxograma de fatores envolvidos em uma simulação computacional:

¹ Representação e Simulação são relacionadas. Do ponto de vista computacional, a simulação pode ser interpretada como uma espécie de representação que inclui a descrição de um objeto e algoritmos preditivos que computam o comportamento de certos aspectos daquele objeto.

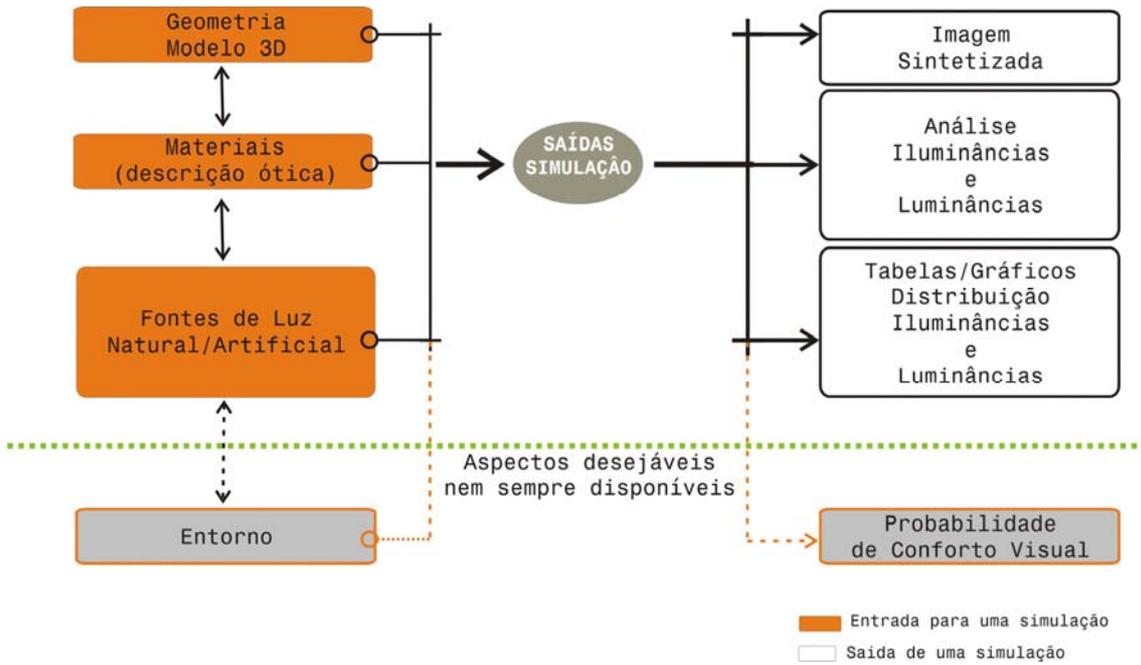
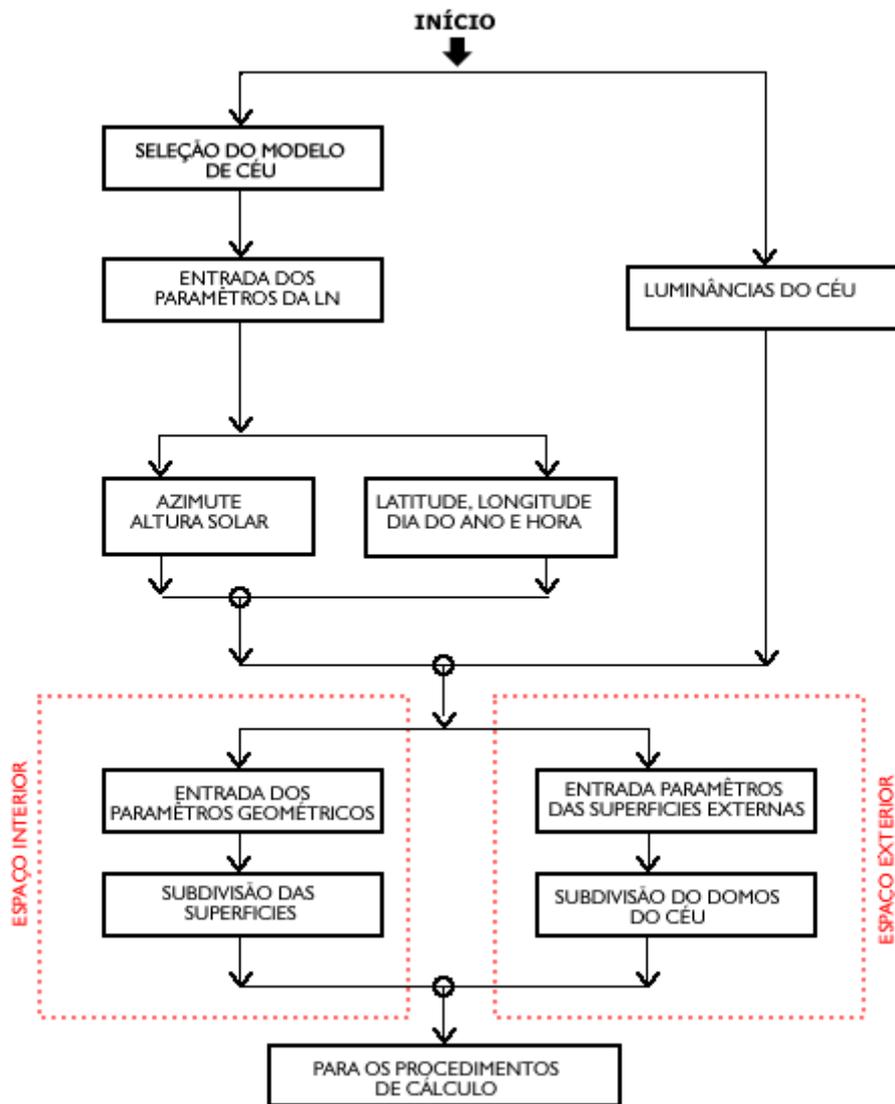


Figura 01 – Fluxograma de fatores envolvidos em uma simulação computacional - entrada e saída.

A simulação da LN tem como entrada:

- Geometria do modelo, informações sobre o observador, Câmera sintética;
- Propriedades óticas dos materiais;
- Fontes Luminosas;
- Informações sobre obstruções do entorno.

De forma mais detalhada, a entrada tem o seguinte fluxograma:



FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS DE ENTRADA DE DADOS

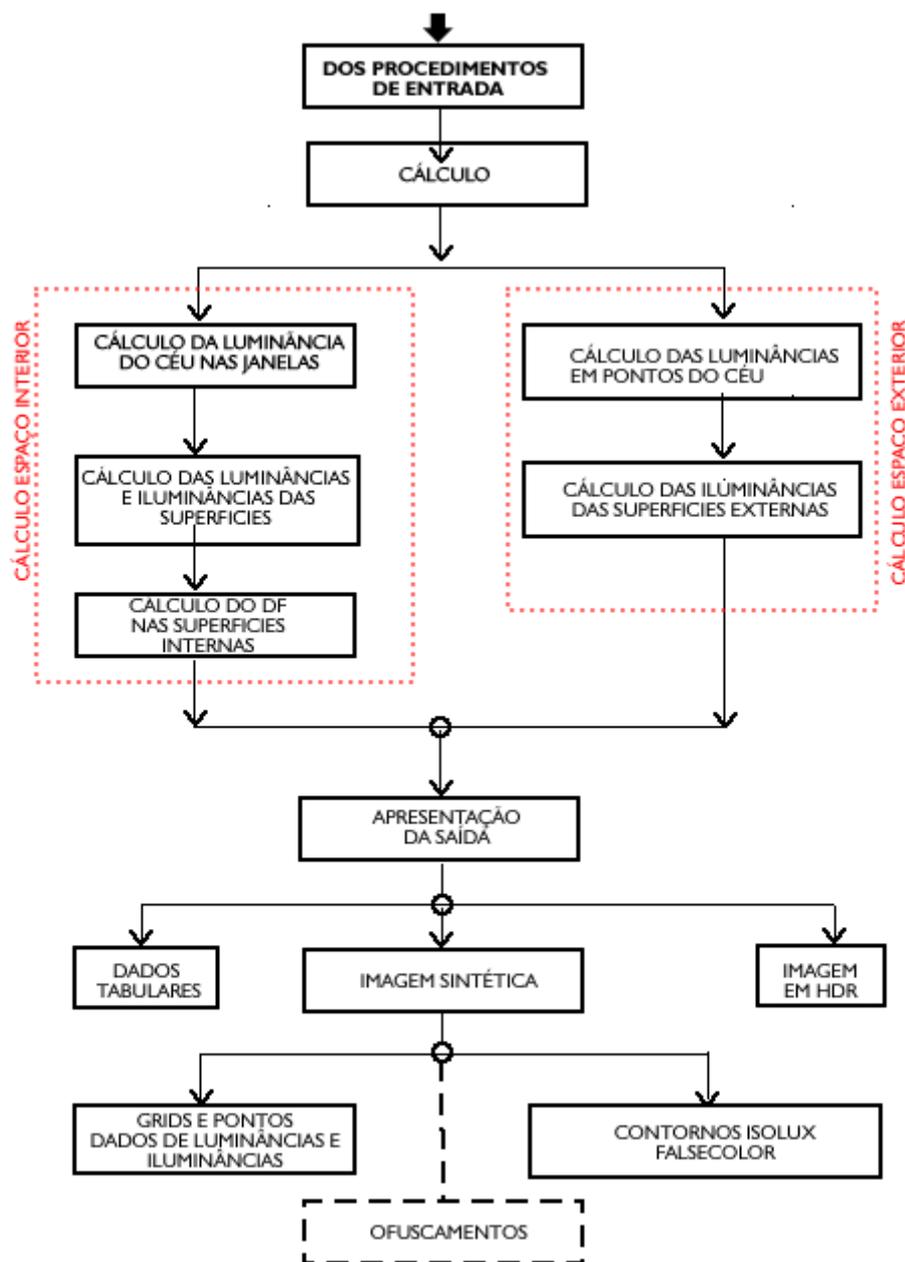
Figura 02 – Fluxograma de procedimentos de entrada em uma simulação

(Fonte: adaptado de BELLIA et al, 2000)

E como saída:

- Imagem sintetizada em formatos *TIF*, *JPG* ou *PIC* com alta faixa dinâmica (*HDR*)
- Imagem analítica – falsecolor, iso-countour;
- Informações numéricas e gráficas da distribuição das Iluminâncias e Luminâncias;
- VCP – Previsão do Conforto Visual – análise de prováveis ofuscamentos.

De forma mais detalhada, as saídas da simulação têm o seguinte fluxograma:



FLUXOGRAMA DE PROCEDIMENTOS DE CÁLCULO E SAÍDAS DE DADOS

Figura 03 – Fluxograma de procedimentos de cálculo e saídas em uma simulação. (Fonte: adaptado de BELLIA et al, 2000)

2.2 A Simulação Computacional nas diversas fases do Projeto Arquitetônico

As decisões tomadas pelo arquiteto, no início da elaboração do projeto, têm impacto decisivo no desempenho ambiental do edifício. O projeto de arquitetura é processo de seqüência de tomadas de decisões. A decisão das propriedades e comportamento do edifício que for estabelecida nos estágios iniciais certamente influencia as decisões posteriores e assim por diante.

Integrar uma ferramenta de simulação ao processo de projeção certamente não é uma tarefa simples, pois o arquiteto precisa obter respostas imediatas que atendam agilmente ao processo de espacialização das idéias adotadas ainda durante a elaboração do estudo preliminar. É sabido que existe um alto grau de incerteza e de abstração no processo de projeção.

A ferramenta, além disso, deve atender ao arquiteto em todas as fases do projeto, com as suas variações formais, funcionais e construtivas ao longo do processo de projeto. O arquiteto tende a não fechar a questão logo no início do processo, para poder explorar todas as opções possíveis, antes de chegar a uma decisão definitiva. (ROBBINS, 1997)

O processo da simulação deve estar inserido paralelamente às etapas de projeto nas quais se definem o “partido” ou o “risco” inicial. No caso da simulação da LN, a definição de onde se obtém os dados geométricos, as informações de materiais dos componentes da obra e dados geográficos para construir o modelo 3D, processar a simulação e em seguida analisar se as soluções adotadas estão de acordo com os parâmetros estabelecidos no programa de necessidades. Alguns ajustes podem ser adotados com novas entradas de dados e então processados novamente, até que a solução satisfaça os objetivos pretendidos. Então, volta-se ao processo de elaboração do projeto já em fase do anteprojeto e, portanto, elaborado com um grau de certeza suficiente para seguir para a fase seguinte do projeto.

A seguir apresenta-se um fluxograma de Projeto Arquitetônico auxiliado por Simulação Computacional.

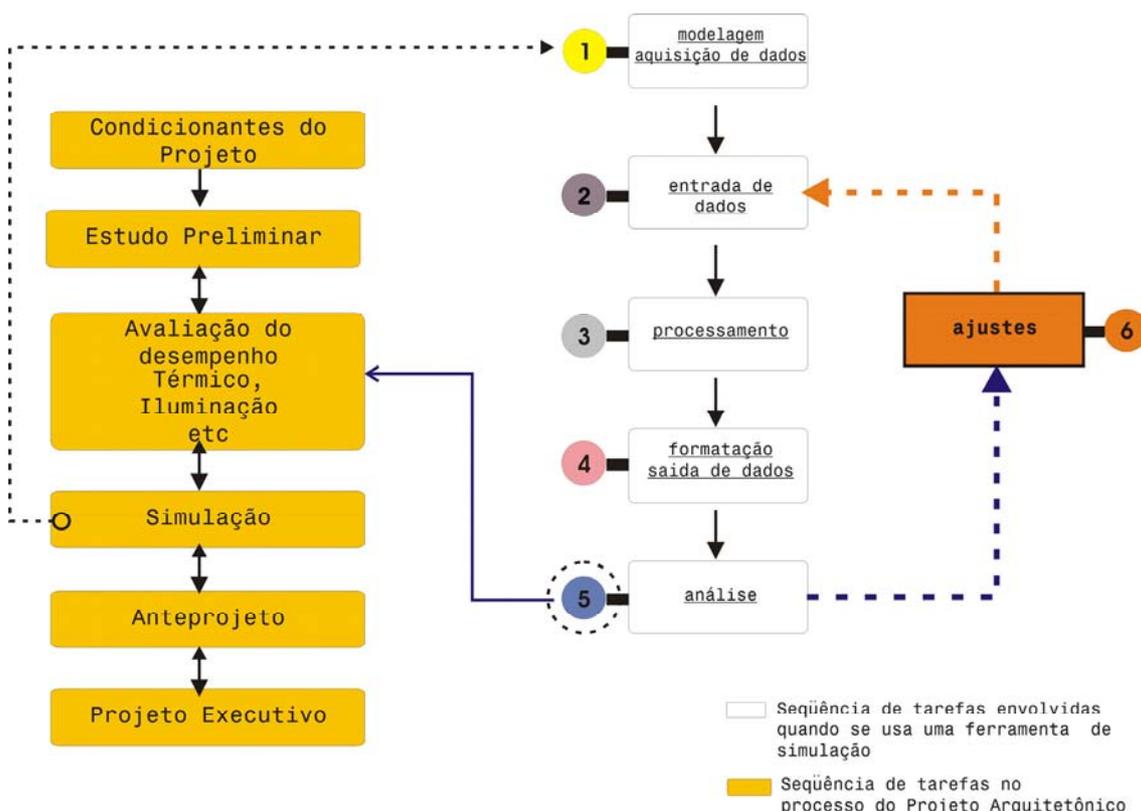


Figura 04 – Fluxograma de Projeto Arquitetônico apoiado por simulação computacional, (baseado em BOSCOLI, 2003 e COMPAGNON, 1997).

2.3 O uso da Simulação Computacional da LN na prática da arquitetura

Não há, ainda, uma avaliação precisa de quantos profissionais consideram os métodos de cálculo da LN como parte das tarefas a serem elaboradas no projeto arquitetônico.

Até 1992, na Europa, somente 15% dos arquitetos se ocupavam dos assuntos da LN em seus projetos (IEA 2000).

Dez anos depois, os resultados são diferentes. Em recente pesquisa da IRC (Institute for Research in Construction), foram consultados 185 indivíduos em 27 países, sendo 20% do Canadá, 20% dos EUA e 12% da Alemanha. Do total de participantes, 38% eram consultores de energia e engenheiros, 31% Arquitetos e Lighting Designers e 23% Pesquisadores de escolas e escritórios.

A pesquisa mostrou que 91% responderam que incluem aspectos da Luz Natural nos projetos de edifícios, sendo que, entre estes, 79% utilizam a simulação computacional, demonstrando forte tendência de crescimento no uso da simulação computacional como apoio ao projeto.

Quanto à realidade brasileira, em estudos sobre a simulação computacional no Brasil, verificou-se uma baixa aceitação do uso das ferramentas de simulação. Isto se deve, em primeiro lugar, à falta de legislação específica para a aplicação dos conceitos de eficiência energética em novos edifícios. Em segundo lugar, existe uma falta de confiança na aplicabilidade destes softwares de simulação na realidade brasileira, em termos de clima e topologia local. (LAMBERTS et al, 2001).

Tudo isso mostra um panorama desfavorável para o uso da simulação computacional no Brasil, se comparado à realidade de países mais desenvolvidos.

2.4 As ferramentas da simulação

As ferramentas utilizadas em todo o processo podem ser divididas em dois grupos, os softwares CAD que geram a geometria da cena e para avaliar a LN nesta cena existem os softwares de simulação.

2.4.1 Softwares CAD

Durante a fase de concepção, os estágios iniciais do projeto, os arquitetos preferem utilizar representações abstratas ou artísticas do projeto proposto, ao invés de desenhos detalhados. A falta de especificidade na representação preserva a possibilidade de alterar a proposta. Representações abstratas permitem interpretações pessoais e subjetivas.

Para gerar um modelo, dispõe-se de softwares CAD que em geral empregam representação “*flat shaded*”² ou “*wire frame*”³ dos projetos dos edifícios. Este enfoque é muito importante para facilitar ao arquiteto a interação com a geometria espacial dos espaços propostos. (EHRlich, 2002).

Existe uma grande variedade de softwares CAD que podem apoiar o trabalho de projeção do arquiteto. De maneira geral, estes executam as tarefas de representação do projeto em suas diversas fases. Nas fases iniciais, representam o partido através de geração de geometrias tridimensionais com o

² Esta representação usa as superfícies limites dos sólidos para descrever os seus contornos.

³ Representação aramada, os objetos são definidos por arestas que definem as bordas dos mesmos.

menor detalhamento possível, mas com um enfoque que permite a representação dos volumes, texturas e sombras. Nas fases posteriores, servem para gerar a representação técnica de desenhos executivos, a documentação para a execução da obra.

A qualidade do modelo desenvolvido determina a qualidade da informação a ser obtida pela simulação. As ferramentas de modelagem de geometria tridimensional fornecidas por softwares de *rendering* são imprecisas ou têm problemas de interface. Por isso é muito comum, nestes casos, utilizar um software CAD para gerar os modelos 3D. No âmbito deste trabalho, utilizou-se um CAD genérico, o AUTOCAD, pois é uma ferramenta CAD que é *de facto* padrão mundial nesta área.

É importante notar que os softwares CAD ocupam-se da informação geométrica e geralmente não dispõem de informações sobre as propriedades óticas dos materiais a serem aplicadas nas superfícies.

2.4.2 Softwares de simulação

Os softwares de simulação costumam trabalhar com um motor de cálculo próprio e um enfoque algorítmico com características variadas para o cálculo da Iluminação Global. Os pacotes mais avançados adotam a abordagem híbrida: estocástica⁴ e determinística⁵, escolhendo a situação quando melhor se aplica uma ou outra.

Segundo HITCHCOCK (2001), uma ferramenta de simulação computacional que se propõe a auxiliar a inclusão da LN no projeto arquitetônico requer um algoritmo que permita determinar níveis de iluminação no interior do edifício e em que medida o conforto luminoso se estabelece.

Os softwares de simulação baseados no comportamento do fenômeno físico da luz estão propostos para facilitar o entendimento da luz e o comportamento dos materiais através de cálculos complexos da LN. A sua principal tarefa não é simplesmente apresentar o projeto arquitetônico, mas

⁴ Modelo matemático de simulação que incorpora variáveis aleatórias no processo. O mesmo problema pode gerar resultados ligeiramente diferentes ao se repetir a simulação. O método Monte Carlo é um método numérico para resolver problemas utilizando amostragem estocástica.

⁵ Modelo matemático de simulação que não permite variáveis aleatórias e cujas características operacionais devem ser exatas.

principalmente avaliar a solução proposta através de imagens sintetizadas e com informações numéricas. E, quando for necessário, retomar a análise das proposições, reformulando o que está trazendo desconforto ou inadequação ao ambiente estudado. (INANICI, 2001).

Os softwares de simulação da LN podem ser utilizados para auxiliar o projeto de arquitetura no que tange ao conforto ambiental e a eficiência energética. Existe um numero considerável de softwares disponíveis atualmente como software livre, de código aberto ou não, ou como softwares comerciais.

A seguir apresenta-se uma relação dos principais softwares de iluminação atualmente disponíveis e seus desenvolvedores:

Software/Plataforma	Desenvolvido por
ADELINE IBM-PC/DOS	Fraunhofer Institute for Buildings – IBP - Suíça
AGI 32 IBM PC/WINDOWS	LIGHTING ANALYSTIS Inc. EUA
DAYSIM Linux, Mac OSX, Windows	Institute for Research in Construction Canadá
DeLIGHT IBM PC/WINDOWS	Lawrence Berkeley Laboratory California EUA
DESKTOP RADIANCE IBM PC/WINDOWS	GREG WARD no Lawrence Berkeley Laboratory California EUA e
ECOTECH IBM PC/WINDOWS	SQUARE ONE <i>research</i> PTY LTD - AUS
GENELUX-WEB WEB	Département Génie Civil et Bâtiment, França
HELIOS 32 IBM PC/WINDOWS	Heart Consultants Limited EUA
INSPIRER IBM PC/WINDOWS	INTEGRA Japão
LESO-DIAL IBM PC/WINDOWS	École Polytechnique Federale Lausanne EPFL - Suíça
LIGHTSCAPE IBM PC/WINDOWS	DISCREET – AUTODESK EUA
LIGHTSKETCH IBM PC/WINDOWS	University of California Energy Institute EUA
LIGHSTUDIO IBM PC/WINDOWS	Die Lichtplaner Alemanha
LUMEM MICRO IBM PC	Lighting Technologies Inc. Colorado EUA
POV-RAY Linux, Mac OSX, Windows	Persistence of Vision Raytracer Pty. Ltd EUA
RADIANCE Linux, Mac OSX, SGI	GREG WARD no Lawrence Berkeley Laboratory California EUA e ...

RAYFRONT Linux, Mac OSX, Windows	ALWARE - Alemanha
RAYSHADE Linux, Mac OSX, DOS, AMIGA	STANFORD UNIVERSITY EUA
RENDERPARK Linux	Computer Graphics Research Group Katholieke Universiteit Leuven Belgica
RELUX IBM PC/WINDOWS	INFORMATIK AG Alemanha
SKYVISION IBM PC/WINDOWS	Institute for Research in Construction Canadá
SUPERLITE Mainframes, IBM-PC/DOS	Lawrence Berkeley Laboratory California EUA
VIRTUAL LIGHTING SIMULATOR WEB	Lawrence Berkeley Laboratory California EUA

Tabela 001 – Listagem dos principais softwares disponíveis.

Entre os softwares listados acima, destacam-se os seguintes:

- DESKTOP RADIANCE** versão 2.0 beta – (<http://radsite.lbl.gov/deskrad>)
 Uma versão acessível, sem ser simplificada do RADIANCE SIS do Laboratório BERKLEY (LBNL). É um *plug-in* – aplicativo dentro – do AUTOCAD® da AUTODESK® amplamente utilizado pelos arquitetos em todo o mundo. Este aplicativo funciona como uma interface gráfica do RADIANCE na plataforma Windows. Utilizando o CAD que funciona também como a base de criação da geometria. Desenvolvido em parceria da LBNL, com Pacific GAS&ELETRIC e o California Institute of Energy Efficiency. Utiliza métodos avançados de Ray Tracing reverso com técnicas Monte Carlo e enfoque híbrido estocástico/determinístico. Deve-se destacar que é software livre, de domínio público.
- RAYFRONT** versão 1.04 (<http://www.schorsch.com/>)
 É uma interface gráfica, comercial, para o RADIANCE desenvolvido para rodar juntamente com o modelador **3DSolar**®, que é um modelador de geometria 3D. Pode rodar como aplicativo externo ao AUTOCAD®. Para plataforma Intel/Windows ou LINUX. Utiliza os mesmos métodos de cálculo do DESKTOP RADIANCE.
- RELUX 2004 PRO + VISION** (<http://www.relux.ch>)
 O RELUX VISION funciona como um plug-in e acrescenta o RADIANCE como motor de cálculo ao RELUX 2004 PRO, possibilitando a simulação fisicamente fundamentada, utilizando a modelagem geométrica do RELUX PRO como entrada.

- **LIGHTSCAPE®** versão 3.2 (<http://www.lightscape.com>)
Inicialmente desenvolvido por *LIGHTSCAPE Technologies of San Jose, CA, USA*. Ferramenta especializada para visualização e análise da iluminação natural e artificial, estava disponível apenas para plataforma UNIX em computadores gráficos “high-end” da *SILICON GRAPHICS* ou *SUN SPARCSTATION*. Foi adaptada para o uso de arquitetos em plataforma PC. Utiliza o método Radiosity com um pós-processamento Ray Tracing. Gira em ambiente *Windows* e, desde a aquisição pela *AUTODESK*, foi incorporado parcialmente ao 3DS VIZ 4.0. Tem um grande número de usuários em todo o mundo, mesmo depois de ter sido descontinuado pelo atual fabricante *AUTODESK®*

A base dos três primeiros é o software *RADIANCE SIS*, criado por *GREG WARD* no início da década de 90, que é composto por mais de 50 módulos externos também denominados como extensões. Pode-se destacá-lo como o mais conhecido e provavelmente o mais importante simulador de iluminação global da atualidade. Além disso, deve-se destacar que foi validado em uma série de trabalhos científicos, certificando sua precisão, com pequenas margens de erros na predição da LN.

2.4.3 Comparativos entre os softwares de simulação da LN

Estudos anteriores fizeram comparações entre diversos softwares de simulação. A maioria destes, no entanto, tinha interesse em investigar a precisão do software e a saída decorrente da simulação, a imagem, deixando de lado os aspectos de aplicabilidade do software em questão, no processo de projeção arquitetônica. A seguir apresentamos os trabalhos mais importantes, abordando a questão da aplicabilidade, em menor ou maior grau:

O trabalho de *ALTMAN* (2000) utilizou o Museu de Arte *KIMBELL* projetado por *L. KHAN* como base do estudo para a experimentação dos softwares de simulação fisicamente fundamentados, *LIGHTSCAPE* e *RADIANCE*, e tinha como objetivo principal da investigação atender aos interessados no tema de visualização da distribuição da luz.

Suas conclusões demonstraram que:

- Os algoritmos utilizados pelo RADIANCE são superiores aos utilizados pelo LIGHTSCAPE, quando calculam o transporte da luz para superfícies que não são idealmente difusas. A solução obtida pelo algoritmo *Radiosity* é inadequada quando trabalha com a luz indireta via teto, por exemplo, onde os materiais reais se desviam da característica ideal de Lambert.
- A interface do LIGHTSCAPE é mais amigável, e o RADIANCE tem limitações muito evidentes nesta área. Por outro lado, o RADIANCE, devido à sua estrutura modular e seu código aberto, permite o acréscimo de módulos externos que possibilitam uma infinidade de opções para as mais variadas tarefas.

Concluem que ambos os programas demonstraram imensas possibilidades para o uso profissional.

KHOUDULEV (1996) fez uma comparação experimental de dois métodos de cálculo da distribuição da iluminação global: o método determinístico *Radiosity* e o método Monte Carlo (estocástico) baseado no Ray-tracing normal⁶. Os softwares utilizados foram o LIGHSTCAPE e o TBT (Turbo Beam Tracing) software desenvolvido pela INTEGRA. A comparação foi executada em cena simples, um cubo, onde os resultados teóricos são acessíveis e também foram utilizadas cenas complexas de espaços arquitetônicos. Os critérios utilizados foram: tempo de simulação, precisão das imagens e foram também discutidas as falhas – conhecidas como artefatos – nas imagens sintetizadas.

Os resultados mostraram que:

- O algoritmo Ray Tracing - Monte Carlo é totalmente adequado às aplicações técnicas, interessadas basicamente nos resultados numéricos da simulação. Considerando a qualidade visual das imagens, o algoritmo determinístico *Radiosity* demonstrou vantagem nas imagens geradas com uma maior suavidade. Por sua vez, o algoritmo Ray Tracing - Monte Carlo apresentou outras vantagens, onde se pode

⁶ Normal porque traça o raio de luz da fonte para o ponto de observação. Em inglês o termo é Forward Ray Tracing.

destacar o fato de que dispõe de modelos de refletância de maior alcance como, por exemplo, refratores e refletores curvos e difusores não-Lambertianos. E permitem maior controle da precisão da simulação e uma visualização de resultados intermediários a qualquer momento.

KHOUDULEV acredita que todos estes são argumentos fortes para considerar que o algoritmo Ray Tracing - Monte Carlo é o principal método para a análise da Iluminação Global.

INANICI, (2001), discute as características técnicas da simulação computacional fisicamente fundamentada para a pesquisa da iluminação na arquitetura. São avaliados o potencial e as limitações dos softwares LIGHTSCAPE, DESKTOP RADIANCE E RADIANCE SIS (*Synthetic Imaging System*) em termos de entradas, algoritmos, saídas e análise. O trabalho aborda os softwares do ponto de vista do pesquisador em busca de uma futura implementação dos simuladores em softwares específicos de arquitetura, não enfocando a questão da interface.

Roy (2000) fez comparações cujo principal interesse abrange a precisão técnica dos softwares de simulação da iluminação, mas também a facilidade de uso destes, por um usuário sem a especialização técnica da computação. Para isso, desenvolveu uma metodologia de critérios para a análise e comparação dos softwares de simulação da LN. Em termos gerais, concluiu que não há o software ideal, pois todos têm suas limitações e qualidades. Entretanto, entre todos, apenas O RADIANCE se destaca em todos os trabalhos científicos comparativos e que parece oferecer confiabilidade em todas as circunstâncias.

