GIOVANI BALEN MENEGHEL

**Proposta de Metodologia para Avaliação de
Métodos de Iluminação Global em Síntese de Imagens**

**São Paulo
2015**

GIOVANI BALEN MENEGHEL

**Proposta de Metodologia para Avaliação de
Métodos de Iluminação Global em Síntese de Imagens**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências**

**São Paulo
2015**

GIOVANI BALEN MENEGHEL

**Proposta de Metodologia para Avaliação de
Métodos de Iluminação Global em Síntese de Imagens**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências**

**Área de Concentração:
Sistemas Eletrônicos**

**Orientador:
Prof. Dr. Marcio Lobo Netto**

**São Paulo
2015**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Meneghel, Giovani Balen

Proposta de metodologia para avaliação de métodos de iluminação global em síntese de imagens / G. B. Meneghel -- versão corr. -- São Paulo, 2015. 122 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos.

1.Computação gráfica 2.Síntese de imagens 3.Iluminação global 4.Qualidade perceptual I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Sistemas Eletrônicos II.t.

Dedico este trabalho à memória do meu pai, Delmir Meneghel (1949-2012),
que teve uma origem humilde e batalhou muito para oferecer aos filhos
uma educação de qualidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço em primeiro lugar o professor Dr. Marcio Lobo Netto pela constante orientação, conselhos, estímulo e paciência durante toda a produção deste trabalho, realizando inclusive inúmeras revisões.

Gostaria de agradecer de maneira especial o pesquisador Anton Kaplanyan, do Karlsruhe Institute of Technology, Alemanha, pelos valiosos conselhos no direcionamento deste trabalho.

Agradeço com grande ênfase a VetorZero, empresa de referência no Brasil, produtora de Animações, Efeitos Visuais e Filmes, sendo a inspiração deste trabalho, me disponibilizando ainda todo o tempo e recursos necessários para seu desenvolvimento e conclusão. Agradeço individualmente todos os sócios pelo apoio e compreensão: Sérgio Salles, Alberto Lopes, Nando Cohen, Mateus Santos, Gabriel Nóbrega e Alceu Baptistão.

Agradeço com muito carinho à Cristiane Santos, então Coordenadora de Produção 3D na VetorZero, pelo apoio, compreensão e grande incentivo à realização deste trabalho.

Agradeço ainda o artista Renato Ferri Carone pela ajuda na reconstrução da fotografia do clássico experimento de Cornell Box.

Por fim, um agradecimento especial à minha esposa Priscila, com a qual tenho um relacionamento extraordinário de mútua compreensão e companheirismo, e que colaborou de todas as maneiras possíveis para que este trabalho fosse realizado.

RESUMO

Produzir imagens de alta qualidade por computador, no menor tempo possível, que sejam convincentes ao público alvo, utilizando-se de maneira ótima todos os recursos computacionais à disposição, é uma tarefa que envolve uma cadeia de processos específicos, sendo um grande desafio ainda nos dias de hoje. O presente trabalho apresenta um estudo sobre toda esta cadeia de processos, com foco na avaliação de métodos de Iluminação Global empregados na Síntese de Imagens fotorrealistas para as áreas de Animação e Efeitos Visuais.

Com o objetivo de auxiliar o usuário na tarefa de produzir imagens fotorrealistas de alta qualidade, foram realizados experimentos envolvendo diversas cenas de teste e seis métodos de Iluminação Global do Estado da Arte: *Path Tracing*, *Light Tracing*, *Bidirectional Path Tracing*, *Metropolis Light Transport*, *Progressive Photon Mapping* e *Vertex Connection and Merging*. O sintetizador escolhido para execução do experimento foi o *Mitsuba Renderer*.

Para avaliação da qualidade dos resultados, duas métricas perceptuais foram adotadas: o Índice de Similaridade Estrutural – SSIM – e o Previsor de Diferenças Visuais – HDR-VDP-2. A partir da avaliação dos resultados, foi construído um Guia de Recomendações para o usuário, indicando, com base nas características de uma cena arbitrária, o método de Iluminação Global mais adequado para realizar a síntese das imagens.

Por fim, foram apontados caminhos de pesquisa para trabalhos futuros, sugerindo o emprego de classificadores, métodos de redução de parâmetros e Inteligência Artificial a fim de automatizar o processo de produção de imagens fotorrealistas e de alta qualidade.

Palavras-chave: Computação Gráfica. Síntese de Imagens. Iluminação Global. Qualidade Perceptual.

ABSTRACT

The task of generating high quality computer images in the shortest time possible, believable to the target's audience perception, using all computational resources available, is still a challenging procedure, composed by a chain of specific processes. This work presents a study of this chain, focusing on the evaluation of Global Illumination methods used on the Synthesis of Photorealistic Images, in the areas of Animation and Visual Effects.

To achieve the goal of helping users to produce high-quality photorealistic images, two experiments were proposed containing several test scenes and six State-of-the-Art Global Illumination methods: *Path Tracing*, *Light Tracing*, *Bidirectional Path Tracing*, *Metropolis Light Transport*, *Progressive Photon Mapping* and *Vertex Connection and Merging*. In order to execute the tests, the open source renderer *Mitsuba* was used.

The quality of the produced images was analyzed using two different perceptual metrics: Structural Similarity Index – SSIM – and Visual Difference Predictor – HDR-VDP-2. By analyzing results, a Recommendation Guide was created, providing suggestions, based on an arbitrary scene's characteristics, of the most suitable Global Illumination method to be used in order to synthesize images from the given scene.

In the end, future ways of research are presented, proposing the use of classifiers, parameter reduction methods and Artificial Intelligence, in order to build an automatic procedure to generate high quality photorealistic images.

Keywords: Computer Graphics. Image Synthesis. Global Illumination. Perceptual Quality.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem típica de Animação.....	15
Figura 2 - Cenas típicas de Efeitos Visuais. (esquerda) Imagens originais; (direita) Imagens modificadas, adicionando-se efeitos visuais.....	15
Figura 3 - (a) Cena Virtual, (b) Traçador de Raios, (c) Síntese pelo Traçador de Raios, (d) Síntese por Iluminação Global.....	19
Figura 4 - Exemplo de um plano do curta-metragem <i>Big Buck Bunny</i> , com duração de 5 segundos.....	20
Figura 5 - Imagem sintetizada pelo método Ray Tracing, contendo superfícies difusas, reflexivas e refrativas. A iluminação indireta foi aproximada por um fator constante, não havendo rebatimento de luzes entre os objetos da cena.....	28
Figura 6 - Imagem sintetizada pelo método Ray Tracing Distribuído, englobando efeitos como desfoque por movimento e penumbras.....	29
Figura 7 - Estratégias de amostragem: (coluna esquerda) Amostragem Uniforme; (coluna do meio) Amostragem Estocástica; (coluna da direita) Amostragem por Importância; (linha de cima) imagem amostrada; (linha do meio) amostras; (linha de baixo) Reconstrução baseada nas amostras.	35
Figura 8 - Um trajeto iniciado na câmera em busca de uma fonte luminosa.	37
Figura 9 - Imagem gerada pelo do método Path Tracing na qual se pode notar rebatimentos de luz entre os objetos da cena através da presença das cores verde e vermelha em objetos de cor neutra.	38
Figura 10 - Funcionamento do método Light Tracing. Ao traçar aleatoriamente raios a partir de fontes luminosas, muitos são desperdiçados e pode haver regiões visíveis à câmera não atingidas por nenhum raio de luz, como é o caso da superfície S_1	40
Figura 11 - Visualização de <i>caustics</i> através do método Light Tracing, situação em que o método se sobressai por não empregar esforço computacional na procura de outros tipos de rebatimentos de luz.....	40
Figura 12 - Cena cuja fonte de luz é difícil de ser encontrada usando Path Tracing. Linhas contínuas representam o trajeto obtido pelo método Path Tracing, linhas tracejadas indicam segmentos obtidos pelo método Bidirectional Path Tracing. C é a câmera virtual, L é uma fonte de luz.	41
Figura 13 - Cena cujas fontes de luz estão dentro de objetos apenas parcialmente abertos (luminárias), dificultando serem encontradas por caminhos aleatórios.	

Imagens geradas utilizando o mesmo tempo de processamento pelos métodos (a) Bidirectional Path Tracing e (b) Path Tracing.....	42
Figura 14 - Imagens parciais representando a contribuição de caminhos de tamanho 2 a 6, apresentadas em cada linha, que compõe a imagem anterior.....	42
Figura 15 - Problema típico abordado pelo método MLT. Esta cena contém uma fonte luminosa muito difícil de ser encontrada até mesmo pelo método BPT.	43
Figura 16 - Estratégias de mutação do método Metropolis Light Transport. (a) Perturbação num vértice do caminho da câmera. (b) Perturbação num vértice do caminho da fonte luminosa.....	44
Figura 17 - Perturbação de um caminho de acordo com método PSSMLT. Na figura, os números correspondem aos índices das amostras utilizadas para a geração de cada sub-caminho. O caminho original foi unicamente determinado pelo conjunto de amostras $u_1...u_8$. Novos caminhos foram gerados perturbando-se apenas as amostras iniciais u_1 e u_2	45
Figura 18 - Taxas de convergência dos métodos MLT e PSSMLT comparadas com métricas RMS (esquerda) e uma métrica perceptual proposta pelos autores (direita), em uma cena simples de teste.....	45
Figura 19 - Imagem esquemática da geração de um Mapa de Fótons. L é uma fonte luminosa, S são superfícies na cena e P_1 a P_9 são pontos de intersecção nos quais fótons são armazenados no mapa.	47
Figura 20 - Imagens geradas através do método Photon Mapping. (a) Emprego exclusivo do Mapa Global de Fótons, contendo 165 mil fótons. (b) Mesmo Mapa Global de Fótons, porém contando adicionalmente com Mapa de Fótons de Caustics, além de técnicas de otimização e redução de erro.	48
Figura 21 - Estágios de funcionamento do método Progressive Photon Mapping. O primeiro estágio consiste em traçar raios a partir da câmera, e o estágio seguinte, que é executado múltiplas vezes, consiste em disparar fótons a partir das fontes luminosas da cena.	49
Figura 22 - Esquema de funcionamento do método Stochastic Progressive Photon Mapping em comparação com o método antecessor, Progressive Photon Mapping. Nota-se a inclusão de mais um estágio, que explora a área ao redor dos pontos de intersecção dos caminhos já traçados.	50
Figura 23 - Esquema de funcionamento do método <i>Vertex Connection and Merging</i> . A primeira coluna ilustra a geração de raios a partir da câmera e a partir das fontes	

luminosas. As colunas do meio sintetizam o funcionamento de métodos baseados em Path Tracing, que procuram conectar caminhos originados na câmera com caminhos originados nas luzes. A última coluna exemplifica o funcionamento de métodos baseados em Photon Mapping. O método VCM combina os anteriores. ...52

Figura 24 - Eficiência do sintetizador PBRT em uma cena simples.58

Figura 25 - Cena de teste Cornell Box Difusa.63

Figura 26 - Cena de teste Cornell Box Espelhada.....64

Figura 27 - Cena de teste Cornell Box Glossy.....65

Figura 28 - Cena de teste Caixa com Esferas.66

Figura 29 - Cena de teste Dragão Especular.67

Figura 30 - Cena de teste Dragão Glossy.68

Figura 31 - Cena de teste Exterior da Piscina.69

Figura 32 - Cena de teste Interior da Piscina.70

Figura 33 - Cena de teste Quarto de Veach.71

Figura 34 - Cena de teste Lafortune Bidirecional.72

Figura 35 - Diferentes tipos de ruído. (a) referência. (b) alta frequência. (c) baixa frequência.....95

Figura 36 - Convergência dos métodos na cena Cornell Box Difusa.97

Figura 37 - Convergência dos métodos na cena Cornell Box Espelhada.....98

Figura 38 - Convergência dos métodos na cena Cornell Box Glossy.....99

Figura 39 - Convergência dos métodos na cena Caixa com Esferas..... 100

Figura 40 - Convergência dos métodos na cena Dragão Especular. 101

Figura 41 - Convergência dos métodos na cena Dragão Glossy. 102

Figura 42 - Convergência dos métodos na cena Interior da Piscina. 103

Figura 43 - Convergência dos métodos na cena Quarto de Veach. 104

Figura 44 - Convergência dos métodos na cena Lafortune Bidirecional. 105

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Notação estendida de caminhos de luz, empregada neste trabalho.	36
Tabela 2 - Quadro comparativo entre vários métodos de Iluminação Global.....	53
Tabela 3 - Principais sintetizadores comerciais para Animação e Efeitos Visuais.....	54
Tabela 4 - Quadro comparativo das cenas de teste.	73
Tabela 5 - Resultados dos testes nas cenas Cornell Box Difusa e Cornell Box Espelhada.	84
Tabela 6 - Resultados dos testes nas cenas Cornell Box Glossy e Caixa com Esferas.....	85
Tabela 7 - Resultados dos testes nas cenas Dragão Especular e Dragão Glossy. ..	86
Tabela 8 - Resultados dos testes nas cenas Exterior da Piscina e Interior da Piscina.	87
Tabela 9 - Resultados dos testes nas cenas Quarto de Veach e Lafortune Bidirecional.....	88
Tabela 10 - Quadro comparativo dos resultados nas cenas de teste.....	110
Tabela 11 - Guia de Recomendações Gerais dos métodos de Iluminação Global mais adequados, dadas as principais características da cena.....	111

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPT	Bidirectional Path Tracing
BRDF	Bidirectional Reflectance Distribution Function
BSDF	Bidirectional Scattering Distribution Function
BTDF	Bidirectional Transmittance Distribution Function
DRT	Distributed Ray Tracing
HDR-VDP	High Dynamic Range Visual Difference Predictor
MLT	Metropolis Light Transport
PM	Photon Mapping
PPM	Progressive Photon Mapping
PSSMLT	Primary Sample Space Metropolis Light Transport
PT	Path Tracing
QPS	Quadros por Segundo
RMS	Root Mean Square: Erro Quadrático Médio
RT	Ray Tracing
SPPM	Stochastic Progressive Photon Mapping
SSIM	Structural Similarity Index Metric
UPS	Unified Path Space
VCM	Vertex Connection and Merging

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Computação Gráfica e Síntese de Imagens	14
1.2	Cena Virtual	15
1.3	Processo de Construção da Cena Virtual	16
1.4	Métodos de Síntese de Imagens	18
1.5	Planos e Taxas de Quadro por Segundo	19
1.6	Processo de Trabalho para a Síntese de Imagens	21
1.7	Objetivo deste Trabalho	22
1.8	Organização da Dissertação	23
2	ESTADO DA ARTE	25
2.1	Trabalhos Relacionados	25
2.2	Ray Tracing e Ray Tracing Distribuído	27
2.3	Equação do Transporte de Luz	30
2.4	Métodos Monte Carlo	34
2.5	Amostragem por Importância	35
2.6	Notação de Caminhos de Luz	36
2.7	Métodos de Iluminação Global	37
2.7.1	<i>Path Tracing</i>	37
2.7.2	<i>Light Tracing</i>	39
2.7.3	<i>Bidirectional Path Tracing</i>	41
2.7.4	<i>Metropolis Light Transport</i>	43
2.7.5	<i>Primary Sample Space Metropolis Light Transport</i>	44
2.7.6	<i>Photon Mapping</i>	46
2.7.7	<i>Progressive Photon Mapping</i>	49
2.7.8	<i>Stochastic Progressive Photon Mapping</i>	50
2.7.9	<i>Vertex Connection and Merging e Unified Path Sampling</i>	51
2.7.10	<i>Resumo Comparativo dos Métodos de Iluminação Global</i>	52
2.8	Sintetizadores Existentes	54
2.8.1	<i>Sintetizadores Comerciais</i>	54
2.8.2	<i>Sintetizadores de Código Aberto</i>	55
2.8.3	<i>Sintetizadores para Fins Acadêmicos</i>	55
2.8.4	<i>Sintetizadores Proprietários</i>	56

2.9	Paralelismo e Máquinas em Rede	57
2.9.1	<i>Paralelismo</i>	57
2.9.2	<i>Máquinas em Rede.....</i>	58
2.10	Plataformas	60
3	CENAS DE TESTE	61
3.1	Cornell Box Difusa	63
3.2	Cornell Box Espelhada	64
3.3	Cornell Box Glossy	65
3.4	Caixa com Esferas	66
3.5	Dragão Especular	67
3.6	Dragão Glossy	68
3.7	Exterior da Piscina	69
3.8	Interior da Piscina	70
3.9	Quarto de Veach	71
3.10	Lafortune Bidirecional	72
3.11	Resumo Comparativo das Cenas de Teste.....	73
4	EXPERIMENTOS	74
4.1	Determinação dos Métodos e do Sintetizador	74
4.2	Métricas	76
4.2.1	<i>Erro RMS</i>	76
4.2.2	<i>SSIM: Índice de Similaridade Estrutural.....</i>	77
4.2.3	<i>HDR-VDP-2: Previsor de Diferenças Visuais.....</i>	78
4.3	Experimentos	79
4.3.1	<i>Experimento 1.....</i>	79
4.3.2	<i>Experimento 2.....</i>	81
5	RESULTADOS E ANÁLISE	83
5.1	Resultados do Experimento 1	83
5.1.1	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Cornell Box Difusa.....</i>	83
5.1.2	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Cornell Box Espelhada</i>	89
5.1.3	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Cornell Box Glossy</i>	90
5.1.4	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Caixa com Esferas</i>	91
5.1.5	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Dragão Especular.....</i>	92
5.1.6	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Dragão Glossy.....</i>	92
5.1.7	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Exterior da Piscina.....</i>	93