2.5 A Ferramenta Ideal: A integração da Simulação ao Projeto do Edifício

O projeto da luz natural incorporado ao edifício envolve basicamente dois aspectos: a informação qualitativa – visual – e os aspectos quantitativos. As ferramentas de simulação da luz natural devem disponibilizar as seguintes facilidades:

1. Visualização do ambiente, analisando a distribuição da luz;

2. Previsão de DLF no interior do edifício. Além disso, determinação dos níveis de iluminâncias em pontos específicos sob condições de céu específicas;
3. Identificação de fontes potenciais de ofuscamento;
4. Avaliação dos índices de conforto visual;
5. Previsão de potencial, economia de energia alcançável pelo uso da luz natural;
6. Controle da penetração dos raios de sol e a visualização dinâmica do comportamento da luz solar;
7. Avaliação da interação da luz e o espaço arquitetônico. (LESLIE, 2003)

Citando COSTA (2000), alguns aspectos importantes a considerar na Simulação Computacional são o rigor e a exatidão radiométrica, isto é, a informação gerada deve ser correta, a fim de:

- Não levar o arquiteto para soluções impossíveis do ponto de vista físico;
- Aumentar ou manter o grau de confiança naquilo que está sendo feito;
- Permitir a este trabalhar nos limites da sua capacidade criativa, isto é, ser levado a explorar sem restrições.

Os recursos disponíveis para realização destas tarefas têm sido objetos de estudo. Buscam-se sistemas que ofereçam ao usuário maiores facilidades para a simulação e modelagem. Estes ambientes de simulação devem oferecer ao usuário recursos para a visualização de dados e a sua interação com os experimentos, permitindo uma melhor compreensão dos dados através da possibilidade de trabalhar diretamente com o modelo e o processo de simulação. (WAGNER et al, 1996)

As ferramentas de simulação de modo geral, e, em especial, as de análise da LN através dos softwares de simulação, devem estar integradas à prática de projeção do arquiteto, para que sejam efetivamente importantes. Na verdade, ainda se espera que haja uma transição da ferramenta básica de simulação “*stand-alone*” para uma ferramenta integrada de projeto e simulação.

Atualmente, as tarefas de projeto relativas à iluminação estão divididas entre os arquitetos que se ocupam em permitir a entrada da LN no invólucro e os “Lighting Designers”, projetistas de iluminação com a responsabilidade da iluminação artificial. As ferramentas acabam por refletir este panorama fragmentado. (AMORIM, 2003)

Deve-se salientar como fundamental a possível integração destas ferramentas ao processo de projeção, através do engaste da ferramenta de simulação à ferramenta CAD. Embora isto pareça óbvio, é um passo ainda a ser dado pelos autores dos softwares de modo geral e motivo de buscas constantes.

A expectativa do arquiteto atualmente é que a ferramenta de projeto assistido por computador envolva a integração dos algoritmos de simulação fisicamente fundamentados ao processo de projeção. Assim, os arquitetos precisam de ferramentas **interativas**, de respostas em **tempo real e fisicamente fundamentadas**, que realmente apoiem o trabalho de projetar o espaço do edifício e o urbano, considerando a LN.

Para estudar a simulação computacional da LN, precisamos antes conhecer as definições e os conceitos de Iluminação Natural, suas grandezas, assim como sua aplicação no projeto do edifício. O capítulo seguinte apresenta de forma resumida os conceitos mais importantes.

CAPÍTULO 3

LUZ NATURAL E ARQUITETURA

Este capítulo expõe as principais definições e conceitos da Iluminação Natural, suas grandezas, assim como o uso da Luz Natural (LN) no projeto do edifício.

3.1 Referencial teórico da LN

A LN que se compõe da luz do sol (direta) e da luz difundida na abóbada celeste (difusa) é a fonte que atende melhor às exigências visuais humanas. Há alguns milhões de anos o olho humano usa o espectro da LN como base de comparação com outras fontes de iluminação. É importante considerar que devido à sua variação ao longo do dia, fornece estímulos suficientes para desencadear processos fisiológicos nos usuários do edifício. (BAKER et al, 1993).

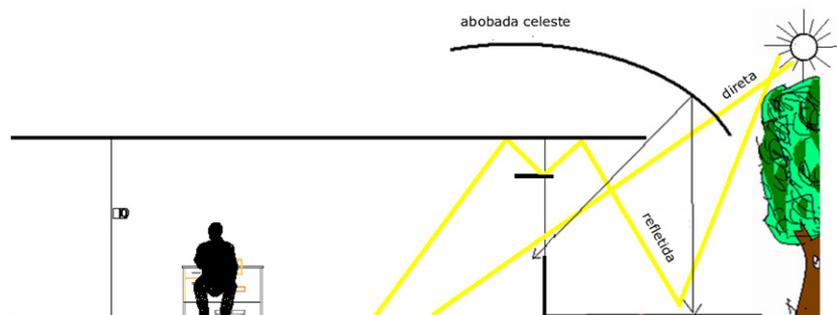


Figura 05 - A Luz Natural no espaço arquitetônico.

Toda LN que ilumina o interior do edifício é constituída basicamente por três componentes: a luz direta do sol, luz difusa do céu e luz refletida pelo solo e outras superfícies do entorno. (MIANNA E GONÇALVES, 2001).

3.1.1 Sobre a Natureza da Luz

Do ponto de vista físico, a luz pode ser considerada como uma porção visível do espectro eletromagnético que varia entre o comprimento de onda de 380 a 750 nanômetros. Considerando que a velocidade da luz é de aproximadamente 3.0×10^8 e que a velocidade de uma onda é o produto da sua frequência e o comprimento de onda, a frequência de onda da luz varia entre 3.9×10^{14} e 7.9×10^{14} Hertz (1/s).

Apesar de a radiação eletromagnética ser tratada como frequência e comprimento de onda, também é entendida como um feixe de fótons. Estes fótons trafegam em trajetórias retas, em atmosfera limpa, até que encontrem

uma superfície. Este modelo corpuscular é utilizado para a predição do comportamento da Luz. (MCHUGH, 1995)

3.1.2 Luz e a Visão Humana

“A luz é uma manifestação visual da energia radiante e, conseqüentemente, está intimamente relacionada com as sensações humanas.” (HOPKINSON et al, 1966).

O entendimento da relação entre a Luz e a Visão é fundamental para a implementação da LN no projeto do edifício. Entre todos os aspectos desta relação, um dos que mais importa ao arquiteto é aquele que trata da qualidade da iluminação.

O que define uma boa visão é uma função da relação entre a distribuição das luminâncias em toda a extensão dos limites do campo visual, o ângulo do pormenor crítico e o contraste crítico, deixando de fora da discussão os temas relativos à cor. (HOPKINSON et al, 1966).

3.1.3 Os aspectos elementares da luz

A energia radiante visível mede-se pelo ritmo de transferência de energia avaliada em termos do seu efeito sobre o sentido visual humano médio. Este fluxo luminoso exprime-se em *lumens*. A distribuição de luz sobre uma superfície exprime-se em termos de *lumens por unidade de área* e dá-se-lhe a designação de iluminação. (HOPKINSON et al, 1966). A unidade de Iluminância é o *lumem por metro quadrado* (lm/m^2) denominado *lux*.

O termo Luminância emprega-se para especificar a quantidade física de brilho. As palavras luminosidade, brilho aparente ou brilho subjetivo são empregadas para tratar do efeito subjetivo. (HOPKINSON et al, 1966). A unidade de Luminância utilizada no sistema métrico é a *candela por unidade de área*.

Definições:

- **LUMINÂNCIA:**
1 cd/m^2 (candela por metro quadrado) que corresponde a:
= 1 nit
- **ILUMINÂNCIA:**
1 lm/m^2 (lumen por metro quadrado) que corresponde a:

= 1 lux (lx)

O cálculo da luz provê o conhecimento das condições luminosas do interior em relação ao exterior, assim é expresso como um percentual e denominado Fator de Luz do Dia, ou DLF (daylighting factor):

$$DLF = 100 \times E_i(\text{interior}) / E_e(\text{exterior}) \quad (1)$$

3.1.4 O Conforto Visual

Segundo LAMBERTS et al (1997), o conforto visual é o principal determinante da necessidade de iluminação no espaço arquitetônico. A boa iluminação deve ter direcionamento adequado e intensidade suficiente sobre a zona de trabalho, assim como boa reprodução de cores e ausência de ofuscamento.

Em geral, o aspecto qualitativo da LN é esquecido quando se tenta satisfazer os padrões de quantidades mínimas para um determinado ambiente. Se o enfoque quantitativo do problema é resolvido à custa do encadeamento excessivo e desconforto visual, o resultado não é considerado satisfatório. (HOPKINSON et al, 1966).

A qualidade da iluminação interior e, conseqüentemente, o conforto visual, é uma função das propriedades das superfícies do interior, assim como do tamanho, formato e posição das aberturas.

Além dos parâmetros relativos ao projeto de arquitetura, devemos levar em conta a relação do usuário com o espaço arquitetônico. Esta relação varia em função da idade, tipo de atividade do usuário.

3.1.4.1 Velamento e ofuscamentos

O conforto visual depende basicamente da percepção de informações específicas pelo usuário.

A ausência de sensações de dor, irritação e distração dependem dos níveis de contraste e das variações das luminâncias no interior do edifício. Neste sentido, o ofuscamento é o maior responsável pelo desconforto. Este parâmetro de desconforto é o efeito desagradável causado por excessivo contraste das luminâncias no campo visual. De modo geral, distinguimos dois tipos de ofuscamentos, o *velamento* e o *adaptativo*. O primeiro é produzido por um foco

brilhante em um fundo muito escuro; assim que os raios de luz entram na retina causam um grau de difusão que nos faz ver o foco brilhante como se estivesse envolvido em um véu, ou produzindo raios em forma de estrelas. O segundo é mais importante para a arquitetura e tem sua causa na incapacidade de adaptação do olho humano em não admitir variações extremas de luminâncias no campo visual. (SERRA, 1998)

3.2 A Luz Natural no Projeto de Arquitetura

“A room is not a room without natural light. Natural light gives the time of day and the mood of the seasons to enter”. (LOUIS KHAN apud ANDER, 2003).

A luz natural determina a identidade de um espaço; por sua vez, o projeto de arquitetura determina onde haverá luz e como estará distribuída.

A arquitetura, especialmente seus melhores exemplos, sempre foi associada à luz natural, do Panteon às catedrais góticas. O papel da luz na arquitetura foi comentado com grande entusiasmo de Vitruvius a Bruno Zevi. (SERRA, 1998)

Ao longo do curso da humanidade quase tudo que foi visto aconteceu sob a luz do dia. O olho humano é adaptado para a cor e a intensidade da luz do sol. A luz artificial elétrica é relativamente nova. Os abrigos ao longo da história foram projetados para admitir a LN para possibilitar a visão, e dependendo do clima para aquecer o interior do edifício. (MCHUGH, 1995)

Durante séculos, os edifícios comerciais, os templos, assim como as fábricas e prédios oficiais foram projetados com janelas e iluminação zenital para explorar ao máximo a disponibilidade da luz natural. Entretanto, esta tradição arquitetônica quase foi perdida nessas últimas décadas e aparentemente todo o conhecimento das vantagens do uso da LN, esquecido.

O baixo custo da energia elétrica e a introdução de sistemas de iluminação mais eficientes com lâmpadas fluorescentes atendiam à demanda por níveis maiores de iluminâncias; ao mesmo tempo, a qualidade da luz recebia menor atenção. Este cenário se estabeleceu até os nossos dias e atualmente é comum que o parâmetro de iluminância – avaliação quantitativa – exclusivamente, oriente o trabalho do projeto de iluminação no ambiente

construído, considerando a distribuição, as luminâncias, contrastes e ofuscamento – avaliação qualitativa – como questões de menor importância. (JOHNSEN, 1998).

Por ter se ocupado principalmente com a questão da iluminação artificial por décadas, o arquiteto deixou o processo de avaliação do projeto da LN para os últimos estágios do projeto. Por outro lado, o projeto da LN exige que o seu estudo compareça já nos traços iniciais, definidores da forma final do projeto. Comumente os estudos sobre iluminação consideram a luz artificial semelhante à luz natural, referindo-se simplesmente a níveis de iluminação. (BAKER et al, 1993).

Gradualmente o uso da LN está sendo novamente incorporado como fonte principal de iluminação e de incremento da eficiência energética em edifícios não-residenciais. Depois da introdução de sistemas inovadores de iluminação natural e a consciência da necessidade das vantagens da utilização da LN, alcançou-se uma significativa redução do uso da energia elétrica para iluminação e, principalmente, um aumento significativo na qualidade e no conforto ambiental nos edifícios.

Existem alguns fatores que em algum momento determinaram a barreira a ser vencida pelos projetistas, vale destacar:

- A falta de *conhecimento e informação* sobre novas tecnologias e sistemas de iluminação e as possibilidades de sua aplicação;
- A falta de *ferramentas de projeto de* iluminação apropriadas e “*user-friendly*”. (JOHNSEN, 1998).

BAKER et al(1993) citam três maneiras de persuadir os arquitetos sobre as vantagens de incrementar e otimizar a LN nos projetos:

- Evidenciar as possibilidades arquitetônicas através de estudos de casos que sirvam como exemplo;
- Oferecer aos arquitetos instrumentos que possam lhes auxiliar no projeto e na avaliação de edifícios com iluminação natural;

- Fornecer análises e informações, através da descrição dos aspectos relevantes e das lições apreendidas dos estudos de caso, de forma que estas possam melhorar a qualidade dos projetos atuais.

Os mesmos autores destacam o fato de que já existem instrumentos simplificados para a avaliação de desempenho da LN nos edifícios, mas que os arquitetos muitas vezes utilizam em seus projetos referências a projetos arquitetônicos precedentes. Por isso, segundo estes, é importante ter um repertório de tipologias de projeto que expressem de forma eficaz os conceitos e princípios da iluminação natural.

3.2.1 As vantagens da LN

MAJOROS apud AMORIM (2002) afirma que a LN oferece inúmeros pontos positivos, entre os quais podemos destacar:

- A qualidade da iluminação obtida é melhor, pois a visão humana desenvolveu-se com a luz natural;
- A constante mudança da quantidade de luz natural é favorável, pois proporciona efeitos estimulantes nos ambientes;
- A luz natural permite valores mais altos de iluminação, se comparada à luz elétrica; note-se que a carga térmica gerada pela luz artificial é maior que a natural;
- O projeto que leva em conta a LN proporciona a iluminação necessária durante 80% a 90% das horas de luz diária;
- A luz natural é fornecida por fonte de energia renovável.

Considerando que o principal foco da arquitetura é promover o conforto do usuário. A LN pode promover o conforto através da sensação de bem-estar ao usuário, atendendo às suas necessidades visuais perceptivas, isto é, as condições em que se consegue enxergar bem e confortavelmente. Por outro lado, devem-se considerar como de extrema importância os aspectos da eficiência energética associados ao uso da LN nos espaços arquitetônicos.

3.2.2 Aplicabilidade e disponibilidade da LN

Segundo RASMUSEN (1998), a luz é de importância decisiva para sentirmos a arquitetura. O mesmo espaço pode ser projetado para dar diferentes impressões mediante o simples expediente de mudar as dimensões e localização de suas aberturas. Transferir uma janela do centro para uma ponta de uma parede transformará profundamente todo o caráter da sala.

A avaliação da LN e sua aplicabilidade no projeto do edifício requerem informações temporais e espaciais da distribuição difusa e direta da LN. Referências – sobre índices de Insolação Total (horas e décimos) e Nebulosidade – podem ser obtidas em publicação do DNMET “Normais Climatológicas (1961 – 1990), publicada em 1992.

Outras informações sobre os valores de Iluminâncias para diversas cidades do Brasil podem ser obtidas em “Conceito de dia típico de projeto aplicado à iluminação natural: dados referenciais para localidades brasileiras” de autoria de SCARAZZATO, 1995.

Segundo a ABNT (projeto de norma da LN publicado em agosto 2003) a disponibilidade de LN é a quantidade de luz em um determinado local, em função de suas características geográficas e climáticas, que se pode dispor por certo período de tempo. Dados e técnicas para a estimativa das condições de disponibilidade de luz natural são importantes para a avaliação do desempenho final de um projeto em termos de conforto visual e consumo de energia. Isto se refere à maneira como varia a quantidade de luz durante o dia e épocas do ano, quanto dura essa iluminação ao longo do dia e os motivos pelos quais as localidades dispõem de mais ou menos luz face aos parâmetros que influem no cálculo da disponibilidade da luz natural.

Para possibilitar o uso da LN no projeto de arquitetura, segundo as recomendações da IES (ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY), devem-se levar em conta os seguintes aspectos da LN:

1. Variações em quantidade e direção da luz incidente;
2. Luminância e sua distribuição de acordo com os tipos de céu que podem ser: Céu Claro, Encoberto Parcialmente ou Encoberto;

3. Variações da intensidade e direção da luz solar;
4. Efeitos do terreno, paisagem e obstruções da disponibilidade da LN.

Os itens um a três estão associados diretamente à latitude e à orientação do edifício.

As iluminâncias que atingem a fachada de um edifício podem variar de uma centena de milhares de lux quando o sol se posiciona ortogonalmente com céu claro e com céu encoberto atingem poucos milhares de lux. (FONTOYNONT, 2002)

A radiação solar e a LN podem variar ao longo do dia; para simplificar a quantificação foram estabelecidas algumas aproximações na sua representação. Segundo o CIE, os tipos de céu levados em consideração nas estimativas dos níveis de iluminação no interior do edifício são:

- Céu claro tende a ser mais brilhante no horizonte do que no zênite. É estável geralmente, pois tende a variar ao longo do dia de forma constante. É definido como aquele que não tem mais de 30% de nuvens obscurecendo a abóbada. A radiação direta é preponderante e a radiação difusa é mais intensa ao redor do sol e próximo do horizonte.
- Céu encoberto (isotrópico), o mais uniforme que tende a variar de forma mais gradual. É definido como aquele que tem pelo menos 80% da abóbada celeste obscurecida por nuvens. Há um turvamento da abóbada celeste e o Sol não está visível, a distribuição da radiação e a luminância tendem a ser mais uniformes.
- Céu parcialmente encoberto (anisotrópico) é definido como aquele que tem entre 30% e 80% da abóbada obscurecida pelas nuvens. O céu tem grande variedade de luminâncias de uma área para outra e tende a variar muito rapidamente entre estas. Segundo LAMBERTS (1997) é o céu predominante na maioria das regiões do Brasil.

As obstruções que não têm relação com o clima do sítio podem alterar substancialmente a disponibilidade da LN no interior do edifício. A LN que chega através das aberturas verticais da fachada pode ser obstruída de diversas formas, por árvores, edifícios vizinhos e etc.

3.2.3 A Estratégia do uso da LN no projeto de arquitetura

Segundo o IEA (2000), o planejamento da Iluminação Natural tem objetivos diferentes de acordo com as fases de desenvolvimento do projeto. Começa com a escolha do sítio e continua até a ocupação do edifício construído.

1. Fase Conceitual – de acordo com o desenvolvimento do “risco inicial”, a LN influencia ou é influenciada pelas decisões básicas sobre a forma do edifício, proporções e aberturas;
2. Fase de projeção – as estratégias precisam ser desenvolvidas para diferentes partes do edifício. As fachadas, a seleção dos materiais, a integração dos diversos sistemas, incluindo a iluminação artificial, fazem parte destas estratégias;
3. Pós-ocupação – quando construído, o edifício precisa receber ajustes e calibrações dos sistemas.

É sabido e reconhecido que a LN precisa ser incorporada ao processo de projeção desde os estágios iniciais, quando se adota o partido do projeto, influenciando na qualidade e quantidade de LN que estará disponível no interior do futuro edifício, com reflexos decisivos, positivos ou negativos, na eficiência energética obtida pela solução.

3.2.4 A Iluminação natural e artificial

As relações entre iluminação e boa visão aplicam-se de um modo igualmente válido, tanto à iluminação natural como à artificial. Entretanto, a iluminação natural desenvolveu técnicas diferentes da artificial, por dois motivos.

1. As variações em quantidade e distribuição da LN ao longo do dia são dificilmente controladas pelo projetista;
2. A iluminação natural tem impacto profundo no projeto do edifício, e por isso tem orientado o desenvolvimento da tecnologia baseando-se principalmente por princípios arquitetônicos do que de engenharia. (HOPKINSON et al, 1966).

3.3. Avaliação da Luz Natural na arquitetura

O objetivo principal da avaliação quantitativa da LN é obter o montante da luz no interior do edifício; por outro lado, a avaliação qualitativa se propõe a conhecer a distribuição da luz no espaço, representada através de imagens. Esta imagem pode ser gerada por fotografias no interior de modelos físicos reduzidos ou escala real. Outra técnica envolve o processamento numérico, a imagem sintetizada. Atualmente existem os recursos de sistemas computacionais de alto poder de processamento que podem gerar imagens sintéticas precisas do espaço arquitetônico. Ambos dependem, para gerar dados confiáveis, de informações estatísticas detalhadas das condições da abóbada celeste e outras informações da LN no sítio onde será implantado o projeto de arquitetura.

No que tange à simulação computacional, a avaliação da iluminação natural tem sido problemática, dado que os modelos matemáticos estabelecidos para a sua predição foram inicialmente desenvolvidos para tratamento de fontes fixas e pouco numerosas. O Sol é uma fonte de posição variável, de altíssima intensidade, criando também no céu uma abóbada de contribuição significativa e também variável (em função da posição do Sol). (CLARO, 2004).

Além dos aspectos das propriedades físicas da Luz, outras questões que envolvem a simulação da luz natural dizem respeito aos algoritmos e métodos de cálculo. No capítulo seguinte apresentam-se os modelos de iluminação global, os softwares de simulação e seus algoritmos.

CAPÍTULO 4

A SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL DA LUZ NATURAL.

Neste capítulo aborda-se a evolução da simulação computacional da LN e de seus algoritmos. Explicam-se os principais conceitos sobre os métodos de cálculo computadorizados, dos modelos de Simulação e de Iluminação Global. Apresentam-se os softwares de simulação selecionados para serem avaliados. Aborda-se como o resultado da simulação é exibido nas imagens sintéticas e a validação dos seus resultados.

4.1 O desenvolvimento da Simulação Computacional da Luz Natural

Inicialmente, os softwares de simulação computacional da LN estavam limitados a formas retangulares e paredes de somente uma janela, girando apenas em ambiente UNIX. A atual geração de simuladores pode simular o comportamento da luz em modelos tridimensionais importados de ferramentas CAD, como ferramentas “*stand-alone*”, autônomas, ou como “*plug-in*”, engastados em outro software, girando em ambiente UNIX, LINUX, MAC OSX, outros ambientes “Unix-like” e o ambiente Windows.

Em 1990 surgiu a primeira versão documentada do **RADIANCE** utilizando novos algoritmos que propiciavam análises de imagens renderizadas, mas necessitava de uma estação de trabalho gráfica, ambiente UNIX, cujo preço limitava seu uso a poucos pesquisadores. Os grandes escritórios de arquitetura e engenharia com sede nos EUA e filiais em todo o mundo – como SKIDMORE OWINGS & MERRILL – desenvolveram seus próprios softwares de simulação da luz natural que exigiam estações de trabalho ou “mainframes” para rodar, e, conseqüentemente, não estavam disponíveis para o uso dos arquitetos de modo geral. (UBBELOHDE, 1998).

Esta exclusão dos arquitetos foi superada, pelos menos parcialmente, com o surgimento de uma grande diversidade de ferramentas que se propõem a realizar simulações da LN de forma mais acessível aos arquitetos. No anexo I, apresenta-se uma listagem dos programas atualmente disponíveis.

4.2 Procedimentos Computacionais de Simulação da LN (Algoritmos e Métodos)

Pode-se pensar em imagens realistas, tanto na simulação do fenômeno físico da luz na interação com o ambiente, como numa ilusão realista criada por aproximações empíricas, às vezes de cunho artístico. (BESUIEVSKY, 1992).

Ao observar uma imagem renderizada por um dado software, pergunta-se qual é a informação física da luz utilizada nesta representação da geometria 3D? De onde vem esta luz?

A maioria dos softwares de visualização não é precisa do ponto de vista matemático, ou seja, gera falsas impressões ao invés de uma imagem que represente precisamente o espaço arquitetônico. Um dos elementos que contribui de forma significativa para esta imprecisão é a representação incorreta da luz, em especial a da LN, no espaço arquitetônico.

WARD (1998) afirma que os mais recentes avanços nos modelos computacionais de iluminação – conhecidos como “modelos de iluminação local e global” – foram desenvolvidos no domínio conhecido como *rendering* “foto-realístico”. O *rendering* é o processo de gerar uma imagem bidimensional de uma vista específica de uma descrição geométrica tridimensional.

Ao se utilizarem ferramentas de visualização baseadas em motor de cálculo que não é fisicamente fundamentado, em geral, precisa-se de uma luz “ambiente”¹ para iluminar a cena com uma luz de fonte invisível, ou melhor, irreal, porque é necessário iluminar as áreas em sombra que se esperava que fossem iluminadas. A imagem gerada a partir desta manipulação pode ter pouca semelhança com o que o espaço arquitetônico realmente será. (WARD, 1998)

Mesmo que esta imagem sintetizada se pareça com uma fotografia, é uma imagem sem precisão porque não foi gerada com base nos conceitos físicos da luz, isto é, a luz não interagiu no seu cálculo como realmente o faz na natureza. Considerando que o estudo da LN precisa determinar o quanto o espaço arquitetônico estará iluminado e como a luz estará distribuída, este método de *rendering* acima mencionado é inútil para efeito do estudo do comportamento real da LN, porque não é preditivo, ou seja, não prevê quantitativa e qualitativamente o comportamento da LN no espaço arquitetônico.

¹ O tratamento dado às inter-reflexões difusas pelos algoritmos Ray Tracers clássicos é limitado a um termo constante: “luz ambiente”. Esta aproximação falha em produzir detalhes nas sombras e impossibilita a utilização deste Ray tracing quando a iluminação indireta é importante. WARD (1998)

Os algoritmos preditivos podem utilizar os modelos de Iluminação Local ou de Iluminação Global. Os algoritmos de “Iluminação Local” descrevem a interação da luz que incide sobre uma superfície, considerando que esta é proveniente apenas das fontes de luz, não admitindo a inter-reflexão da luz entre as superfícies.

O termo “Iluminação Global” diz respeito aos modelos que simulam uma vista de uma cena, analisando a luz refletida de um dado ponto x , considerando **toda** a iluminação que chega a este ponto. Isto significa que se considera não somente a luz que chega a este ponto diretamente da fonte luminosa, mas toda a luz indireta que pode ter sido originada de uma fonte luminosa via outras superfícies. (WATT, 2000)

4.2.1 Modelos de Iluminação Global

A abordagem da iluminação global é diferente do *rendering* clássico, pois evita o atalho algorítmico que objetiva apenas um “efeito” realístico, sacrificando a precisão numérica dos resultados. Os simuladores se ocupam da precisão fotométrica e radiométrica da cena. Os algoritmos que simulam as propriedades físicas e comportamentais da luz, em escalas macro (propagação da luz da fonte ao observador) em escala micro (interações da luz com as características das superfícies) são chamados, em geral, como algoritmos de “**iluminação global**”. (EHRlich, 2002).

Os modelos matemáticos adotados na Computação Gráfica para gerar imagens sintéticas a partir de modelos 3D, em geral se utilizam de técnicas de aproximações de forma que possam ser implementados em forma de algoritmos². A forma generalizada do problema da iluminação Global é muito complexa. Uma abordagem generalizada tem de considerar como a luz refletida em qualquer direção a partir de um ponto afeta a luz refletida em todas as direções em todos os outros pontos da cena. É um problema multidimensional e de natureza integral, isto é, a informação das fontes de luz é processada, nas várias dimensões do problema, por toda a cena. (COSTA, 2000)

² Resta saber se estas aproximações que são inevitáveis quando se trata da simplificação dos fenômenos físicos da luz em forma de algoritmos, são consistentes com os objetivos do trabalho proposto. (INANICI, 2001)

4.2.2 Algoritmos de Simulação da Iluminação Global

O enfoque³ mais adequado para diferenciar os modelos de iluminação global é aquele que se baseia em como o algoritmo computa a radiância percebida por cada pixel da imagem. Neste enfoque as aproximações ao problema de síntese de imagem apresentam-se divididas em duas classes distintas: as designadas por síntese baseada em imagem (ou *image-based*⁴) e as que trabalham em nível do modelo geométrico que descreve a cena, designadas por síntese de imagem baseada na geometria (ou *scene-based*⁵). (CARVALHO et al, 1999).

A característica do algoritmo baseado na **imagem** é calcular diretamente a radiância média de cada pixel da imagem sem precisar computar primeiro a radiância da representação geométrica da cena. Um exemplo da síntese de imagem que usa este enfoque é o algoritmo conhecido como Ray Tracing. Sua principal vantagem é que o armazenamento de qualquer dado que não seja referente à geometria ou aos materiais pode ser desprezado. Por isso é mais adequado às cenas muito complexas para as quais pode gerar resultados muito precisos. A sua principal limitação é que toda a computação necessita ser refeita quando a posição do observador muda. (BEKAERT, 1999)

Um exemplo de visualização "*scene-based*" é o algoritmo Radiosity que utiliza um método que trata o ambiente como um todo, em suas características geométricas, independentemente de um observador para a cena⁶. Uma vez realizada a interação entre as diferentes superfícies luminosas, obtém-se, com relativa facilidade, diferentes pontos de vista. (CLARO, 2004)

Em uma categorização resumida, com enfoque quanto à visualização, o método Radiosity tem os seguintes diferenciais:

1. Por ser "View-independent";
2. Por ser baseado no método de cena (*scene-based*);

³ Outro enfoque trata dos problemas matemáticos envolvidos na simulação e categoriza os que têm base probabilística ou estocástica e os problemas determinísticos.

⁴ Também conhecido como "pixel-driven approach".

⁵ Também conhecido como "object-space approach".

⁶ Esta característica decorre do conceito adotado neste método de que todas as superfícies do ambiente são difusas perfeitas, isto é seguem a Lei do co-seno de Lambert e, portanto podem ser visualizadas de qualquer ponto.

Já o método Ray Tracing tem os seguintes diferenciais:

1. Por ser “View-dependent”;
2. Por ser baseado na imagem (*image-based*);

4.3 A Imagem Sintética e o problema da transformação dos resultados

Segundo WARD (1998), o meio mais natural para representar a simulação da luz, sem dúvida é uma imagem *renderizada* – ou imagem sintetizada – pois é de fácil de interpretação, já que simula o resultado pretendido na solução final do projeto arquitetônico.

De modo geral, as imagens produzidas como resultados da simulação computacional são vistas por observadores humanos na tela de computador ou impressas, ou até mesmo nas salas de cinema. Os monitores de vídeo convencionais não podem exibir a extensa faixa de intensidades da luz que ocorrem na natureza e do resultado das simulações fisicamente fundamentadas da luz.

Neste caso, precisa-se de alguma outra indicação da Luminância. Uma representação da imagem que possa ser utilizada para ultrapassar as limitações da faixa dinâmica dos atuais monitores.

Esta abordagem será detalhada no próximo capítulo, em que se estudam os tipos de saída, resultantes da simulação computacional da LN.

4.4 Os softwares de simulação da LN

A seguir, apresentam-se os softwares de simulação da LN que adotam o modelo de Iluminação Global, que serão avaliados no âmbito deste trabalho.

4.4.1 LIGHTSCAPE (LS) versão 3.2

O LIGHTSCAPE utiliza o algoritmo Radiosity, produz imagens de grande apelo visual, devido principalmente ao pós-processamento Ray Tracing implementado no software. Tem qualidades que poderiam destacá-lo dos demais, especialmente no que tange à facilidade de aprendizagem e sua excelente interface amigável. Tem bibliotecas de materiais, mobiliário e suporte para iluminação artificial. Pode trabalhar com processamento distribuído,

através de rede local. Há alguns anos atrás foi incorporado aos produtos da Autodesk, e em seguida descontinuado.



Figura 06 – LightScape - Simulação da LN no espaço-padrão.

Pré-requisitos: processador Intel Pentium 200 MHz (ou equivalente) 64 MB RAM, 1 GB livre em disco rígido e placa de vídeo gráfica com 16 bits de cor. Windows 95/98/ME/2000/NT service pack 4 ou superior /XP

4.4.2 DESKTOP RADIANCE (DR) versão 2.0 BETA

O DESKTOP RADIANCE incorpora o motor de cálculo do RADIANCE SYNTHETIC IMAGING SYSTEM (SIS), que é um conjunto de meia centena de módulos externos, denominados extensões. O software inicialmente produzido no LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY (LBNL) no início da década de 1990 e seu principal autor é Greg Ward.

Os cálculos incluem os valores espectrais da radiância (luminância + cor), da irradiância (iluminância + cor) e índices de ofuscamentos. Os resultados da simulação podem ser imagens coloridas, valores numéricos e plotagem de contornos. (LBNL, 2004)

O procedimento de cálculo adotado pelo RADIANCE SIS é o que representa o estado da arte em algoritmos de predição da LN no espaço arquitetônico. Simula a propagação da luz em um ambiente, usando as aproximações do método estocástico. E, através das extensões, permite que se incluam as mais significantes contribuições, tais como as inter-reflexões difusas e fontes secundárias. Utiliza o método de Ray Tracing Reverso por motivos de eficiência, já que no método Normal para seguir os raios de luz que

nunca alcançam o observador gastam-se enormes esforços computacionais. (WARD e SHAKESPEARE, 1998)

O enfoque híbrido determinístico/estocástico adotado pelo RADIANCE permite obter um equilíbrio entre velocidade e precisão. Os componentes diretos são computados com raios traçados para pontos arbitrários (estocástico) nas fontes de luz. Os componentes especulares indiretos são calculados com raios distribuídos sobre o espelho e transmitidos em diversas direções, usando a amostragem uniformemente balanceada Monte Carlo. Posteriormente, quando estes componentes forem removidos da Integral, as inter-reflexões difusas são computadas em pontos selecionados dinamicamente. (WARD e SHAKESPEARE, 1998)

Sobre o DESKTOP RADIANCE versão 2.0, especificamente, pode-se destacar que foi utilizada uma versão ainda experimental, BETA, e que ainda não dispõe de todos os recursos que o software RADIANCE SIS tem a oferecer. Estas características também se aplicam aos outros dois softwares analisados, o RAYFRONT e RELUX porque utilizam a mesma base do motor de cálculo do RADIANCE SIS, em sua versão no ambiente Windows.

O DESKTOP RADIANCE é uma ferramenta que gira no ambiente Windows 95/98/NT que integra o RADIANCE SIS com o AUTOCAD R14 e AUTOCAD 2000, inclui bibliotecas de materiais, vidros, mobiliário e suporte para a iluminação artificial. O seu foco principal consiste em integrar a ferramenta com pacotes CAD populares para facilitar a adoção de estratégias de iluminação natural e eficiência energética no projeto de arquitetura.

Foi desenvolvido por convênio entre diversas empresas de energia e pela divisão de Tecnologia dos Edifícios do Laboratório BERKELEY, CA USA.. A interface com o AUTOCAD R14 foi desenvolvida por MARINSOFT, CA, USA.



Figura 07 – Desktop Radiance - Simulação da LN no espaço-padrão.

Pré-requisitos: Processador Intel Pentium 200 MHz, 64 Mb RAM, 150 MB livres em disco e placa de vídeo gráfica com 8 bits de cor. Windows 95/98/ME/2000/NT (*service pack 3* em diante) /XP. AUTOCAD R14 ou 2000

4.4.3 RAYFRONT (RF) versão 1.04

É uma ferramenta independente de plataforma e do sistema operacional que prove uma interface gráfica ao software RADIANCE SIS e pode ser operado como módulo externo ao AUTOCAD ou INTELLICAD ou como uma ferramenta “*stand-alone*” e principalmente em combinação com o 3DSOLAR. É adequado para a iluminação natural ou artificial e inclui um gerenciador de projetos para estudos de variantes da simulação.

Pode importar a geometria de softwares CAD genéricos, mas o seu ponto forte é a integração com o 3DSOLAR, um poderoso modelador parametrizável de geometrias 3D. Esta combinação é ideal para ser utilizada nas fases iniciais do projeto. Utiliza banco de dados de luminárias em formato IES e pode distribuir a simulação entre os computadores da rede local, na plataforma UNIX.

Com o módulo RAYDIRECT, pode-se calcular sistemas avançados de LN, como o LASER CUT PANEL e Painéis Prismáticos.



Figura 08 – RayFront - Simulação da LN no espaço-padrão.

Pré-requisitos: Processador Intel Pentium 200 MHz, 64 Mb RAM, 1 GB em disco e placa de vídeo gráfica com 16 bits de cor. Windows 2000 (*service pack 4*)/NT (*service pack 6*)/XP

Outra exigência diz respeito à resolução de tela mínima de 1024x768.

4.4.4 RELUX (RL) PRO 2004 + VISION

O software utiliza dois enfoques distintos na mesma interface gráfica, embora isto não o caracterize como um software híbrido ou de duas passadas:

- Existe a possibilidade da utilização apenas do módulo principal que se baseia no método Radiosity para avaliar a iluminação natural e artificial no espaço arquitetônico, possibilitando a avaliação de eficiência energética anual. Utiliza apenas o Céu Nublado, iluminação difusa e Céu Claro. Denominado RELUX 2004 PRO, é software gratuito disponível no sítio WWW do fabricante.
- O outro enfoque se baseia no motor de cálculo do RADIANCE SIS e oferece uma interface gráfica para isto, o módulo denominado VISION que é um software comercial.

O VISION precisa do módulo principal para girar, e utiliza todos os seus principais recursos, tais como o cálculo de eficiência energética anual, ajustes de câmera sintética e etc.

As simulações foram realizadas com a versão DEMO disponibilizada no sítio WWW da *software-house*. As limitações da versão demo são a marca aplicada na imagem gerada (figura 09) e restrições nas análises dos resultados.



Figura 09 – Relux Vision - Simulação da LN no espaço-padrão

Pré-requisitos: Processador Intel Pentium 400 MHz, 256 Mb RAM, 80 MB em disco e placa de vídeo gráfica com 16 bits de cor. Windows 95/98/ME/2000 (service pack 6)/NT/XP

4.5 Validação da Simulação Computacional

O modelo computacional somente pode ser útil se os resultados obtidos pela predição forem muito próximos do ambiente real.

O mundo computacional tem um pé no mundo real dos mecanismos físicos e um pé no mundo abstrato dos objetos matemáticos. Mas, de qualquer forma, devemos ter a clareza de que estamos debatendo as propriedades da representação matemática do mundo real. O problema é a tarefa de fornecer um argumento convincente de que a versão matemática do problema é uma representação fiel da questão tal qual ela se apresenta no mundo real. O problema da validade do modelo. (CASTI, 1997)

Sobre a validação destes softwares avaliados no presente trabalho, alguns autores realizaram validações dos softwares RADIANCE, e LIGHTSCAPE. Em algumas situações específicas, como no caso de Hong Kong, o LIGHTSCAPE demonstrou maior precisão, comparativamente ao RADIANCE, embora na maioria das situações o contrário sempre prevaleceu. O trabalho de NG (2001) demonstrou que em situações específicas como as de Hong Kong, pela enorme densidade populacional da cidade, as janelas dos edifícios – por estarem muito juntos uns dos outros – tendem a ter pouca disponibilidade de luz nos andares baixos. Neste caso específico, o LIGHTSCAPE foi mais preciso do que o RADIANCE. Na maioria das outras comparações com as medições no local, o algoritmo do RADIANCE foi superior

em todos os aspectos, em especial nos que se referem à precisão da representação da luz no interior do edifício. O RADIANCE que é o motor de cálculo de três dos quatro simuladores já foi validado por vários trabalhos científicos na área da CG e da matemática.

Os trabalhos de KHOUDOLEV e KOPYLOV (1996) fizeram comparações das simulações em pontos específicos de modelos 3D e os compararam com as medições no modelo real. Os resultados mostraram a precisão real do algoritmo utilizado pelo RADIANCE e a incapacidade de avaliar os transportes de luz com interações especulares pelo LIGHTSCAPE. Além disso, o trabalho demonstrou a ineficiência do mesmo para simular a luz, em curto espaço de tempo, em função da natureza do algoritmo Radiosity.

Entretanto, sabe-se que, dentre os resultados da simulação, a imagem final não depende exclusivamente da validade do método empregado, mas também da qualidade dos dados de entrada e dos métodos adotados para transformar os resultados do cálculo em pixels.

Neste sentido, a metodologia e os critérios de avaliação dos softwares de simulação necessitam ser cuidadosamente estudados. O próximo capítulo apresenta a metodologia proposta para a avaliação dos softwares de simulação escolhidos.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA PROPOSTA PARA AVALIAÇÃO DOS SOFTWARES DE SIMULAÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a metodologia proposta, estabelecendo-se o ponto de vista do arquiteto como referência para a análise dos softwares de simulação da LN.

Muitas ferramentas que reivindicam a precisão na representação da LN, na verdade, são inadequadas. Isto foi abordado em vários estudos de validação¹ destas ferramentas. Por outro lado, é preciso salientar que estas validações têm trabalhado sistematicamente um enfoque numérico da questão. Este escopo pode ser considerado limitado para o arquiteto e outras questões que também importam ao mesmo têm sido pouco abordadas.

Neste sentido, a avaliação dos softwares de simulação da LN sob o ponto de vista do arquiteto precisa ser mais ampla. Implica necessariamente a avaliação da interface com o usuário – como a ferramenta interage com o usuário – aspecto considerado vital em função da complexidade do trabalho do arquiteto ao longo das diversas fases de projeção. É importante também como o arquiteto pode trabalhar o input – entrada – a partir de modelos 3D gerados nas ferramentas CAD, para o aproveitamento do trabalho de modelagem em 3D da proposta feita anteriormente para estudos de volumes e apresentação.

Em pesquisa publicada em 2003 na Conferência do “*Building Simulation 2003*”, por pesquisadores suíços, constatou-se que 32,1% dos arquitetos entrevistados declararam que a interface amigável é o critério mais importante. Já 29,1% declararam que o critério mais importante é o fácil aprendizado. Dos principais problemas, 57,6% concluíram que o conhecimento dos arquitetos era insuficiente. A entrada de dados (12,1%) e a interface inadequada (9,1%) são as principais barreiras para o uso da simulação. E dos que já tinham vencido esta barreira, 100% utilizavam a simulação na análise de dados referentes ao condicionamento de ar. (MAHDAVI et al, 2003). Isto demonstra a importância da avaliação da LN na eficiência energética global do projeto de arquitetura.

¹ Ver capítulo 4 item 5 ver também definição no glossário pagina 108

5.1 Metodologia proposta e sua aplicação

O ponto de vista do arquiteto foi a base da elaboração dos critérios de avaliação, que foram compilados com base em trabalhos comparativos de softwares de simulação da LN, considerados como o estado da arte, já mencionados no capítulo 4. A metodologia adotada para avaliar os softwares de simulação, de acordo com o exposto, seguiu o seguinte fluxo:

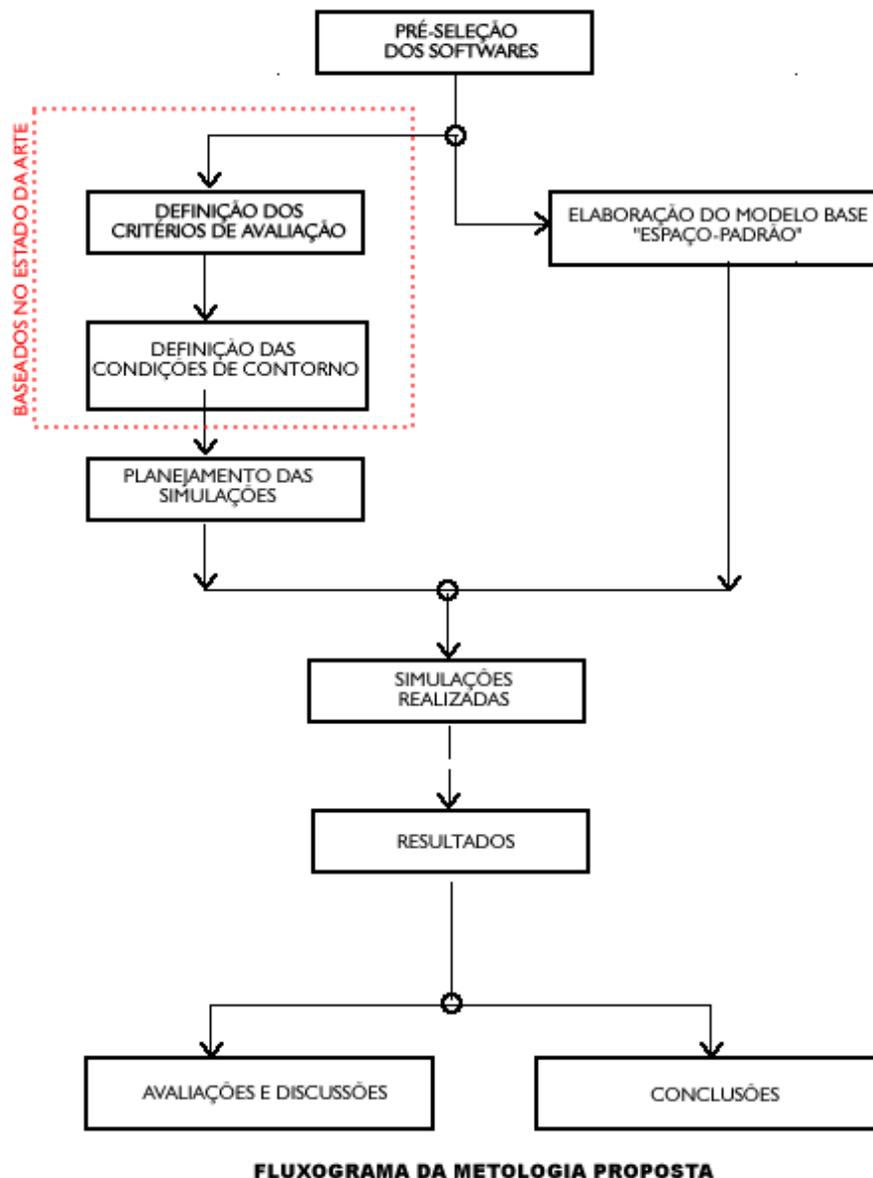


Figura 010 – Metodologia proposta

5.1.1 Seleção dos softwares

Selecionaram-se, dentre um grande número, 4 softwares de simulação para serem avaliados neste trabalho, (ver capítulo 4 e o anexo I sobre as características dos softwares estudados.) quais sejam: DESKTOP RADIANCE, LIGHTSCAPE, RAYFRONT e RELUX VISION.

Os critérios de escolha levaram em conta, em ordem de prioridade:

- Maior flexibilidade, no sentido da sua possível adaptabilidade ao trabalho do arquiteto;
- Precisão (validação);
- Representar os algoritmos do estado da arte atual;
- Preferencialmente que fossem softwares livres;
- Mais conhecidos no Brasil e acessíveis ao usuário brasileiro, arquiteto;
- Disponibilidade em língua portuguesa;

5.1.2 Definição do modelo 3D

Foi elaborado um modelo 3D para as simulações, utilizando software CAD, denominado “espaço-padrão”.

5.1.2.1 Sobre a construção do espaço-padrão

Para que sejam diretamente aplicáveis ao projeto do edifício, os softwares CAD de auxílio devem atuar na descrição do edifício – o modelo geométrico 3D – muito precisamente, de forma que o objeto simulado descreva o edifício que realmente será construído. Desenvolver este modelo com o nível de detalhamento e precisão necessário pode ser uma tarefa com alto consumo de tempo e sujeita a erros. (HITCHCOCK, 1995)

A condição ideal das simulações no presente trabalho seria adotar a referência de espaços arquitetônicos complexos para serem avaliados pelos softwares de simulação, tendo em vista que o trabalho desenvolvido pelo arquiteto, em geral, não se limita a uma simples figura geométrica.

No entanto, em vista da proposição de gerar uma série muito grande de variantes, adotamos um espaço-padrão simplificado, um paralelepípedo com um nível de complexidade e detalhamento básico. Além disso, outra simplificação foi necessária, para uniformizar as respostas entre os softwares de simulação; fixamos determinadas descrições óticas – a serem detalhadas no capítulo 6 – para os materiais de acabamento, de forma que todos os softwares de simulação possibilitassem atribuir a mesma propriedade ótica do material às superfícies.

Este procedimento adotado justifica-se pelos seguintes argumentos:

- Em vista do grande volume de variações a serem realizadas;
- Uniformização dos parâmetros para todos os 4 softwares de simulação;
- Fixado um tempo máximo de rendering de 60 minutos. É sabido que o tempo despendido nas renderizações pode levar de alguns minutos a muitas horas ou até mesmo dias, para cada uma das variações das simulações.
- Este procedimento diz respeito ao trabalho considerável de construir modelos e sua simplificação é necessária para viabilizar a simulação computacional da luz, especialmente nas etapas iniciais do processo de projeção, pois o tempo de processamento tende a ser significativo e pode impedir a experimentação de novas alternativas da geometria e das propriedades óticas dos materiais.

5.1.3 Definição das condições de contorno

A metodologia empregada na avaliação dos softwares de simulação baseou-se na tentativa de reprodução de situações rotineiras de trabalho do arquiteto. Neste sentido, o objetivo principal em realizar diversas variações das simulações com os 4 softwares de simulação em questão foi avaliar como este se comporta em diversas situações. Isto é, avaliar em que medida pode-se aplicar o software de simulação ao processo de projeção do arquiteto, de modo geral, e principalmente para aquele arquiteto que não tem a especialização na área da computação gráfica.

5.1.4 Planejamento e realização das simulações

O planejamento teve como ponto de partida a fixação do número de variações a serem simuladas e os aspectos a serem abordados nestas variações. Simularam-se o equinócio da primavera, os solstícios de verão e inverno, adotando três horas típicas do dia: 9 horas, 12 horas e 15 horas. Dois tipos de céu, claro e parcialmente encoberto. Outra variante foi o uso ou não da Prateleira de Luz.

5.1.5 Avaliação das simulações

A avaliação foi executada em duas etapas. A primeira etapa aconteceu durante as simulações; foram anotadas as facilidades e limitações que mais se destacaram em cada um dos softwares. A segunda etapa, a partir dos critérios estabelecidos, atribuiu-se notas para cada software de simulação.

5.2 Os critérios para avaliação dos softwares de simulação

Os critérios de avaliação foram elaborados a partir de pesquisa em diversos trabalhos, como ALTMAN (2000), KHODULEV (1996), INANICI (2001) e ROY (2000). O objetivo era selecionar os programas de simulação que fazem a predição da LN com precisão, e que possam ser integrados ao trabalho de projeção do arquiteto.

Os critérios adotados e seus respectivos pesos, no presente trabalho, para a avaliação dos softwares de simulação, considerando o fluxo de trabalho do arquiteto e em ordem de importância são:

Critério	peso
Modelagem – <i>Input</i> da Geometria	1
Interface	2
Produto obtido – <i>Output</i>	1
Parâmetros da LN	1
Propriedades das superfícies	1
Processamento	1
Validação	1
Suporte ao usuário	1

Tabela 02 – Base para os critérios de avaliação adotados e seus respectivos pesos

Foi atribuído peso 2 ao critério de interface, pois este é reconhecidamente um dos maiores empecilhos para que o arquiteto, usuário comum, utilize um software específico e complexo.

5.2.1 Modelagem – *Input* da Geometria.

O primeiro passo para gerar uma simulação computacional da LN é gerar um modelo 3D que represente o espaço a ser estudado. O modelo 3D pode ser construído no software de simulação, quando este tem essa capacidade, ou ser importado.

Este critério pretende avaliar a capacidade de importar com precisão geometrias complexas ou não; em caso positivo, quais formatos podem ser importados e se possui modelador incluído. A maioria dos softwares de simulação não dispõe de facilidades de modelagem da geometria do modelo 3D. Em contrapartida, oferecem a importação de dados modelados em sistemas de CAD 3D, em formatos mais comuns como o DWG, DXF e o 3DS.

Na sua maioria, o processo de transferência de dados não é tão simples, como aparentemente poderia ser, em função da incompatibilidade entre os formatos de arquivos² proprietários de diversos fabricantes que atuam nesta área. Como os Sólidos são gerados, a orientação das normais das superfícies, problemas com “layers” (camadas) são focos potenciais de problemas de importação.

Os formatos de importação são em geral arquivos DXF³, padrão “*de facto*” de intercâmbio de dados geométricos adotado por todos os softwares de CAD em PC – computadores pessoais. Para os softwares de simulação baseados em plataforma⁴ Windows e plataforma POSIX (interfaces gráficas baseadas em UNIX/LINUX), como o RAYFRONT, existem tradutores que fazem a conversão do formato DXF para MGF.

Um dos problemas na conversão do formato DXF para os softwares de simulação é que este é um padrão basicamente de informações geométricas de origem bidimensional. Alguns softwares dão preferência ao formato 3DS para importação quando se trata de geometria tridimensional.

² um arquivo é uma entidade de dados disponível aos usuários do sistema, que é capaz de ser manipulado como uma entidade. (Dicionário de Tecnologia, 2003)

³ é um formato de arquivo com uma descrição ASCII/Binary de um arquivo de desenho que pode ser lido por qualquer ferramenta CAD. (AutoCAD R14 User's Guide, 1997) mais informações em <http://www.autodesk.com/techpubs/autocad/acadr14/dxf/>

O formato 3DS⁵ tem um grande melhoramento, pois permite importar para o software de simulação os materiais e as câmeras sintéticas – ponto de vista do observador – anteriormente criados. Isto pode ser uma grande vantagem, pois alguns softwares de simulação têm uma interface muito deficiente para a criação de câmeras sintéticas, e outros são também deficientes na interface que atua na escolha das propriedades físicas dos materiais.

Outro aspecto importante para avaliação refere-se à capacidade de o software de simulação importar com precisão modelos de superfícies complexas. Nem todos os softwares de simulação podem lidar com superfícies e geometrias complexas; a limitação pode estar associada ao método de importação das malhas das superfícies e a variáveis como o gerenciamento da memória RAM⁶ disponível.

Se a importação do modelo 3D é complexa, questões sobre a modelagem na ferramenta CAD precisam ser detalhadamente observadas, pois muitos erros de análise da LN podem ser evitados construindo o modelo 3D de acordo com as especificações do software de simulação. Em geral, todos os softwares de simulação requerem que as faces sejam orientadas segundo a regra da “mão direita” – o software de simulação precisa saber para onde a normal da face aponta. No caso de esta regra não ser observada, podem acontecer erros ou problemas de cálculo que podem ser cruciais na confiabilidade dos resultados no processo de simulação.

A regra da mão-direita determina qual é o eixo Z positivo quando se sabe a direção dos eixos X e Y em um sistema de coordenadas 3D. Para determinar a direção positiva dos eixos X, Y e Z, coloque a face anterior da mão direita perto da tela do monitor, em seguida aponte o dedo polegar para o eixo positivo X, estique o dedo indicador e aponte-o na direção positiva de Y e

⁴ Plataforma – Em computadores, uma plataforma é um sistema no qual programas de aplicação podem ser utilizados. Em computadores pessoais, o Windows, Macintosh e Linux são exemplos de plataformas. (Dicionário de Tecnologia, 2003)

⁵ é um formato do antigo 3DS STUDIO da AutoDesk extremamente popular nos meados da década de 90

⁶ Ram (memória de acesso randômico) é o local em um computador onde o sistema operacional, os programas aplicativos e os dados em uso são armazenados de forma que possam ser rapidamente acessados pelo processador. (Dicionário de Tecnologia, 2003)

o dedo máximo aponta para a direção positiva de Z. Para determinar o eixo positivo de rotação em torno de um determinado eixo, posicione o polegar na direção positiva do eixo e dobre os dedos; esta é a direção positiva de rotação do eixo. Ver figura abaixo

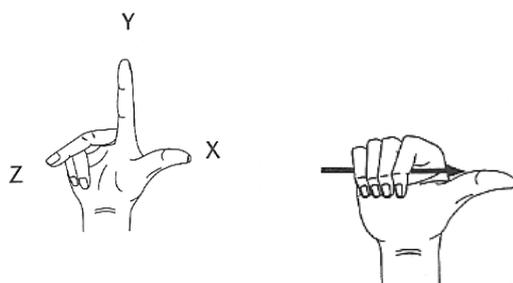


Figura 11 – Regra da mão-direita (fonte: Manual do AutoCAD R14, 1997)

A matriz deste item na avaliação será abordada como “modelagem própria” e “importação da geometria”, que estará subdividida em dois sub-itens: formato(s) que importa, e se suporta geometrias complexas.

Modelagem própria	Sim () Não ()
Importação da geometria	
• Formatos	3DS() DXF () outros ()
• Suporta geometrias complexas	Sim () Não ()

5.2.2 Interface

Neste trabalho a interface poderia ser limitada ao conceito de que: “consiste em um conjunto de teclas, botões, comandos de sistema operacional, formatos de exibição gráfica e outros dispositivos fornecidos por um programa para permitir que o usuário se comunique e o utilize”. (Dicionário de Tecnologia, 2003, pagina 432)

Entretanto, pretende-se empregar, além do enunciado citado, um conceito ampliado, baseado no fluxo de trabalho do arquiteto nas diversas fases de projeção. Está se falando da relação entre a complexidade da natureza dos dados de input e as questões da aplicabilidade do software de simulação no trabalho do arquiteto.

Sabe-se que um dos grandes obstáculos à utilização da simulação computacional associada ao processo de projeção é a dificuldade de integração da natureza dos dois processos. A integração destes processos deve levar em conta o alto nível de abstração do processo de projeção, especialmente nas fases iniciais e o seu caráter não monotônico que permite a retro-alimentação ao longo das fases de definição do partido e do anteprojeto. Se a ferramenta de simulação é avaliada exclusivamente pela precisão numérica do cálculo, o aspecto fundamental de aplicabilidade da ferramenta é negligenciado. Esta integração gera uma interface adequada ao arquiteto.

A interface adequada ao arquiteto deve permitir que o software de simulação possa ser utilizado em diversas fases do projeto. Isto pode parecer simples, mas na verdade não é. Porque no estágio inicial – alto nível de abstração – não existem medidas exatas, nem definição precisa dos materiais empregados. Então o software de simulação deve calcular os valores de disponibilidade de LN e sua distribuição a partir destas informações restritas e oferecer um bom produto de saída. Em contrapartida, a maioria dos softwares de simulação necessita de entradas com informações precisas sobre a geometria, características dos materiais e outros parâmetros para alcançar resultados adequados.

Outros itens de avaliação associados à interface são importantes, tais como:

- Definição da câmera sintética⁷ deve ser simples de ser estabelecida e restaurada através de interface gráfica de forma intuitiva, evitando entradas numéricas de coordenadas tridimensionais para o ponto de vista e o alvo do observador.
- Facilidade de inserção e compreensão dos materiais. E a inclusão de uma biblioteca básica acessível por meio de caixas de diálogo, evitando que o usuário seja obrigado a saber valores de refletâncias de inúmeros materiais.

⁷ Câmera Sintética diz respeito ao parâmetro de visualização relativo ao ponto de vista do observador. ver glossário pagina 102

- Adoção de uma interface para o estabelecimento dos parâmetros dos modelos de céu de forma simples e seguindo os padrões mundiais para as coordenadas de locação do sítio.
- “Set-up” do *rendering* de fácil acesso e de controle simplificado, através de recursos de interface comumente chamados “*wizards*”⁸.
- Barras de progresso da simulação preferencialmente exibindo o tempo restante do processo ao invés de percentuais do que já foi realizado.
- Contempla a análise dos resultados numéricos, saídas, na mesma interface, ou precisa convocar programas externos, como planilhas de cálculo, etc.
- Provê saída para a análise de ofuscamentos na mesma interface.
- Impressão dos resultados das simulações na mesma interface.
- Necessidade de outros módulos externos para a análise dos resultados.

A categorização do software de simulação – se é um “*stand-alone*”, “*plug-in*” ou “*front-end*” – é um dos aspectos que pode fazer a diferença na escolha do software de simulação ideal. Porque o software de simulação “*stand-alone*”, como o próprio nome diz, não precisa de outros softwares para gerar a simulação. Isto envolve aspectos de tempo de aprendizagem e eventualmente aspectos financeiros.

A interface também envolve o domínio do tempo despendido e dificuldade para aprendizado do software. Este aspecto envolve em que língua a interação do software utiliza. Obviamente a interface em português é extremamente benéfica ao usuário.

A matriz deste item na avaliação será abordada como “interface” e estará subdividida nos seguintes subitens:

Interface	
Interface em português	Sim () Não ()
Adequado a todas fases do projeto	Sim () Não ()

⁸ Diz respeito a rotinas que facilitam ao usuário o ajuste de parâmetros. Ver glossário pagina 108.