5.1.8	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Interior da Piscina.....</i>	94
5.1.9	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Quarto de Veach</i>	94
5.1.10	<i>Resultados do Experimento 1 na Cena Lafortune Bidirecional.....</i>	95
5.2	Resultados do Experimento 2.....	96
5.2.1	<i>Resultados do Experimento 2 na Cena Cornell Box Difusa.....</i>	96
5.2.2	<i>Resultados do Experimento 2 na Cena Cornell Box Espelhada</i>	96
5.2.3	<i>Resultados do Experimento 2 na Cena Cornell Box Glossy.....</i>	106
5.2.4	<i>Resultados do Experimento 2 na Cena Caixa com Esferas</i>	106
5.2.5	<i>Resultados do Experimento 2 na Cena Dragão Especular.....</i>	107
5.2.6	<i>Resultados do Experimento 2 na Cena Dragão Glossy.....</i>	107
5.2.7	<i>Resultados do Experimento 2 na Cena Interior da Piscina.....</i>	108
5.2.8	<i>Resultados do Experimento 2 na Cena Quarto de Veach</i>	108
5.2.9	<i>Resultados do Experimento 2 na Cena Lafortune Bidirecional.....</i>	109
5.3	Resumo Comparativo dos Resultados	109
5.4	Guia de Recomendações Gerais	110
5.5	Sugestões de Emprego dos Métodos de Iluminação Global	111
5.5.1	<i>Sugestões para Casos Gerais</i>	111
5.5.2	<i>Sugestões para Casos Específicos</i>	112
6	CONCLUSÕES.....	113
6.1	Ferramenta para Classificar Cenas	114
6.2	Ferramenta para Exploração Automática de Parâmetros	115
6.3	Avaliar Erro em Vídeos Gerados pela Síntese de Imagens.....	116
6.4	Melhorias ou Novas Propostas de Métodos de Iluminação Global.....	116
	REFERÊNCIAS.....	118
	REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES	122

1 INTRODUÇÃO

1.1 Computação Gráfica e Síntese de Imagens

A Computação Gráfica é uma área de extrema importância para diversos setores da tecnologia, e está cada vez mais presente no dia-a-dia das pessoas. Basta observar-se que a maioria dos dispositivos eletrônicos utilizados diariamente por pessoas do mundo inteiro possui uma interface para exibição de algum tipo de informação para o usuário, a qual faz uso de mecanismos gráficos computacionais.

Através dela é possível criar visualizações de informações relevantes – ou representações destas informações – para diversas áreas de aplicação, dentre as quais destacam-se a Visualização Científica, Processos de Simulação Industrial, Indústria Automotiva e Aeroespacial, Estudos Climáticos, Medicina, Arquitetura, Videogames, Cinema e TV, etc.

Dentro da Computação Gráfica uma das áreas de maior destaque é a da Síntese de Imagens, a qual engloba diferentes técnicas e processos de geração de imagens. Tais processos têm o propósito de produzir imagens com algum significado relevante para quem as vê.

Na área de Cinema e TV, a síntese de imagens é utilizada para fins de entretenimento, jornalísticos e publicitários por exemplo. São diversas as aplicações da síntese de imagem para produção de conteúdo para Cinema e TV, das quais se destacam as áreas de Animação e Efeitos Visuais. A Figura 1 ilustra um exemplo de Animação, enquanto que a Figura 2 apresenta casos de Efeitos Visuais.

O foco deste trabalho está na aplicação da Computação Gráfica para a síntese de imagens nas áreas de Animação e Efeitos Visuais. A principal motivação para esta escolha é o fato de o autor deste estudo trabalhar numa empresa produtora de conteúdo para Cinema e TV, com ênfase em síntese de imagens para fins de entretenimento e publicitários.

Diversos são os desafios de se trabalhar nestas áreas, que exigem principalmente atualização constante de softwares, conhecimento, métodos e processos de trabalho, a fim de se produzir, no final da cadeia, conteúdo e imagens cada vez mais surpreendentes para o público alvo. Ou seja, é um ambiente muito favorável para profissionais que tenham em seu perfil o interesse e habilidades no conjunto: Academia + Pesquisa + Aplicação.

Figura 1 - Imagem típica de Animação.

Blender Foundation

Figura 2 - Cenas típicas de Efeitos Visuais. (esquerda) Imagens originais; (direita) Imagens modificadas, adicionando-se efeitos visuais.

Blender Foundation

1.2 Cena Virtual

O processo de síntese de imagens na área de Efeitos Visuais tem início na necessidade de se gerar alguma informação visual que não exista no mundo real ou

que seja muito difícil de ser capturada por câmeras reais. Para se produzir uma imagem no mundo real, são necessários uma cena, composta por objetos e seus materiais, fontes luminosas, para iluminar o cenário e todos seus elementos, e uma câmera fotográfica, a fim de capturar os estímulos luminosos, convertendo-os em informações de cor, que finalmente compõe uma imagem. Este processo é muito fácil de ser imaginado no mundo real, porém para simulá-lo no mundo virtual, são necessárias algumas representações dos elementos e fenômenos reais.

Na cadeia de processos para a síntese de imagens por computador, um dos primeiros conceitos é o de cena virtual. Ela nada mais é do que um container de informações, englobando a representação da geometria de todos os objetos que aparecerão na imagem sintetizada, ou produzirão efeito indireto nela, como por exemplo rebatimentos de raios luminosos. A geometria é geralmente descrita de maneira a representar a superfície dos elementos, determinando as formas, limites e detalhes, a partir do seu posicionamento e orientação em um sistema de coordenadas.

Além de informações geométricas, outras informações importantes que devem estar detalhadas na cena virtual são os materiais de cada objeto. Um material descreve o comportamento da luz rebatida (transmitida ou refletida) em função da luz incidente na superfície de um objeto. Ele possui informações de cor (por exemplo: sólida, uma textura, um padrão matemático ou procedural, etc), bem como informações sobre o espalhamento e absorção de luz (se é perfeitamente difuso, perfeitamente espelhado, perfeitamente refrativo, etc.).

Além disso, a cena virtual contém informações sobre as fontes luminosas, contendo dados da posição, padrão de cor, intensidade, formato, direção de emissão, entre outros.

Finalmente informações sobre a câmera virtual completam o conjunto, descrevendo o posicionamento, orientação, dados de enquadramento como ângulo de abertura, foco e zoom, etc.

1.3 Processo de Construção da Cena Virtual

A construção da cena virtual envolve um processo que pode ser dividido conceitualmente em etapas, cada uma agregando informações correspondentes à

cena e exigindo habilidades específicas dos usuários designados para construí-las, detalhadas a seguir.

De maneira geral o processo pode ser visto como uma linha de produção, em que o produto – a cena virtual – vai sendo incrementada em cada passo. As etapas podem ser classificadas seguindo uma lógica progressiva: Determinação das Referências, Construção Geométrica, Construção de Materiais, Animação e finalmente Iluminação e Síntese.

Na etapa de Determinação das Referências, imagina-se o resultado esperado no fim da cadeia – um vídeo, resultado da composição das imagens sintetizadas – e são levantadas referências muito próximas ao que deseja-se criar. Nesta etapa está presente também a direção de arte, que pode determinar uma paleta de cores a ser seguida, um guia de texturas, e outras informações visuais com a finalidade de orientar a construção do vídeo.

Com as referências em mãos, a etapa de Construção Geométrica pode ser iniciada. É neste momento que toda a geometria da cena virtual é criada. Usuários com esta atribuição são conhecidos como artistas de modelagem ou modeladores, sendo responsáveis por construir virtualmente os objetos e elementos da cena. Tendo sido construída a geometria, duas etapas podem ser iniciadas em seguida: a Construção de Materiais e a Animação.

Na fase de Construção de Materiais, tomando-se como base as referências levantadas e a direção de arte, os artistas criam a descrição dos materiais de todos os objetos da cena, incluindo informações de textura e comportamento da luz ao incidir no material.

Paralelamente, na etapa de Animação, os usuários – conhecidos como artistas de animação ou animadores – criam o movimento dos objetos dentro da cena virtual. Para executar tal tarefa, estes usuários geralmente trabalham diretamente com os objetos geométricos sem a presença de materiais. O resultado é a geração de informações de mudança de posição em função do tempo, que são incorporadas na cena.

Finalmente, fontes luminosas virtuais são criadas na etapa de Iluminação e Síntese, na qual o usuário responsável também acumula a função de determinar a escolha do método de síntese das imagens, bem como os parâmetros do sintetizador escolhido.

1.4 Métodos de Síntese de Imagens

Tendo uma cena virtual em mãos, o usuário – ou artista de iluminação – tem a tarefa de sintetizar uma imagem e, para tanto, ele geralmente pode manipular apenas um conjunto limitado de parâmetros. Afinal, a cena foi construída com base num resultado esperado – a direção de arte da produção em questão, a construção geométrica dos elementos, etc. – e este resultado deve ser alcançado o mais fielmente possível. Usualmente os parâmetros que não podem ser alterados são as informações geométricas e a câmera virtual. Quanto às informações dos materiais, pode existir uma abertura para pequenas variações, como por exemplo leves mudanças na tonalidade ou índices de reflexão. De modo geral, dentre todos os parâmetros da cena virtual, resta ao artista a possibilidade de manipular as informações das luzes, alterando posicionamento, intensidades, taxas de emissão, etc. Porém, um outro conjunto de parâmetros externo à cena pode ser definido com maior liberdade pelo usuário. Tal conjunto representa a escolha do método de síntese das imagens, e um grupo de opções específicas do sintetizador.

O método de síntese, de maneira objetiva, é responsável por determinar a cor de cada pixel da imagem sintetizada. Tal determinação é feita tomando-se como base as informações descritas na cena virtual, pertinentes para cada pixel, como por exemplo dados do objeto e geometria, parâmetros do material associado ao objeto e dados da luz incidente no ponto ou região abrangida por cada pixel da imagem. Internamente, a essência do método de síntese está na maneira como ele calcula a distribuição de luz dentro da cena.

Os métodos de síntese mais usados até hoje são baseados no modelo **Traçador de Raios** proposto por Whitted (1980). Métodos mais recentes procuram levar em conta todos os rebatimentos da luz existentes na cena, buscando simular de maneira fiel o comportamento da propagação de luz no mundo real, sendo denominados, portanto, de **Métodos de Iluminação Global**. Métodos desta categoria buscam solucionar a *Equação do Transporte de Luz*, formulada por Kajiya (1986), e são apresentados em detalhes no Capítulo 2. A Figura 3 ilustra um comparativo entre uma Cena Virtual, uma imagem sintetizada exclusivamente pelo Traçador de Raios de Whitted, e uma imagem produzida por um método de Iluminação Global.

Figura 3 - (a) Cena Virtual, (b) Traçador de Raios, (c) Síntese pelo Traçador de Raios, (d) Síntese por Iluminação Global.

Fonte: (c) e (d) Jensen (2001)

1.5 Planos e Taxas de Quadro por Segundo

No processo de síntese de imagens para utilização nas áreas de Animação e Efeitos Visuais, o produto final – um filme ou vídeo – deve ser gerado em um padrão de 24, 30, 48 ou até 60 quadros por segundo (qps). Em produções que empregam o uso da estereoscopia, em que dois filmes são gerados – um para ser visto pelo olho esquerdo e outro pelo direito, simultaneamente – estas taxas são ainda multiplicadas por 2, chegando a 96 ou até 120 qps.

Alguns exemplos são os longas-metragens da série *The Hobbit* (2012), produzidos a 48 qps estereoscópicos, ou seja, a 96 qps no total, e o curta-metragem *Big Buck Bunny*, de Blender Foundation, re-gerado por Kristensen (2013) a 60 qps de maneira estereoscópica, ou seja, 120 qps.

Figura 4 - Exemplo de um plano do curta-metragem *Big Buck Bunny*, com duração de 5 segundos. Este curta-metragem foi re-gerado por Kristensen (2013) a uma taxa de 120 quadros por segundo. Ou seja, para este plano foi necessária a síntese de 600 quadros. Pode-se perceber a continuidade das imagens em (a), (b) e (c), não havendo variação significativa do cenário e condições de iluminação.

(a)

(b)

(c)

O filme, por sua vez, é constituído de *planos*. Cada plano consiste em uma seqüência ordenada de imagens obtidas através da mesma câmera, de maneira ininterrupta, estando limitado a um espaço – o cenário e seus elementos visíveis no enquadramento – e ao tempo, possuindo uma certa duração. Desta maneira, levando-se em conta a taxa de quadros por segundo do produto final, um plano de duração de alguns segundos pode ser composto por centenas ou até milhares de imagens. A Figura 4 ilustra o exemplo de um plano com estas características.

1.6 Processo de Trabalho para a Síntese de Imagens

Tomando-se como base a definição de plano e observando-se casos gerais como o apresentado na Figura 2, constata-se que, de modo geral, os planos não apresentam variação significativa do cenário nem de condições de iluminação em toda sua duração. Desta maneira, é natural concluir que, durante a síntese das imagens de um mesmo plano, um determinado método de Iluminação Global que produza bons resultados na geração de um quadro, produzirá também bons resultados ao sintetizar as demais imagens da seqüência.

De fato, a principal tarefa do artista de iluminação quando recebe a incumbência de sintetizar todas as imagens de um plano é de determinar o método de Iluminação Global e o conjunto correspondente de parâmetros mais adequados para gerar as imagens o mais próximo possível do resultado esperado. Para obter êxito em tal atribuição, o artista utiliza de seu prévio conhecimento e experiência para a escolha destas opções. E além disso, este processo de determinação dos parâmetros se dá de maneira iterativa por tentativa e erro: o artista testa um conjunto inicial de parâmetros que supõe, com base em seu conhecimento, que irão produzir um resultado inicial muito bom e, após a síntese e com base nos resultados obtidos, altera os parâmetros sempre visando chegar mais próximo do resultado esperado.

Neste processo de trabalho, o artista deve sempre ter em mente quais são os recursos computacionais disponíveis. Se ele tiver a sua disposição estes recursos em abundância, não precisará se preocupar com a otimização de parâmetros, podendo escolher um método de Iluminação Global computacionalmente muito custoso ou estabelecer um conjunto de parâmetros com taxas de amostragem muito mais altas do que as suficientemente necessárias. Como geralmente este cenário não existe – pois as empresas visam a utilização ótima de seus recursos – o artista

deve buscar a determinação dos parâmetros no limiar da qualidade aceitável, evitando assim o desperdício de recursos computacionais. E ainda, se ele conseguir esta otimização em um quadro do plano, conseqüentemente todos os outros quadros se beneficiarão de tais melhorias. Analogamente, caso o método ou parâmetros escolhidos não sejam ótimos, a síntese de todos os quadros da seqüência será penalizada, desperdiçando-se esforço computacional proporcional à duração do plano. Um estudo mais aprofundado sobre recursos computacionais é apresentado no Capítulo 2 deste trabalho.

Após a síntese de todas os quadros do plano, a seqüência de imagens é avaliada detalhadamente levando-se em consideração a direção pretendida da produção. Frequentemente são constatados problemas ou pontos de melhoria, que tornaram-se aparentes apenas após o estágio da geração das imagens, ou seja, após o emprego de grande esforço computacional. A partir desta análise, são propostas modificações na cena virtual, que podem ser aplicadas em qualquer estágio anterior na linha de produção. Além disso, alterações nas fases anteriores também podem surgir em decorrência de fatores externos à cena, como por exemplo mudança na direção de arte, inclusão ou remoção de objetos em virtude de novas propostas, etc. E para cada alteração em qualquer estágio da construção da cena virtual, uma nova síntese de todas as imagens do plano pode ser feita a fim de se visualizar o resultado final, consumindo-se novamente grande esforço computacional.

Este processo de trabalho – e retrabalho – evidencia a importância de uma boa escolha do método de Iluminação Global e determinação de seus parâmetros, ficando claro que muito esforço computacional será desperdiçado caso um método ineficiente seja escolhido ou parâmetros super-estimados sejam empregados.

1.7 Objetivo deste Trabalho

Visando atacar os problemas levantados nas seções anteriores, o presente estudo foi elaborado com o seguinte objetivo:

Auxiliar o usuário na escolha do método de Iluminação Global mais adequado para sintetizar uma dada cena virtual.

A fim de deixar claro este propósito e tendo em vista o foco deste trabalho, faz-se necessário uma melhor definição de alguns termos, no contexto da Computação Gráfica e Síntese de Imagens:

- usuário: alguém que tenha em mãos uma cena virtual, um sintetizador de cenas no qual é possível escolher entre um conjunto de métodos e parâmetros, e a necessidade de sintetizar uma imagem fotorrealista usando ambos. Esta definição engloba o artista de iluminação, porém pode ser estendida ao programador de um novo sintetizador, ou ao pesquisador que esteja estudando métodos de Iluminação Global.
- adequado: que gere uma imagem de qualidade, no menor tempo possível, dados os recursos computacionais disponíveis.
- qualidade: que leve em consideração todos os rebatimentos de luz perceptíveis, gerando uma imagem com qualidade percebida muito próxima à imagem ideal.
- qualidade percebida: imagem fotorrealista, agradável ao olhar humano, com baixo nível de ruído, difícil de ser distinguida da imagem ideal.
- imagem ideal: imagem de referência, solução exata da *Equação do Transporte de Luz*, que leva em consideração todas as interações de luz na cena, sendo livre de erro e ruído; uma fotografia da cena no mundo real, caso exista.