Quais?	Estudo Preliminar () Anteprojeto () Executivo ()
Compatível com a natureza do processo de projeção	Sim () Não ()
Câmeras sintéticas criadas por	Interface Gráfica () Coordenadas 3D ()
Câmeras são gravadas e restauradas por meio de	Caixas de diálogo () Coordenadas ()
Câmera Sintética criada por processo intuitivo	Sim () Não ()
Os materiais são estabelecidos através de paletas gráficas ou apenas textuais	Interface Gráfica () Entrada numérica ()
Parâmetros da LN de Brasília	Banco de dados próprio() Entrada Direta ()
Set-up de rendering auxiliado por meio de	Wizard () Não – só manualmente ()
Barras de progresso na interface gráfica	Sim () Não ()
Tempo restante e Percentual executado	Sim () Não ()
Contempla a saída numérica na mesma interface, grids etc.	Sim () Não ()
Contempla a saída de análise de ofuscamento na mesma interface	Sim () Não ()
Análise dos resultados	Módulo externo () engastado ()
Imprime os resultados na mesma interface	Sim () Não ()
Categoria	Stand-alone () Plug-in () Front-end ()
Tempo despendido para aprendizagem ou dificuldade para	Baixa () Médio () Alta ()

5.2.3 Output - Produto obtido

Os resultados da simulação podem estar disponibilizados em diversas formas, o que permite que possam ser visualizados novamente, gravados em

arquivo de imagem de alta resolução, impressos ou importados para uma planilha eletrônica.

As alternativas oferecidas para saída (output) são as seguintes:

- Imagens Sintetizadas (HDRi) High Dinamic Range – Imagens geradas com HDR possuem uma alta faixa dinâmica das luminâncias. Também conhecidas como “Radiance maps” são úteis para representar valores da iluminação real em aplicativos de rendering que utilizam o método de “image-based”. Assim como para gravar a iluminação incidente e utilizá-la para iluminar objetos, na computação gráfica, com o intuito de proporcionar foto-realismo. (DEBEVEC, 1998)

A partir destas informações em HDR, alguns softwares de simulação dispõem de comandos que simulam como a cena apareceria aos olhos humanos, transformando a informação da imagem HDR através de filtros lineares e não lineares, comprimindo a faixa dinâmica de forma que a maioria dos detalhes em alto contraste possa ser exibida na tela simultaneamente. De forma similar à experiência visual em um espaço arquitetônico real.

- Dados Fotométricos – Imagens em Falsecolor ou Isocontours – Podem ser utilizadas enquanto não se pode contar com técnicas mais avançadas como o “tone mapping”⁹ para resolver o problema da exibição das luminâncias do mundo real. Utilizam-se as imagens “**falsecolor**” que possibilitam contornar o problema, analisando o produto da simulação através do artifício de estabelecer cores para uma determinada faixa de valores de luminâncias ou iluminâncias. Através desta informação, imagens em falsecolor podem ser criadas mapeando a luminância de um pixel para uma cor arbitrariamente escolhida. Usualmente a cor azul escuro é escolhida para áreas escuras e vermelho indica altas luminâncias.

⁹ A conversão do mundo real para exibir as luminâncias é conhecida como “tone mapping”. Utiliza o conceito para mapear as luminâncias do mundo real para uma imagem possível de ser exibida em um monitor comum. (WARD, 1997)

O mesmo procedimento é executado para a saída de “*isocontours*”, plotando linhas na imagem que possuem faixas de valores de luminâncias ou iluminâncias.

- Avaliação de Ofuscamentos – a análise de possíveis ofuscamentos e desconforto visual é uma das características mais importantes do produto de saída do software de simulação. Pode-se obter imagem com os valores possíveis de desconforto ou apenas indicações numéricas dos ofuscamentos.
- Análise de Pontos na Imagem – a facilidade de medir a luminância/iluminância de ponto selecionado pelo usuário apenas por um “click” de “mouse” na imagem. Valores máximos, mínimos e médios da área também são desejáveis.
- Zona de Trabalho – Alguns softwares de simulação podem criar uma zona de trabalho (geralmente a 0,75 m do piso) onde são plotados os valores das iluminâncias e são exibidos os valores da grade solicitada a partir de um “click” de mouse.
- Na ausência de exibição dos valores de “*isocontours*”, a possibilidade de gerar uma malha com grade variável para exibição na tela do monitor ou exportação para planilha eletrônica pode ser útil.
- Cálculo do FLD (Fator de Luz do Dia) – Esta proporção é útil para avaliar a distribuição da LN no interior do espaço
- Animação – devem existir possibilidades para criar filmes com as mudanças da LN e o movimento aparente do sol. Inclusive podendo executar animações de *Walkthroughs*, ou seja, a animação de câmera que trafega por dentro do espaço arquitetônico.
- VRML – Linguagem de Realidade Virtual através da qual se pode navegar interativamente em uma animação *Walkthrough*.
- Cálculo de Eficiência Energética Anual – a partir do estabelecimento de parâmetros mínimos de iluminação no ambiente, de acordo com a norma, o software faz cálculos de quantas horas do dia e em que mês ou meses se necessitará do auxílio da luz artificial. Isto mostra a

eficiência energética da solução arquitetônica relativamente à iluminação natural.

A matriz deste sub-item será abordada como “Produto Obtido – Output”:

Produto Obtido - Output	
HDR (High Dynamic Range) Simula a visão Humana	Sim () Não () Sim () Não ()
Dados Fotométricos	FalseColor () Isocontour ()
Avaliação de Ofuscamentos	Imagem () Numérica ()
Pontos na Imagem	Sim () Não () Valores máximos, mínimos, Médios ()
Zona de Trabalho A partir de um “click” ponto na imagem	Sim () Não () Sim () Não ()
Grade com valores	Sim () Não ()
Cálculo de FLD	Sim () Não ()
Animação	Sim () Não ()
VRML	Sim () Não ()
Cálculo de Eficiência Energética Anual	Sim () Não ()

5.2.4 Parâmetros da LN

Um dos mais importantes componentes da luz natural na simulação é o modelo de céu, entidade dinâmica que depende da localização sítio e da hora. Modelos de céu corretos são fundamentais para simular precisamente a LN. O programa deve possibilitar a entrada de padrões de céu desenvolvidos pela CIE e preferencialmente modelos de céus específicos do sítio estudado.

A correção da solução depende da precisão dos modelos de céu. Nem todos os softwares aplicativos podem calcular uma abóbada celeste específica, a maioria faz estimativa, utilizando um modelo de céu padrão. Os modelos de céu específicos têm maior precisão, pois estão ajustados ao céu do sítio do edifício simulado. Mesmo os programas mais recentes utilizam os modelos de céu padrão da CIE ou IES.

Os tipos de céu segundo os padrões da CIE podem ser:

- Céu Claro
- Céu Parcialmente Encoberto (anisotrópico)
- Céu Encoberto (isotrópico)

Os procedimentos de cálculo utilizados por estes métodos nem sempre expõem claramente os parâmetros utilizados em referência aos dados climáticos. Sendo assim, quando na presença de dados inconsistentes, não se pode avaliar qual deles foi responsável pelas diferenças. (BELLIA, 2000)

Alem dos padrões de céu, outros parâmetros têm que ser informados:

- o norte geográfico
- A latitude e a longitude (hora local)
- Altura e Azimute solar
- Cor solar e do Céu

Assim a matriz deste sub-item é a seguinte:

Parâmetros da LN	
Modelos de Céu CIE	Sim () Não ()
Modelos de Céu do sítio	Sim () Não ()
Dados geográficos	Norte () latitude longitude () Altura e Azimute () Cor Solar ()

5.2.5 Propriedades das superfícies

Pode-se atribuir material de um conjunto de bibliotecas às superfícies. Novos materiais podem ser adicionados ou não. A matriz deste sub-item é a seguinte:

Propriedades das superfícies	
Possui biblioteca própria	Sim () Não ()
Podem-se criar novos materiais	Sim () Não ()

5.2.6 Processamento

Diz respeito à eficiência da implementação do algoritmo e também avalia a possibilidade do uso de processamento paralelo (distribuição da tarefa de cálculo para vários computadores em rede), que é muito importante para geração de animações e “walkthroughs”. A matriz deste sub-item é a seguinte:

Processamento	
Computação Paralela	Sim () Não ()
Eficiência	Alta () Média () Baixa ()

5.2.7 Precisão da saída

Validação (ver capítulo quatro item 4.5 página 46)

A maioria dos softwares a serem avaliados neste trabalho já foram validados por inúmeros métodos. A matriz deste sub-item é a seguinte:

Validação	
Validado	Sim () Não ()

5.2.8 Suporte ao usuário

Disponibilidade de documentação, tutoriais, listas de discussão ou fórum. A matriz deste sub-item é a seguinte:

Suporte	
Tutoriais	Sim () Não ()
Lista de Discussão ou Fórum	Sim () Não ()

A seguir, apresenta-se uma tabela com todos os critérios discutidos.

1-Geometria (peso 1)	LightScape	DesktopRadiance	RayFront	Relux Vision
Modelagem própria Sim () Não ()				
Importação da geometria Sim () Não ()				
Formatos 3DS() DXF () outros ()				
Suporta geometrias complexas Sim () Não ()				
2-Interface (peso 2)				
Interface gráfica em português Sim () Não ()				
Adequado às todas as fases do projeto Sim () Não ()				
Adequado às diversas fases do projeto? Quais? E. Prelim () Aprojeto () Exec ()				
Compatível com a natureza do processo de projeção Sim () Não ()				
Câmeras sintéticas criadas por Interface. Gráfica () Coordenadas 3D ()				
Câmeras são gravadas e retomadas por meio de Interface. Gráfica () Coordenadas 3D ()				
Câmera sintética criada por processo intuitivo Sim () Não ()				
Os materiais são estabelecidos através paletas gráficas () apenas textuais ()				
Parâmetros da LN de Brasília Banco Dados próprio () Entrada Direta ()				
Set-up de rendering auxiliado por meio de Wizard () manual ()				
Indicação de evolução do processamento Sim () Não ()				
Barras de Progresso:Tempo restante e Percentual executado				
Análise dos resultados com Módulo interno Sim () Não ()				
Contempla as saídas na mesma interface Sim () Não ()				
Tempo despendido para aprendizagem ou dificuldade para Baixa () Médio () Alta ()				
Imprime os resultados na própria Interface Sim () Não ()				
Categoria <i>Stand-Alone</i> Sim () Não ()				
Output (peso 1)				
HDR Sim () Não ()				

Simula a visão Humana Sim () Não ()				
Dados Fotométricos FalseColor () IsoContorno ()				
Avalia Ofuscamentos Sim () Não ()				
Pontos na Imagem para valores de Sim () Não () luminâncias e iluminâncias				
Valores máximos, mínimos, Médios Sim () Não ()				
Zona de Trabalho Sim () Não ()				
Calculo de DLF Sim () Não ()				
Grade com valores Sim () Não ()				
Animação engastada Sim () Não ()				
VRML Sim () Não ()				
Calculo de Eficiência Energética Anual Sim () Não ()				
Parâmetros da LN (peso 1)				
Modelos de Céu CIE Sim () Não ()				
Modelos de Céu do sitio Sim () Não ()				
Dados geográficos Norte () lat/longitude () Alt/Azimuth () C. Sol ()				
Materiais (peso 1)				
Possui biblioteca própria Sim () Não ()				
Podem-se criar novos materiais Sim () Não ()				
Processamento (peso 1)				
Computação Paralela (distribuída) Sim () Não ()				
Eficiência em apresentar resultados Alta () Média () Baixa ()				
Validação (peso 1)				
Validado Sim () Não ()				
Suporte (peso 1)				
Tutoriais Sim () Não ()				
Lista de Discussão ou Fórum Sim () Não ()				

Tabela 03 – Critérios de avaliação detalhados

A partir desta metodologia e levando em conta estes critérios, foram avaliados os 4 softwares de simulação pré-selecionados. No próximo capítulo descrevem-se as simulações e os resultados obtidos.

CAPÍTULO 6

AS SIMULAÇÕES REALIZADAS

Neste capítulo descrevem-se as simulações realizadas com os softwares, empregando a metodologia discutida no capítulo 5, assim como os resultados obtidos.

6.1 Descrição dos parâmetros das simulações

Para gerar qualquer simulação computacional, antes de mais nada, o primeiro passo a ser dado é criar um modelo 3D cuja geometria seja exatamente igual ao espaço arquitetônico que se pretende estudar.

Para avaliar a LN foi adotado um único espaço interno de uma sala, um espaço de trabalho. Este espaço foi denominado **espaço-padrão**, com as seguintes características descritas a seguir:

6.1.1 Dados geométricos do modelo 3D do espaço-padrão

O espaço-padrão é um paralelepípedo desenhado com as dimensões de 6.60 x 3.30, pé-direito igual a 2.75 metros. Considerando o módulo igual a 1.10 x 1.10 m. (ou seja: 6 x 3 x 2^{1/2} módulos). Ver figura 12.

Dispõe de uma janela com as seguintes medidas: 1.65 (largura) x 1.65 (altura) (ou 1^{1/2} módulo) fixada a 1.10 metros do piso.

A área envidraçada tem praticamente as mesmas dimensões da janela, já que não foram considerados os caixilhos da esquadria.

Foi adicionada à janela uma prateleira de luz interna com as seguintes dimensões, 1.65 x 0.40 metros, fixada a 2.20 metros do piso.

Cobertura plana com 9.60 x 6.30 metros, formando um beiral de 1.50 metros nos quatro lados do retângulo.

A área de piso externo tem as mesmas dimensões do teto.

Mobiliário: Mesa de trabalho de 1.22 x 0.76 x 0.76; Cadeira com rodízio tamanho padrão.

6.1.1.1 Modelagem do espaço-padrão

O modelo 3D do espaço-padrão foi gerado com o AUTOCAD da Autodesk, que pode ser considerado como um CAD genérico de nível intermediário na modelagem de geometrias tridimensionais, na sua versão R14. Esta versão foi

adotada pela compatibilidade com todos os simuladores, especificamente na exportação/importação do modelo 3D que representa a geometria do espaço-padrão.

Foram utilizados basicamente entidades simples como linhas com a extrusão adequada para os planos verticais, e extrusões girando a UCS para obter os planos horizontais. Além do plano representando o teto, foi criado um plano para representar o piso externo na mesma medida do teto. Sua função é atender à possibilidade de simular a reflexão no piso como fonte de luz indireta.

Este modelo serviu para três softwares de simulação; a única exceção foi o RELUX 2004 PRO + VISION, que não importa modelos 3D gerados em CAD¹. Neste caso, foi gerado o espaço-padrão utilizando o modelador interno próprio, que é orientado por objetos.

6.1.2 Propriedades óticas dos materiais aplicados –

Propriedades dos materiais				
Superfície	refletância	transmitância	especularidade	rugosidade
Parede 1 Tipo: Pintura Cor branca	65,61%	0%	0%	0%
Parede 2 Tipo: Pintura Cor branca	65,61%	0%	0%	0%
Parede 3 Tipo: Pintura Cor branca	65,61%	0%	0%	0%
Parede 4 Tipo: Pintura Cor branca	65,61%	0%	0%	0%
Piso Cor cinza granito	35%	0%	0%	0%
Teto Tipo: Pintura Cor Branca	68%	0%	0%	0%
Prateleira de Luz Tipo: Pintura Cor branca	65,61%	0%	2,68%	1%
Vidro Tipo transparente E=8 mm	82%	89,90%		
Mobiliário	Mesa: Cor bege, marrom e cromados. Cadeira: Laranja e cromados			

¹ Pode-se utilizar um módulo externo, denominado RELUX-CAD, que trabalha com geometrias complexas e interage com o AutoCAD 2005 e com o módulo principal RELUX 2004 PRO.

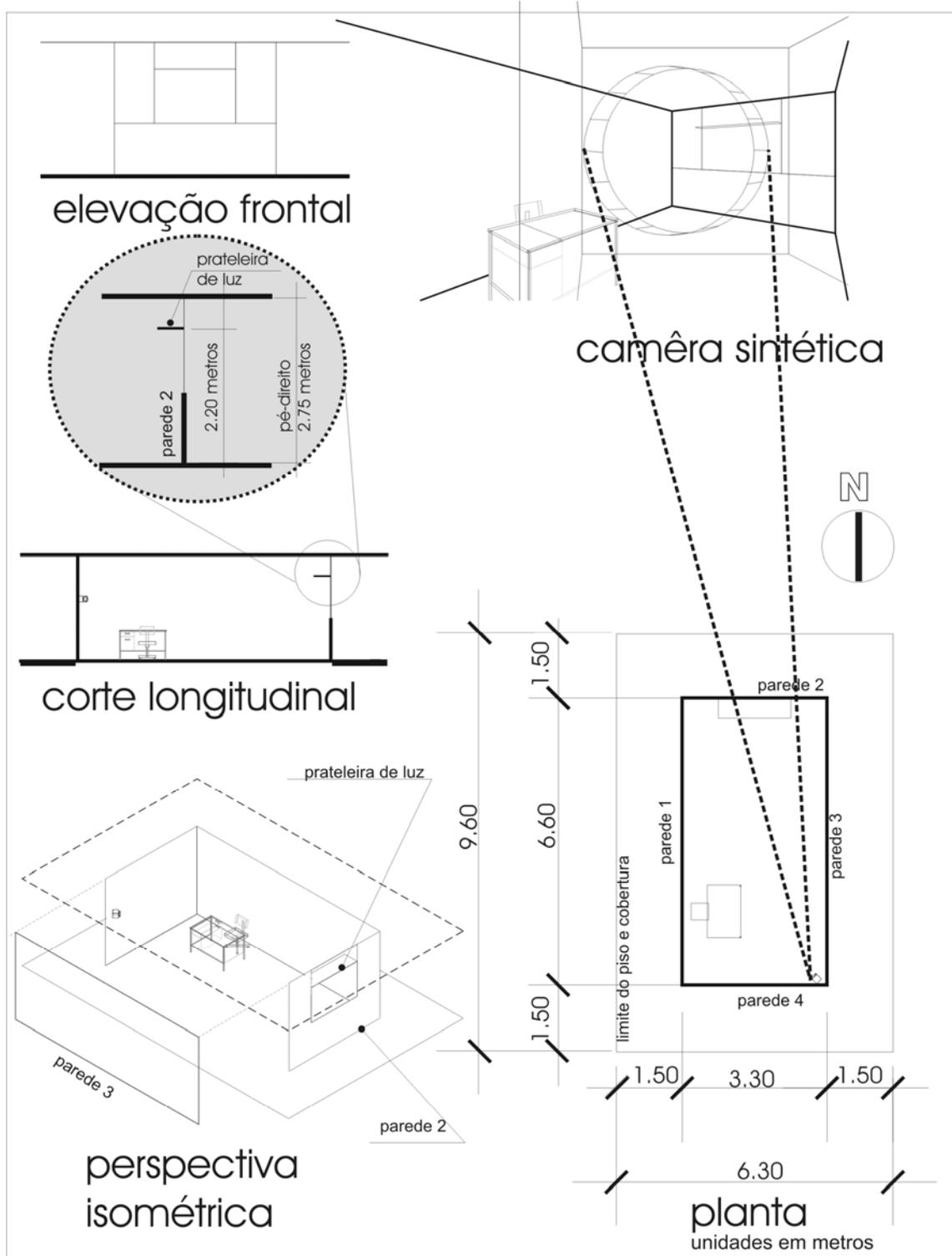


Figura 12 – Planta, Elevação, Corte, Câmera Sintética e Perspectiva Isométrica do espaço-padrão.

6.1.3. Dados da LN

6.1.3.1 Dados geográficos e climáticos do sítio das simulações

Sítio das simulações: Brasília, Distrito Federal.

Latitude	15° 52' S
Longitude	47° 55' W
Altitude	1060 m
Meses mais quentes (medias máximas mais altas)	Setembro, outubro e novembro.
Meses mais frios (medias mínimas mais baixas)	Junho, julho e agosto.

Tabela 04 – Dados geográficos e climáticos de Brasília. (Fonte: Goulart, 1998)

Segundo LAMBERTS (1997), Brasília é a cidade de clima com mais horas na zona de conforto entre as capitais analisadas a partir de estudos em cartas bioclimáticas, registrando um percentual da ordem de 43,6% das horas do ano na zona de conforto.

6.1.3.2 Dados Iluminâncias do céu

Quando o software de simulação não utiliza o padrão CIE, como é o caso do LIGHTSCAPE, utilizou-se a referência dos dados obtidos utilizando o software DLN de autoria de SCARAZZATO, 1995:

21 DE MARÇO – OUTONO Céu Parcialmente Nublado - sol alto -	23 DE SETEMBRO – PRIMAVERA Céu Parcialmente Nublado - sol médio	22 DE JUNHO – INVERNO Céu Claro - sol baixo	22 DE DEZEMBRO – VERÃO Céu Nublado - sol alto
9h – 60.000 lux	9h – 60.000 lux	9h – 62.100 lux	9h – 15.100 lux
10h – 81.500 lux	10h – 81.500 lux	10h – 80.500 lux	10h – 18.100 lux
11h – 95.600 lux	11h – 95.600 lux	11h – 92.100 lux	11h – 20.000 lux
12h – 100.600 lux	12h – 100.600 lux	12h – 96.000 lux	12h – 20.600 lux
13h – 95.600 lux	13h – 95.600 lux	13h – 92.100 lux	13h – 20.000 lux
14h – 81.500 lux	14h – 81.500 lux	14h – 80.500 lux	14h – 18.100 lux
15h – 60.000 lux	15h – 60.000 lux	15h – 62.100 lux	15h – 15.100 lux
16h – 35.000 lux	16h – 35.000 lux	16h – 38.500 lux	16h – 11.100 lux
17h – 13.300 lux	17h – 13.300 lux	17h – 13.400 lux	17h – 6.500 lux
18h – 3.000 lux	18h – 3.000 lux	18h – 8.000 lux	18h – 3.000 lux

Tabela 05 – Dados de iluminância global em plano vertical e horizontal para Brasília nos dias típicos (fonte:AMORIM, 2002)

6.1.3.3 Orientação do modelo

Orientação da janela na parede 2: norte (ver item 6.1.1 e figura 12)

6.1.4 Computadores e sistema operacional

Os computadores utilizados nas simulações têm a seguinte configuração:

Computador 1 – (principal)

- Processador AMD ATHLON 2000 MHz com 256 KB memória cache
- 1 GB memória RAM
- Discos rígidos para armazenagem de 80 GB 7200 rpm e 40 GB 7200 rpm
- Placa de vídeo nVIDIA GeFORCE 64 MB RAM
- Sistema Operacional: Windows XP Pro *service pack 1*
- Também foram utilizados os sistemas operacionais Windows 2000 e Windows NT Workstation *service pack 6*, girando em modo de máquina virtual.
- Sistema Operacional LINUX Distribuição SUSE 8.1 Pro

Computador 2 – (auxiliar)

- Processador PENTIUM IV 1800 MHz com 256 KB memória cache
- 256 GB memória RAM
- Disco rígido para armazenagem de 40 GB
- Placa de vídeo – na placa-mãe com memória compartilhada
- Sistema Operacional: Windows XP HOME *service pack 2*
- Sistema Operacional LINUX Distribuição CONECTIVA 10 DESKTOP

Computador 3 (experimental)

- Processador PowerPC G3 400 mHZ –Macintosh iMAC
- 512 MB RAM
- Disco rígido para armazenagem de 60 GB 7200 rpm
- Placa de vídeo ATI AGP on-board com 32 MB RAM
- Sistema Operacional: Mac Osx versão 10.2.8 conhecido como JAGUAR. Este SO é baseado no UNIX com interface gráfica própria MAC.

Esta variedade de sistemas operacionais e diferentes hardwares utilizados nas simulações tiveram dois objetivos:

- Avaliar a possibilidade de realização de simulações com o RADIANCE versão completa – denominada comumente como RADIANCE SIS (Synthetic Imaging System) – para estabelecer parâmetros de referência para todas as outras imagens produzidas.
- Descobrir se há alguma diferença de comportamento do software em relação à sua estabilidade, e especialmente à sua interface.

6.2 Detalhamento das simulações

Foram executadas as simulações com os mesmos parâmetros para os 4 softwares de simulação. Ao todo foram feitas 144 simulações, sendo 36 para cada software. O objetivo deste número de simulações é induzir o software simulador a gerar respostas, na medida do possível, a todos os critérios de avaliação estabelecidos previamente.

SIMULAÇÕES								
Arquivo	Dias	horas	Céu CIE	PLuz	DR	LS	RF	RL
Simulação 01_1a	22 de junho	9 horas	Céu claro	não	x	x	x	x
Simulação 01_2a	22 de junho	9 horas	Céu claro	sim	x	x	x	x
Simulação 01_3a	22 de junho	9 horas	Céu P. Encoberto	não	x	x	x	x
Simulação 01_4a	22 de junho	9 horas	Céu P. Encoberto	sim	x	x	x	x
Simulação 01_1b	22 de junho	12	Céu claro	não	x	x	x	x
Simulação 01_2b	22 de junho	12	Céu claro	sim	x	x	x	x
Simulação 01_3b	22 de junho	12	Céu P. Encoberto	não	x	x	x	x
Simulação 01_4b	22 de junho	12	Céu P. Encoberto	sim	x	x	x	x
Simulação 01_1c	22 de junho	15	Céu claro	não	x	x	x	x
Simulação 01_2c	22 de junho	15	Céu claro	sim	x	x	x	x
Simulação 01_3c	22 de junho	15	Céu P. Encoberto	não	x	x	x	x
Simulação 01_4c	22 de junho	15	Céu P. Encoberto	sim	x	x	x	x
Simulação 02_1a	23 de setemb	9 horas	Céu claro	não	x	x	x	x
Simulação 02_2a	23 de setemb	9 horas	Céu claro	sim	x	x	x	x
Simulação 02_3a	23 de setemb	9 horas	Céu P. Encoberto	não	x	x	x	x
Simulação 02_4a	23 de setemb	9 horas	Céu P. Encoberto	sim	x	x	x	x
Simulação 02_1b	23 de setemb	12	Céu claro	não	x	x	x	x
Simulação 02_2b	23 de setemb	12	Céu claro	sim	x	x	x	x
Simulação 02_3b	23 de setemb	12	Céu P. Encoberto	não	x	x	x	x
Simulação 02_4b	23 de setemb	12	Céu P. Encoberto	sim	x	x	x	x
Simulação 02_1c	23 de setemb	15	Céu claro	não	x	x	x	x
Simulação 02_2c	23 de setemb	15	Céu claro	sim	x	x	x	x
Simulação 02_3c	23 de setemb	15	Céu P. Encoberto	não	x	x	x	x
Simulação 02_4c	21 de setemb	15	Céu P. Encoberto	sim	x	x	x	x
Simulação 03_1a	22 de dez	9 horas	Céu claro	não	x	x	x	x
Simulação 03_2a	22 de dez	9 horas	Céu claro	sim	x	x	x	x
Simulação 03_3a	22 de dez	9 horas	Céu P. Encoberto	não	x	x	x	x
Simulação 03_4a	22 de dez	9 horas	Céu P. Encoberto	sim	x	x	x	x
Simulação 03_1b	22 de dez	12	Céu claro	não	x	x	x	x
Simulação 03_2b	22 de dez	12	Céu claro	sim	x	x	x	x
Simulação 03_3b	22 de dez	12	Céu P. Encoberto	não	x	x	x	x
Simulação 03_4b	22 de dez	12	Céu P. Encoberto	sim	x	x	x	x
Simulação 03_1c	22 de dez	15	Céu claro	não	x	x	x	x

Simulação 03_2c	22 de dez	15	Céu claro	sim	x	x	x	x
Simulação 03_3c	22 de dez	15	Céu P. Encoberto	não	x	x	x	x
Simulação 03_4c	22 de dez	15	Céu P. Encoberto	sim	x	x	x	x

Legenda: **PLUZ**= Prateleira de Luz **DR**=DESKTOP RADIANCE- **LS**=LIGHTSCAPE-
RF=RAYFRONT- **RL**=RELUX 2004 PRO+VISION

Tabela 06 – Parâmetros adotados nas simulações realizadas.

6.3 Resultados das Simulações

Uma ficha foi preenchida com os dados de cada simulação, exemplo:

Parâmetros de simulação					
Arquivo: simulação_XXXXX		Data da simulação: 29/jun		software: LS() DR() RF() RL()	
Parâmetros da LN					
iluminâncias	Estação	dia	hora	Céu	
60.000 lux	Primavera	23 set	9:00	Parcialmente nublado	
Propriedades óticas dos materiais aplicados					
	refletância	transmitância	especularidade	rugosidade	Obs
piso					
paredes					
teto					
caixilho					
prateleira de luz					
vidro					
Mobiliário					
		cor			Obs
cadeira	Chair4 LBNL	Light-gray, gray, yellow			
mesa	Desk, LBNL	Beige, chrome, brown			
Parâmetros de análise					
	Grid (0.80m)				

Figura 13 – Ficha com os parâmetros da simulação

Abaixo exemplificamos alguns resultados das saídas em imagem:



Figura 14 – Análise de Contornos de isolux gerada no Desktop Radiance

No anexo III disponibiliza-se os dados completos das simulações

6.4 Avaliação dos softwares

Após a realização das simulações com os quatro softwares, foi preenchida a tabela de avaliação, com os resultados de todas as simulações, segundo os critérios estabelecidos anteriormente. Em seguida foi atribuído, a cada item, uma nota, de acordo com o seguinte critério:

conceito	
☺	Bom (+2 pontos)
☹	Suficiente (0 ponto)
☹	Insuficiente (-1 ponto)
NA	Não se Aplica

O resultado da avaliação pode ser resumido segundo a tabela a seguir:

	LIGHTSCAPE	DESKTOP RADIANCE	RAYFRONT	RELUX VISION
1- GEOMETRIA	5	6	3	3
2- INTERFACE	38	-2	-10	62
3- OUTPUT	8	9	12	3
4- PARAMETROS DA LUZ NATURAL	0	1	6	1
5- MATERIAIS	4	4	4	4
6- PROCESSAMENTO	2	-1	-1	-1
7- VALIDAÇÃO	2	2	2	2
8- SUPORTE	1	4	1	4
TOTAL	60	23	17	78

Tabela 07 – Resultado da avaliação dos softwares de simulação

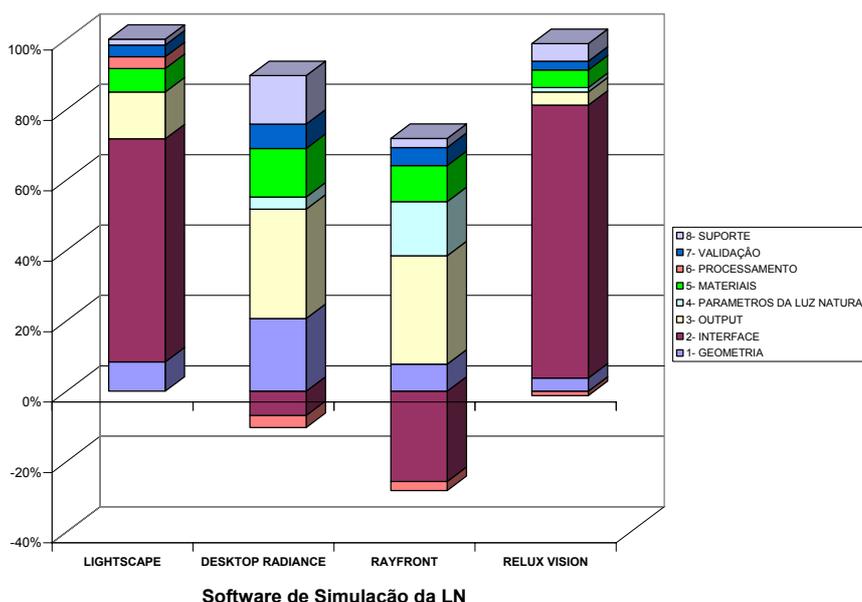


Figura 15 – Gráfico analítico dos resultados da avaliação dos softwares de simulação.