1.8 Organização da Dissertação

O presente estudo está estruturado da seguinte maneira. O Capítulo 2 consiste em apresentar o estado da arte, iniciando com um levantamento de *Trabalhos Relacionados* que buscaram atingir objetivos semelhantes ao deste. São apresentados na sequência os conceitos de *Traçador de Raios*, *Equação do Transporte de Luz* e diversos *Métodos de Iluminação Global* existentes. Outros tópicos também são abordados pois fornecem embasamento para os conceitos anteriores, como *Métodos Monte Carlo* e *Amostragem por Importância*. São apresentados também estudos sobre síntese de imagens do ponto de vista de *Plataformas* existentes, *Paralelismo* e como distribuir o esforço computacional entre *Máquinas em Rede*.

O Capítulo 3 inicia a descrição de dois experimentos realizados, que visam revelar os pontos fortes, fracos e o comportamento de cada método de Iluminação

Global em diversas situações existentes em cenas virtuais típicas. É apresentada e justificada a construção de 10 casos de teste visando esta finalidade.

No Capítulo 4 os experimentos são descritos em detalhes. São apresentadas justificativas para a escolha dos métodos de Iluminação Global a serem avaliados: 1. *Path Tracing*, 2. *Light Tracing*, 3. *Bidirectional Path Tracing*, 4. *Metropolis Light Transport*, 5. *Progressive Photon Mapping* e 6. *Vertex Connection and Merging*. Para realizar os experimentos foi escolhido o sintetizador de código aberto *Mitsuba Renderer*, desenvolvido por Jakob (2010), por já conter a implementação de quase todos os métodos escolhidos, restando apenas ao autor deste trabalho a implementação do método VCM. Todos os casos de teste são analisados em função da expectativa de resultados, ou seja, do desempenho esperado de cada método de Iluminação Global em cada cena virtual proposta. Dando embasamento a esta abordagem, são discutidas métricas de comparação de resultados, como a raiz quadrada do erro quadrático médio – erro RMS –, porém uma maior ênfase é dada nas métricas perceptuais. Duas destas métricas são empregadas neste estudo: o *Índice de Similaridade Estrutural: SSIM*, de Wang et al. (2004), e a última versão do *Previsor de Diferenças Visuais: HDR-VDP-2*, de Mantiuk et al. (2011).

Os resultados dos experimentos são apresentados no Capítulo 5, revelando detalhadamente em que situações cada método de Iluminação Global se sobressai ou apresenta limitações. São discutidas também estratégias para geração de imagens de referência em cada caso, mediante uma análise detalhada das características de cada cena de teste, tendo em vista os métodos de Iluminação Global disponíveis. Por fim, com base nos resultados obtidos, é proposto um guia de recomendações para tratar de casos gerais, com sugestões de emprego de métodos de Iluminação Global para cada caso, juntamente com as expectativas de resultados correspondentes.

No Capítulo 6 é feita a conclusão do trabalho, indicando também linhas de pesquisa que podem ser abordadas no futuro, como por exemplo a construção de uma ferramenta para classificar automaticamente cenas virtuais ou uma ferramenta para automatizar a exploração de combinações ótimas de métodos e parâmetros em uma cena qualquer.

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Trabalhos Relacionados

Não há muitos trabalhos especificamente sobre comparação de métodos de Iluminação Global. O que existem são diversos estudos que indiretamente abordam este tema, porém sem um profundo enfoque na comparação de resultados. Um dos primeiros grupos de pesquisadores a publicar ideias sobre a precisão de métodos de Iluminação Global foi Arvo et al. (1994), que analisou a fonte de erros em imagens sintetizadas devidos a três fatores: aproximações nos modelos matemáticos, imprecisões na descrição geométrica dos elementos da cena e simplificações nos algoritmos. Entretanto, diferentemente do presente trabalho, não foram comparados diferentes métodos de Iluminação Global.

Khodulev (1996) restringiu a comparação a dois métodos de Iluminação Global disponíveis na época: um baseado em métodos *Monte Carlo* e outro baseado em *Radiosidade Determinística*, concluindo que métodos do primeiro grupo demonstraram melhores resultados para sintetizar cenas gerais. Para comparar os métodos, ele usou uma cena simples que possui solução analítica conhecida. Além desta, em cenas mais complexas ele comparou as imagens obtidas nos testes com imagens de referência geradas nos mesmos métodos abordados em seu estudo, porém após um longo período de processamento. Para comparação, apenas imagens de teste e referência foram exibidas, sendo que nenhuma métrica foi empregada. Szirmay-Kalos et al. (2001) ampliou o conjunto de cenas com solução analítica, empregando diferentes tipos de fontes luminosas, materiais e elementos geométricos, criando casos particularmente interessantes com solução constante em qualquer coordenada do plano da imagem, porém seu trabalho foi apenas teórico e não foi realizada uma comparação entre diferentes métodos de Iluminação Global.

Smiths e Jensen (2000) propuseram um conjunto de cenas muito simples, algumas possuindo solução analítica, com o objetivo de permitir à comunidade científica validar novos métodos de Iluminação Global, entretanto não propuseram o uso de nenhuma métrica de validação, nem realizaram a comparação de métodos. Drago e Myszkowski (2001) propuseram uma cena mais complexa baseada num cenário existente no mundo real: o átrio da Universidade de Aizu, fornecendo uma enorme quantidade de medições reais de materiais e iluminação em diversos pontos

do cenário. Eles também empregaram um método perceptual, baseado em opiniões de pessoas, para comparar a fidelidade das imagens geradas por computador com a observação do próprio cenário real. Um conjunto mais amplo de cenas foi proposto por CIE (2006), mas Maamari et al. (2006) logo constatou que este conjunto precisava ser ampliado a fim de abranger mais tipos de interações de luz, ou seja, apesar de haver várias cenas de testes, muitos dos efeitos de iluminação interessantes e desafiadores não estavam contemplados.

McNamara (2000) e McNamara (2006) explorou alguns métodos para se comparar imagens do mundo real com imagens geradas por computador, analisando métricas e diferenças perceptuais, realizando diversos testes. Ele verificou que comparações por técnicas numéricas não necessariamente fornecem medidas significantes de qualidade percebida por observadores reais, e então explorou a comparação perceptual em diversos experimentos envolvendo opiniões de usuários reais bem como métricas de qualidade perceptual, usando os índices *SSIM* e a primeira versão do índice *VDP* proposto por Daly (1992). Desta maneira, estes estudos limitaram-se a casos em que há tanto imagens reais e sintetizadas de uma cena existente no mundo real.

Uma análise completa de como validar métodos de Iluminação Global foi feita por Ulbricht et al. (2006), em que empregou algumas definições de qualidade perceptual e propôs o uso de algumas métricas para a comparação de resultados. Porém o trabalho é um Relatório do Estado da Arte (STAR), e nenhum método de Iluminação Global foi comparado.

Nos últimos anos tem-se visto muitos avanços no campo da simulação do transporte de luz, porém pouca atenção tem sido dada em se realizar uma completa análise comparativa de resultados.

Por exemplo, Hachisuka et al. (2008) ao propor o método *Progressive Photon Mapping*, comparou as imagens geradas no novo método com imagens produzidas por outros métodos, porém sem a adoção de nenhuma métrica. Todas as comparações foram feitas apenas exibindo-se as imagens de teste e instruindo-se o leitor a encontrar visualmente as diferenças, notando uma melhor qualidade nas imagens geradas pelo método proposto. Em seguida, Hachisuka e Jensen (2009), ao proporem o método *Stochastic Progressive Photon Mapping*, compararam os resultados quase que exclusivamente com imagens produzidas pelo método antecessor, exceto em um único caso em que resultados foram comparados com os

gerados utilizando *Bidirectional Path Tracing*. Ainda neste trabalho, apenas uma métrica de comparação foi empregada, o erro RMS. Além disso, em ambos os casos, os autores apresentaram apenas situações construídas para que os novos métodos exibissem suas vantagens e melhorias, não demonstrando casos gerais com diferentes condições de iluminação e materiais, por exemplo.

Quando o método VCM de Georgiev et al. (2012) foi proposto, este grupo de pesquisadores comparou (no documento suplementar) os resultados obtidos pelo novo método de Iluminação Global proposto com outros métodos do estado da arte, como *Path Tracing*, *Bidirectional Path Tracing* e *Progressive Photon Mapping*, utilizando métricas de qualidade perceptual como *SSIM* e *HDR-VDP*. Entretanto, novamente foram apenas criados casos de teste os quais revelavam as características desejadas pelos autores, não apresentando portanto resultados para casos gerais. Outro ponto a observar é que nenhuma menção é feita para o método e parâmetros de geração das imagens de referência.

No presente trabalho são analisados diferentes métodos de Iluminação Global trazendo todos a uma mesma base de comparação. Todos os métodos são exercitados em todas as cenas de teste, e as mesmas métricas são utilizadas para medir a qualidade de todas as imagens geradas. São também descritos os procedimentos para geração das imagens de referência em cada caso, acreditando-se assim apresentar um estudo bastante completo, amplo e justo sobre comparação e avaliação de métodos de Iluminação Global.

A fim de se interar com o Estado da Arte da Síntese de Imagens, que hoje abrange diversos métodos de Iluminação Global, faz-se necessário apresentar alguns conceitos chaves, num breve histórico da evolução da Computação Gráfica detalhado a seguir.

2.2 Ray Tracing e Ray Tracing Distribuído

O método *Ray Tracing* proposto por Whitted (1980) foi o primeiro a traçar raios a partir da câmera virtual em direção à cena. Tal ideia se baseou na tentativa de modelar o comportamento de uma câmera fotográfica no mundo real, porém de maneira inversa. Uma câmera real possui geralmente um conjunto de lentes focais e uma pequena abertura através da qual a luz, após ter sido emitida por fontes luminosas e rebatida nos objetos, entra e sensibiliza um filme fotográfico. Modelar

este fenômeno é até hoje muito ineficiente do ponto de vista computacional pois apenas uma fração irrisória dos fótons emitidos seriam rebatidos até atravessarem a abertura e atingirem naturalmente o filme fotográfico. Porém a ideia reversa introduzida por Whitted se mostrou equivalente e muito mais eficiente.

O método traça raios a partir da câmera virtual e busca por intersecções com objetos da cena. Caso a intersecção atinja uma superfície especular (reflexiva ou refrativa), um novo raio é traçado a partir do ponto de intersecção e para a direção apropriada até que uma superfície difusa ou uma fonte de luz seja atingida. Caso a próxima intersecção seja com uma fonte luminosa, a contribuição de luz é adicionada ao pixel correspondente. Caso uma superfície difusa seja encontrada, raios são traçados em direção às fontes luminosas para calcular a contribuição correspondente à iluminação direta deste ponto, e a intensidade luminosa é adicionada ao pixel correspondente na imagem sintetizada. A Figura 5 é um exemplo de uma imagem sintetizada utilizando-se o método Ray Tracing.

Figura 5 - Imagem sintetizada pelo método Ray Tracing, contendo superfícies difusas, reflexivas e refrativas. A iluminação indireta foi aproximada por um fator constante, não havendo rebatimento de luzes entre os objetos da cena.

Whitted (1980)

Verifica-se portanto que o método Ray Tracing não contempla os rebatimentos de luz entre superfícies difusas na cena. Ele leva em consideração apenas reflexos, refrações e incidência direta de luz. Para aproximar a contribuição

dos rebatimentos de luz entre objetos na cena, um fator constante chamado de *luz ambiente* pode somado em cada ponto de cada objeto da cena visível através câmera virtual. Portanto este método não encontra corretamente o equilíbrio da distribuição de luz na cena, apresentando um erro com relação à solução ideal. Tal erro é chamado de *bias* – termo usado na língua inglesa – e portanto este método é considerado *biased*.

O método *Ray Tracing Distribuído* proposto por Cook; Porter e Carpenter (1984) abordou uma série de fenômenos não previstos por Whitted, tais como desfoque por movimento (*motion blur*), desfoque por distância (*depth of field*), penumbras (*soft shadows*), reflexos com desfoque (*glossiness*) e desfoque por translucência (*blurred transparency*). A Figura 6 é um exemplo de uma imagem sintetizada pelo método Ray Tracing Distribuído.

Figura 6 - Imagem sintetizada pelo método Ray Tracing Distribuído, englobando efeitos como desfoque por movimento e penumbras.

Cook; Porter e Carpenter (1984)

A ideia de abordar tais fenômenos veio a partir de técnicas de anti-serrilhamento (*anti-alias*), usando amostras de raios extras em outras dimensões,

como por exemplo, variando-se parâmetros como: tempo, posição em uma fonte luminosa, ângulo de reflexão ou refração em uma superfície, etc. Apesar de modelar uma série de novos fenômenos, o rebatimento de luz entre objetos na cena ainda não foi abordado devidamente e era aproximado por um fator constante, a *luz ambiente*, tornando este método *biased*.

2.3 Equação do Transporte de Luz

Com o objetivo de modelar a correta distribuição de luz em qualquer cena virtual ou real, Kajiya (1986) formulou a *Equação do Transporte de Luz* – originalmente chamada *The Rendering Equation*. Tal modelo está baseado no princípio da conservação de energia. A equação atesta que a radiância emitida por uma superfície no ponto p e na direção ω_o é definida pela soma da radiância emitida pela própria superfície L_e na direção ω_o , se esta for uma fonte luminosa, com a somatória de toda a radiância L_i incidente em p , vinda de todas as direções ω_i de acordo com a esfera S centrada em p , refletida na direção ω_o segundo uma função de distribuição bidirecional de espalhamento – BSDF – $f(p, \omega_o, \omega_i)$, atenuada pelo fator de incidência na superfície $\cos\theta = \omega_i \cdot n$, onde θ é o ângulo entre ω_i e o vetor n normal à superfície no ponto p . Na proposição de Kajiya, radiância pode ser entendida como quantidade de luz. Assim, a Equação do Transporte de Luz pode ser escrita como:

$$L_o(p, \omega_o) = L_e(p, \omega_o) + L_s(p, \omega_o)$$

Expandindo-se o termo L_s :

$$L_o(p, \omega_o) = L_e(p, \omega_o) + \int_S f(p, \omega_o, \omega_i) L_i(p, \omega_i) (\omega_i \cdot n) d\omega_i$$

A BSDF engloba fenômenos tanto de reflexão como de transmissão. Tomando-se por suposição um objeto não emissor, a luz que é emitida pela superfície no ponto p em decorrência da iluminação da cena é portanto a soma da luz que incidiu no ponto p e foi *refletida*, com a somatória de toda luz que incidiu em qualquer outro ponto p' do objeto e foi *transmitida* internamente pelo objeto até sair

através do ponto p . A BSDF portanto pode ser desmembrada em duas funções: a função bidirecional de distribuição de reflectância, BRDF, e a função bidirecional de distribuição da transmissão, BTDF.

A BSDF pode ser interpretada como sendo o material do objeto virtual, pois determina a aparência em cada ponto da superfície, em cada espectro de luz, para toda luz incidente e emitida na direção do observador. A função é bidirecional pois apresenta o mesmo comportamento caso seja invertida a direção de luz incidente ω_i com a direção do observador ω_o , em relação ao ponto p . Esta formulação foi inicialmente proposta por Nicodemus (1965).

Conseqüentemente na Equação do Transporte de Luz a quantidade de luz L_s devida ao espalhamento, ou seja, o resultado da integral na formulação anterior, pode ser escrita como (omitindo-se as notações de p , ω_i e ω_o):

$$L_s = L_R + L_T = \int_S f_R L_i \cos \theta_i d\omega_i + \int_S f_T L_i \cos \theta_i d\omega_i$$

Como a BRDF trata da emissão da luz incidente e refletida no ponto p , não faz sentido considerar a luz que chegou em p pela da transmissão através da superfície. Portanto a integral da BRDF pode considerar apenas a semi-esfera Ω centrada em p e *externa* à superfície. Analogamente a BTDF pode considerar apenas a semi-esfera Ω' centrada em p e *interna* à superfície. A equação pode ser reescrita como:

$$L_s = \int_{\Omega} f_R L_i \cos \theta_i d\omega_i + \int_{\Omega'} f_T L_i \cos \theta_i d\omega_i$$

O exemplo mais clássico de BSDF é o modelo de reflectância Lambertiano, também conhecido como reflexão perfeitamente difusa, ou seja, $f_R(p, \omega_o, \omega_i)$ é constante e $f_T(p, \omega_o, \omega_i) = 0$, para $\forall (\omega_i, \omega_o)$. Este modelo descreve superfícies que refletem luz igualmente em todas as direções, não apresentando reflexos especulares, tampouco transmissões internas. Tais superfícies não existem no mundo real por serem perfeitamente ideais, mas alguns materiais reais se aproximam de tais distribuições, como a madeira, uma folha de papel ou uma parede

pintada com tinta fosca, depois de seca. Trabalhos posteriores na medição de BRDFs reais foram feitos por Matusik et al. (2003) e Müller et al. (2005).