6.5 As Interfaces dos softwares

A seguir apresentam-se alguns “screenshots” das interfaces dos 4 softwares de simulação examinados neste trabalho, que ilustram a avaliação da matriz Interface feitas na pagina 77. Informações mais detalhadas sobre as interfaces: consultar os tutoriais no anexo IV. (CD-Rom anexo)

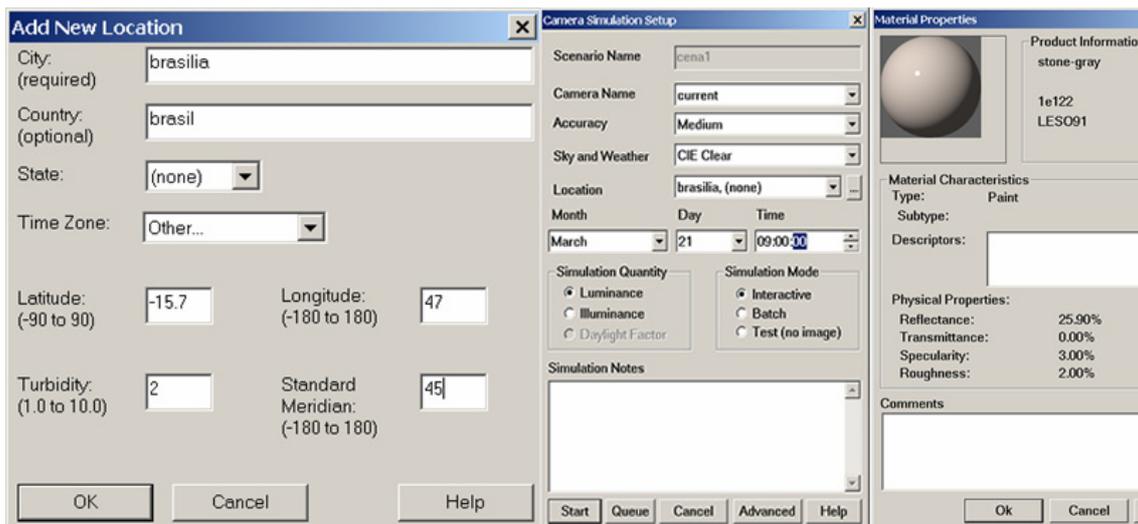


Figura 16 – Interface do DESKTOP RADIANCE para ajuste dos dados geográficos, da simulação e propriedades óticas dos materiais.

```
C:\WINDOWS\System32\cmd.exe

C:\ARQUIV01\DESKT01\{EAF66...}>rad -u C2 cena2DEZ9horas.rif
    econv -f -f mat/lbn1/housing.rad mat/lbn1/galvanized.rad mat/lbn1/arctic_ice.rad mat/lbn1/1e122.rad glz/dup/30pub6.rad cena2dez9horas_frn.rad modelo_prateleira2_m_housing.rad modelo_prateleira2_m_galvanized.rad modelo_prateleira2_m_arctic_ice.rad modelo_prateleira2_m_1e122.rad cena2dez9horas_sky.rad > cena2DEZ9horas.oct
warning - zero area for polygon "modelo_prateleira2_9F9.0.2"
    econv -f -f -i cena2DEZ9horas.oct modelo_prateleira2_g_30pub6_glass.rad
> cena2DEZ9horas0.oct
    mkillum -ab 1 cena2DEZ9horas0.oct "<" modelo_prateleira2_g_30pub6_glass.rad > ila01944
    econv -f -f -f -i cena2DEZ9horas.oct ila01944 > cena2DEZ9horas1.oct
    del ila01944
    rpict -t 0 -vu 0 0 1 -vf C2.vf -x 1024 -y 1024 -ps 3 -pt .08 @cena2DEZ9horas.opt cena2DEZ9horas1.oct > cena2DEZ9horas_C2.unf
```

Figura 17 – Janela DOS que transfere os dados da interface do DESKTOP RADIANCE para o cálculo no RADIANCE.

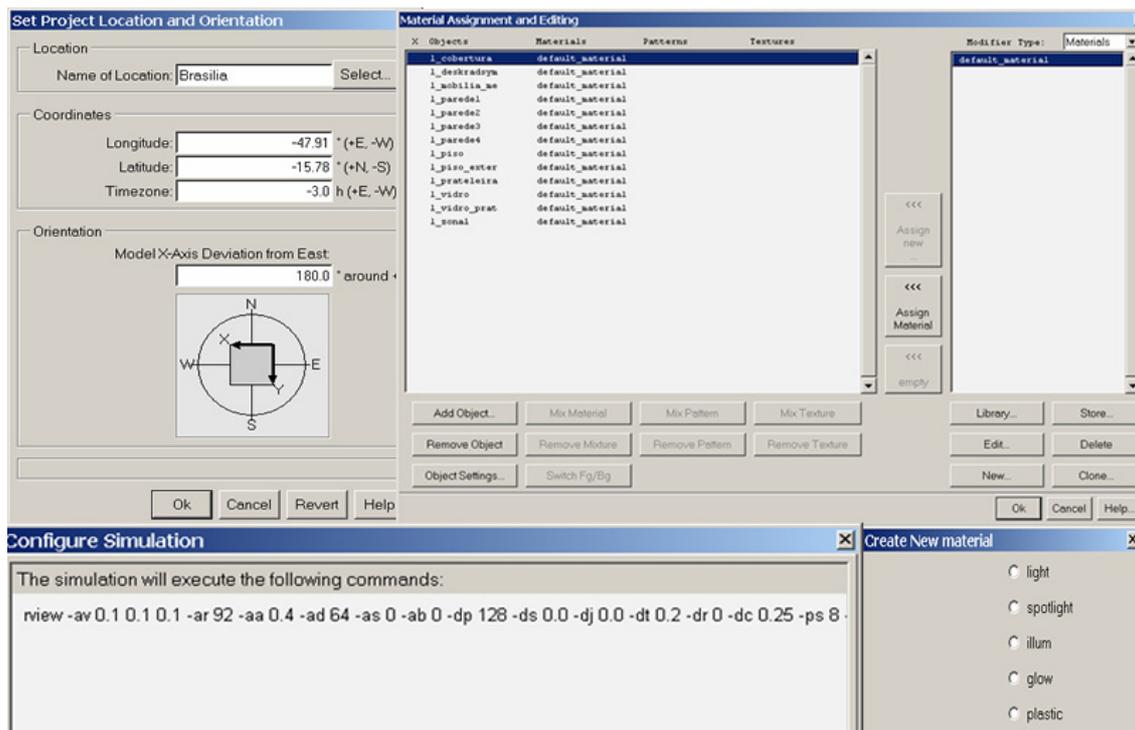


Figura 18 – Interface do RAYFRONT, ajustando parâmetros geográficos, atribuindo materiais, criando novos materiais e a janela de simulação.

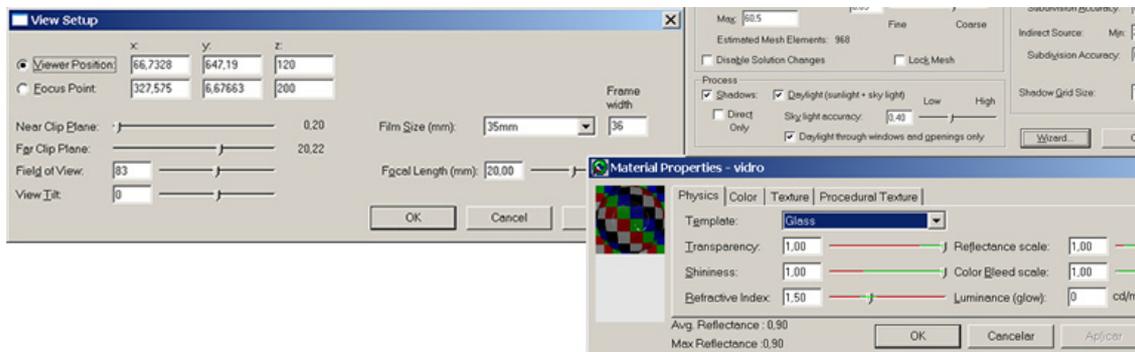


Figura 19 – Interface do LIGHTSCAPE – Ajuste da câmera sintética, ajuste das propriedades óticas dos materiais, recurso *wizard* para o *set-up* final da simulação.

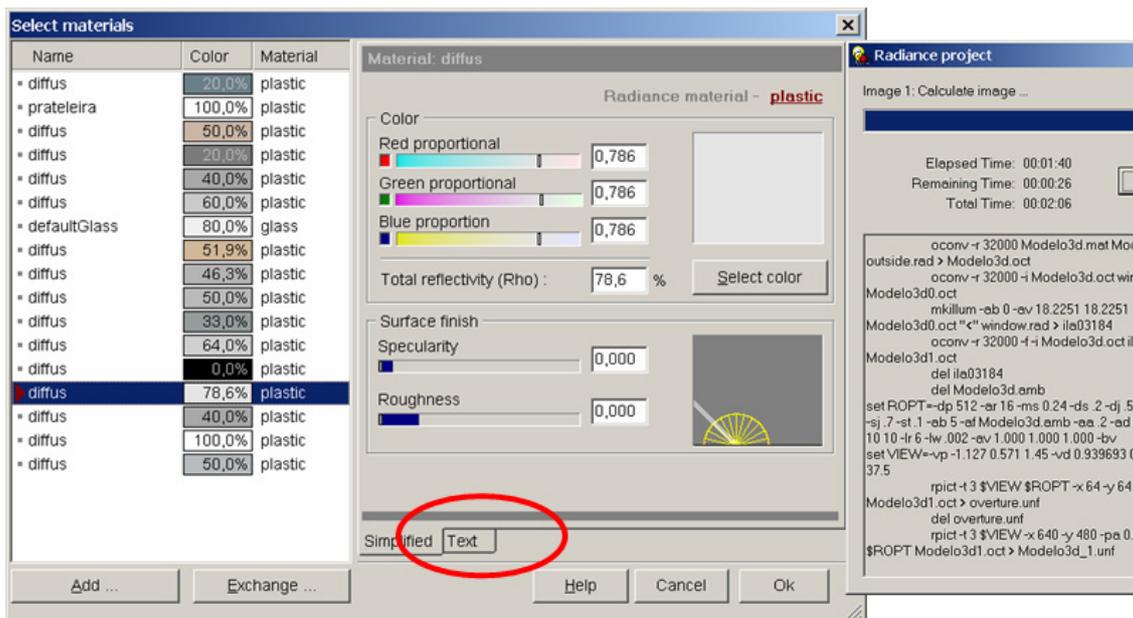


Figura 20 – Interface do RELUX PRO + VISION – Atribuição de propriedades óticas dos materiais, Barra de Progresso, com tempo decorrido e o restante para o termino da simulação.

No próximo capítulo, apresentam-se as discussões e conclusões a partir dos resultados obtidos nas simulações.

CAPÍTULO 7

DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

Neste capítulo analisam-se os resultados das simulações do espaço-padrão e discutem-se os resultados de cada software utilizado. Apresentam-se as conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros.

7.1 Discussão

A simulação do espaço-padrão por cada um dos quatro softwares de simulação gerou 144 imagens sintetizadas. (Anexo III). A seguir discutimos as qualidades, limitações, dificuldades e erros que pudemos constatar:

A seguir, apresentam-se as avaliações de cada um dos 4 softwares:

7.1.1 LIGHTSCAPE (LS)

O software LIGHTSCAPE utiliza como método de cálculo o algoritmo Radiosity. As simulações da LN e os resultados obtidos têm características inerentes a este algoritmo, como o cálculo das inter-reflexões difusas e por ser independente em relação à câmera sintética. (Anexo II). De fato, o enfoque híbrido adotado pelo LIGHTSCAPE não pode ser entendido como método avançado, porque não há nenhum indício de que o método Ray Tracing participe no cálculo das superfícies especulares, apenas as representa na imagem pós-processada. A análise numérica e de tonalidades é gerada independentemente do pós-processamento Ray Tracing.

7.1.1.1 Pontos positivos:

- Interface amigável e fácil aprendizado;
- Recurso *Wizard* para ajuste dos parâmetros da simulação;
- Facilidade no ajuste da câmera sintética;
- Importa muitos formatos de geometria 3D;
- Imprime os resultados na própria interface;
- Produz imagens com rapidez e view-independent;
- Podem-se alterar parâmetros de simulação e voltar ao processo de cálculo de forma interativa;
- Ferramentas de análise de fácil acesso e compreensão;
- Dispõe de manuais e tutoriais em PDF, instalados junto com o principal;

7.1.1.2 Sobre as limitações

As limitações que podemos destacar são, em geral, decorrentes do método de cálculo adotado pelo software, o algoritmo Radiosity.

- Produz saída de imagens inerentemente focadas nas superfícies difusas;
- Não atende a todas as fases de projeto;
- Não faz análise dos possíveis ofuscamentos. Não gera cálculos para os valores de iluminâncias nas superfícies não oclusivas;
- Imprecisão ao predizer os níveis de luz indireta e não levar em conta o piso externo como fonte de luz indireta;
- De acordo com experiências anteriores, em simulação de espaços arquitetônicos complexos, constatou-se que a imprecisão torna-se maior cada vez, conforme aumenta a complexidade da geometria;
- Falta suporte ao usuário.

7.1.1.3 Sobre as dificuldades e erros:

- Imprecisões devidas à interpretação incorreta da geometria importada: apareceram alguns vazios entre as faces das superfícies por onde entrava a luz externa;
- O modelo de céu não é consistente com os padrões CIE. Ajustar o céu, especialmente o céu parcialmente encoberto, é uma tarefa que precisa da utilização de recursos experimentais para aproximar às condições dos modelos de céu CIE;
- É preciso ajustar uma espessura qualquer na entidade da superfície do vidro, caso contrário geram-se erros de cálculo; além disso, é obrigatório criar uma superfície com espessura qualquer para representar aberturas de entrada da LN;
- Considera o valor da longitude para oeste de Greenwich como positivo. Gera confusão para o usuário;

- As propriedades óticas dos materiais não são consistentes, pois não considera as interações da luz nas superfícies especulares. Embora a interface permita atribuir e criar materiais de forma extremamente simples.

7.1.1.4 Sobre a aplicabilidade:

- O LIGHTSCAPE tem tido uso na produção de imagens “foto-realísticas” nos últimos anos, apesar de ter sido descontinuado pela Autodesk – atual proprietária – para ser incorporado parcialmente nos seus produtos. O uso do software pelos arquitetos pode ser de grande utilidade para apresentação do projeto, pois dispõe de recursos de animação e VRML; entretanto, como simulador, tem uso limitado na predição da LN.

Um dos seus principais impedimentos, além das deficiências já descritas, para não ser considerado adequado ao uso na predição da LN no projeto de arquitetura diz respeito ao fato de que a correção de problemas de programação não acontecerá pelo fato de estar descontinuado, e, portanto a evolução do seu algoritmo está comprometida, além dos problemas de suporte ao usuário.

O LIGHTSCAPE totalizou 60 pontos na avaliação. Seu ponto forte acontece na matriz da “Interface” e seu pior desempenho relativo é na matriz “Parâmetros da LN”.

7.1.2 DESKTOP RADIANCE (DR)

Os softwares DESKTOP RADIANCE e RAYFRONT têm como base o motor de cálculo do RADIANCE SIS, já validado, e por isso não deixam dúvidas quanto à precisão dos seus resultados. As imagens sintéticas produzidas na simulação do espaço-padrão têm muita consistência qualitativa e quantitativa. As variações entre seus resultados podem ser resultantes de ajustes e parâmetros disponibilizados na interface de cada um.

7.1.2.1 Pontos positivos:

- Confiabilidade e eficiência, gira com um *plug-in* dentro do AutoCAD, beneficiando-se da sua Interface e das possibilidades de modelagem 3D. Não tem limites para o tamanho e complexidade da geometria;
- Pode trabalhar com todas as relações de transporte da luz, especulares, a difração e com as inter-reflexões difusas;
- Ferramenta de análise precisa que aborda qualitativa e quantitativamente a predição da LN;
- Possibilidade de modelar o céu padrão CIE;
- Possibilidade de modelar materiais e texturas com precisão;
- Capacidade para avaliar a LN que chega através de venezianas, mas não na Interface Gráfica;

Tem grande comunidade dedicada à pesquisa, e por isso têm suporte através de listas de discussão, sítios WWW, artigos científicos e livros.

7.1.2.2 Sobre as limitações:

- As suas limitações dizem respeito a sua excessiva complexidade, o que torna a falta de um recurso “*wizard*” para facilitar o seu uso por um arquiteto não especializado em CG, mais evidente. Por outro lado, estas imensas possibilidades tornam o potencial de cálculo o seu ponto mais positivo;
- Somente pode utilizar o AutoCAD R14 ou 2000; não está adequado ao uso de versões mais recentes;
- Tem facilidades de análise de possíveis ofuscamentos, embora isto não esteja ao alcance do usuário através da interface gráfica;
- A visualização da imagem é gerada por dois módulos externos, o RVIEW e o WINIMAGE. O enfoque do primeiro é interativo e adequado principalmente para corrigir e ajustar os parâmetros iniciais. O segundo é um módulo exclusivamente para fazer a análise quantitativa e qualitativa.

- Gerenciador de simulação que funciona adequadamente, mas tem problemas de coordenação com as “janelas” DOS – onde gira o RADIANCE – que neste caso provocam erros de gerenciamento no sistema operacional e fecham prematuramente o programa.

7.1.2.3 Sobre dificuldades e erros:

- Para alcançar resultados consistentes devem-se utilizar coeficientes de ambiente igual a $(-a_v \ 0 \ 0 \ 0)$ e coeficientes para a variável que controla o número de interações igual a $(-a_b \ 5)$ para calcular as inter-reflexões da prateleira de luz.
- Quanto à interface, os ajustes acima mencionados estão entre as várias dezenas de possibilidades das caixas de diálogo dos parâmetros avançados, o que dificulta o uso por parte do arquiteto não especialista;
- Adoção de parâmetros em desacordo com o padrão mundial, por exemplo, considerando a longitude, a oeste de Greenwich, como positiva e o sistema de hora local independente. É possivelmente um foco gerador de erros, mesmo considerando que está documentado.

7.1.2.4 Sobre a aplicabilidade:

- A interface gráfica tem interação restrita com o usuário; contudo, o fato de girar como plug-in no AUTOCAD compensa parcialmente as limitações da interface, facilitando a integração da simulação ao editor gráfico CAD, e evitam-se assim os graves problemas de importação de geometria a que os outros simuladores estão submetidos;
- Este enfoque é o ideal para a integração do software de simulação ao processo de projeção. Além disso, a interface do AUTOCAD é bem conhecida pelos arquitetos há vários anos;
- Os ajustes de nível de precisão da simulação, juntamente com o gerenciador de simulação, podem tornar o processo muito eficiente do ponto de vista do tempo necessário para a simulação e a retroalimentação do processo para estudo de alternativas do projeto de arquitetura.

- Isto não significa que o software seja adequado ao uso nas fases iniciais do projeto, pois seu algoritmo necessita de informações muito exatas de input e ajustes complexos para obterem-se resultados adequados.

O DESKTOP RADIANCE totalizou 23 pontos na avaliação. Seu ponto forte acontece na matriz “Geometria” e seu pior desempenho relativo acontece na matriz “Interface”.

7.1.3 RAYFRONT (RF)

7.1.3.1 Pontos positivos:

- Gerenciador de arquivos de simulações eficiente, facilitando tarefa de estudar variações. Além disso, permite um fácil controle dos projetos;
- Confiabilidade e eficiência;
- Não tem limites para o tamanho e complexidade da geometria;
- Múltiplas plataformas, LINUX, Mac OSx, SGI, PC-IBM;
- Possui pré-visualização para averiguar a câmera sintética e os parâmetros iniciais;
- Pode trabalhar com todas as relações de transporte da luz: especulares, a difração e com as inter-reflexões difusas;
- Ferramenta de análise precisa que aborda qualitativa e quantitativamente a predição da LN. Além das disponibilizadas pelo DR, dispõe de ferramenta para tratamento e conversão de imagens;
- Possibilidade de modelar o céu específico do sítio, através de entrada de parâmetros na interface, além do céu padrão CIE;
- Conta com biblioteca de materiais sofisticada, com vidros avançados e Painéis Prismáticos;
- Apesar de usar o mesmo RADIANCE do DR, não tem problemas com a implementação deste no ambiente Windows;

- Capacidade para avaliar a LN que chega através de venezianas além dos dispositivos avançados da LN, tais como Painéis Prismáticos. Os dispositivos LASER CUT PANEL e outros quando está associado ao *plug-in* RAYDIRECT.

7.1.3.2 Sobre as limitações:

- As suas limitações dizem respeito à dificuldade de importação dos modelos CAD quando não gira simultaneamente com o 3DSOLAR ou AUTOCAD ;
- Somente pode utilizar o AutoCAD R14 ou 2000; não está adequado ao uso de versões mais recentes;
- A visualização da imagem é gerada por dois módulos externos, o RVIEW e o WINIMAGE. O enfoque do primeiro é interativo e adequado principalmente para corrigir e ajustar os parâmetros iniciais. O segundo para fazer a análise das luminâncias e iluminâncias;
- Tem facilidades de análise de possíveis ofuscamentos, embora isto não esteja ao alcance do usuário através da interface gráfica;
- Dificuldades em adaptação do software ao ambiente Windows XP em português que precisa ser instalado em pasta específica e isto não está documentado;
- A documentação é apenas descritiva; não dispõe de tutoriais e o suporte dado pelo fabricante é totalmente deficiente.

7.1.3.3 Sobre dificuldades e erros:

- Como no DR, para alcançar resultados consistentes deve-se adotar um conjunto de parâmetros que não estão documentados claramente, somente indiretamente através dos manuais do RADIANCE SIS. E devem ser testados empiricamente, até alcançar resultados desejados;
- Existe grande dificuldade para gerar a câmera sintética quando o modelo é importado via DXF, sem apoio de interface interativa em tempo real do AutoCAD;

- A interface para criação e aplicação de materiais nas superfícies é inadequada ao usuário não especialista, sem o apoio de paletas gráficas como as do DR, do LS e RL. Assim, precisa-se lembrar da descrição ótica dos materiais que se deseja utilizar.
- 7.1.3.4 Sobre a aplicabilidade:
- O RAYFRONT utilizado com o 3DSOLAR tem um grande potencial para apoiar o processo de projeção do arquiteto. Este enfoque busca a integração do software de simulação ao processo de projeção;
- Ideal para estudo de alternativas do projeto de arquitetura especialmente nas fases iniciais, se utilizado com o 3DSOLAR;
- Sem o auxílio do 3DSOLAR, o RAYFRONT tem um potencial muito baixo de aplicação no trabalho do arquiteto e está mais adequado ao trabalho de pesquisadores da área.
- Todo o potencial do RAYFRONT se mostra quando está girando associado com o 3DSOLAR e com a adição do plug-in RAYDIRECT. Torna-se a ferramenta ideal para analisar os dispositivos avançados da LN.

O RAYFRONT obteve 17 pontos na avaliação. Seu ponto forte acontece na matriz “Output” e seu pior desempenho relativo na matriz “Interface”.

7.1.4 RELUX VISION

O RELUX 2004 PRO + VISION, segundo o fabricante, dispõe de motor de cálculo baseado no RADIANCE SIS ligeiramente modificado. Além disso, dispõe do algoritmo Radiosity para cálculos limitados para a iluminação difusa gerada pelo céu encoberto.

7.1.4.1 Pontos positivos:

- Confiabilidade e eficiência;
- Interface com interação perfeita em relação ao fluxo de trabalho, tornando-a intuitiva, o que facilita o seu aprendizado além de ser na língua portuguesa;

- Modelador interno simples, mas poderoso, para elaborar a geometria. Utiliza objetos e não entidades geométricas, isto é, criam-se paredes (não cria linhas ou faces que *representam* paredes), janelas, lajes, clarabóias, portas, mesas, cadeiras, luminárias e etc.;
- Aborda a geometria e as propriedades óticas dos materiais atribuídos aos objetos, na mesma interface;
- Permite output com várias abordagens da iluminação natural e artificial, tais como avaliação numérica de ofuscamentos, eficiência energética anual, pseudo-cores (falsecolor) e curvas de isocontornos em todos os planos da geometria 3D, paredes, pisos e teto. Permite o corte longitudinal e transversal no plano de referência, exibindo o gráfico de iluminância e sua composição da contribuição direta e indireta;
- Ao analisar a eficiência energética do projeto, avalia a integração da iluminação natural e artificial, prevendo em que horas do dia, mês que se precisa acionar a luz elétrica. Isto acontece em função da entrada de valores de probabilidade de sol ao longo de cada mês, no sítio especificado;
- Permite criar zonas de avaliação virtual em qualquer plano da geometria do modelo, além dos tradicionais planos de referência de trabalho.
- Parâmetros óticos dos materiais consistentes, em formato texto como o RADIANCE SIS utiliza (o que é extramente poderoso) ou em formato de paletas gráficas que simulam a aparência final do material;
- Ajuste da câmera sintética, gráfica e numericamente, de modo intuitivo e extremamente simples;
- Possui pré-visualização para ajustar a câmera sintética e os parâmetros iniciais, evitando assim esperar-se algum tempo, horas até para constatar que os parâmetros adotados não agradam;
- Basta passar o mouse em qualquer ponto da imagem para saber a sua luminância;

- Possui gerenciador de arquivos com a descrição detalhada de cada projeto;
- Permite imprimir as saídas para impressora local e PDF.

7.1.4.2 Sobre as limitações:

Avaliar e elaborar considerações muito precisas sobre as limitações de um software na versão DEMO é uma tarefa de valor discutível. Pode-se, entretanto, questionar algumas características do que já foi visto.

- Quanto ao módulo principal que utiliza o algoritmo Radiosity, não existem estudos de validação sobre a correção ou não dos resultados. Embora os seus resultados sejam coerentes com os obtidos pelo LS;
- Apesar da interface na língua portuguesa, os manuais, os arquivos de ajuda e os tutoriais são na língua inglesa;
- Não possui banco de dados geográficos de outros continentes, à exceção de alguns países da Europa. Obriga-se a entrada manual dos dados de latitude, longitude e hora GMT;
- Não tem saída de imagem em HDR;
- A avaliação dos ofuscamentos não está implementada nesta versão;
- Não permite importação direta da geometria gerada em ferramenta CAD. Isto é um dos pontos negativos mais importantes, embora seja compreensível, porque trabalha com objetos em vez de simples entidades vetoriais;
- Possui módulo externo e comercial para importação de geometria e interação com a ferramenta AUTOCAD, denominado RELUX CAD;
- Não dispõe de análise, na versão DEMO das iluminâncias;
- Não dispõe de possibilidade de customização para a execução de tarefas específicas, através de linguagem de programação de alto nível.

7.1.4.3 Sobre dificuldades e erros:

- A biblioteca de mobiliário, embora seja completa e de boa qualidade, tem alguns problemas no acerto da posição e ponto de inserção dos objetos;
- Existem poucas dificuldades de uso da interface; entretanto, o entendimento de como ajustar as saídas não é intuitivo, pois sempre se espera que o software dê a saída da imagem diretamente no frame-buffer;
- Precisa-se fechar o programa para que os cálculos sejam executados, considerando as mudanças de geometria feitas no espaço-padrão. Ao apagar-se a prateleira, os cálculos consideravam esta mudança, mas a imagem não. Isto acontecia em outras versões do programa e não foi corrigido.

7.1.4.4 Sobre a aplicabilidade:

A sua aplicabilidade no processo de projeção é bastante promissora, pois tem todas as condições e capacidade para apoiar as diversas fases do projeto de arquitetura. Tem um número grande de possibilidades de análise qualitativa e quantitativa do comportamento da luz no espaço arquitetônico. Dispõe de saídas gráficas e numéricas para quase todos os parâmetros necessários para esta tarefa. A sua interface amigável é muito apropriada para os arquitetos.

O RELUX VISION obteve 78 pontos na avaliação. Seu ponto forte acontece na matriz “Interface” e seu pior desempenho relativo na matriz “Geometria”.

7.2 Conclusões

A simulação da Luz Natural no espaço arquitetônico tem aplicação nos estudos de conforto ambiental e também como estratégia de conservação de energia. A dificuldade em encontrar métodos simples, ou seja, uma ferramenta adequada para o uso do arquiteto não especialista em CG, é a principal barreira no uso extensivo da simulação preditiva no processo de projeção da arquitetura.

Para avaliar os softwares de simulação utilizou-se um espaço-padrão modelado em 3D com as características precisas e situado em Brasília, DF, tendo como objetivo principal estudar a capacidade e adaptabilidade destas ferramentas na predição computacional da LN no projeto arquitetônico.

Na avaliação dos softwares de simulação, de acordo com a tabela de critérios estabelecida anteriormente, os resultados foram em ordem decrescente: RELUX VISION 78 pontos, LIGHTSCAPE 60 pontos, DESKTOP RADIANCE 23 pontos e RAYFRONT 17 pontos.

Concluiu-se, diante da avaliação e discussão anterior, que, entre os softwares analisados, o RELUX PRO 2004 + VISION é o que mais se aproxima do trabalho do arquiteto atual; por outro lado, o RAYFRONT e o DESKTOP RADIANCE são os que apresentam mais dificuldades para integrar-se ao processo de projeção arquitetônica.

O RAYFRONT poderia beneficiar-se do uso combinado com o 3DSOLAR, pois estes softwares foram desenvolvidos para trabalhar em conjunto, e por isso acredita-se que o rendimento do RAYFRONT seria superior quando utilizado nesta condição.

Quanto ao DESKTOP RADIANCE, a maioria dos problemas apresentados é semelhante aos do RAYFRONT. Contudo, sua utilização é menos complexa, porque o seu funcionamento é transparente para o usuário, pelo fato de estar incluído na ferramenta AUTOCAD, que tem uma interface gráfica muito conhecida pelos arquitetos. Além disso, dispõe de caixas de diálogo para a seleção dos materiais, seleção de vidros e visualização por meio de câmeras sintéticas.

O LIGHTSCAPE tem uma interface amigável, mas não tão intuitiva quanto o RELUX. Alguns aspectos da imprecisão dos cálculos estão relacionados principalmente aos modelos de céu e ao não tratamento das superfícies especulares nas propriedades óticas dos materiais. Está descontinuado pelo fabricante, isto sem dúvida é um ponto negativo importante, especialmente no que diz respeito ao suporte para o usuário.

O RELUX VISION alia a precisão do motor de cálculo validado a uma interface correta, amigável e extremamente simples. O software se ocupa menos em oferecer recursos infinitos de cálculos e mais com a interação com o usuário, arquiteto não especialista em CG ou matemática. A este usuário, que pretende utilizar a ferramenta como apoio ao processo de projeção do espaço arquitetônico, se oferece a possibilidade de fácil aprendizagem e aplicabilidade,

sem abrir mão da possibilidade de cálculos e imagens precisas. A interação da interface é na língua portuguesa – de Portugal – o que merece um grande destaque, pois propicia segurança ao usuário. Têm os principais pré-requisitos para apoiar o projeto nas suas diversas fases, contribuindo de forma importante para adicionar ao espaço arquitetônico as qualidades da LN.

A metodologia adotada para avaliação dos softwares mostrou-se adequada, tanto no caso presente, como possivelmente para avaliar outros softwares de simulação da LN. Supõe-se que, com algumas adaptações, poderia ser aplicada também à avaliação de softwares de simulação térmica e ou energética.

Como resultado desta avaliação, conclui-se ainda que não exista o software de simulação ideal que os arquitetos esperam. Este, idealmente, deveria integrar-se ao processo de projeção arquitetônico, através das ferramentas de edição e criação de geometria 3D, e avaliar o projeto com um enfoque único para a avaliação luminosa e a contrapartida térmica decorrente do uso da LN. A ferramenta ideal deve considerar o projeto arquitetônico como uma integração de diversos fatores, dando ao arquiteto a possibilidade de integrar conhecimentos no mesmo, utilizando processos digitais acessíveis a ele.

Considera-se, por fim, que existe um grande potencial para utilização de softwares de simulação por parte dos arquitetos, no projeto de arquitetura. Necessariamente, é grande o papel da formação do arquiteto neste sentido, considerando que cada vez mais este deve integrar, em seu percurso formativo, conhecimentos de informática e familiaridade com as questões de desempenho ambiental do projeto, considerando a integração da LN no mesmo. As ferramentas computacionais – softwares de simulação- devem facilitar ao máximo seu uso por parte dos arquitetos, mas, claramente, estes últimos devem estar adequadamente preparados para lidar com elas.

Voltando ao paradigma inicial de Cremonini. “*O arquiteto necessita contribuir para integrar o homem através da luz, com os recursos e a obra da natureza no objeto arquitetônico*”. As ferramentas de Simulação Computacional da LN podem apoiar o projeto de arquitetura na integração proposta por Cremonini; algumas delas, analisadas no presente trabalho, estão disponíveis, isto é,

prontas para serem usadas, contribuindo, desta maneira, para um melhor desempenho ambiental e eficiência dos projetos atuais e conseqüentemente para maior sustentabilidade da arquitetura em geral.

7.3 Desdobramentos e Trabalhos Futuros

Os trabalhos de pesquisa futuros podem aprofundar a comparação de softwares analisados no presente trabalho, especialmente aqueles que contam com o motor de cálculo do RADIANCE, pelas razões explicadas ao longo desta pesquisa. Aprofundar também significa utilizar modelos 3D com geometria e materiais mais complexos, adotando como premissa de trabalho, os dispositivos avançados de Luz Natural, tais como Tubos de Luz, Painéis Prismáticos, *Laser Cut Panel* e outros.

Um grande número de interfaces gráficas para o RADIANCE está sendo proposto por pesquisadores com os mais diversos enfoques, entre estas pode-se destacar a integração do RADIANCE com o software livre BLENDER, ferramenta de modelagem 3D multiplataforma. Esta integração é bastante promissora e pode fazer parte de uma nova comparação em que o critério de software livre seja decisivo.

Estudar a elaboração de ferramenta interativa girando totalmente no CD-ROM, sem precisar instalar, com o sistema operacional livre LINUX de forma totalmente independente, sem interferir no conteúdo do computador do usuário. Neste ambiente, o arquiteto terá a sua disposição as ferramentas necessárias, o estado da arte, para estudar o conforto luminoso e térmico integrados, do espaço projetado, através de interface gráfica única, dispondo também de material didático em forma de tutoriais e vídeos para o aprendizado dos softwares.

Embora se saiba que o uso dos softwares de simulação não é fácil e requer treinamento, é preciso destacar que o arquiteto precisa estar pronto para utilizar as facilidades dos recursos computacionais para otimizar a avaliação do conforto ambiental e da eficiência energética do espaço proposto no projeto de arquitetura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALTMAN, Kurt., APIAN-Benewitz, Peter, "Report on an Investigation of the Application and Limits of Currently Available Programme Types for Photorealistic Rendering of Light and Lighting in Architecture".- The Kimbell Art Museum as a Case Study for Lightscape, Radiance and 3D-Studio MAX - April 7, 2001

AMORIM, Claudia Naves David. **Desempenho Térmico de edificações e simulação computacional no contexto da arquitetura bioclimática**: Estudo de casos na região de Brasília. Dissertação de mestrado- Faculdade de Arquitetura, Universidade de Brasília, 1998.

_____. Iluminação Natural e Eficiência Energética – **Estratégias de projeto para uma arquitetura sustentável (parte 1)**. In: **Cadernos Eletrônicos da Pós**, Brasília, v.4, nov. 2002. Disponível em: http://www.unb.br/fau/posgraduação/cadernos_eletronicos/edição2002.htm>. Acesso em 20 nov. 2002.

_____. Iluminação Natural e Eficiência Energética – **Sistemas inovadores para a luz natural (parte 2)**. In: **Cadernos Eletrônicos da Pós**, Brasília, v. 4, nov. 2002. Disponível em: http://www.unb.br/fau/posgraduação/cadernos_eletronicos/edição2002.htm>. Acesso em 20 nov. 2002.

ANDER, G., D. "Daylighting Performance and Design". 2ª Ed., John Wiley&Son, Inc. 2003

_____. Notas de sala de aula, FAU-UNB , 2003

AUTOCAD R14, - USER'S GUIDE – Autodesk, 1997

BAKER, N.; FANCHIOTTI, A. ; STEEMERS, Koen. "Daylighting in Architecture": A European Reference Book. Londres: James&James Editors, 1993.

BAKER, N. ; STEEMERS, Koen. "Daylight Design of Buildings". Londres: James&James Editors, 2002.

BEKAERT, Philippe "Hierarchical and Stochastic Algorithms For Radiosity" Tese de doutorado em Informática, KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN, Bélgica 1999

BEKAERT, Philippe et al. "Advanced Global Illumination" Ed. AK Peters, Bélgica, 2003

BELLIA, L., et al., "De-Light: a Software Tool for the Evaluation of Direct Daylighting illuminances Both Indoors and Outdoors-Comparison with Superlite 2.0 and Lumen Micro 7.1." Building and Environment 35 (2000) pag 281 a 295, 2000.

BESUIEVSKY, Sérgio G., "Cálculo da iluminação em Síntese de Imagens através de Ray Tracing Estocástico" Dissertação de mestrado em Física, UNICAMP, 1992

BOSCOLI, Maria B. "Simulações de Edificações: análise da situação atual e busca de uma estrutura para integrar as ferramentas de simulação". Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina/ Dep. de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2003 (Apresentação em Power Point).

BRYAN, Harvey; AUTIF, Sayed M. "Lighting/Daylighting Analysis: a Comparison". 2001 Proceedings of the 27th National Passive Solar Conference, American Solar Energy Society, USA: R. Campbell-Howe editor, June 2002.

CALDAS, Luiza G., NORFORD, Leslie K. – "A Design Optimization Tool Based on a Genetic Algorithm". Em "Automation in Construction", nov. 2002 págs 173–184

CARVALHO, A., V., et al. "Síntese de Imagem para Ambientes Virtuais Experiências com a técnica RENDERCACHE" 10º Encontro Português de Computação Gráfica, Lisboa, Portugal, 2001

CASTI, John L. "Mundos Virtuais: Como a Computação Está Mudando as Fronteiras da Ciência". Rio de Janeiro: Ed. Revan, 1998.

CLARO, Anderson, " LUZ SOLAR: Modelo Vetorial Esférico para Radiosidade/Ray-Tracing". UFSC –Depto Arquitetura e Urbanismo. Disponível em http://www.arq.ufsc.br/~ander/pesq_atual.html) acessado em 30/8/2004

COMPAGNON, R. "**RADIANCE: The Simulation Software In Architecture Teaching Context**". In: Florence International Conference for Teachers of Architecture, 2, Firenze. 1997
Disponível em: < <http://radsite.lbl.gov/radiance/papers/rctia97/rct97.htm>>. Acesso em 1 dez. 2003

COSTA, Antonio C. et al. "**Design de Iluminação**". 8º Encontro Português de CG , 1999, PT
Disponível em: <<http://www.dei.isep.ipp.pt/~acc/radiance/epcg98/index.htm>>. Acesso em 2 abr. 2003

CREMONINI, Lorenzo. "**Luce: Luce Naturale, Luce Artificiale**". Firenze: Alinea, 1962
(tradução e adaptação de Cláudia Naves David Amorim).

DE LAET, Suykens, "**On Robust Monte Carlo Algorithms for Multi-pass Global Illumination**" Tese de Doutorado em Informática KATHOLIEKE UNIVERSITEIT LEUVEN, Belgica 2002

DESKTOP Radiance 2.0 Beta – User manual – LBNL. Berkley, USA: Environmental Energy Technologies Division, Building Technologies Department, 2001

Dicionário de Tecnologia / Editado por Lowell Thing. São Paulo: Futura, 2003

Dicionário Eletrônico HOUAISS da Língua Portuguesa. Versão 1.0 , 2001

DONN, Michael. "**Tools for quality control in simulation**" in Building and Environment 36 (2001) pag 673-680, 2001

ERLICH, Charles K. "**Computer Aided Perception: A method to Evaluate the Representation of Glare in Computer Graphics Imagery**". ,2002. Dissertação de Mestrado – University of California, Berkley, USA, 2002.

FILHO, João, G., "**Ergonomia do objeto: Sistema Técnico de Leitura Ergonômica**". Escrituras Editora, São Paulo, 2003

FONTOYNONT, M., "**Perceived Perfomance of Daylighting Systems: Lighting Efficacy and Agreeableness**" em Solar Energy, vol 73 No 2 pag 83-94, 2002.

GOULART, Solange V. G et al. "**Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras**". Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998

HITCHCOCK, Robert J. "**Advancing Lithting and a Daylighting Simulation: The Transition From Analysis to Design Aid Tools**". In: Building Simulation- Seventh International IBPSA Conference, Madison, USA, 1995

HOLANDA, Aurélio B. F. "**Dicionário Aurélio Básico da Língua Portuguesa**". 1ª. ed. Rio de janeiro: Nova Fronteira, 1988.

HOPKINSON, G et al. "**Iluminação Natural**". Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, , 1966.

INANICI, Mehlika N. "**Application of the State-of-the-Art Computer Simulation and Visualization in Architectural Lighting Research**". In: Building Simulation- Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brasil, ago 2001

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **IEA, Daylight In Buildings : A Source Book On Daylighting Systems And Components: A Report Of Iea Task 21/ Ecbcs** , Annex 29, jul. 2000.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. "**Validation Of Daylighting Computer Programs. A Report of IEA SHC Task 21 / Annex 29**", nov. 1999

JOHNSEN, Kjeld. "**Daylight in Buildings, Collaborative Research in the International Energy Agency (IEA Task 21)**". In: Renewable Energy 15, pag 142-150, 1998

KHODOLEV, Andrei . "**Comparison of two Methods of Global Illumination Analysis**". 1996. Instuto Keldysh da Academia Russa de Ciências. Disponível em: <<http://www.keldysh.ru/pages/cgraph/articles/cmgia/index.htm>>. Acesso em 2 abr. 2003.

- _____.; KOPYLOV, E. "**Physically Accurate Lighting Simulation in Computer Graphics Software**". In: International Conference on Computer Graphics and Visualization, 6, St. Petersburg, 1996. Disponível em: <<http://rmp.kiam.ru/articles/pals>>. Acesso em 2 abr. 2003.
- LAMBERTS, Roberto et al. "**Eficiência Energética na Arquitetura**". São Paulo: PW, 1997
- _____, "**Building simulation in Brasil**" em IBPSA, agosto de 2001
- LESLIE, R. P. "**Capturing the daylight dividend in buildings: why and how?**". In: Building and Environment, , v. 38, p. 381-385, USA, 2002.
- LIGHTSCAPE ver 3.2 – User's Guide.
- MADALJEVIC, John. "**Daylight Simulation: Validation, Sky Models and daylight Coefficients**". Tese de Doutorado – Institute of Energy and Sustainable Development de Montfort university Leicester, UK, 1999
- _____. "**The Application, Validation and Further Development of Radiance: Some UK Activities**". In: Building Simulation- Seventh International IBPSA Conference, Madison, USA, ago 1995
- MAHDAVI, A et al, "**An Inquiry Into The Building Performance Simulation Usage By Architects In Austria.**" Publicado em *Eighth International IBPSA Conference* Eindhoven, Netherlands August 11-14, 2003
- MCHUGH, J., "**Daylighting Design Via Monte Carlo**". Dissertação de Mestrado em Engenharia na Colorado University, Colorado USA, 1995
- NG, Edward., "**A Study on the Accuracy of Daylighting Simulation of Heavily Obstructed Buildings in Hong Kong**". In: Building Simulation- Seventh International IBPSA Conference, Rio de Janeiro, Brasil, ago 2001
- PAPST, Ana L., PEREIRA, Fernando R., LAMBERTS, Roberto "**Uso de Simulação Computacional para Análise de Iluminação Natural**" ENTAC (VII ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO) Abril De 1998 – Florianópolis - SC
- PHILLIPE et al. "**Cornell Cube Experiment**", 1996 Disponível em <http://www.cs.kuleuven.ac.be/cwis/research/graphics/CORNELLCUBE/cube.shtml> acessado em 31/08/2004
- RASMUSSEN, Steen Eiler. "**Arquitetura Vivenciada**". 2. ed. São Paulo: M Fontes, 1998. 246 p
- ROBBINS, Claude L. **Daylighting Design and Analysis**. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1986.
- ROBBINS, E., "**Why architects draw**". The MTI press Londres, Inglaterra, 1997
- ROY, Geoffrey G. "**A Comparative Study of Lighting Simulation Packages Suitable for Use in Architectural Design**". [S.L.]: Murdoch University, Austrália, 2000. Disponível em: <<http://www.eng.murdoch.edu.au/FTPsite/daylighting.html>>. Acesso em 2 abr 2003.
- SCARAZZATO, P. "**Dia Luminoso Típico: Conceituação e Aplicação**". In: III ENCONTRO NACIONAL E I ENCONTRO LATINO AMERICANO DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO. Proceedings. pp. 517-520. Gramado, RS, Julho 1995.
- SERRA, R., "**Chapter 6 – Daylighting**" em Renewable and Sustainable Energy Reviews 2 pag 115-155, 1998
- SERRA, F. R.; COCH, Roura. "**Arquitectura y Energia Natural**". Barcelona: UPC, 1995.
- SCHMID, Aloísio, L., "**Simulação da Luz Natural: Combinação dos Algoritmos de Raytracing e Radiosidade e Aplicações na Arquitetura**" em VI Encontro Nacional e III Encontro Latino-americano sobre Conforto no Ambiente Construído. São Pedro, 2001.
- TSANGRASSOULIS, Aris SANTAMOURIS, Mat "**Daylight Modelling With Passport-Light**" BPSA 1997

UBBELOHDE, Susan M.; HUMANN, Christian. ACEE- Summer Study on Energy Efficiency in Buildings: **"Comparative Evaluation of four Daylighting software Programs"**. Berkeley. Berkeley: American Council for an Energy-Efficient Economy; University of California, 1998.

VIANNA, Nelson S. & Gonçalves, Joana C., S., **"Iluminação e Arquitetura"**, Geros s/c Ltda, São Paulo, SP, 2004

WAGNER, P. R., et al., **"Um Novo Paradigma Para Modelagem e Simulação Interativa Visual"**. Anais do IX SIBGRAPI, págs. 87 a 94, 1996)

WARD, Gregory L. **"The Radiance Lighting Simulation and Rendering System"** - Computer Graphics . In: 94 SIGGRAPH CONFERENCE. Proceedings , p.459-472, 1994.

_____ **"Making Global Illumination User-friendly"**. Lawrence Berkley laboratory, Berkley, USA, 1995

_____ **"A Ray tracing Solution for Diffuse Interreflection"**. Em Computer Graphics, Volume 22, numero 4, agosto de 1988.

_____ **"High Dynamic Range Image Encodings"** (Anywhere Software)

http://www.anywhere.com/gward/hdrenc/hdr_encodings.html

acessado em 20/07/2004

WARD et al, **"A Visibility Matching Tone Reproduction Operator for High Dynamic Range Scenes"**. Paper produzido pela LBNL em 1997

WARD, G. L., SHAKSPEARE, R., **"Rendering with Radiance- The Art and Science of Lighting Visualization."** Morgan Kaufmann Publishers, San Francisco USA, 1998

Fontes de Pesquisa, não citadas:

IEA, **"Daylighting Simulation: Methods, Algorithms, and Resources"**
A Report of IEA SHC Task 21 / ECBCS ANNEX 29 December 1999

EDMONDS, I.R.: **"Performance of Laser Cut Light Deflecting Panels in Daylighting Applications"**, Solar Energy Materials and Solar Cells 29(1), 1993, pp. 1-26.

GREENUP, P.J., Edmonds, I.R, and Compagnon, R.: **"Radiance Algorithm to Simulate Laser-Cut Panel Light-Redirecting Elements"**, Lighting Research and technology 32(2), 2000, pp. 49-54.

GREENUP, P., Bell, J.M, and Moore, I.: **"The Importance of Interior Daylight Distribution in Buildings On Overall Energy Performance"**, Renewable Energy 22(2001), pp. 45-52.

JENSEN, H., W., **"Global Illumination Using Photon Maps"** The Technical University of Denmark

LIMA, Thais B. S. **"Uso da Simulação Computacional em Projetos de Iluminação Interna"**. Ago. 2003 Dissertação de Mestrado. UFBA, 2003

MARDALJEVIC, J.: **"Simulation Of Annual Daylighting Profiles For Internal Illuminance"**, Lighting Research and Technology 32(3), 2000, pp. 111-118.

_____ **"Validation Of A Lighting Simulation Program Under Real Sky Conditions"**, Lighting Research and Technology 27(4), 1995, pp. 181-188. S

MEYER, Jon – **"The Future of Digital Imaging - High Dynamic Range Photography"** Fev 2004. Disponível em <http://www.cybergrain.com/tech/hdr/>

(acessado em junho de 2004)

MOECK, M.: **"On Daylight Quality and Quantity and Its Application to Advanced Daylight Systems"**, Journal of the Illuminating Engineering Society of North America 27(1), 1998, pp. 3-21.

NEWSHAM, Guy R., “**Lighting Quality Evaluations using Images on a High Dynamic Range Display**”. Apresentado em ARCC/EAAE 2002 International Conference on Architectural research. Montreal 2002

REINHART, C.F, and Walkenhorst, O.: “**Validation of Dynamic Radiance-Based Daylight Simulations For a Test Office With External Blinds**”, Energy and Buildings 33(2001), pp. 683-697.

TAPLLN, Paul. **Putting Interactive CAD Systems in Perspective**. In: Buildings Simulation, 1993

Sítios WWW:

<http://rmp.kiam.ru/articles/pals/>

<http://www.iesd.dmu.ac.uk/~jm/validation/>

http://www.iesd.dmu.ac.uk/~jm/sky_models/

<http://radsite.lbl.gov/mgf/compare.html>

<http://radsite.lbl.gov/radiance/refer/IMG/s98c33i1.jpg>

<http://www.graphics.cornell.edu/online/box/compare.html>

<http://hobbes.lbl.gov/>

GLOSSÁRIO

Algoritmo

Conjunto das regras e procedimentos lógicos perfeitamente definidos que levam à solução de um problema em um número finito de etapas.

Altitude Solar

É a distancia angular entre o sol e o horizonte do ponto de vista de um observador.

Artefatos

Na Computação Gráfica diz respeito às perturbações na imagem sintética, geradas pelo algoritmo.

Azimute

Segundo o Dicionário Eletrônico HOUAISS, é o ângulo medido no plano horizontal entre o meridiano do lugar do observador e o plano vertical que contém o ponto observado.

Aplicabilidade

A facilidade na qual o usuário pode aprender a operar, preparar entrada de dados e interpretar as saídas de um programa computacional.

CAD - computer aided design.

O uso de computadores para projetar produtos. O software CAD é utilizado para projetos genéricos ou especializado, tais como arquitetura, engenharia elétrica e mecânica.

Câmera Sintética

(ver “cena”)

Cena

Em computação gráfica, “Cena” diz respeito a um conjunto de elementos tais como: a geometria do modelo, os atributos dos materiais, as fontes de luz e os parâmetros de câmera sintética.

É um conjunto de dados composto de:

1. Geometria: define a forma dos objetos a serem renderizados;
2. Atributos: define as propriedades dos materiais, dos quais os objetos são formados, tais como cor, propriedades reflexivas e refrativas;
3. Luz: define as fontes de luz do modelo, a intensidade, distribuição espacial da iluminação;
4. Câmera Sintética: parâmetro de visualização que decide qual fragmento do modelo renderizado aparecerá na imagem.

Color bleeding

(ver “inter-reflexão difusa”)

Discretização

Segundo o Dicionário Eletrônico HOUAISS: constituído por unidades distintas (diz-se de uma grandeza); descontínuo. Sujeito a variações descontínuas; capaz de assumir exclusivamente valores inteiros (diz-se de valor). Diz respeito ao ato de transformar uma grandeza analógica em digital.

Flat shaded

Representação que utiliza as superfícies limites dos sólidos para descrever os seus contornos.

Eficiência Luminosa

Ou Eficácia Luminosa é a relação entre o fluxo luminoso em lúmen emitido por uma fonte e seu fluxo energético (potência) consumido para produzi-lo. É também conhecido como rendimento. As lâmpadas incandescentes, por exemplo, apresentam uma eficácia luminosa de 5 a 30 lm/W, as fluorescentes de 20 a 100 lm/W, e a luz natural (média sol/céu) 115 lm/W. (VIANNA, 2001).

Equação do Rendering

$$I_r(x, y, z) = \int_{t=-\infty}^{\infty} \int_{\lambda=400}^{700} \int_{\varphi=0}^{\pi/2} \int_{\theta=0}^{\pi} L(t, x, y, z, \varphi, \theta, \lambda) R(t, \varphi, \theta, \lambda) d\theta d\varphi d\lambda dt$$

onde:

x, y, z = as coordenadas do ponto na superfície

t = tempo

λ = comprimento de onda

φ = azimute (ângulo do eixo Z)

Θ = ângulo do eixo Z

Esta é a equação do rendering proposta por J. Kajiya. The Rendering Equation. Proc. of SIGGRAPH '86 (Dallas, TX, Aug. 18-22). *Computer Graphics*, 20(4):143-150, Ago. 1986

Front-end:

Aplicativo que atua na interface do usuário com o software.

Glare

(ver "ofuscamento")

Hardware

Segundo o Dicionário Eletrônico HOUAISS: conjunto dos componentes físicos (material eletrônico, placas, monitor, equipamentos periféricos etc.) de um computador.

HDR

High Dynamic Range – diz respeito à imagem com altíssima faixa de densidade dinâmica. A faixa dinâmica de uma cena é a proporção entre o contraste da área mais brilhante e a mais escura.

Uma imagem HDR com alta faixa dinâmica é aquela que tem uma faixa dinâmica maior que pode ser exibida em um monitor de vídeo ou que possa ser capturada por uma câmera fotográfica com apenas uma exposição. De fato em

qualquer cena, na qual as fontes de luz podem ser vistas diretamente é uma imagem HDR.

Iluminância

É o total de luz visível iluminando um ponto na superfície.

A unidade padrão da Iluminância é:

Lúmens por metro quadrado (lm/m²) também denominada Lux.

Segundo o IES, os valores típicos de Iluminâncias são:

0,25 a 1 lx	Lua cheia
10 lx	Iluminação vias públicas
100-1000 lx	Iluminação em ambiente de trabalho
10000 lx	Iluminação mesa cirúrgica
100000 lx	Sol brilhante

Imagem Sintética

Imagem produzida por procedimentos computacionais a partir de uma cena. Pode-se usar também, imagem renderizada, imagem texturizada.

Input

Informação que é inserida para um software.

Interatividade

Modo de operação no qual cada input do usuário gera uma resposta ou ação do sistema, em contraste aos sistemas em lote.

Interface

É a fronteira compartilhada por dois dispositivos, sistemas ou programas que trocam dados e sinais. Ou o meio pelo qual o usuário interage com um programa ou sistema operacional (p.ex., DOS, Windows).

“Consiste em um conjunto de teclas, botões, comandos de sistema operacional, formatos de exibição gráfica e outros dispositivos fornecidos por um programa para permitir que o usuário se comunique e o utilize”. (Dicionário de Tecnologia, 2003, pagina 432)

Interface Gráfica

“Se notabilizam por seus abundantes recursos técnicos e visuais, no modo de como o programa se apresenta ao usuário – facilitando sobremaneira os trabalhos relativos a editoração eletrônica e à computação gráfica de um modo geral.” (FILHO, 2003)

Inter-reflexão Difusa

A luz que é refletida por uma superfície é atenuada pela refletividade da mesma e associada com a sua cor. Em geral a energia refletida é colorida por uma pequena parcela da cor da superfície da qual foi refletida.

Esta reflexão da energia luminosa em um ambiente produz um fenômeno conhecido por "*color bleeding*". Uma superfície colorida de forma brilhante tornará esta cor presente nas superfícies adjacentes.

Lei de Lambert

Se uma superfície é definida para ser refletora difusa da luz e se esta superfície é atingida por esta, será refletida em todas as direções, dependendo somente do ângulo entre a normal da superfície e o vetor do raio de luz. Esta relação é conhecida como a Lei de Lambert.

Linux

Sistema Operacional criado por LINUS TORVALDS em 1992, totalmente compatível com as definições do sistema UNIX. Estes sistemas operacionais compatíveis também são denominados POSIX.

Lighting Designer

Refere-se aos profissionais que atuam no dimensionamento da iluminação, em geral a artificial, no projeto de arquitetura.

Luminância

Segundo o Dicionário Eletrônico HOJAISS: é o quociente entre a intensidade do fluxo luminoso emitido por uma superfície em uma dada direção e a área dessa superfície projetada ortogonalmente sobre um plano perpendicular àquela direção; brilhância, brilhância fotométrica, brilho.

É a quantidade de luz visível que deixa um ponto de uma superfície em uma dada direção. A sensação luminosa é decorrente desta reflexão, pois os raios luminosos não são visíveis. Como as superfícies do mundo real não são refletoras perfeitas, uma iluminância pode produzir diferentes valores de luminâncias dependendo da capacidade de reflexão da superfície.

A unidade padrão da Luminância é candela por metro quadrado (cd/m^2), nos Estados Unidos é denominada *NITS*.

Segundo o IES os valores típicos de luminâncias são:

1.6 * 10⁹ cd/m^2 Disco Solar ao meio dia
600000 cd/m^2 Disco Solar no horizonte
8000 cd/m^2 Céu claro
2500 cd/m^2 Superfície da Lua
2000 cd/m^2 Céu nublado

Luz direta e indireta

Toda superfície em um dado ambiente está iluminada por uma combinação de luz direta e luz refletida. A luz direta é a energia luminosa que vem diretamente de uma ou mais fontes, atenuadas pelo meio onde trafega. (poluição, fumaça, poeira etc.)

A luz refletida é a energia luminosa que depois de ser emitida por uma ou mais fontes, é refletida de uma ou mais superfícies do ambiente. Esta energia luminosa é atenuada pela refletividade da superfície, já que alguma energia será absorvida pela superfície e alguma outra passará através desta. A refletividade de uma superfície é geralmente definida como a sua cor.

Mainframe.

Termo usado para descrever computadores de grande porte.

Manual do Usuário

Documentação na qual se descreve como usar o software que, em geral, inclui tutoriais.

Material

Atribuído a determinadas entidades do modelo que informa ao software dados referentes à cor, refletância e textura.

Modelo

É a representação de propriedades relevantes de qualquer objeto, mapeado em um meio particular.

Modelagem

Na computação gráfica, refere-se à construção de modelos, em geral, tri-dimensionais.

Objeto 3D

Refere-se às entidades com uma base tridimensional, X,Y,Z criadas em software apropriado.

Ofuscamento

Entre os aspectos mais importantes da qualidade da luz em um ambiente, destacam-se aqueles que dizem respeito ao desconforto por ofuscamento e velamento.

Ofuscamento – quando as luminâncias causam desconforto no campo visual, sem interferir na visão do observador, esta sensação é conhecida por ofuscamento. Geralmente é causado por ofuscamento direto de fontes luminosas ou luminárias que são extremamente brilhantes, mal acondicionadas ou mal dimensionadas para a área. Também pode ser causado por reflexões indiretas em superfícies especulares. Por exemplo, o reflexo da luz do sol em um pára-brisa de automóvel, pode ser extremamente desconfortável.