Já para caso da BTDF, que modela o comportamento da luz transmitida internamente pelo objeto e que sai através do ponto p , são duas as características dos materiais: a transparência e a translucência. Em materiais transparentes a luz viaja em direção constante até encontrar uma fronteira superficial. Nesta fronteira a luz pode totalmente ou em parte sair ou ser refletida de volta para o mesmo material. Exemplos de materiais com estas características são o vidro e água. Este fenômeno é modelado pelas Leis de Fresnel da reflexão e refração da luz. Em materiais translúcidos, ou com algum grau de translucência, a luz viaja internamente no objeto por espalhamento, geralmente atingindo um raio de propagação máximo a partir do ponto p' de incidência, em função da intensidade luminosa. A pele humana, água turva e a cera são exemplos de superfícies que apresentam este comportamento.

Uma BSDF $f(p, \omega_o, \omega_i)$ é dita fisicamente plausível, e portanto, tendo utilidade no processo de geração de imagens fotorrealistas, caso satisfaça três condições:

- positividade, ou seja, $\forall \omega_i$ e $\forall \omega_o$, $f(p, \omega_o, \omega_i) \geq 0$;
- reciprocidade, ou seja, $f(p, \omega_o, \omega_i)/\eta_o^2 = f(p, \omega_i, \omega_o)/\eta_i^2$, onde η representa o índice de refração dos materiais das superfícies envolvidas na transmissão. No caso da BRDF, a função é simplificada: $f(p, \omega_o, \omega_i) = f(p, \omega_i, \omega_o)$;
- conservação de energia, ou seja, $\forall \omega_i$, $\int_S f(p, \omega_o, \omega_i) \cos \theta_o d\omega_o \leq 1$.

Resolver de maneira fechada as integrais presentes na Equação de Transporte de Luz é uma tarefa possível apenas em cenas virtuais elementares. Tais cenas são denominadas *cenas com solução analítica* e alguns trabalhos que estudaram cenas com estas características foram realizados por Smiths e Jensen (2000) e Szirmay-Kalos et al. (2001). Em cenas mais complexas, geralmente as cenas interessantes para fins cinematográficos e de entretenimento – que possuem inúmeros objetos com características de materiais variadas e diversas fontes luminosas – resolver de maneira fechada as integrais de espalhamento de luz é uma tarefa praticamente impossível. Basta imaginar que quando o número de objetos aumenta, resolver o rebatimento de luz de cada objeto levando-se em conta todos os outros objetos, resolvendo o espalhamento de luz sucessivamente até a cena encontrar o equilíbrio, é uma tarefa cuja complexidade é exponencial e recursiva.

Visto que a solução analítica é impraticável em cenas complexas, para tentar aproximar as integrais presentes na Equação de Transporte de Luz Kajiya propôs alguns métodos, sendo que os que se mostraram mais relevantes até os dias de hoje são: Aproximação por Radiosidade, proposto por Goral; Torrance e Greenberg (1984) e métodos Monte Carlo e Cadeias de Markov Monte Carlo.

A Aproximação por Radiosidade é uma tentativa de resolver a questão do espalhamento de luz entre objetos da cena, eliminando o uso da *luz ambiente* constante, porém leva em consideração apenas a radiosidade emitida por superfícies perfeitamente difusas. Portanto outros métodos para cálculo de reflexos, refrações e transmissões devem ser adicionados a esta aproximação.

Para cada superfície da cena, uma função de emissão de radiosidade é calculada. Então para cada ponto visível através da câmera virtual, o objeto correspondente ao ponto deve ser analisado varrendo-se todas as outras superfícies da cena, considerando a visibilidade e a distância da superfície com relação ao ponto, a luz incidente nesta e a função de emissão de radiosidade. Isso é feito iterativamente porém como o número de rebatimentos pode chegar facilmente a valores intratáveis, uma aproximação é feita considerando-se apenas os primeiros termos da série.

Em alguns casos, principalmente cenas com poucas superfícies, este método fornece uma solução aproximada muito boa para a luz ambiente, entretanto a um custo computacional muito elevado. É impraticável usar esta aproximação em cenas cujo número de objetos aumenta e um maior número de rebatimentos é considerado. Deduz-se então que em uma cena, sendo N o número de superfícies e M o número de rebatimentos considerados, o esforço total é $O(N^{M+1})$. Nota-se aqui que em cenas cujos objetos são descritos através de polígonos, cada triângulo da cena é considerado uma superfície distinta. Tal método é geralmente aproximado, porém tornando-se *biased*, se uma distância limite for considerada para busca por outras superfícies.

Técnicas baseadas em Monte Carlo, especialmente Cadeias de Markov Monte Carlo, são soluções reconhecidamente úteis para aproximar soluções de integrais, especialmente as multidimensionais. Os métodos Monte Carlo garantem que quanto mais amostras forem utilizadas, mais o resultado se aproxima da solução exata da integral. Apesar de Kajiya ter citado alguns usos de métodos Monte Carlo, há pouco detalhamento em seu trabalho original. Muitas propostas e variações de

métodos Monte Carlo surgiram no decorrer dos anos para solucionar as integrais da Equação de Transporte de Luz, e são detalhadas a seguir.

2.4 Métodos Monte Carlo

Métodos Monte Carlo empregam a utilização de técnicas de amostragem para aproximar soluções de integrais, sendo particularmente úteis quando o domínio das integrais é multi-dimensional. Este é o caso dos métodos de Iluminação Global, em que a quantidade luz incidente, refletida e transmitida por uma superfície deve ser calculada em todo domínio do espaço e direções possíveis.

Um detalhamento aprofundado das equações e formulações matemáticas de métodos Monte Carlo não é apresentado neste trabalho, que se limita apenas a apresentar os conceitos gerais de seu emprego no contexto de síntese de imagens. Uma boa referência para estes conceitos está em Shirley (2001).

De maneira geral, dada uma função $g(x)$ que se deseja integrar num certo domínio Ω , o resultado I é obtido:

$$I = \int_{\Omega} g(x) dx$$

A fim de se estimar o valor de I , é construído o estimador $\langle I \rangle$, através do emprego de N amostras da função $g(x)$:

$$\langle I \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{g(x)}{p(x)}$$

Na notação equação anterior, $p(x)$ é a função de densidade de probabilidade das amostras, sendo que $\int p(x) d(x) = 1$. No caso de distribuição uniforme de variáveis no domínio $[0, 1]$, $p(x) = 1$, $\forall x$. Facilmente observa-se que no limite de $N \rightarrow \infty$, tem-se $\langle I \rangle = I$.

É possível demonstrar que a variância do resultado final é proporcional a $1/N$ e o erro (*bias*) introduzido pelo estimador devido à amostragem é proporcional a

$1/N^{1/2}$. Ou seja, para reduzir a variância pela metade, é necessário dobrar o número de amostras. E para reduzir o erro pela metade, é necessário empregar um número quatro vezes maior de amostras.

2.5 Amostragem por Importância

A fim de otimizar o processo de amostragem apresentado na Seção anterior, convém concentrar amostras em regiões do domínio cuja função $g(x)$ apresente maiores valores e utilizar menos amostras onde o resultado desta função seja zero ou muito próximo disso. Ou seja, melhores resultados serão estimados quando $p(x)$ for (aproximadamente) proporcional a $g(x)$. A Figura 7 ilustra um exemplo de amostragem por importância em uma imagem.

Figura 7 - Estratégias de amostragem: (coluna esquerda) Amostragem Uniforme; (coluna do meio) Amostragem Estocástica; (coluna da direita) Amostragem por Importância; (linha de cima) imagem amostrada; (linha do meio) amostras; (linha de baixo) Reconstrução baseada nas amostras. Todas as estratégias de amostragem utilizaram 84 amostras. Melhor resultado é claramente obtido pela Amostragem por Importância.

Fonte: Art of Rendering, FX Guide (2012)

2.6 Notação de Caminhos de Luz

Com o intuito de facilitar a descrição das situações típicas de iluminação, Heckbert (1990) propôs uma notação em forma de expressões regulares que descreve o trajeto de raios a partir das fontes luminosas até chegarem à câmera. No presente trabalho esta notação foi ampliada para melhor tratar casos específicos abordados por métodos de Iluminação Global mais recentes. A notação estendida é apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Notação estendida de caminhos de luz, empregada neste trabalho.

Notação	Explicação
A	Luz do tipo área ou do tipo mapa ambiente, incluindo a
a	Luz do tipo área porém pequena, ou do tipo mapa ambiente que possui uma pequena região muito luminosa, como o sol num céu limpo
d	Luz do tipo delta, ou seja, que não pode ser atingida por um raio aleatório, ex: luzes do tipo pontual ou direcional
L	Qualquer tipo de luz, corresponde a (A/d)
D	Superfície difusa
M	Superfície perfeitamente reflexiva ou perfeitamente refrativa
G	Superfície reflexiva com desfoque ou refrativa com desfoque
S	Qualquer superfície especular, corresponde a (M/G)
E	Câmera virtual
$*$	Zero ou mais interações do tipo especificado
$+$	Uma ou mais interações do tipo especificado
$?$	Zero ou uma interação do tipo especificado
(x/y)	Interação do tipo x ou y
$(x/y)^*$	Qualquer seqüência que contenha interações do tipo x ou y
$(x/y+)^*$	Qualquer seqüência que contenha interações do tipo x ou y , com pelo menos uma interação do tipo y
$(x+/y+)^*$	Qualquer seqüência que contenha interações do tipo x ou y , com pelo menos uma interação do tipo x e uma interação do tipo y

2.7 Métodos de Iluminação Global

2.7.1 Path Tracing

Path Tracing foi proposto por Kajiya (1986) no mesmo trabalho em que introduziu a *Equação do Transporte de Luz* porém sem muito formalismo. Lafortune (1996) se encarregou de desenvolver e descrever matematicamente este método, propondo também, concorrentemente a Veach (1995), uma extensão denominada *Bidirectional Path Tracing*, descrita ainda neste Capítulo.

O método *Path Tracing* consiste em traçar, a partir da câmera virtual, raios que atingem objetos na cena em pontos de intersecção, e sucessivamente traçar novos raios aleatoriamente a partir das intersecções anteriores, até que uma fonte de luz seja atingida. Neste caminho traçado a partir da câmera com rebatimentos nos objetos da cena até encontrar uma fonte luminosa, em cada intersecção do raio com um objeto a função BSDF de espalhamento de luz da superfície é levada em consideração. Por este motivo o método Path Tracing, e todos os outros métodos que o tem como base, é dito ser baseado na integração de caminhos.

Figura 8 - Um trajeto iniciado na câmera em busca de uma fonte luminosa. O trajeto possui tamanho $i+1$ iniciado na câmera em p_0 , com $i-1$ rebatimentos em objetos até atingir uma fonte luminosa. C é a câmera virtual, S são superfícies e L é uma fonte luminosa.

Características como cor, absorção, transmissão, reflexão e espalhamento de cada objeto são acumuladas no decorrer das intersecções, e vão definindo a *vazão do trajeto*. Desta forma, a radiância que chega até a câmera através do caminho é o produto da radiância emitida pela fonte luminosa com a vazão do trajeto. A Figura 8 ilustra o exemplo de um trajeto iniciado na câmera até uma fonte luminosa. A Figura 9 apresenta uma imagem sintetizada através do método Path Tracing, em que é possível notar o rebatimento de cores entre diferentes superfícies.

Figura 9 - Imagem gerada pelo do método Path Tracing na qual se pode notar rebatimentos de luz entre os objetos da cena através da presença das cores verde e vermelha em objetos de cor neutra.

Facilmente o método pode construir diversos caminhos cuja vazão seja igual ou muito próximo a zero, tendo contribuição nula ou irrelevante na luminosidade final do ponto a ser iluminado. Outro fato que pode ocorrer também com certa facilidade é a construção de diversos caminhos que, após um número elevado de rebatimentos, já possuem uma vazão muito baixa e ainda não encontraram nenhuma fonte de luz. Alguns exemplos são caminhos que possuam um raio cujo ângulo de saída ou entrada em uma superfície é muito próximo a zero, ou quando as cores de superfícies no caminho correspondem a espectros muito distintos da luz, como o

vermelho e o verde. Nestes casos, alguns critérios de parada podem ser utilizados, como por exemplo a *Roleta Russa*, formulada por Arvo e Kirk (1990), e a amostragem explícita das fontes de luz da cena – técnica conhecida como *Previsão do Próximo Evento*. Lafortune (1996) demonstrou que uma correta re-ponderação dos pesos no caminho quando se utiliza a *Roleta Russa* e *Previsão do Próximo Evento* não introduz erro no cálculo da solução, mantendo o método *Path Tracing* ainda *unbiased*.

Outra boa estratégia quando se usa amostragem explícita de fontes luminosas é continuar traçando raios aleatórios em busca de mais rebatimentos de luzes na cena a partir do último ponto do caminho até então, gerando-se um novo caminho. Esta reutilização de caminhos introduz correlação na amostragem, porém é uma maneira eficiente de otimizar a geração de caminhos pois novos trajetos não precisam ser traçados todos a partir do ponto inicial. Esta abordagem, ainda *unbiased*, pode chegar a resultados com baixa variância com menos esforço computacional, porém pode apresentar erro caso um número inadequado (pequeno) de amostras sejam utilizadas.

Diversos métodos de Iluminação Global posteriormente propostos, inclusive os métodos tratados neste estudo, são baseados no *Path Tracing* pelo motivo de este ser um método que converge corretamente, porém de maneira computacionalmente custosa, para a solução da Equação do Transporte de Luz. Geralmente este é o método utilizado, com uma alta amostragem, para produzir imagens de referência para comparação quando um novo método é proposto.

2.7.2 *Light Tracing*

Dutré; Lafortune e Willems (1993) propuseram o método *Light Tracing*, uma ideia inversa ao método *Path Tracing*. Nesta proposta, caminhos são traçados a partir das fontes luminosas em direção aos objetos da cena e, em cada intersecção, tanto novos caminhos são gerados a fim de se distribuir a luz através de rebatimentos entre os objetos da cena, quanto raios são traçados em direção à câmera virtual na tentativa de se encontrar uma intersecção com o plano da imagem. A Figura 10 apresenta uma imagem esquemática do funcionamento do método.

Este método é extremamente ineficiente na maioria dos casos pois é muito difícil que, através de rebatimentos aleatórios, todos os pixels no plano da imagem

sejam atingidos por algum raio. Isto geralmente acarreta na geração de uma imagem com alto nível de ruído, eventualmente até apresentando muitos pixels com ausência total de contribuição luminosa.

Figura 10 - Funcionamento do método Light Tracing. Ao traçar aleatoriamente raios a partir de fontes luminosas, muitos são desperdiçados e pode haver regiões visíveis à câmera não atingidas por nenhum raio de luz, como é o caso da superfície S_1 .

Figura 11 - Visualização de *caustics* através do método Light Tracing, situação em que o método se sobressai por não empregar esforço computacional na procura de outros tipos de rebatimentos de luz.

Além da alta variância, este método não consegue tratar superfícies perfeitamente especulares, como vidros e espelhos, tornando o objeto completamente preto na imagem sintetizada. Porém há casos particulares em que o método Light Tracing se sobressai, como por exemplo a visualização do efeito de *caustics*, pelo fato de não empregar esforço computacional na procura por outros tipos de rebatimento de luz que, neste caso, não existem. A Figura 11 é um exemplo de uma cena com esta característica.

2.7.3 Bidirectional Path Tracing

Bidirectional Path Tracing foi introduzido e devidamente formalizado simultaneamente e de maneira independente por Lafortune e Willems (1993) e Veach (1995). O principal motivador desta idéia é tentar resolver o transporte de luz em cenas nas quais as fontes de luzes são difíceis de serem encontradas, mesmo traçando-se raios de sombra. A Figura 12 ilustra um exemplo de uma cena com estas características.

Figura 12 - Cena cuja fonte de luz é difícil de ser encontrada usando Path Tracing. Linhas contínuas representam o trajeto obtido pelo método Path Tracing, linhas tracejadas indicam segmentos obtidos pelo método Bidirectional Path Tracing. *C* é a câmera virtual, *L* é uma fonte de luz.

Figura 13 - Cena cujas fontes de luz estão dentro de objetos apenas parcialmente abertos (luminárias), dificultando serem encontradas por caminhos aleatórios. Imagens geradas utilizando o mesmo tempo de processamento pelos métodos (a) Bidirectional Path Tracing e (b) Path Tracing.

Veach (1995)

Figura 14 - Imagens parciais representando a contribuição de caminhos de tamanho 2 a 6, apresentadas em cada linha, que compõe a imagem anterior.

Veach (1995)

Este método propõe que caminhos sejam iniciados tanto a partir da câmera virtual, exatamente como no caso do Path Tracing, quanto como a partir das fontes luminosas, assim como no método Light Tracing. Para cada caminho gerado a partir da câmera, em cada ponto do trajeto são traçados raios de visibilidade para pontos de trajetos iniciados nas fontes luminosas. Caso os pontos sejam visíveis entre si, os

caminhos são conectados, formando um trajeto completo desde a câmera até uma fonte luminosa.