Não deve ser confundida com o velamento que pode realmente prejudicar o desempenho da visão, e não apenas causar desconforto.

Output

Número ou valor que resulta de um processo.

Plataforma

O hardware e o software que precisam estar presentes para que um programa aplicativo possa funcionar. Segundo o Dicionário Eletrônico HOJAISS:

É o padrão de um processo operacional ou de um computador; a tecnologia fundamental em que se assenta um sistema de computador.

Pixel

É o acrônimo de “*picture element*” representa a menor porção de uma imagem digital que é exibida em uma matriz de pontos retangulares ou quadrados.

POSIX

(Ver “LINUX”, “UNIX”)

Plug-in

Módulo adicionado ao software principal que adiciona capacidades a este.

Radiometria

É a disciplina que estuda a quantificação da energia eletromagnética no espectro ótico infravermelho, visível e ultravioleta.

Rendering

É um processo de representação bidimensional, uma vista específica de um determinado modelo tridimensional.

Representação

Representação e simulação estão intimamente relacionadas. Do ponto de vista computacional, a simulação pode ser interpretada como uma espécie de representação que inclui a descrição de um objeto e algoritmos preditivos que mimetizam o comportamento de certos aspectos daquele objeto.

Simulação

Em geral entende-se o termo “simulação computacional” como referente a *qualquer* algoritmo que mimetiza um processo físico. (HITCHCOCK, 1995)

Sistema Operacional

Software que controla a execução de programas e provê serviços de controle e gerenciamento de dados. Usualmente o sistema operacional é predominantemente software, mas implementações parciais ou completas por hardware são possíveis.

Software.

Programas, procedimentos, regras e qualquer documentação pertinente ao sistema operacional. Complementar ao hardware.

Stand-alone

Termo que classifica um software como autônomo, não dependendo de nenhum outro para funcionar, exceto o sistema operacional.

Tutorial

Material didático que mostra passo a passo como utilizar um determinado software, em geral está acompanhando o manual.

UNIX

Sistema Operacional, multitarefa, multi-usuário desenvolvido nos laboratórios Bell Labs, para criar um ambiente favorável para o desenvolvimento de pesquisas científicas.

(ver LINUX)

User-friendly

Termo consagrado no contexto computacional que atribui a uma interface a qualidade de interatividade com o usuário.

(ver interface)

User's guide

(ver “manual do usuário”)

Usuário

Uma pessoa que usa um sistema computacional com o propósito de troca de informações de dados.

(ver “Interface”)

Validação

Segundo o Dicionário Eletrônico HOAUISS: teste que comprova a validade, a correção ou concordância com padrões etc., de dados introduzidos num sistema de computador. Geralmente determina a correção do resultado final de um programa computacional, comparativamente a um parâmetro do mundo real.

WalkThrough

Termo que designa a ação de caminhar dentro ou através de um espaço arquitetônico, utilizando animação computacional e uma câmera sintética animada que se movimenta ao longo da cena.

Wireframe

É um método rápido de visualização, no qual os objetos são exibidos como se fossem feitos em telas de arame, mostrando todas as suas arestas.

Wizard

É um recurso que o software proporciona através da sua interface com o usuário, para auxiliar de forma muito simples, em geral com apenas uma caixa de diálogo, os inúmeros ajustes a serem feitos para a execução de determinadas tarefas.

ANEXO I

PRINCIPAIS SOFTWARES DE SIMULAÇÃO DA LN

Os principais softwares de simulação da iluminação no projeto de arquitetura e em especial da LN, estão relacionados a seguir:

Software/Plataforma	Desenvolvido por
ADELIN IBM-PC/DOS/WINDOWS	Fraunhofer Institute for Buildings – IBP - Suíça
AGI 32 IBM PC/WINDOWS	LIGHTING ANALYSTIS Inc. EUA
DAYSIM Linux, Mac OSX, Windows	Institute for Research in Construction Canadá
DeLIGHT IBM PC/WINDOWS	Lawrence Berkeley Laboratory California EUA
DESKTOP RADIANCE IBM PC/WINDOWS	GREG WARD no Lawrence Berkeley Laboratory California EUA e
ECOTECT IBM PC/WINDOWS	SQUARE ONE <i>research</i> PTY LTD - AUS
GENELUX-WEB WEB	Département Génie Civil et Bâtiment, França
HELIOS 32 IBM PC/WINDOWS	Heart Consultants Limited EUA
INSPIRER IBM PC/WINDOWS	INTEGRA Japão
LESO-DIAL IBM PC/WINDOWS	École Polytechnique Federale Lausanne EPFL - Suíça
LIGHTSCAPE IBM PC/WINDOWS	DISCREET – AUTODESK EUA
LIGHTSKETCH IBM PC/WINDOWS	University of California Energy Institute EUA
LIGHTSTUDIO IBM PC/WINDOWS	Die Lichtplaner Alemanha
LUMEM MICRO IBM PC	Lighting Technologies Inc. Colorado EUA
POV-RAY Linux, Mac OSX, Windows	Persistence of Vision Raytracer Pty. Ltd EUA
RADIANCE Linux, Mac OSX, SGI	GREG WARD no Lawrence Berkeley Laboratory California EUA e ...
RAYFRONT Linux, Mac OSX, Windows	ALWARE – Alemanha
RAYSHADE Linux, Mac OSX, DOS, AMIGA	STANFORD UNIVERSITY EUA
RENDERPARK Linux	Computer Graphics Research Group Katholieke Universiteit Leuven Belgica
RELUX IBM PC/WINDOWS	INFORMATIK AG Alemanha
SKYVISION IBM PC/WINDOWS	Institute for Research in Construction Canadá
SUPERLITE Mainframes, IBM-PC/DOS	Lawrence Berkeley Laboratory California EUA
VIRTUAL LIGHTING SIMULATOR WEB	Lawrence Berkeley Laboratory California EUA

Tabela 08 – Listagem dos principais softwares de simulação

Entre os principais softwares de simulação, além dos que foram examinados no presente trabalho, pode-se destacar o ADELIN, ECOTECT, LIGHTSKETCH, LIGHTSTUDIO e o RENDERPARK. Todos têm aplicação no projeto de

arquitetura, com exceção do último que se propõe basicamente a estudar os algoritmos de predição da LN.

O ADELINÉ é um software extremamente eficiente e completo, pois aborda as principais necessidades do projeto arquitetônico. Além de utilizar o RADIANCE SIS como algoritmo de predição da LN, faz predições térmicas, aborda aspectos climáticos, fotométricos, óticos do espaço arquitetônico e dispõe de modelador de geometrias engastado. Na versão 3 gira em ambiente Windows 95/NT além da versão DOS

O ECOTECH versão 5 é um software de simulação com uma interface que busca a integração dos processos de projeção relacionados ao arquiteto, além de ser bastante amigável. Caracteriza-se por um modelador de geometrias 3D simples que trabalha a relação integrada dos aspectos envolvidos no projeto de arquitetura, buscando uma análise climática detalhada, avaliando o impacto potencial da radiação solar, a luz disponível e o nível de ventilação. Gira em ambiente Windows NT/2000/XP.

LIGHSKETCH é uma ferramenta inovadora que trabalha com a noção do “croquis” do arquiteto, interpretando por meio de símbolos gráficos as linhas desenhadas através do apontador “mouse” e transformado-as simultaneamente em modelos geométricos tri-dimensionais para a visualização. Esta ferramenta propõe a análise da iluminação através do algoritmo do RADIANCE SIS e trata da busca em ampliar a prática da projeção arquitetônica integrada a avaliação da LN.

O LIGHTSTUDIO é um programa *front-end* que integra o motor de cálculo do algoritmo do RADIANCE SIS ao 3DS MAX versão 6 e 7, através de um *plug-in* adicionando o *rendering* fisicamente fundamentado ao software mais conhecido na área da animação e modelagem.

Quando se trata de avaliação dos algoritmos atualmente disponíveis, deve-se levar em conta a ferramenta RENDERPARK que oferece em uma mesma interface todas as vertentes algorítmicas na predição da LN. Entre os diversos enfoques disponíveis, podem-se citar os algoritmos que buscam adicionar o método Monte Carlo ao algoritmo Radiosity, e aqueles que buscam integrar um método baseado na imagem para o mesmo.

ANEXO II

PRINCIPAIS ALGORITMOS

O algoritmo Ray Tracing e o Radiosity estão entre os mais conhecidos modelos de Iluminação Global. Entretanto, na sua implementação básica, respondem somente a apenas um aspecto da Iluminação Global. O método Ray Tracing atende perfeitamente a reflexão especular, superfícies refletoras como o espelho. Já o Radiosity, por outro lado, trata da interação na qual a luz é refletida por superfícies difusas para iluminar outras superfícies. (WATT, 2000)

A interação difusa é muito comum nos espaços arquitetônicos que têm muitos materiais como tapetes no piso e pinturas foscas nas paredes.

Mutuamente exclusivos estes métodos tendem a criar uma assinatura de identificação nas imagens. Reflexões recursivas perfeitas e extremamente precisa na refração é a marca do Ray Tracing. Por outro lado, as imagens geradas pelo método Radiosity exibem luzes suaves e não contêm objetos brilhantes. (WATT, 2000)

Para a predição da LN, o método mais importante é o Ray Tracing Distribuído, evolução do conhecido *Path Ray Tracing*, através da implementação de técnicas Monte Carlo. Sua principal vantagem sobre outros métodos é a precisão e a rapidez com que este enfoque trata as geometrias complexas. Pode-se destacar também, o método conhecido como *bi-directional* Ray Tracing, ou Ray Tracing de duas passadas, que incorpora fenômenos conhecidos como “caustics” no seu algoritmo.

II.1 Comparativos entre os algoritmos

Para demonstrar as características dos algoritmos citados neste trabalho apresentamos um experimento realizado no departamento de Ciência da Computação da Faculdade de Engenharia da Katholieke Universiteit Leuven, Bélgica, utilizando o software RENDERPARK.

II.3.1 Descrição

Foi feita uma réplica do modelo físico conhecido como “CORNELL BOX¹” e fotografado por uma vídeo-câmera. As outras imagens foram geradas a partir de um modelo 3D, com a mesma definição do ponto de vista, com a descrição completa do modelo físico, isto é, com as mesmas propriedades geométricas e

¹ Este modelo desenvolvido pela CORNELL UNIVERSITY, EUA com a intenção de avaliar os algoritmos fisicamente fundamentados e a pesquisa denomina-se “CORNELL BOX COMPARISON”

ópticas do modelo físico. Cada uma dessas imagens foi sintetizada a partir de diferentes enfoques algorítmicos.

A figura apresentada a seguir tem 4 imagens, uma delas é a fotografia do modelo físico.

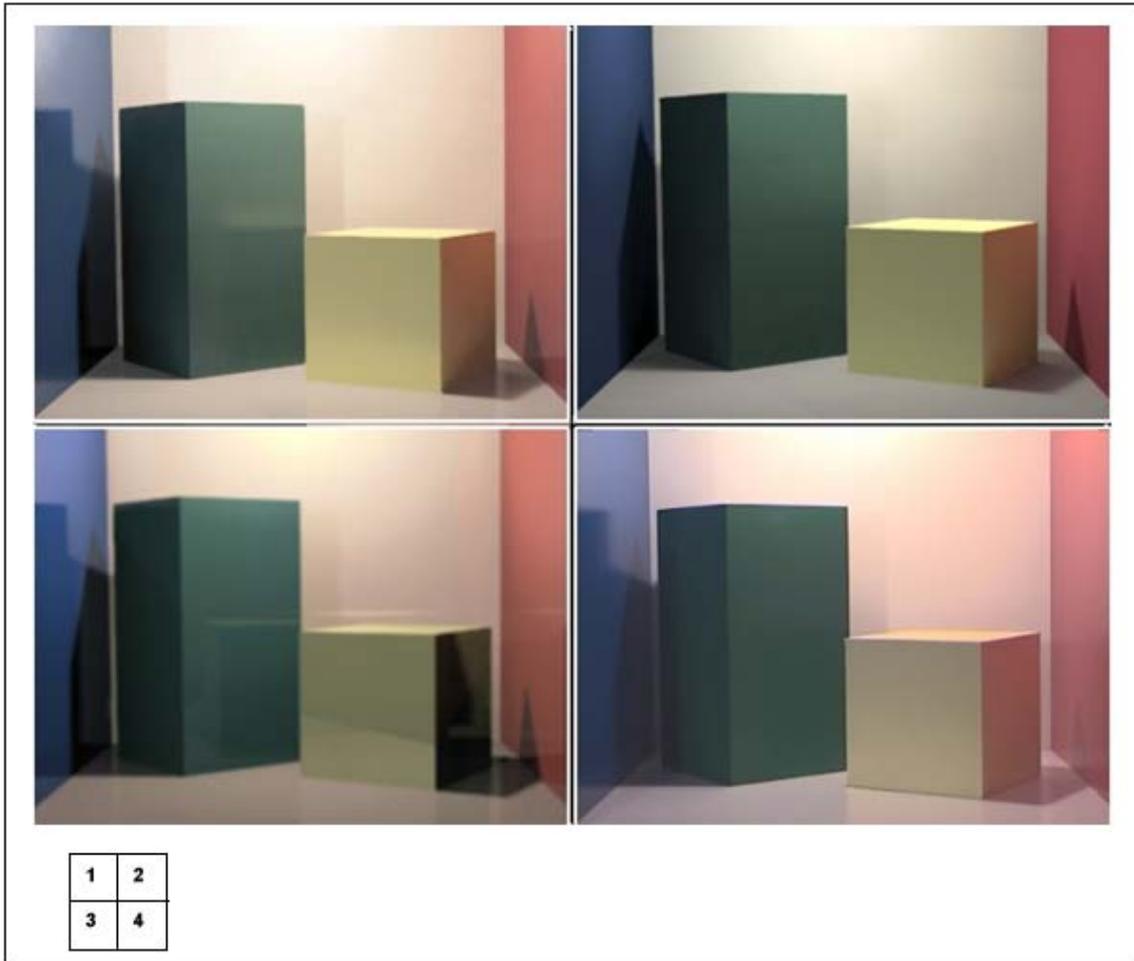


Figura 21 – Imagens do CORNELL BOX produzidas por diversas técnicas

II.3.1.1 Comparativo: Imagem 1 e imagem 4

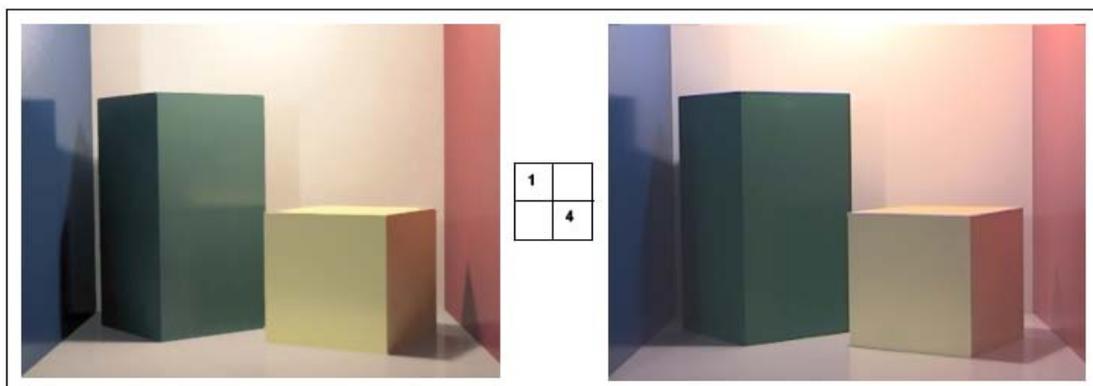


Figura 22 – Imagem1, comparada com imagem 4 (vídeo-câmera)

A imagem número 1 foi gerada utilizando uma técnica conhecida por “técnica de duas passadas”: a iluminação difusa (view-independent) foi computada utilizando o algoritmo Radiosity. A iluminação não-difusa, a qual é dependente do ponto de vista do observador (view-dependent) foi adicionada posteriormente utilizando o algoritmo Ray Tracing Monte Carlo.

Poder-se-ia melhorar o resultado das superfícies com acabamento em pintura, utilizando propriedades de reflexão da luz através de descrição ótica mais exata. A reflexão do material amarelo no cubo verde é exageradamente marcada em relação ao modelo físico.

II.3.1.2 Comparativo: Imagem 2 e imagem 4

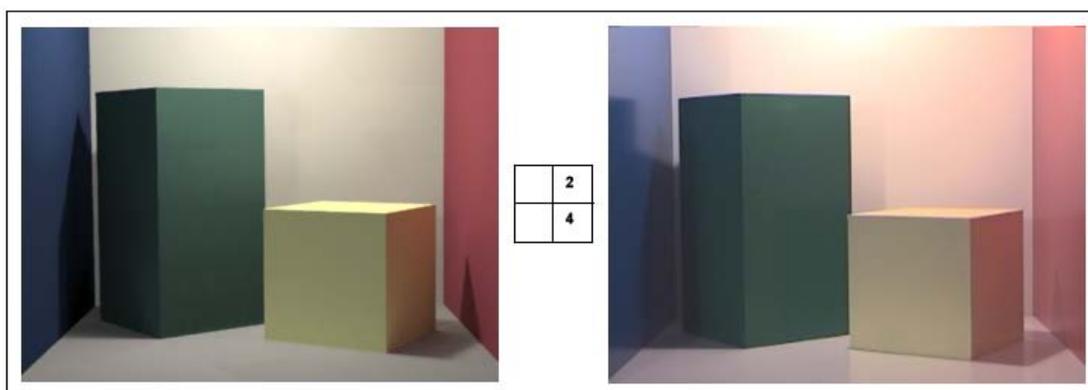


Figura 23 – Imagem 2, comparada com imagem 4 (vídeo-câmera)

A imagem 2 foi gerada pelo método Radiosity, que computa somente as superfícies difusas da cena, como o efeito de “color bleeding” no cubo amarelo devido a proximidade da parede vermelha. As interações não-difusas estão ausentes, as reflexões especulares nas paredes e no piso do modelo físico, não foram representadas pelo método Radiosity.

Apesar das reflexões especulares que faltaram, o método Radiosity é importante, pois uma vez que a iluminação for computada, pode-se rapidamente gerar novas imagens a partir de novos pontos de vista, ou câmeras sintéticas.

II.3.1.3 Comparativo: Imagem 3 e imagem 4

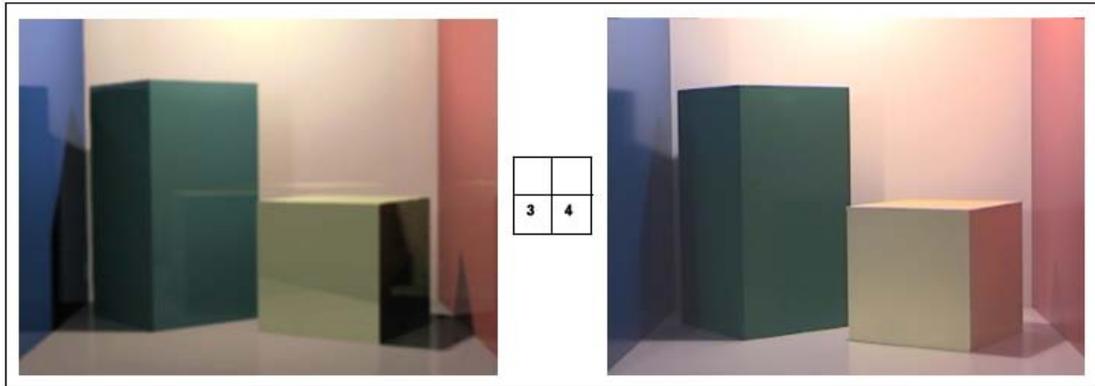


Figura 24 – Imagem 3, comparada com imagem 4 (vídeo-câmera)

A imagem 3 foi gerada utilizando o método Ray Tracing, que foi o primeiro método de *rendering* a permitir computar reflexões e refrações perfeitas. Entretanto, nesta implementação básica, as reflexões estão exageradamente definidas, que no modelo físico são mais suaves. Outra consideração importante é a falta do efeito de brilho vermelho no lado direito do cubo amarelo, próximo à parede vermelha.

Estas inter-reflexões difusas da luz não podem ser calculadas pelo Ray Tracing clássico.

ANEXO III
AS SIMULAÇÕES REALIZADAS

As simulações, realizadas de acordo com o planejamento, geraram 144 imagens sintéticas do espaço-padrão.

A seguir exibem-se as imagens sintéticas do dia típico do solstício de verão e inverno e do equinócio da primavera, às 9 horas. Os conteúdos completos das simulações estão contidos no CD-ROM anexo.

III.1 Dia típico do solstício de Inverno.

No dia típico de inverno 22 de junho, de acordo com os dados climáticos, o céu em Brasília tem um céu claro e o ângulo de altitude solar baixo, com valores de luminâncias no plano horizontal que variam de 62.100 lux às 9 horas e 15 horas e 96.000 lux às 12 horas.

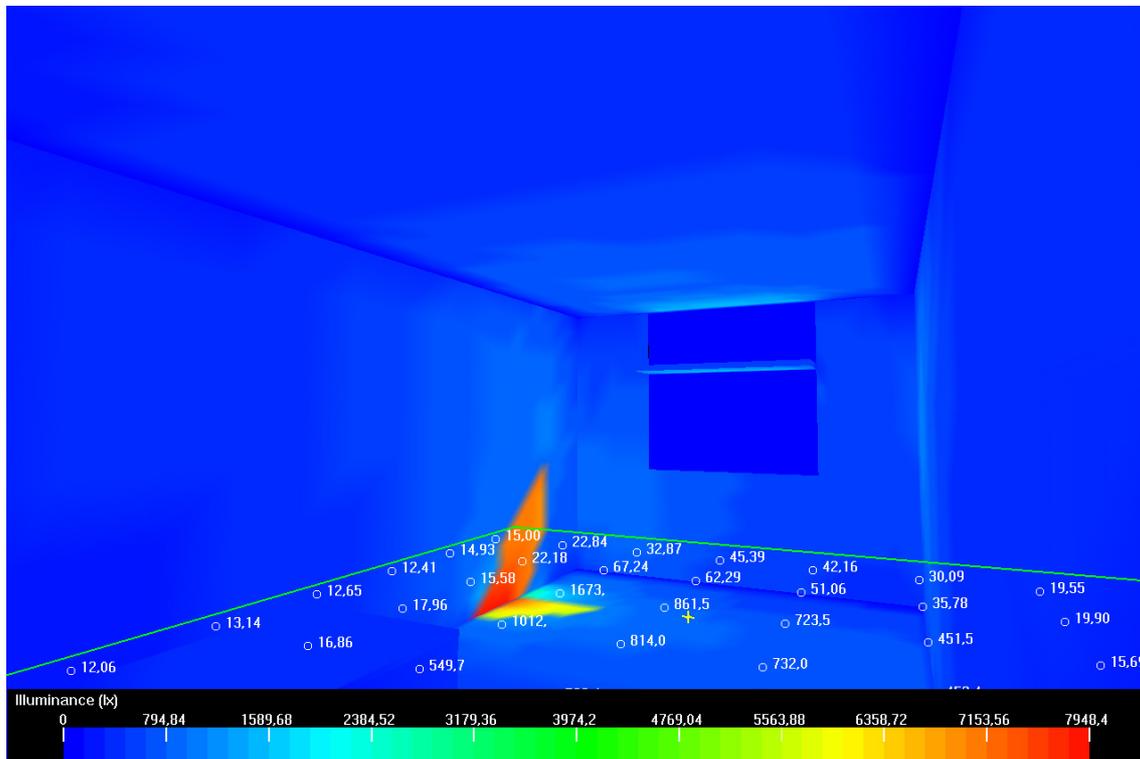


Figura 25 – LIGHTSCAPE dia típico de Inverno: 9 horas.

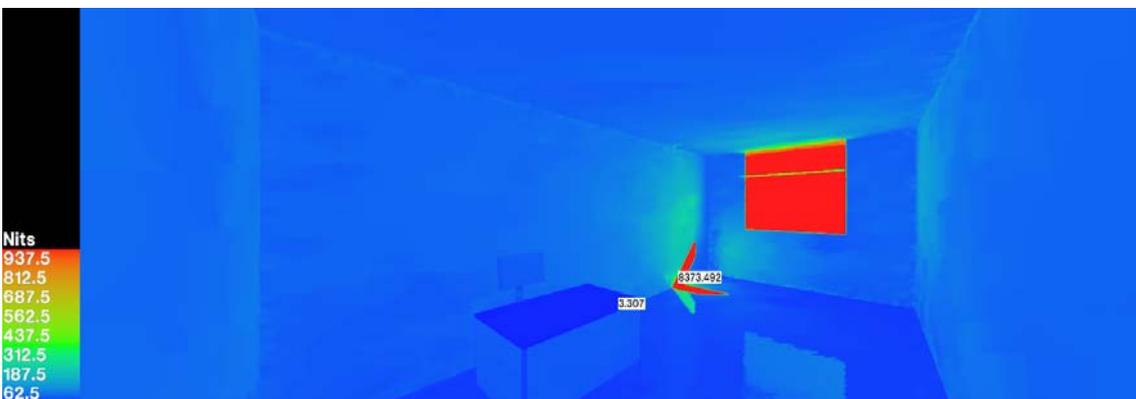


Figura 26 – DESKTOP RADIANCE, dia típico de Inverno: 9 horas.

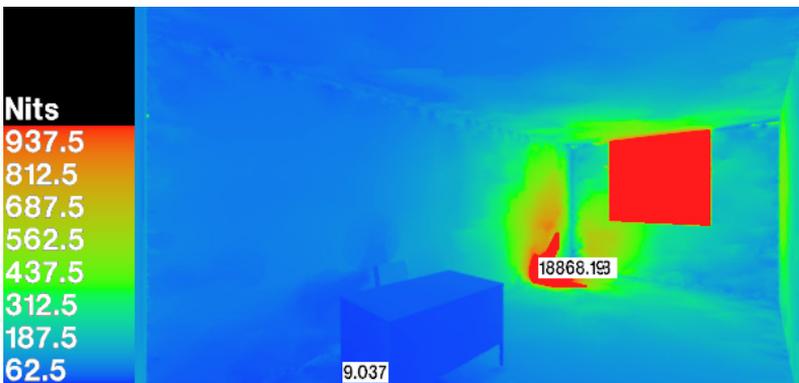
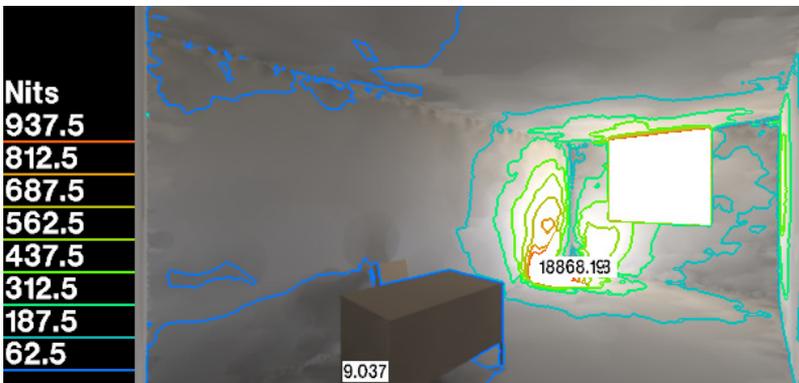


Figura 27 – RAYFRONT, dia típico de Inverno: 9 horas.

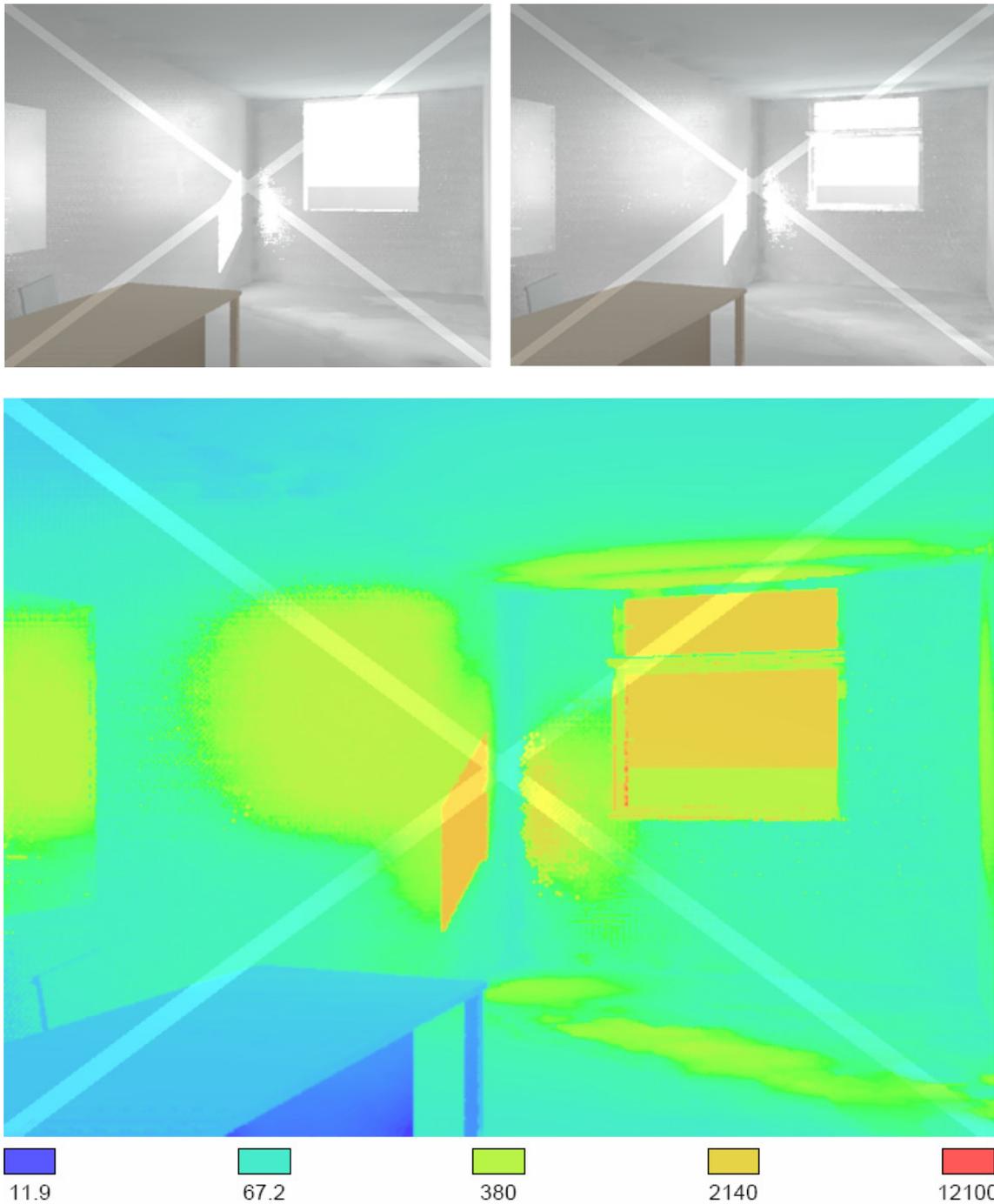


Figura 28 – RELUX, dia típico de Inverno: 9 horas.