A Figura 13 apresenta uma cena sintetizada com o métodos (a) Bidirectional Path Tracing e (b) Path Tracing, utilizando o mesmo tempo de processamento. A Figura 14 representa as imagens parciais para cada caminho de tamanhos de 2 a 6, que, somadas, compõe a imagem final.

2.7.4 Metropolis Light Transport

A proposta do método Metropolis Light Transport – Veach e Guibas (1997) – é de concentrar esforço computacional em caminhos que efetivamente carregam luz, ou seja, correspondentes à conexão de caminhos originados em fontes luminosas com caminhos originados na câmera. A maior eficiência deste método ocorre em cenas como na Figura 15, cujas fontes luminosas estão muito escondidas, isto é, que exigem caminhos com diversos rebatimentos para serem encontradas ou que sejam visíveis somente através de pequenos espaços entre os objetos da cena. Por natureza, este método se baseia no Bidirectional Path Tracing.

Figura 15 - Problema típico abordado pelo método MLT. Esta cena contém uma fonte luminosa muito difícil de ser encontrada até mesmo pelo método BPT.

Veach (1997)

Inicialmente apenas uma fração dos caminhos utilizados no Bidirectional Path Tracing é traçada, tanto a partir de fontes luminosas quanto a partir da câmera. Quando uma conexão é encontrada entre caminhos destes dois conjuntos, pequenas perturbações (também chamadas de mutações) são feitas a fim de se gerar novos caminhos ligeiramente diferentes do original, porém que também carreguem luz. Nas mutações propostas originalmente por Veach, partes de um caminho válido – ou *sub-caminhos* – são substituídos por novas perturbações, mantendo assim sub-caminhos originais em todo novo caminho construído. Estas perturbações são realizadas utilizando-se o algoritmo Metropolis-Hastings – Metropolis et al. (1953) e Hastings (1970) – que por sua vez é um método Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC). Desta maneira, mais esforço computacional é empregado na exploração ao redor de caminhos válidos, na esperança de que os novos caminhos produzidos também conectem a câmera às fontes de luz, carregando informação luminosa. Diversas estratégias de mutações podem ser empregadas neste método. A Figura 16 ilustra algumas destas estratégias.

Figura 16 - Estratégias de mutação do método Metropolis Light Transport. (a) Perturbação num vértice do caminho da câmera. (b) Perturbação num vértice do caminho da fonte luminosa.

2.7.5 Primary Sample Space Metropolis Light Transport

Alguns anos mais tarde Kelemen et al. (2002) propôs uma nova estratégia de mutação no método MLT, conhecida como *Primary Sample Space MLT*, ou PSSMLT. Esta nova abordagem consiste em perturbar não diretamente os caminhos, mas sim nas amostras – números aleatórios no intervalo $[0, 1)$ – utilizadas na criação de caminhos. Como consequência, caminhos válidos que conectam a câmera a fontes luminosas podem sofrer alterações por inteiro, e não apenas em sub-caminhos, como nas mutações propostas originalmente por Veach (1997).

Foi constatado pelos autores que esta nova estratégia exige um maior esforço computacional para a geração de cada novo caminho válido, em comparação com as estratégias existentes no método MLT, pois geralmente os caminhos devem ser recalculados por completo. Porém alguns benefícios do novo método – como a diminuição da correlação entre caminhos, utilização de perturbações de maior escala, fatores estes que acarretam no aumento da taxa de aceitação de um novo caminho – fazem ele possuir uma taxa de convergência maior que o método antecessor. A Figura 17 apresenta um esquema do funcionamento deste método e a Figura 18 apresenta um gráfico comparativo da taxa de convergência.

Figura 17 - Perturbação de um caminho de acordo com método PSSMLT. Na figura, os números correspondem aos índices das amostras utilizadas para a geração de cada sub-caminho. O caminho original foi unicamente determinado pelo conjunto de amostras $u_1 \dots u_8$. Novos caminhos foram gerados perturbando-se apenas as amostras iniciais u_1 e u_2 .

Kelemen et al. (2002)

Figura 18 - Taxas de convergência dos métodos MLT e PSSMLT comparadas com métricas RMS (esquerda) e uma métrica perceptual proposta pelos autores (direita), em uma cena simples de teste.

Kelemen et al. (2002)

2.7.6 Photon Mapping

O método Photon Mapping foi proposto por Christensen e Jensen (1995), aprimorado por Jensen (1996), com o objetivo de atacar dois aspectos considerados computacionalmente custosos nos métodos Monte Carlo *unbiased*: iluminação indireta e *caustics*. O método é composto por dois estágios. No primeiro, fótons – partículas carregando energia luminosa – são traçados a partir das fontes de luzes em todas as direções. Para cada colisão de um fóton com um objeto, o ponto de intersecção (em coordenadas globais) e a intensidade luminosa calculada são armazenados em uma estrutura de dados chamada Mapa de Fótons – *Photon Mapping* – totalmente desacoplada da geometria da cena. Para evitar que os fótons sejam rebatidos indefinidamente entre os objetos da cena, para cada intersecção pode ser calculada a probabilidade de o fóton ser rebatido ou absorvido. Foi mostrado por Jensen (2001) que a máxima eficiência do método é obtida ao adotar-se a probabilidade de rebatimento igual à intensidade luminosa do fóton, aumentando-se também a luminosidade de cada fóton rebatido de maneira proporcional, gerando-se desta maneira menos fótons rebatidos porém sem perda de intensidade luminosa total. Outro critério simples de parada é empregar-se uma profundidade máxima para os rebatimentos. A Figura 19 ilustra o procedimento de criação de um Mapa de Fótons.

No segundo estágio, raios são traçados a partir da câmera virtual em direção à cena, assim como no método Path Tracing. Para cada ponto de intersecção de um raio da câmera com um objeto da cena os Mapas de Fótons são consultados a fim de se determinar a cor do ponto de intersecção. Uma distância máxima – denominada de *raio de busca* – é empregada para identificar os fótons mais próximos dentro do Mapa de Fótons, e a média da luminosidade destes fótons (ponderada pela distância) é calculada. Tal técnica é conhecida como *estimativa de densidade*, empregada também em todas as variações do método Photon Mapping.

A fim de atacar de maneira mais eficiente cada um dos problemas existentes em métodos Monte Carlo – iluminação indireta e *caustics* – dois mapas de fótons podem ser utilizados: Mapa Global de Fótons e Mapa de Fótons de *Caustics*. A diferença entre eles é que para se gerar o Mapa de Fótons de *Caustics*, fótons são emitidos das fontes luminosas exclusivamente na direção de objetos especulares, sofrendo rebatimentos até que uma superfície difusa seja encontrada, ponto no qual

são armazenados no mapa. Outra diferença é que a densidade de fótons no Mapa de Fótons de *Caustics* pode ser muito maior do que no Mapa Global, a fim de se produzir imagens ricas em detalhes deste fenômeno. A Figura 20 exibe imagens sintetizadas através deste método.

Fica claro que métodos que empregam estimativa de densidade introduzem erro no resultado pois a cor de um ponto não é determinada pela quantidade de luz que chega até ele mas sim por uma aproximação da intensidade luminosa em sua vizinhança, o que torna o método *biased*.

Figura 19 - Imagem esquemática da geração de um Mapa de Fótons. L é uma fonte luminosa, S são superfícies na cena e P_1 a P_9 são pontos de intersecção nos quais fótons são armazenados no mapa.

Técnicas de redução de erro podem ser empregadas sem necessidade de aumentar o número de fótons nos mapas, como cálculo da iluminação direta através da amostragem explícita de fontes luminosas, assim como no método Path Tracing, e o uso de uma técnica conhecida como *Final Gathering* para calcular a iluminação indireta. Tal técnica, ao invés de consultar o mapa de fótons ao redor do ponto no qual se deseja calcular a iluminação indireta, ou seja, na primeira intersecção do raio de câmera com objetos na cena, consiste em traçar novos raios aleatoriamente,

como no método Path Tracing, e onde estes raios interceptam objetos na cena, computam-se valores de luminosidade consultando-se o mapa de fótons, levando cada resultado de maneira ponderada de volta ao ponto originador destes raios, acumulando-se ali a luz recebida de maneira indireta.

Figura 20 - Imagens geradas através do método Photon Mapping. (a) Emprego exclusivo do Mapa Global de Fótons, contendo 165 mil fótons. (b) Mesmo Mapa Global de Fótons, porém contando adicionalmente com Mapa de Fótons de Caustics, além de técnicas de otimização e redução de erro.

2.7.7 Progressive Photon Mapping

Mais de uma década após a criação do método Photon Mapping, Hachisuka; Ogaki e Jensen (2008) revisitaram o método com uma nova abordagem, eliminando a limitação do tamanho dos Mapas de Fótons imposta pela quantidade de memória disponível na máquina.

A nova proposta, chamada de *Progressive Photon Mapping*, é um método que consiste no emprego de múltiplos passes de disparo de fótons. Para que isso fosse possível, os dois estágios do método de Photon Mapping tiveram que ser invertidos. No novo método, o primeiro estágio consiste em disparar raios através da câmera em direção à cena virtual, assim como no método Path Tracing, determinando-se pontos de intersecção.

Em seguida o estágio de disparo de fótons é realizado, acumulando-se informação luminosa nos pontos de intersecção descobertos no estágio anterior, através da criação e utilização imediata de um novo Mapa de Fótons. Este estágio de disparo de fótons é repetido diversas vezes, de acordo com um número pré-definido de iterações ou indefinidamente, até ser cancelado pelo usuário. A Figura 21 ilustra o esquema de funcionamento deste método.

Figura 21 - Estágios de funcionamento do método Progressive Photon Mapping. O primeiro estágio consiste em traçar raios a partir da câmera, e o estágio seguinte, que é executado múltiplas vezes, consiste em disparar fótons a partir das fontes luminosas da cena.

Hachisuka; Ogaki e Jensen (2008)

Desta maneira, a quantidade de fótons que pode ser empregada não é limitada pela memória disponível. Virtualmente qualquer número de fótons pode ser utilizado neste método, desde que haja tempo suficiente para se executar o número necessário de etapas de disparo de fótons. Outro benefício trazido por este método

é o de capturar detalhes importantes de *caustics* na cena, sendo particularmente eficaz na presença de caminhos do tipo SDS, ou seja, reflexos de *caustics*.

2.7.8 Stochastic Progressive Photon Mapping

Os mesmos autores do método Progressive Photon Mapping observaram que ele se mostrava eficiente em cenas nas quais era suficiente estimar a densidade de fótons nos *pontos* de intersecção de raios. Porém em cenas que possuem efeitos abordados pelo Ray Tracing Distribuído – desfoque por movimento, luzes do tipo área, desfoque pela lente da câmera, materiais do tipo reflexivos e refrativos com desfoque, etc – nas quais seria mais eficiente estimar a densidade por *área*, o método necessitava de uma quantidade muito mais elevada de fótons para produzir resultados visivelmente livres de ruído.

Hachisuka e Jensen (2009) propuseram então uma simples extensão ao método anterior, denominada de *Stochastic Progressive Photon Mapping*. Tal extensão inclui mais uma etapa no processo anterior, em que calcula-se a densidade de fótons em função da área ao redor dos pontos de intersecção dos raios. A Figura 22 apresenta uma imagem esquemática do método com esta etapa.

Figura 22 - Esquema de funcionamento do método Stochastic Progressive Photon Mapping em comparação com o método antecessor, Progressive Photon Mapping. Nota-se a inclusão de mais um estágio, que explora a área ao redor dos pontos de intersecção dos caminhos já traçados.

Hachisuka e Jensen (2009)

Outro ponto forte deste método é sua eficiência em sintetizar cenas que apresentam uma combinação das características abordadas pelo Ray Tracing Distribuído, ou seja, que contenham caminhos do tipo GDG (reflexo desfocado de

caustics desfocado, por exemplo), cenas contendo materiais do tipo *glossy* e luzes do tipo área ou mapa ambiente, efeitos de desfoque por movimento com câmeras com desfoque na lente, etc.

2.7.9 *Vertex Connection and Merging e Unified Path Sampling*

Métodos baseados em Path Tracing, que convergem de maneira *unbiased* para a solução da Equação do Transporte de Luz, e métodos consistentes, porém *biased*, baseados em Photon Mapping, que realizam uma estimativa da densidade de fótons na vizinhança dos pontos de intersecção dos raios, eram considerados conceitualmente incompatíveis, não podendo ser utilizados simultaneamente na síntese de imagens.

Dois grupos de pesquisadores independentemente e de maneira simultânea resolveram este problema trazendo ambas as abordagens para a mesma formulação matemática, empregando métodos de Amostragem por Importância para ponderar a escolha entre caminhos gerados por ambas as classes de métodos. O resultado foi a criação dos métodos *Unified Path Sampling*, por Hachisuka et al. (2012), e *Vertex Connection and Merging*, por Georgiev et al. (2012). Por serem considerados métodos conceitualmente idênticos, apesar de terem formulação matemática ligeiramente diferente, ambos os métodos são denominados hoje de *Vertex Connection and Merging*. A Figura 23 apresenta o esquema de funcionamento citado anteriormente.

Este método reúne todos os benefícios de métodos baseados em Path Tracing com os pontos fortes de métodos baseados em Photon Mapping, sendo capaz de sintetizar de maneira robusta e eficiente cenas com diversas condições de iluminação, múltiplos reflexos, ampla diversidade de materiais especulares, mesmo os que apresentam desfoque, caminhos SDS e GDG, etc.

O fato de incorporar estimativa de densidade no cálculo da iluminação dos pixels, assim como em métodos baseados em Photon Mapping, resulta na introdução de erro no resultado, tornando o método *biased*. Porém foi demonstrado pelos autores que quanto mais amostras forem utilizadas, e quanto menor for o raio de busca na estimativa da densidade, menor será o erro introduzido, o que caracteriza o método como *consistente*. Além disso, o método só é eficiente em casos nos quais métodos baseados em Path Tracing ou métodos baseados em

Photon Mapping são eficientes, não tratando nenhum caso em que ambas as classes de métodos revelam suas fraquezas.

Figura 23 - Esquema de funcionamento do método *Vertex Connection and Merging*. A primeira coluna ilustra a geração de raios a partir da câmera e a partir das fontes luminosas. As colunas do meio sintetizam o funcionamento de métodos baseados em Path Tracing, que procuram conectar caminhos originados na câmera com caminhos originados nas luzes. A última coluna exemplifica o funcionamento de métodos baseados em Photon Mapping. O método VCM combina os anteriores.

Hachisuka et al. (2012)

2.7.10 Resumo Comparativo dos Métodos de Iluminação Global

A fim de sintetizar as características de todos os métodos de Iluminação Global apresentados anteriormente, facilitando a visualização e comparação entre eles, um quadro comparativo é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Quadro comparativo entre vários métodos de Iluminação Global.

Método/Ano	Caso Geral	Pontos Fortes	Pontos Fracos	Limitações	Avaliado*
Ray Tracing (RT/1980)	dDM*E, AM*E	dDM*E, AM*E	Não é um método de Iluminação Global.	LS(S D+)*E, L(S D+)(S D+)*E, LDG+E, ADS+E	Não
Distributed Ray Tracing (DRT/1984)	LD?S*E	LDG*E, AS*E	Não é um método de Iluminação Global.	LS(S D+)*E, L(S D)*DD(S D)*E	Não
Path Tracing (PT/1986)	L(S D)*E	LD+S*E	aS+D+E	dS+D+E	<u>Sim</u>
Light Tracing (LT/1993)	L(S D)*DE	LS+DE	Necessita de elevada taxa de amostragem	L(S D)*SE	<u>Sim</u>
Bidirectional Path Tracing (BPT/1993,95)	L(S D)*E	Fontes de luz dentro de objetos semi-abertos	AS+DS+E	dS+DS+E	<u>Sim</u>
Photon Mapping (PM/1995)	L(S D)*E	LS+DE (caustics)	Qualidade é limitada pela memória.	Método <i>biased</i> . Número máximo de fótons é limitado pela memória.	Não
Metropolis Light Transport (MLT/1997)	L(S D)*E	Fontes de luz muito difíceis de serem encontradas.	L(S D G+)*E	Mesmo que BPT	<u>Sim</u>
Primary Sample Space MLT (PSSMLT/2002)	L(S D)*E	Ligeira melhora sobre MLT	L(S D G+)*E	Mesmo que MLT	Não
Progressive Photon Mapping (PPM/2008)	L(S D)*E	LS+DE, LS+DS+E (reflexo de caustics)	LG+DG+E, aS+DS+E	Método <i>biased</i> .	<u>Sim</u>
Stochastic Progressive Photon Mapping (SPPM/2009)	L(S D)*E	LG+DG+E (múltiplas interações com desfoque)	L(S D)*GG+S*E (superfícies com leve desfoque refletindo uma a outra)	Método <i>biased</i> .	Não
Vertex Connection and Merging (VCM/2012)	L(S D)*E	Reúne pontos fortes do BPT e SPPM	Mesmos que SPPM	Método <i>biased</i> .	<u>Sim</u>

* A coluna *Avaliado* informa se o método de Iluminação Global foi utilizado nos experimentos deste estudo. As justificativas para escolha dos métodos avaliados estão descritas no Capítulo 4.

2.8 Sintetizadores Existentes

2.8.1 Sintetizadores Comerciais

A Tabela 3 apresenta os principais sintetizadores comerciais utilizados na indústria de Animação e Efeitos Visuais. É importante ressaltar que o primeiro longa-metragem sintetizado exclusivamente por métodos de Iluminação Global foi produzido no ano de 2006, ou seja, 20 anos após a formulação da *Equação do Transporte de Luz* – Kajiya (1986).

Tabela 3 - Principais sintetizadores comerciais para Animação e Efeitos Visuais.

Sintetizador e Empresa	Detalhes
Renderman™ Pixar®	1989: Lançamento 2002: Inclusão de Ray Tracing 2005: Photon Mapping 2013: Inclusão de Path Tracing 2014: API para implementação de métodos; BPT e VCM inclusos
V-Ray™ Chaos Group®	2002: Lançamento: Ray Tracing, Path Tracing e Photon Mapping 2006: Importance Sampling, Melhorias Photon Mapping
Arnold™ Solid Angle®	1997: Início do Desenvolvimento, Path Tracing 2004: Adotado pela empresa <i>Sony Pictures Imageworks</i> (SPI) 2006: Primeiro longa-metragem sintetizado inteiramente por métodos de Iluminação Global é lançado: <i>Monster House</i>, da SPI 2010: Release para grandes estúdios 2013: Release pública
Mental Ray™ NVIDIA®	Sintetizador padrão que vem incluso em pacotes de modelagem 3D, como o Maya™ da empresa Autodesk®.
Mantra™ Side FX®	Sintetizador padrão do software Houdini™, produzido pela empresa Side FX®, baseado em Ray Tracing e Path Tracing.
Modo™ The Foundry®	Lançado entre os anos de 2004 e 2005, totalmente baseado em Ray Tracing, implementa alguns métodos de Iluminação Global, como Photon Mapping.
Maxwell™	Lançado em 2004, este sintetizador é puramente baseado em Ray Tracing e implementa variações do método MLT.
Corona™	Desenvolvimento com início em 2009, lançamento comercial em 2015, inclui os métodos PT, BPT e VCM.
3Delight™	2000: Lançamento, Ray Tracing e Photon Mapping 2014: inclusão do método Path Tracing

2.8.2 Sintetizadores de Código Aberto

Existem no mercado alguns sintetizadores de código aberto, portanto gratuitos, com o propósito principal de fornecer resultados de alta qualidade para usuários iniciantes e estudantes, com emprego principal na produção de trabalhos sem fins comerciais. Muitos destes sintetizadores estão disponíveis juntamente com o pacote *Blender* de modelagem 3D, sendo o principal pacote open source para esta finalidade. Alguns exemplos de sintetizadores são: *LuxRender* (baseado do PBRT, detalhado na próxima Seção), *YafaRay*, *POV-Ray* e *SmallPT*.

Cabe destacar que o sintetizador *SmallPT* é apenas uma demonstração da implementação do método Path Tracing, cujo código fonte consiste exclusivamente de 99 linhas de código em C++, incluindo a descrição da cena virtual e seus materiais, além da implementação do Traçador de Raios e do método PT para sua síntese. Como o desafio proposto pelo autor foi o de produzir o menor código possível e não o mais eficiente, o sintetizador é extremamente lento e ineficiente, mas ainda assim converge para a solução correta se uma taxa de super-amostragem for empregada.

2.8.3 Sintetizadores para Fins Acadêmicos

Existem ainda sintetizadores também de código aberto, porém com fins acadêmicos, ou seja, que trazem implementações de referência de alguns métodos de Iluminação Global. Os principais são detalhados a seguir.

PBRT, desenvolvido por Pharr e Humphreys (2010), em sua última versão disponível, 2.0, contém a implementação dos métodos PT, PM e MLT. Não possui uma interface gráfica, sendo operado totalmente por linhas de comando. Possui um formato de cena virtual específico e textual, facilmente editável, e é compatível com diversos formatos de arquivos de geometria e imagem existentes. Possui extensa documentação disponível.

Mitsuba Renderer, desenvolvido por Jakob (2010), contém a implementação de diversos métodos de Iluminação Global: PT, LT, BPT, MLT, PSSMLT, PM, PPM, SPPM, além de algumas variações deste métodos. Possui uma interface gráfica completa e de fácil utilização, sendo compatível com diversos formatos de arquivos

de geometria e imagem existentes. Além disso, possui ampla documentação disponível.

GIRT – *Global Illumination Rendering Toolkit* – é sintetizador desenvolvido em 2013 pelo Departamento de Computação Gráfica e Interatividade (DCGI) da Universidade Técnica da República Tcheca (CVUT). Possui a implementação dos métodos PT, BPT, LT, PM e VCM. É compatível com o formato de arquivo OBJ para informação de geometria, e possui um formato específico para definição da cena virtual. Sua interface é simples. Possui pouca documentação disponível, essencialmente em Hub (2013).

SmallVCM é um sintetizador desenvolvido por Georgiev et al. (2012) sendo uma implementação de referência do método VCM, possuindo inspiração no *SmallPT* – detalhado anteriormente – contendo ainda os métodos PT, LT, BPT, BPM (*Bidirectional Photon Mapping*, não abordado neste estudo) e PPM. Não possui interface gráfica e não oferece suporte a especificações de cenas virtuais em arquivo: estas devem ser programadas diretamente no código fonte do sintetizador e compiladas junto com ele, o que torna seu emprego muito limitado na prática.

2.8.4 Sintetizadores Proprietários

É sabido que alguns estúdios de Animação e Efeitos Visuais possuem sintetizadores proprietários que implementam métodos de Iluminação Global, desenvolvidos internamente pelas próprias equipes de P&D, não estando disponíveis comercialmente. Alguns exemplos são apresentados a seguir.

- O estúdio *Sony Pictures Imageworks* possui uma implementação proprietária baseada no sintetizador ArnoldTM da SolidAngle[®].
- A empresa *Weta Digital* divulga em seu portal na Internet informações sobre o desenvolvimento e utilização de um sintetizador denominado *Manuka*, alegando implementar métodos de Iluminação Global.
- A *DreamWorks Animation*, sem fornecer nenhum detalhe adicional, revelou que utiliza um sintetizador denominado *Moonlight*, dentro de um pacote de aplicativos chamado *Torch*, ambos de implementação proprietária da empresa.
- A *Blue Sky Studios* também alega utilizar um sintetizador proprietário. Não há muitas informações disponíveis sobre o sintetizador, é sabido apenas que ele faz parte de um pacote interno de aplicativos denominado *CGI Studio*TM.

2.9 Paralelismo e Máquinas em Rede

Visando a utilização máxima dos recursos computacionais a fim de sintetizar imagens a partir de uma cena virtual, satisfazendo o nível de qualidade desejado pelo usuário, no menor tempo possível, faz-se necessário a utilização de todos os processadores e todas as máquinas que estiverem disponíveis para tal tarefa. É comum que estúdios e produtoras na área de Computação Gráfica e Efeitos Visuais tenham a sua disposição um parque de computadores – comumente denominado *renderfarm* – destinado exclusivamente à etapa de síntese de imagens.

2.9.1 Paralelismo

Tipicamente a resolução das imagens geradas deve corresponder à resolução dos dispositivos de reprodução de vídeo. Padrões atuais de televisão digital já impõe uma resolução, no mínimo, *HD* – High Definition – contendo 1280×720 pixels, de acordo com a norma ABNT NBR 15602:2008, totalizando aproximadamente 1 milhão de pixels. Resoluções de salas de cinema como o IMAX, e padrões mais recentes de televisão presumem resoluções ainda maiores, como os padrões *4K* e *8K*, que determinam 3840×2160 e 7680×4320 pixels, totalizando cerca de 8.3 e 33.2 milhões de pixels por imagem, respectivamente.

Métodos baseados em traçadores de raios são, por natureza, facilmente paralelizáveis. Basta considerar que cada raio poder ser traçado e calculado independentemente por um processador disponível na máquina. Um estudo profundo sobre paralelismo foi feito por Netto (1997). Entretanto algoritmos que procuram aumentar a eficiência do paralelismo não disparam um raio por processador disponível, ao invés disso tentam disparar um conjunto de raios muito próximos entre si a fim de aumentar a coerência entre estes, supondo que raios vizinhos irão, em muitos casos, ser rebatidos pelos mesmos objetos e não apresentarão variações bruscas de intensidade luminosa.

É comum dividir a imagem a ser sintetizada em pequenos subconjuntos, blocos tipicamente de 16×16 , 32×32 , até 64×64 pixels. Desta maneira, imagens no padrão HD são divididas, na média, em 900 blocos, enquanto que imagens no padrão 4K são divididas em 8100 blocos. Nos casos do *PBRT* e *Mitsuba Renderer* –

sintetizadores de código aberto com fins educacionais e acadêmicos – o número padrão de blocos é 16×16 e 32×32 respectivamente. No caso do Arnold™ – sintetizador comercial amplamente utilizado na indústria de Efeitos Visuais – o número padrão de blocos é 64×64 . A Figura 24 apresenta um gráfico medindo a eficiência do PBRT.

Figura 24 - Eficiência do sintetizador PBRT em uma cena simples.

A eficiência foi medida em um computador com 24 processadores ao sintetizar diversas vezes a cena Cornell Box Difusa, detalhada no próximo Capítulo, e com número elevado de amostras por pixel.

É importante observar que o número de blocos é muito maior que o número de núcleos (ou processadores) disponíveis nos computadores atuais – cerca de 32 nos mais modernos. Isto é proposital pois podem haver regiões da imagem cujo cálculo pode demorar muitas vezes a mais do que o cálculo em outras regiões. Se a imagem fosse dividida num número de blocos igual ao número de processadores disponíveis, alguns núcleos ficariam ociosos após finalizar o cálculo em regiões simples, aguardando o término do cálculo das regiões mais complexas. Esta abordagem não utilizaria de maneira eficiente os processadores disponíveis. Ter um número de blocos muito maior que o número de núcleos garante uma melhor distribuição do trabalho entre estes, minimizando a chance de alguns ficarem ociosos em boa parte do processo de síntese da imagem.

2.9.2 Máquinas em Rede

Analogamente à ideia do paralelismo dentro em uma máquina, em que divide uma imagem em subconjuntos de pixels e aloca um processador para calcular um

subconjunto por vez, existe a ideia de dividir a síntese de todas as imagens do filme entre diversos computadores em rede. De acordo com informações publicadas por Kristensen (2013), o número de imagens que precisaram ser sintetizadas para a produção do curta-metragem *Big Buck Bunny*, em 2013, de duração aproximada de 10 minutos, nas versões de 24 a 60 quadros por segundo, foi de 79781 quadros.

Um parque de cerca de 80 mil computadores disponíveis para a síntese de imagens é algo que não faz parte da realidade atual de estúdios e produtoras de computação gráfica e efeitos visuais. De fato, o número é muito menor do que este. Alguns exemplos de empresas especializadas em síntese de imagens a partir de cenas virtuais, e que oferecem serviços simultaneamente para diversos estúdios, são a Foxrenderfarm[®], Rebus Farm[®] e Zync Render[®]. De acordo com informações disponíveis em seus portais na Internet, a empresa Foxrenderfarm[®] conta atualmente com 2000 computadores, enquanto que a empresa Rebus Farm[®] conta com 3000. Já a empresa Zync Render[®] não divulga em seu portal na Internet o número total de computadores em seu parque de máquinas, divulga apenas que é possível contratar no máximo 200 computadores simultaneamente por cliente. A maioria dos estúdios de animação e efeitos visuais não divulga o número de máquinas disponíveis em suas renderfarms, provavelmente por questões estratégicas de negócio e competitividade, mas pode-se supor que seja igual ou inferior ao número disponível nas empresas oferecedoras deste serviço.

Em todo caso, nota-se novamente que o número de imagens a serem sintetizadas é tipicamente muito maior que o número de computadores disponíveis. Cabe então distribuir todos os quadros a serem sintetizados entre os computadores alocados para esta tarefa. Uma maneira eficiente de se fazer isto é sob demanda, em que aloca-se inicialmente uma imagem a ser sintetizada em cada computador disponível e, à medida que cada computador conclui a síntese do quadro, uma nova tarefa – mais uma imagem – é designada ao computador que já terminou a anterior. Isto garante um bom balanço, similarmente ao paralelismo da síntese de imagens dentro de um computador com diversos núcleos, pois quadros diferentes podem apresentar complexidades distintas no cálculo de sua geração, exigindo muito mais esforço computacional que outros.

Existem no mercado diversos softwares gerenciadores de fila de tarefas específicos para o caso de síntese de imagens. Alguns exemplos atuais são:

Deadline™ da empresa Thinkbox Software®, Royal Render™ da empresa Binary Alchemy®, Tractor™ da empresa Pixar® e Backburner™ da empresa Autodesk®.

2.10 Plataformas

Todos os sintetizadores de hoje se beneficiam da capacidade plena de processamento da CPU, e alguns utilizam ainda o processamento fornecido pela GPU caso esta atenda às especificações exigidas. Porém algumas plataformas recentes prometem entregar maior poder de processamento com foco em melhorar o desempenho de métodos de Iluminação Global.

Pode-se citar o co-processador da Intel® denominado Xeon Phi™. Segundo informações do fabricante, este equipamento foi desenvolvido especificamente para computação de alto desempenho, podendo ser empregado para aceleração de métodos de Iluminação Global, entregando a performance de 1 Tera FLOPS. Seu tamanho equivale ao de uma placa PCIe atual.

Outro equipamento de destaque é o NVIDIA Visual Computing Appliance (VCA), sendo composto por 8 placas de vídeo de última geração, possuindo mais de 23 mil núcleos, 256 GB de memória RAM, sendo do tamanho de um gabinete comum atual.

3 CENAS DE TESTE

A fim de se verificar o comportamento e desempenho dos métodos de Iluminação Global, faz-se necessário a utilização de casos de teste que sejam capazes de abordar os aspectos os quais se deseja analisar. Dentro da área de Síntese de Imagens, os campos de pesquisa são inúmeros, sendo que os que mais atraem interesse até hoje são:

- Algoritmos de intersecção de raios com objetos;
- Estruturas de aceleração e classificação de objetos em hierarquias;
- Otimizações em cenas com elevada quantidade de objetos;
- Otimizações em cenas com elevada quantidade de fontes luminosas;
- Otimizações de acesso a dispositivos de armazenamento;
- Pré-processamento de geometria e texturas;
- Meios heterogêneos, efeitos atmosféricos, luzes volumétricas, fumaça;
- Simulação da estrutura da pele;
- Cenas com características específicas do transporte de luz;
- Cenas com fontes luminosas muito difíceis de serem encontradas;
- Programação de *shaders*, que descrevem comportamento de BSDFs;

Dentre os campos apresentados anteriormente, no presente trabalho optou-se pelo foco na síntese de imagens de cenas com características específicas do transporte de luz, ou seja, nas quais estejam presentes efeitos interessantes como *caustics*, BSDFs realistas do tipo reflexivos e refrativos, tanto os perfeitamente especulares quanto os que apresentam desfoque, principalmente em cenas que apresentam uma combinação destes efeitos, e foco em cenas cujas fontes luminosas são muito difíceis de serem encontradas. Ambas as áreas de interesse foram destacadas na listagem anterior.

Tendo em vista esta abordagem, procurou-se elaborar casos de testes contendo uma ampla gama de situações de iluminação e BSDFs, contando inclusive com variações na dificuldade em se encontrar as fontes luminosas. Foi tomado o cuidado de se produzir cenas de complexidade variável e gradual, indo de cenas muito simples a muito complexas, do ponto de vista da iluminação e das BSDFs empregadas. Desta maneira foram propostos 10 casos de estudo que utilizam diversos tipos de fontes luminosas e empregam várias combinações de BSDFs,

gerando efeitos interessantes, que acredita-se cobrir uma ampla gama de situações reais. As cenas são descritas a seguir nas próximas seções.

A fim de detalhar as cenas de teste utilizadas neste trabalho, as seguintes características foram levantadas em cada caso: Geometria, BSDFs, Iluminação, Abrangência, Complexidade, Motivação, Compatibilidade e Fonte. A explicação de cada termo está a seguir.

Geometria. O número de objetos e a quantidade total de primitivos na cena são detalhados nesta categoria. Cada objeto pode ser composto de múltiplos primitivos, sendo que os materiais são associados por objeto, e não por primitivos. Um primitivo é um elemento geométrico básico, como um triângulo ou uma esfera.

BSDFs. Aqui são detalhados os tipos de materiais associados aos objetos da cena, podendo ser: perfeitamente difuso, perfeitamente reflexivo, perfeitamente refrativo, reflexivo com desfoque (*glossy*), refrativo com desfoque (*glossy*) e tipo *phong*, que é uma combinação entre perfeitamente difuso e reflexivo com desfoque.

Iluminação. Esta classificação descreve o modelo de iluminação da cena e tipos de fontes luminosas empregadas: área, direcional, mapa ambiente ou pontual.

Abrangência. Aqui são descritos os caminhos de luz presentes na cena, segundo a nomenclatura estendida proposta na Tabela 1, bem como a dificuldade de se construir caminhos válidos entre a câmera e as fontes luminosas, ou seja, o quão escondidas estão as fontes de luz em relação aos objetos visíveis pela câmera.