III.2 Dia típico do equinócio de Primavera.

No dia típico de primavera, de acordo com os dados climáticos, o céu em Brasília tem um céu parcialmente nublado e o ângulo de altitude solar médio, com valores de luminâncias no plano horizontal que variam de 60.000 lux às 9 horas e 15 horas e 100.600 lux às 12 horas.

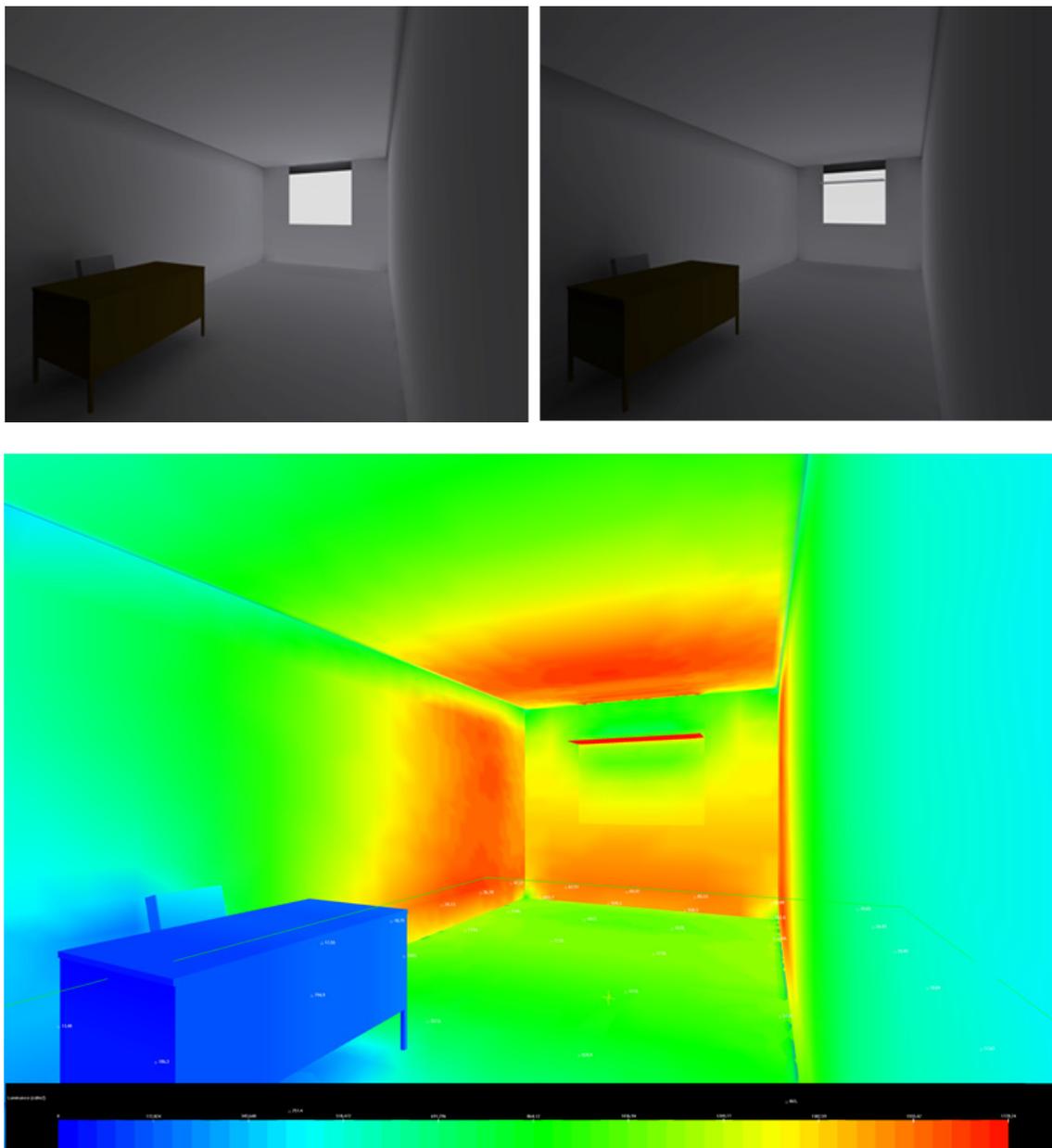


Figura 29 – LIGHTSCAPE, dia típico de Primavera: 9 horas.

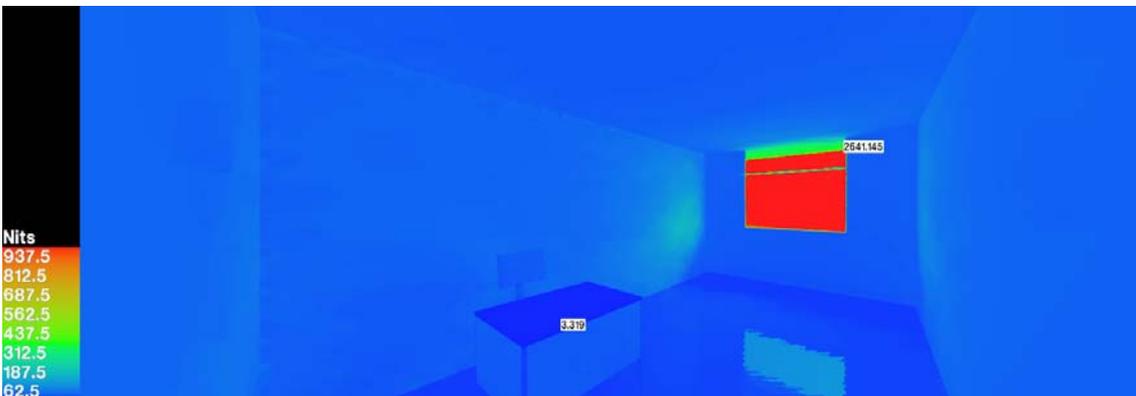


Figura 30 – DESKTOP RADIANCE, dia típico de Primavera: 9 horas.

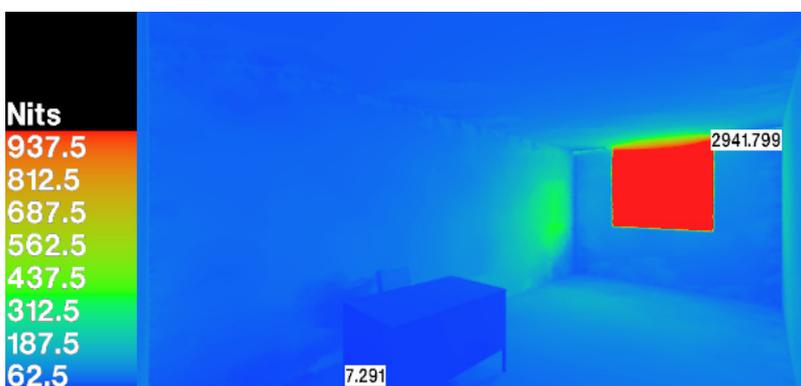


Figura 31 – RAYFRONT, dia típico de Primavera: 9 horas.

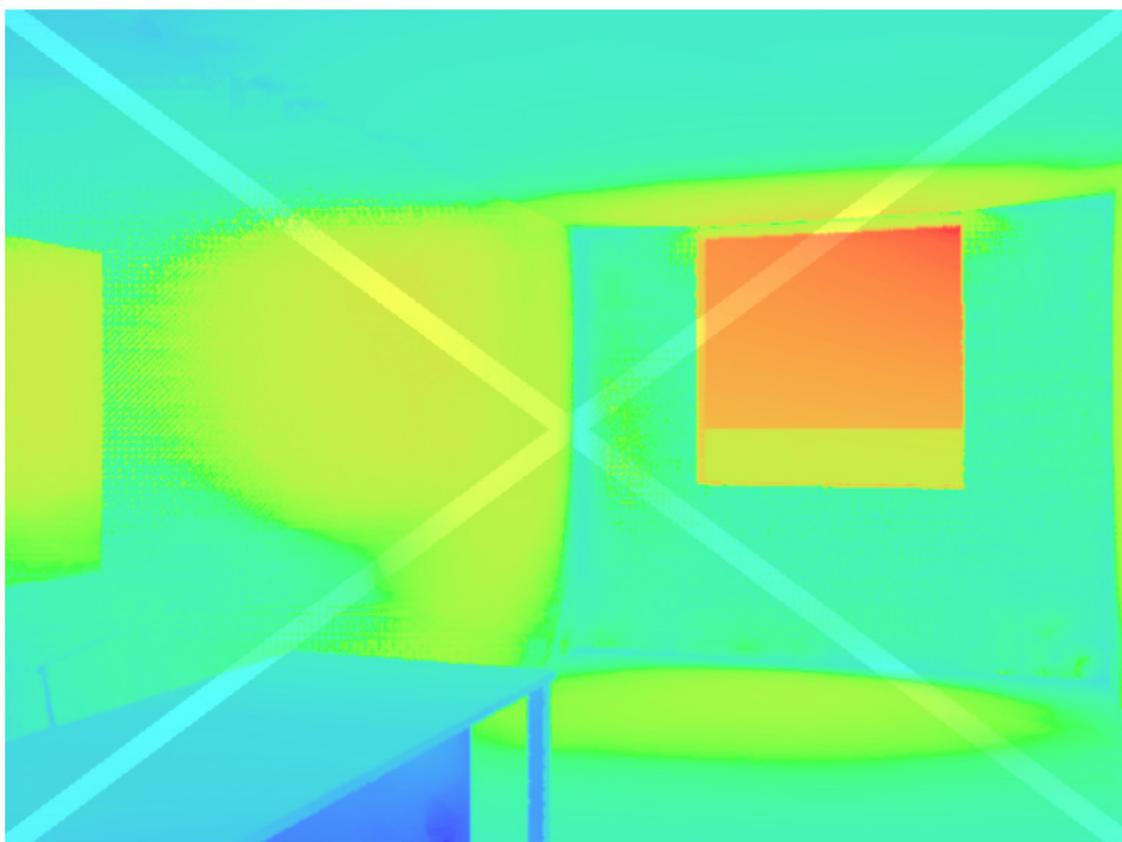
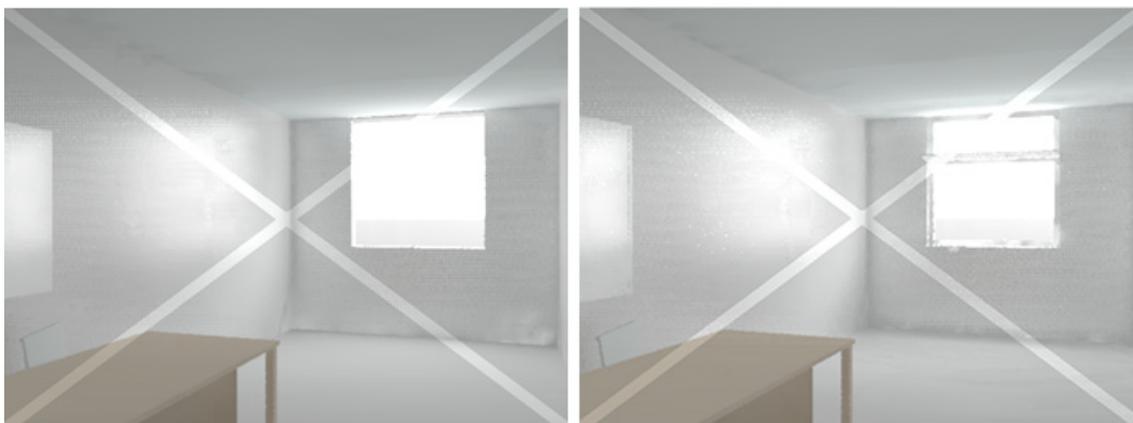


Figura 32 – RELUX, dia típico de Primavera: 9 horas.

III.3 Dia típico do solstício de Verão

No dia típico de verão, de acordo com os dados climáticos, o céu em Brasília tem um céu parcialmente nublado e o ângulo de altitude solar alto, com valores de luminâncias no plano horizontal que variam de 15.100 lux às 9 horas e 15 horas e 20.600 lux às 12 horas.

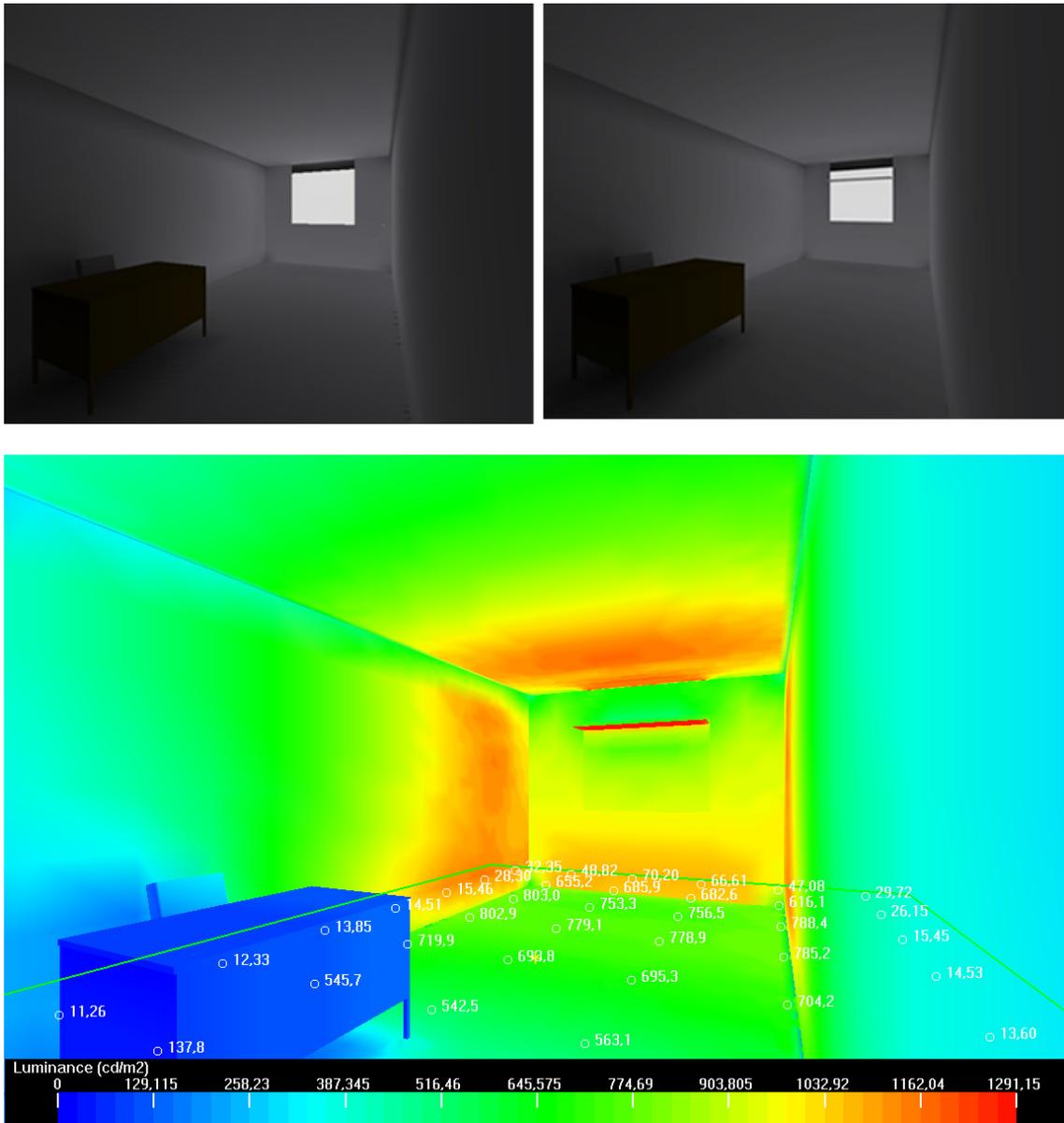


Figura 33 – LIGHTSCAPE, dia típico de Verão: 9 horas.

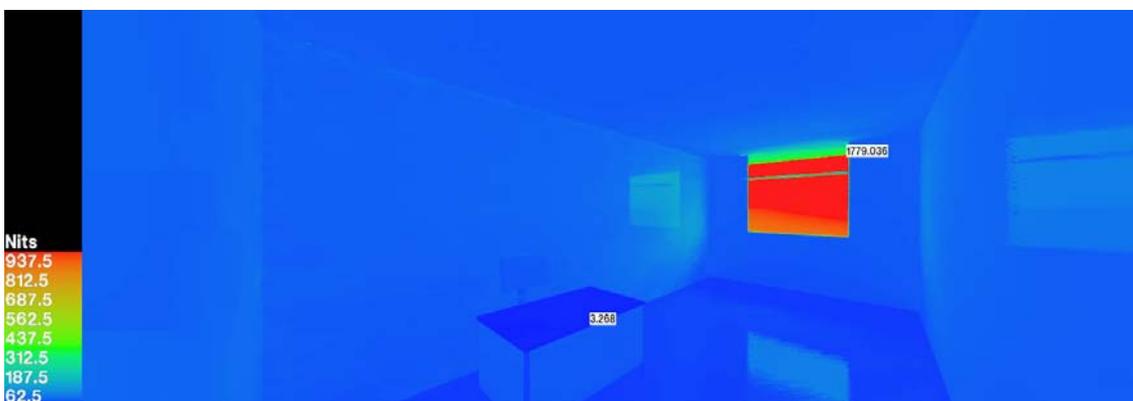


Figura 34 – DESKTOP RADIANCE, dia típico de Verão: 9 horas.

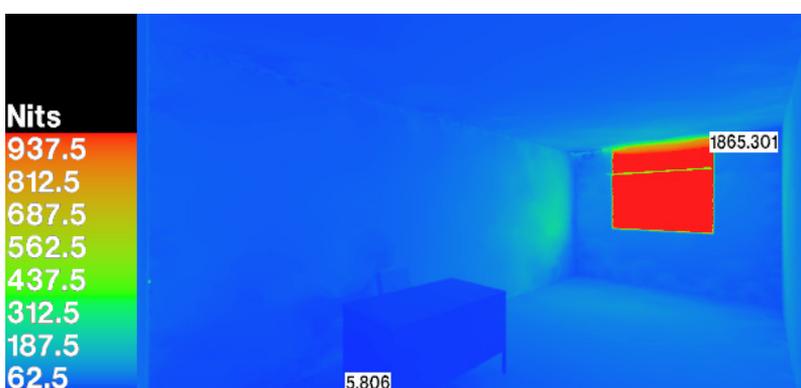


Figura 35 – RAYFRONT, dia típico de Verão: 9 horas.

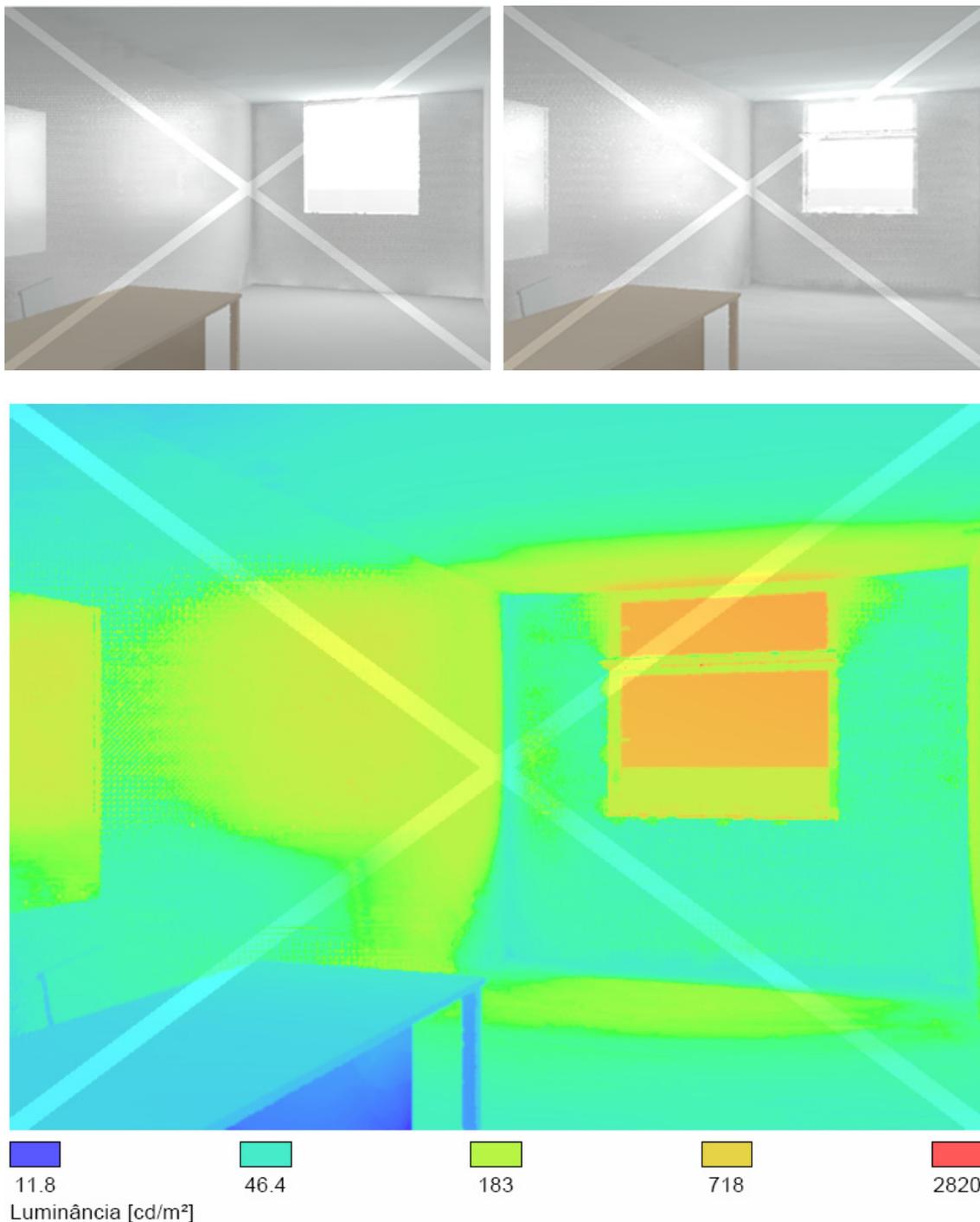


Figura 36 – RELUX, dia típico de Verão: 9 horas.

Todos os dados referentes às simulações, inclusive a análise quantitativa disponibilizadas pelos softwares, estão incluídos no CD-ROM, na pasta *.../dados_simul*. Além destes dados, o CD-ROM inclui os arquivos PDF da dissertação, e a versão DEMO dos softwares DESKTOP RADIANCE, RAYFRONT e RELUX VISION.

A seguir apresenta-se a tabela que contém a avaliação dos softwares de simulação de acordo com os critérios estabelecidos.

1-Geometria (peso 1)	LS	DR	RF	RL
Modelagem própria Sim () Não ()	☹	☺	☹	☺
Importação da geometria Sim () Não ()	☺	☺	☺	☹
Formatos 3DS () DXF () outros ()	☺	☹	☹	NA
Suporta geometrias complexas Sim () Não ()	☺	☺	☺	☺
2-Interface (peso 2)				
Interface gráfica em português Sim () Não ()	☹	☹	☹	☺
Adequado a todas as fases do projeto Sim () Não ()	☹	☹	☹	☺
Adequado às diversas fases do projeto? Quais? Estudo. Prelim () Aprojeto () Exec ()	☹	NA	NA	☺
Compatível com a natureza do processo de projeção Sim () Não ()	☺	☺	☹	☺
Câmeras sintéticas criadas por Interface. Gráfica () Coordenadas 3D ()	☺	☺	☹	☺
Câmeras são gravadas e retomadas por meio de Interface. Gráfica () Coordenadas 3D ()	☺	☺	☺	☺
Câmera sintética criada por processo intuitivo Sim () Não ()	☺	☹	☹	☺
Os materiais são estabelecidos através paletas gráficas () apenas textuais ()	☺	☺	☹	☺
Parâmetros da LN de Brasília Banco Dados próprio () Entrada Direta ()	☹	☹	☺	☹
Set-up de rendering auxiliado por meio de Wizard ()	☺	☹	☹	☺
Indicação de evolução do processamento Sim () Não ()	☺	☹	☹	☺
Barras de Progresso: Tempo restante e Percentual executado	☹	NA	NA	☺
Análise dos resultados com Módulo interno Sim () Não ()	☺	☹	☹	☺
Contempla as saídas na mesma interface Sim () Não ()	☺	☹	☹	☺
Tempo despendido para aprendizagem ou dificuldade para: Baixa () Médio () Alta ()	☹	☹	☹	☺
Imprime os resultados na própria Interface Sim () Não ()	☺	NA	NA	☺
Categoria <i>Stand-Alone</i> Sim () Não ()	☺	☹	☺	☺
3-Output (peso 1)				
HDR Sim () Não ()	☹	☺	☺	☹
Simula a visão Humana Sim () Não ()	NA	☺	☺	NA

Dados Fotométricos das Luminâncias e Iluminâncias através de FalseColor () IsoContorno ()				
Avalia Ofuscamentos Sim () Não ()				
Pontos na Imagem para valores de luminâncias e iluminâncias Sim () Não ()				
Valores máximos, mínimos, Médios Sim () Não ()				
Zona de Trabalho Sim () Não ()				
Calculo de FLD Sim () Não ()				
Grade com valores Sim () Não ()				
Animação engastada Sim () Não ()				
VRML Sim () Não ()				
Calculo de Eficiência Energética Anual Sim () Não ()				
4- Parâmetros da LN (peso 1)				
Modelos de Céu CIE Sim () Não ()				
Modelos de Céu do sítio Sim () Não ()				
Dados geográficos Norte () lat/longitude () Alt/Azimute () C. Sol ()				
5- Materiais (peso 1)				
Possui biblioteca própria Sim () Não ()				
Podem-se criar novos materiais Sim () Não ()				
6- Processamento (peso 1)				
Computação Paralela (distribuída) Sim () Não ()				
Eficiência em apresentar resultados Alta () Média () Baixa ()				
7- Validação (peso 1)				
Validado Sim () Não ()				
8 - Suporte (peso 1)				
Tutoriais Sim () Não ()				
Lista de Discussão ou Fórum Sim () Não ()				
TOTAL GERAL				
	60	23	17	78

Tabela 09 – Quadro completo da avaliação dos softwares de simulação.

ANEXO IV
TUTORIAIS

Os tutoriais para o DESKTOP RADIANCE e RAYFRONT foram desenvolvidos inicialmente, para serem utilizados através da Interface WWW do MOODLE, plataforma didática para ensino à distancia, na Internet. Pretende-se substituir os tutoriais em papel, propondo uma ferramenta interativa.

Os tutoriais estão disponíveis no sitio:

<http://www.archidigital.arq.br/ead>

Sítio WEB desenvolvido, pelo autor, para facilitar a interatividade do usuário ao trabalhar com os tutoriais, adicionando uma considerável eficiência aos mesmos. Na página inicial, apresentam-se os propósitos dos tutoriais.

The screenshot shows a web browser window with the title "simulação computacional da Luz Natural - Mozilla Firefox". The address bar shows the URL "http://www.archidigital.arq.br/ead/". The page content includes a header with the title "simulação computacional da Luz Natural" and a language dropdown menu set to "Português - Brasil (pt_br)". Below the header, there are two main sections: "Informações e Contato" with a link for "Novidades no sítio" and "Últimas Notícias" with a link to "Adicionar um novo tópico...". The "Cursos disponíveis" section features a course titled "Simulação Computacional da Luz Natural Aplicada ao Projeto de Arquitetura" by "evangelos christakou". A text box on the right explains the site's mission: "Este sitio WWW busca atender à necessidade de mudar o quadro da utilização da simulação computacional no Brasil. Segundo estudos, a maioria dos arquitetos não utiliza a simulação no processo de projeção. Isto se deve principalmente as dificuldades de aprendizagem deste tipo de software. É a nossa contribuição." At the bottom, there is a Moodle logo and a message: "Você ainda não fez o acesso (Acesso)".

Figura 37 – Sítio WWW desenvolvido para os tutoriais.

Curso: Simulação Computacional da Luz Natural Aplicada ao Projeto de Arquitetura - Mozilla Firefox

File Edit View Go Bookmarks Tools Help

http://archidigital.arq.br/ead/course/view.php?id=2&edit=off

SPOT Webmail - UnB - Lighting Simulation wit... Physically Accurate Ligh... HyperGraph Table of C...

Simulação Computacional da Luz Natural Aplicada ao Projeto de Arquitetura Você acessou como **evangelos christakou** (Sair)

eadigital » SCLN [Ativar edição](#)

Participantes

- Participantes
- Grupos
- Editar perfil

Atividades

- Fóruns
- Glossários
- Materiais

Buscar

Buscar no fórum

Administração

- Ativar edição
- Configurações...
- Facilitadores...
- Estudantes...
- Backup...
- Restore...

Programação

- Fórum de notícias
- glossário
- 1
- 2 tutorial DESKTOP RADIANCE
- 3 Tutorial RAYFRONT

Últimas Notícias

[Adicionar um novo tópico...](#)

31 Oct, 22:33 - evangelos christakou
nova versão do RADIANCE SYNTHETIC IMAGE SYSTEM [mais...](#)

Próximos Eventos

Não há nenhum evento próximo

[Calendário...](#)
[Novo evento...](#)

Atividade recente

Atividade desde Saturday, 13 November 2004, 16:53

[Relatório completo da atividade recente](#)

Nenhuma novidade desde o seu último acesso

Usuários online

(últimos 5 minutos)

evangelos christakou

Done

O acesso inicial aos tutoriais do DESKTOP RADIANCE e RAYFRONT.

Figura 38 – Pagina inicial dos tutoriais.

Nesta tela do MOODLE, o usuário poderá acessar os tutoriais interativamente, e, além disso, pode-se acessar material em formato PDF com o manual do DESKTOP RADIANCE ou através de *links* acessar o sitio do fabricante do RAYFRONT e buscar novas informações.