Complexidade. As cenas são classificadas de acordo com cinco níveis de complexidade: muito baixa, baixa, moderada, moderada a alta e alta. A classificação é atribuída analisando-se os caminhos de luz presentes na cena e a dificuldade de se encontrar as fontes luminosas. A complexidade aumenta em cenas com efeito do tipo *caustics*, materiais do tipo especular e *glossy*, que contenham uma combinação destes efeitos, bem como quanto mais escondidas estão as fontes de luz.

Motivação. Neste tópico são apresentados o motivo e argumentações para a escolha de cada cena de teste neste trabalho, ressaltando aspectos particulares que se pretende observar com a execução de cada método, geralmente em função dos caminhos de luz presentes na cena.

Compatibilidade. Revelam-se os métodos de Iluminação Global que devem ou não convergir para a solução correta do equilíbrio da distribuição de luz, e uma breve menção ao tipo de erro esperado, bem como expectativas de resultados.

Fonte. Aqui é detalhada a fonte original de autoria da cena, caso exista.

3.1 Cornell Box Difusa

Figura 25 - Cena de teste Cornell Box Difusa.

Geometria: 8 objetos, 38 triângulos no total.

BSDFs: esta cena contém apenas materiais perfeitamente difusos, de apenas 3 cores distintas: uma parede lateral da cor verde, outra parede lateral da cor vermelha, e as demais paredes de uma cor neutra, próxima ao branco. Os dois objetos no interior do cenário são da mesma cor neutra que as paredes.

Iluminação: a cena é iluminada por uma

fonte de luz do tipo área, interna ao cenário, de tamanho médio.

Abrangência: é uma cena que possui exclusivamente caminhos do tipo AD*E (vide Tabela 1). A fonte luminosa é visível praticamente de qualquer ponto na cena.

Complexidade: cena de complexidade muito baixa, por conter um número muito pequeno de polígonos, uma fonte luminosa muito fácil de ser encontrada, e apenas materiais difusos, não gerando nenhum efeito do tipo *caustics*.

Motivação: o intuito da utilização desta cena é testar métodos de Iluminação Global em uma cena muito simples, com dois objetivos principais: primeiro, observar se cada método converge para a solução correta e, segundo, verificar o peso adicional imposto pelas lógicas de construção de caminhos de métodos mais recentes, sendo que nesta cena praticamente todo caminho gerado irá conectar a câmera à fonte luminosa, e tais lógicas acarretarão apenas em custo computacional desnecessário.

Compatibilidade: todos os métodos de Iluminação Global abordados neste trabalho devem ser capazes de convergir para a solução correta do equilíbrio da distribuição de luz desta cena.

Fonte: cena disponível para download juntamente com a versão 0.5.0 do Mitsuba, sendo uma reconstrução de um dos experimentos originais de Cornell Box.

3.2 Cornell Box Espelhada

Figura 26 - Cena de teste Cornell Box Espelhada.

Geometria: 8 objetos totalizando 38 triângulos.

BSDFs: similarmente à cena anterior, contém materiais perfeitamente difusos, porém um dos objetos no interior do cenário é perfeitamente espelhado.

Iluminação: cena iluminada por uma fonte de luz do tipo área, interna ao cenário, de tamanho médio e no formato aproximadamente quadrangular.

Abrangência: é uma cena que possui

caminhos do tipo AD^*E , $ASD+E$, $AD+SE$, não apresentando interações na forma $S+$. A fonte luminosa é visível praticamente de qualquer ponto na cena.

Complexidade: cena de complexidade baixa, por conter um número muito pequeno de polígonos, uma fonte luminosa muito fácil de ser encontrada, e apenas materiais difusos e um perfeitamente especular. O efeito do tipo *caustics* observado é portanto de baixa complexidade.

Motivação: a utilização desta cena foi motivada pelo fato de estarem disponíveis medições reais da luminosidade em cada ponto, ou seja, é possível comparar as imagens sintetizadas com uma fotografia de referência, obtida através da montagem no mundo real. Além disso, esta cena é um pouco mais interessante que a anterior pois começa a explorar o comportamento da distribuição da luz na presença de superfícies reflexivas, ainda que de maneira simples.

Compatibilidade: todos os métodos de Iluminação Global abordados neste trabalho, exceto o método Light Tracing, devem ser capazes de convergir para a solução correta do equilíbrio da distribuição de luz desta cena.

Fonte: cena reconstruída tomando-se como base a cena anterior, porém utilizando-se medições reais fornecidos pela Universidade de Cornell, no trabalho de Pattanaik et al. (1997).

3.3 Cornell Box Glossy

Figura 27 - Cena de teste Cornell Box Glossy.

Geometria: 8 objetos totalizando 38 triângulos.

BSDFs: configuração semelhante à primeira cena, contendo materiais perfeitamente difusos, porém os objetos no interior do cenário possuem materiais do tipo *glossy*, ou seja, reflexivos com desfoque.

Iluminação: cena iluminada por uma fonte de luz do tipo área, interna ao cenário, de tamanho médio.

Abrangência: é uma cena que possui caminhos do tipo $A(D|G)^*E$, apresentando algumas interações na forma $G+$. A fonte luminosa é visível praticamente de qualquer ponto na cena.

Complexidade: cena de complexidade moderada, por conter um número muito pequeno de polígonos, uma fonte luminosa muito fácil de ser encontrada, porém com objetos cujo reflexo é do tipo *glossy*, apresentando interações do tipo $G+$. O efeito do tipo *caustics* é de baixa complexidade, produzido apenas por reflexos de superfícies planas, porém o resultado da síntese da imagem através de alguns métodos pode apresentar ruído difícil de ser eliminado de maneira eficiente.

Motivação: apesar de ainda não ser uma cena de complexidade alta, alguns caminhos não triviais da propagação de luz – tipo LDG, LGD e interações GG – estão presentes, permitindo observar quais métodos conseguem tratá-los de maneira eficaz.

Compatibilidade: todos os métodos de Iluminação Global abordados neste trabalho, inclusive o Light Tracing por não envolver superfícies perfeitamente especulares, devem ser capazes de convergir para a solução correta do equilíbrio da distribuição de luz desta cena.

Fonte: cena construída a partir da cena Cornell Box Difusa, porém alterando-se a BSDF dos objetos internos para o tipo reflexo *glossy*.

3.4 Caixa com Esferas

Figura 28 - Cena de teste Caixa com Esferas.

Geometria: 8 objetos totalizando 14 triângulos e 2 esferas.

BSDFs: configuração semelhante às cenas anteriores, contendo materiais perfeitamente difusos nas paredes e teto, material com reflexo tipo *glossy* no chão, e objetos no interior com materiais dos tipos perfeitamente reflexivo e refrativo.

Iluminação: cena iluminada por uma fonte de luz do tipo direcional, simulando a incidência da luz do Sol no cenário.

Abrangência: é uma cena que possui caminhos do tipo $d(D|G|S)+E$, apresentando interações na forma $S+$, GS e SG , produzindo um *caustics* detalhado na parede vermelha, porém o reflexo deste *caustics* na esfera espelhada é quase imperceptível. A fonte luminosa não é difícil de ser encontrada.

Complexidade: cena de complexidade alta, apesar de conter um número muito pequeno de polígonos e uma fonte luminosa simples e fácil de ser encontrada, apresenta diversas interações entre materiais do tipo *glossy* e especular muito difíceis de serem capturadas pelos métodos de Iluminação Global.

Motivação: exercitar os métodos de Iluminação Global em caminhos de propagação de luz difíceis de serem abordados na maioria deles, constatando quais destes caminhos de fato não são capturados por cada método.

Compatibilidade: métodos do tipo Path Tracing devem falhar ao capturar a correta distribuição de luz nesta cena, enquanto métodos baseados em Estimativa de Densidade – os quais utilizam Mapas de Fótons – devem ser capazes de englobar todos os tipos de rebatimentos de luz. Porém o método Bidirectional Path Tracing deve apresentar bons resultados, falhando apenas em capturar o reflexo do *caustics*, fenômeno que nesta cena é quase imperceptível.

Fonte: esta cena foi reconstruída a partir de uma cena de teste do método VCM, de autoria de Georgiev et al. (2012), a fim de demonstrar a eficiência deste método.

3.5 Dragão Especular

Figura 29 - Cena de teste Dragão Especular.

Geometria: 2 objetos totalizando 203.032 triângulos. O objeto do dragão possui 202.520 triângulos.

BSDFs: o material do dragão é um alaranjado perfeitamente refrativo e o material do chão é perfeitamente difuso de cor aproximadamente branca, a fim de capturar melhor o *caustics* produzido.

Iluminação: cena iluminada por uma fonte de luz do tipo mapa ambiente, simulando um dia ensolarado.

Abrangência: é uma cena que possui predominantemente caminhos do tipo aDE e aSSDE, na presença de uma luz tipo mapa ambiente.

Complexidade: cena de complexidade moderada, pois o *caustics* é produzido através de um objeto complexo, o que supostamente exige o emprego de uma alta taxa de amostragem para ser produzido com baixo ruído. Entretanto, o efeito de *caustics* na presença de uma luz ambiente torna-se borrado, às vezes quase imperceptível, permitindo portanto utilizar taxas de amostragem mais baixas.

Motivação: esta cena foi criada para descobrir se altas taxas de amostragem são realmente necessárias para se produzir o efeito de *caustics* suficientemente detalhado, sendo que a condição de iluminação é de uma luz tipo mapa ambiente.

Compatibilidade: todos os métodos de Iluminação Global abordados neste trabalho – exceto o Light Tracing devido à cena possuir materiais do tipo perfeitamente especulares – devem ser capazes de convergir para a solução correta do equilíbrio da distribuição de luz desta cena. Métodos baseados em Path Tracing devem gerar resultados com ruído perceptível de alta frequência, e métodos baseados em Mapas de Fótons devem gerar resultados com ruído imperceptível de baixa frequência. Métodos baseados em MLT também devem produzir bons resultados.

Fonte: cena elaborada pelo autor deste trabalho, utilizando o modelo do dragão disponibilizado publicamente pela Stanford 3D Scanning Repository (2015).

3.6 Dragão Glossy

Figura 30 - Cena de teste Dragão Glossy.

Geometria: 3 objetos totalizando 203.044 triângulos. O objeto do dragão possui 202.520 triângulos.

BSDFs: a cena é composta de três materiais distintos: o material do dragão é um alaranjado refrativo com desfoque (*glossy*), o material do cubo é reflexivo com desfoque (*glossy*) e o material do chão é perfeitamente difuso de cor

aproximadamente branca, a fim de capturar melhor o *caustics* e reflexos.

Iluminação: cena iluminada por uma fonte de luz do tipo direcional, simulando a incidência da luz do Sol no cenário.

Abrangência: é uma cena que possui caminhos do tipo $d(D|G)^*E$, apresentando especialmente interações GGDG – reflexo desfocado de *caustics* desfocado – produzindo *caustics* borrado no chão e seu reflexo borrado pelo cubo. A fonte luminosa é muito fácil de ser encontrada.

Complexidade: cena de complexidade alta, não pelo aumento considerável no número de polígonos, mas sim pela presença dominante de caminhos com múltiplas interações do tipo *glossy*, o que exige uma alta taxa de amostragem na maioria dos métodos para se eliminar o ruído.

Motivação: considerada uma cena de elevado desafio inclusive para os métodos mais recentes, o objetivo de seu emprego neste trabalho é revelar os pontos fracos e limitações da maioria dos métodos de Iluminação Global existentes.

Compatibilidade: todos os métodos de Iluminação Global abordados neste trabalho – inclusive o Light Tracing devido à cena possuir materiais do tipo *glossy* e não perfeitamente especulares – devem ser capazes de convergir para a solução correta do equilíbrio da distribuição de luz desta cena, porém a maioria dos métodos deve gerar resultados com altos níveis de ruído.

Fonte: cena elaborada pelo autor deste trabalho, utilizando o modelo do dragão disponibilizado publicamente pela Stanford 3D Scanning Repository (2015).

3.7 Exterior da Piscina

Figura 31 - Cena de teste Exterior da Piscina.

Geometria: 60 objetos totalizando 2.095.134 triângulos. A superfície da água possui 1.884.160 triângulos.

BSDFs: a cena é composta por materiais: perfeitamente especular, sendo a superfície da piscina e o vidro das janelas à direita, perfeitamente difuso, sendo os chinelos e o interior azul da piscina, e tipo *phong*, todos os

demais materiais, incluindo o chão, a toalha, a escada de alumínio, etc.

Iluminação: cena iluminada por uma fonte de luz do tipo mapa ambiente, sendo uma fotografia do céu ensolarado de uma dia sem nuvens.

Abrangência: esta cena possui predominantemente caminhos do tipo LSDSE, do interior da piscina, caminhos LDE na iluminação geral do ambiente e caminhos LSDE/LDSE do reflexo causado pelas janelas de vidro à direita.

Complexidade: cena de complexidade alta, devido não apenas ao grande número de polígonos, mas sim à existência dominante de caminhos da forma SDS na presença de uma fonte luminosa do tipo mapa ambiente, dificultando ainda mais a síntese detalhada e livre de ruído do *caustics* no fundo da piscina.

Motivação: cenas contendo superfícies líquidas através das quais é possível ver o fundo do recipiente, constituem um grande desafio para qualquer método de Iluminação Global pois exigem muito esforço computacional para amostrar o *caustics* em taxas suficientes para que o ruído seja eliminado.

Compatibilidade: nesta cena apenas o método Light Tracing irá falhar totalmente pois não conseguirá sintetizar nenhum ponto da superfície da piscina. Métodos baseados em Path Tracing deverão produzir resultados ruins pois não são eficientes na presença de caminhos do tipo SDS. Métodos baseados em Mapa de Fótons devem produzir bons resultados.

Fonte: cena criada e disponibilizada por Vorba et al. (2014), ligeiramente simplificada pelo autor deste trabalho enfatizando a visualização dos caminhos SDS.

3.8 Interior da Piscina

Figura 32 - Cena de teste Interior da Piscina.

Geometria: 3 objetos totalizando 1.884.316 triângulos. A superfície da água possui 1.884.160 triângulos.

BSDFs: a cena contém apenas 2 materiais: a superfície da água é perfeitamente especular, e o fundo e laterais da piscina são perfeitamente difusos.

Iluminação: cena iluminada por uma

fonte de luz do tipo direcional, simulando a incidência da luz do Sol.

Abrangência: esta cena possui principalmente caminhos do tipo LSD+E, sendo que caminhos LSDE são responsáveis pelo efeito de *caustics* predominante.

Complexidade: apesar da configuração simples, esta cena é considerada de complexidade moderada, devido ao efeito de *caustics* extremamente detalhado e predominantemente visível. A complexidade aumentaria caso a fonte luminosa fosse do tipo mapa ambiente, ou se a piscina estivesse sendo vista de fora da água (através de caminhos do tipo SDS).

Motivação: esta cena é um caso particular em que o método Light Tracing se sobressai, ou seja, a visualização de *caustics* puro. O objetivo é revelar quais outros métodos conseguem convergir para a solução correta do equilíbrio da distribuição de luz, medindo a eficiência com relação ao método Light Tracing.

Compatibilidade: nesta cena apenas o método Path Tracing irá falhar totalmente pois não conseguirá traçar nenhum caminho que conecte a câmera à fonte luminosa. Demais métodos baseados em Path Tracing deverão produzir resultados ruins com ruído de alta frequência, e métodos baseados em Mapa de Fótons devem produzir bons resultados pois o ruído de baixa frequência é menos perceptível no efeito de *caustics*.

Fonte: cena criada e disponibilizada por Vorba et al. (2014), alterada pelo autor deste trabalho, colocando a câmera dentro da piscina e embaixo da água, focando na visualização do efeito de *caustics*.

3.9 Quarto de Veach

Figura 33 - Cena de teste Quarto de Veach.

Geometria: 22 objetos totalizando 20.764 triângulos.

BSDFs: a maioria dos materiais da cena é perfeitamente difusa, com exceção do bule da esquerda, sendo do tipo reflexivo com desfoque, o bule da direita que é perfeitamente refrativo

(vidro), a maçaneta da porta que é reflexiva com desfoque e o chão que é uma mistura de perfeitamente difuso com perfeitamente reflexivo.

Iluminação: cena iluminada por uma fonte de luz do tipo área, exterior ao cenário, simulando a iluminação vinda de outro quarto.

Abrangência: esta cena possui principalmente caminhos do tipo AD+E e AD+(S|G)E, sendo que a fonte luminosa é muito difícil de ser encontrada.

Complexidade: apesar de possuir objetos e materiais simples em sua maioria, sem nenhuma predominância de efeitos tipo *caustics*, esta cena é considerada de complexidade moderada a alta, devido à cena ser totalmente iluminada de maneira indireta e à grande dificuldade em se encontrar caminhos válidos que carreguem informação luminosa.

Motivação: o objetivo de se avaliar esta cena está na verificação da eficácia das estratégias de busca de caminhos válidos presentes em métodos baseados em MLT, versus algoritmos que não visam tais otimizações.

Compatibilidade: todos os métodos deverão ser capazes de sintetizar corretamente esta cena, ao custo de uma elevada taxa de amostragem. O método Light Tracing irá falhar apenas ao sintetizar o bule de vidro. Métodos baseados em MLT deverão convergir mais rapidamente a uma imagem livre de ruído. Métodos com estratégia bidirecional devem produzir melhores resultados do que métodos unidirecionais.

Fonte: cena criada por Lehtinen et al. (2013), sendo uma reprodução de uma cena clássica utilizada por Veach (1997) em sua tese de PhD. Segundo informações dos autores, a quantidade de luz que passa pela porta é de aproximadamente 0.1% da luz emitida no outro quarto.

3.10 Lafortune Bidirecional

Figura 34 - Cena de teste Lafortune Bidirecional.

Geometria: 5 objetos totalizando 886 triângulos.

BSDFs: cena predominantemente composta de materiais perfeitamente difusos, com exceção das luminárias cujo material é perfeitamente reflexivo. As cores empregadas são exatamente as mesmas da cena Cornell Box Difuso: verde, vermelha e branca.

Iluminação: cena iluminada por duas fontes de luz do tipo área, internas ao cenário e posicionadas no interior de luminárias, dificultando um pouco serem encontradas e fazendo com que a iluminação majoritária da cena seja indireta.

Abrangência: esta cena possui predominantemente caminhos do tipo aD+E e alguns caminhos aD+SE por causa do material espelhado das luminárias. As fontes luminosas apresentam moderada dificuldade de serem encontradas.

Complexidade: esta cena apresenta características gerais de complexidade baixa pois, apesar de haver alguma dificuldade em se encontrar as fontes luminosas, toda a configuração restante é simples. O material perfeitamente espelhado não chega a agravar a complexidade da cena.

Motivação: o emprego desta cena visa verificar a eficiência de métodos bidirecionais e métodos baseados em MLT, uma vez que a exploração puramente aleatória será ineficiente na maioria dos caminhos traçados.

Compatibilidade: todos os métodos deverão ser capazes de sintetizar corretamente esta cena, ao custo de uma elevada taxa de amostragem. O método Light Tracing irá falhar apenas ao sintetizar as luminárias, pois estas são perfeitamente reflexivas. Métodos com estratégia bidirecional ou baseados em MLT deverão se sobressair, convergindo mais rapidamente à correta distribuição do equilíbrio de luz na cena.

Fonte: cena criada pelo autor deste trabalho tendo inspiração em imagens produzidas por cenas clássicas criadas por Lafortune (1996) em sua tese de PhD.

3.11 Resumo Comparativo das Cenas de Teste

A Tabela 4 contém um resumo comparativo das cenas de teste, detalhando apenas as principais características de cada uma pertinentes a este estudo.

Tabela 4 - Quadro comparativo das cenas de teste.

Cena	BSDFs	Iluminação*	Abrangência	Complexidade*
1 Cornell Box Difuso	Perfeitamente difusos	★ Luz tipo área	AD*E	★
2 Cornell Box Espelhada	Perfeitamente difusos e reflexivos	★ Luz tipo área	AD*S?D*E	★★
3 Cornell Box Glossy	Perfeitamente difusos e reflexivos com desfoque	★ Luz tipo área	A(D G)+E	★★★
4 Caixa com Esferas	Perfeitamente difusos, reflexivos e refrativos, reflexivos com desfoque	★★ Luz tipo direcional	d(D G S)+E	★★★★★
5 Dragão Especular	Perfeitamente difusos e refrativos	★★★ Luz tipo mapa ambiente	aDE, aSSDE	★★★
6 Dragão Glossy	Perfeitamente difusos, reflexivos com desfoque, refrativos com desfoque	★ Luz tipo direcional	d(D G)+E, dGGDG?E	★★★★★
7 Exterior da Piscina	Perfeitamente difusos e refrativos, reflexivos com desfoque	★★★ Luz tipo mapa ambiente	aSDSE, a(D G)E, aSDE, aDSE	★★★★★
8 Interior da Piscina	Perfeitamente difusos e refrativos	★★ Luz tipo direcional	dSD+E	★★★
9 Quarto de Veach	Perfeitamente difusos e refrativos, reflexivos com desfoque	★★★★★ Luz tipo área	aD+E, aD+(S G)D?E	★★★★★
10 Lafortune Bidirecional	Perfeitamente difusos e reflexivos	★★★ Luz tipo área	aD+S?E	★★

* Número de estrelas varia de 1 a 5 indicando complexidade crescente. No caso de *Iluminação*, indica a dificuldade em se encontrar a fonte luminosa. No caso de *Complexidade*, indica a dificuldade geral da cena levando-se em conta todas as suas características.

4 EXPERIMENTOS

4.1 Determinação dos Métodos e do Sintetizador

Definidos os casos de teste, fez-se necessária também a determinação dos métodos de Iluminação Global a serem avaliados. Para auxiliar nesta escolha, foram verificadas as classificações dos métodos com relação a algumas características:

- **Métodos iniciados na câmera:** Nesta categoria encontra-se o método *PT*.
- **Métodos iniciados nas fontes de luz:** Aqui podem ser classificados o método *LT*, e métodos baseados em Mapa de Fótons: *PM*, *PPM* e *SPPM*.
- **Métodos bidirecionais:** O próprio método *BPT*, mas também os métodos *MLT*, *PSSMLT*, e *VCM*.
- **Métodos que tratam de fontes luminosas escondidas:** Especificamente apenas os métodos baseados em Metropolis Light Transport, ou seja, *MLT* e *PSSMLT*.
- **Métodos baseados na integração de caminhos ponto-a-ponto:** Aqui estão todos os métodos *unbiased*: *PT*, *LT*, *BPT*, *MLT* e *PSSMLT*.
- **Métodos baseados em estimativa de densidade:** Todos os métodos consistentes, porém *biased*: *PM*, *PPM*, *SPPM* e *VCM*.
- **Métodos híbridos:** métodos baseados na combinação de estratégias citadas anteriormente: somente o *VCM*.

Seguindo esta classificação, e tendo em vista as características de cada método apresentadas no Capítulo 2, pode-se restringir a escolha dos métodos de Iluminação Global para um conjunto que consiga contemplar todas as categorias anteriores. Desta maneira, os seguintes métodos foram escolhidos, e as justificativas estão a seguir.

- **Path Tracing:** método iniciado na câmera, *unbiased*.
- **Light Tracing:** método iniciado nas fontes de luz, *unbiased*.
- **Bidirectional Path Tracing:** método bidirecional, *unbiased*.
- **Metropolis Light Transport:** método bidirecional, *unbiased*, contendo otimizações em cenas cujas fontes luminosas são difíceis de serem descobertas.

- **Progressive Photon Mapping:** método iniciado na fonte de luz, baseado em estimativa de densidade, portanto *biased*.
- **Vertex Connection and Merging:** método bidirecional e híbrido, sendo uma combinação ponderada de acordo com pesos determinados usando Amostragem por Importância – ver Seção 2.5 – dos métodos PT, LT, BPT, PPM e BPM, sendo portanto *biased*.

Os métodos não abordados no estudo também possuem uma justificativa para tal. O *PSSMLT* é simplesmente uma pequena otimização do método *MLT*, então é suposto que ele produza resultados apenas um pouco melhores que o método base, que deve apresentar resultados muito melhores que todos os demais métodos em cenas cujas fontes luminosas sejam muito difíceis de serem encontradas. Com relação ao *PM*, este possui um sucessor equivalente, o *PPM* que, por ser de natureza progressiva, não possui restrições quanto ao número de fótons que pode ser empregado, portanto o último é preferível em relação ao primeiro. Porém entre o *PPM* e o *SPPM* o critério para a escolha foi ponderado apenas pelas implementações disponíveis, e justificado a seguir.

Quanto ao sintetizador escolhido, e com base nos métodos existentes, este trabalho optou pelo emprego do **Mitsuba Renderer**, desenvolvido por Jakob (2010), sendo um sintetizador de código aberto utilizado principalmente para fins acadêmicos, e que contém a implementação de diversos métodos de Iluminação Global: *PT*, *LT*, *BPT*, *MLT*, *PSSMLT*, *PM*, *PPM* e *SPPM*. Como ainda não havia uma implementação do método *VCM* disponível no *Mitsuba*, este foi implementado pelo autor do presente estudo, com detalhes apresentados a seguir neste Capítulo.

Quanto ao método *SPPM*, um problema constatado pelo autor deste trabalho, reportado ao desenvolvedor e ainda em aberto na data desta publicação¹, impede que este método possa ser empregado neste estudo. O *SPPM* apresenta uma grande vantagem em relação ao método anterior, o *PPM*, que é um melhor tratamento de casos com múltiplas interações do tipo G, principalmente na presença de luzes do tipo A, segundo a notação estendida de caminhos de luz, fazendo com que seu emprego fosse preferível ao *PPM*.

¹ <https://www.mitsuba-renderer.org/tracker/issues/311>

Além de conter a implementação da maioria dos métodos, o *Mitsuba* possui outros benefícios: uma interface de muito fácil utilização, uma ampla gama de tipos de fontes luminosas, objetos e BSDFs, uma linguagem muito intuitiva para se descrever as cenas virtuais, fornece informações detalhadas durante e após o processo de síntese das imagens, e possui suporte a formatos de arquivo muito populares do meio da Computação Gráfica, como OBJ e PLY para descrição geométrica e JPG, PNG, EXR e HDR como formato de imagens.

4.2 Métricas

A fim de se ter medidas da qualidade das imagens sintetizadas, optou-se pelo uso de algumas métricas existentes e previamente utilizadas para a mesma finalidade. Dado que o foco deste trabalho está na síntese de imagens no contexto da produção de conteúdo para as áreas de Animação e Efeitos Visuais, não há obrigatoriedade em se produzir imagens exatamente fiéis à realidade – mesmo porque o conteúdo a ser produzido muitas vezes não existe (ou não pode ser visto) no mundo real, como personagens fantásticos, efeitos luminosos simulando magia, efeitos sobrenaturais, etc. – bastando assim que elas sejam convincentes ao público-alvo e agradáveis ao olhar.

Desta maneira, duas métricas de qualidade perceptual foram empregadas: *Índice de Similaridade Estrutural*, *SSIM* de Wang et al. (2004) e a última versão disponível, 2.1.3, do *Previsor de Diferenças Visuais*, *HDR-VDP-2* de Mantiuk et al. (2011). Para efeito de comparação com as métricas perceptuais, o cálculo da raiz quadrada do erro quadrático médio, ou erro *RMS*, também foi empregado.

4.2.1 Erro RMS

O erro *RMS* é uma medida de desvio amplamente utilizada em diversas áreas que fazem uso de modelos ou medidas matemáticas: Astronomia, Economia, Química, Biologia, Estatística, etc. O seu cálculo presume a comparação entre a medida de uma amostra e uma medida de referência.

No contexto de comparação de imagens, o erro RMS total de uma imagem de teste é obtido calculando-se a média de todos os valores do erro RMS pixel a pixel

entre a imagem a se testar e a correspondente imagem de referência. A fórmula é apresentada a seguir, onde X é o valor do pixel p :

$$RMS = \sqrt{\frac{\sum_{p=1}^N (X_{t,p} - X_{r,p})^2}{N}}$$

No presente estudo, a fim de calcular esta métrica, foi utilizado o pacote gratuito de ferramentas gráficas *ImageMagick*, criando-se um simples script que recebe como entrada duas imagens quaisquer de mesmas dimensões e gera como saída o valor do erro RMS total entre elas.

4.2.2 SSIM: Índice de Similaridade Estrutural

O índice SSIM proposto por Wang et al. (2004) foi introduzido com o objetivo de mensurar a percepção da degradação de imagens originais – imagens de referência – após terem sido modificadas por algum processo, por exemplo, a codificação JPEG. No trabalho original, são demonstrados vários exemplos de comparação com o erro RMS, ressaltando casos em que o índice SSIM fornece uma medida de melhor qualidade do erro percebido. Este índice se mostrou também muito útil para verificação de resultados produzidos por métodos de Iluminação Global, de acordo com vários estudos apresentados no início do Capítulo 2.

O índice consiste em comparações bloco a bloco da imagem de teste com relação a imagem de referência. O cálculo geral segue a formulação:

$$SSIM(t, r) = \frac{(2\mu_t\mu_r + c_1)(2\sigma_{tr} + c_2)}{(\mu_t^2 + \mu_r^2 + c_1)(\sigma_t^2 + \sigma_r^2 + c_2)}$$

onde:

- t, r são blocos das imagens de teste e referência, por padrão 8x8;
- μ é a média dos valores no bloco;
- σ a variância dos valores no bloco;
- σ_{tr} é a covariância dos blocos t e r ;

- $c_1 = (k_1 L)^2$, $c_2 = (k_2 L)^2$ variáveis para estabilizar a divisão;
- L é a amplitude dos valores de cores (255 para 8 bits);
- $k_1 = 0.01$, $k_2 = 0.03$ são valores padrões destes índices.

Por padrão o cálculo do índice SSIM leva em consideração apenas a luminância das imagens comparadas, ignorando-se a cor. Este cálculo foi ligeiramente modificado neste trabalho para corresponder à média do índice obtido separadamente nos canais R, G e B. Tal alteração foi motivada para melhor abordar o rebatimento de luz entre superfícies de cores diferentes, efeito muito importante produzido por métodos de Iluminação Global. Um script na linguagem *Python* foi desenvolvido, aceitando como entrada duas imagens a serem comparadas, gerando como saída uma imagem codificada nas cores azul, verde e vermelha indicando valores do índice SSIM pixel a pixel, além de uma nota geral da qualidade da imagem no intervalo de 0 a 1.

4.2.3 HDR-VDP-2: Previsor de Diferenças Visuais

A métrica HDR-VDP-2 proposta por Mantiuk et al. (2011) leva em consideração muitos outros aspectos da visualização da imagem por um observador real em comparação com uma imagem de referência, tendo como saída duas principais medidas: uma imagem que representa a probabilidade de detecção de diferenças, pixel a pixel, e uma nota geral da qualidade da imagem de teste, sendo ambas as medidas em relação à média de opiniões de usuários envolvidos nos experimentos de calibração desta métrica.

Alguns parâmetros levados em consideração para o cálculo da métrica são por exemplo a distância do usuário e a intensidade luminosa da tela, e o número de pixels por ângulo de visão. Esta métrica, assim como destacado no Capítulo 2, tem sido empregada para comparação de imagens sintetizadas através de métodos de Iluminação Global.

Os resultados apresentados neste trabalho demonstram a aplicação da métrica com parâmetros de entrada propostos pelos autores, sendo empregada nas imagens já corrigidas pelo índice *gamma* médio padrão dos monitores, que é de 2.2. Os resultados apresentados correspondem aos parâmetros Q_MOS (*Quality Mean Opinion Score*), que é uma medida da qualidade no intervalo de 0 a 100, e P_map

(*Probability map*), que é uma imagem revelando a probabilidade de detecção de diferenças pixel a pixel. Vale ressaltar que de acordo com os autores da métrica, estes dois parâmetros de saída não necessariamente possuem uma relação entre si.

A fim de utilizar a implementação padrão da métrica, disponível apenas para o software MatLabTM, foi criado um script na linguagem *Python* que recebe como entrada duas imagens a serem comparadas e gera como saída um script na linguagem *.m*, sendo em seguida executado dentro do MatLabTM.

4.3 Experimentos

No presente trabalho optou-se pela realização de dois experimentos, detalhados nas próximas seções, cujas justificativas são apresentadas a seguir.

A proposta do primeiro experimento foi de estipular-se um tempo fixo para execução dos métodos de Iluminação Global nas cenas de teste, verificando-se após o tempo estipulado o resultado de cada método em cada métrica adotada. Esperava-se assim obter-se uma classificação justa de cada método de Iluminação Global de acordo com características predominantes na cena.

Entretanto após a realização do primeiro experimento ficou claro que uma melhor classificação dos métodos de Iluminação Global poderia ser obtida analisando-se as curvas de convergência dos métodos em cada caso de teste porém tendo um intervalo muito maior de tempo. Portanto um segundo experimento foi elaborado com esta finalidade.

Vale ressaltar ainda que na execução do primeiro experimento o método VCM não havia sido implementado pelo autor deste trabalho e, portanto, não há resultados neste caso. Analisando-se as cenas de teste propostas, houve uma grande suspeita de que o método VCM poderia sobressair-se em diversos casos, sendo que este foi um grande motivador para sua implementação e emprego no segundo experimento.

4.3.1 Experimento 1

O Experimento 1 consistiu em executar os métodos de Iluminação Global escolhidos neste Capítulo, com exceção do *VCM* pois ainda não havia sido

totalmente implementado, nas cenas de teste propostas no Capítulo 3, seguindo algumas restrições.

Primeiramente, determinou-se que os recursos computacionais fossem os mesmos para todos os métodos executados em uma mesma cena de testes. Foi decidido fixar o tempo de síntese, ao invés de outros parâmetros como número de amostras, raios ou caminhos por exemplo, pois na prática o recurso que o usuário geralmente tem a sua disposição é uma certa quantidade de tempo para produzir o melhor resultado possível, dados os recursos computacionais disponíveis.

Além disso, os computadores utilizados no experimento possuem exatamente as mesmas configurações, pertencendo a um mesmo lote. Desta maneira, acredita-se que a comparação é a mais justa possível.

Com relação às opções do sintetizador, estas foram mantidas exatamente iguais entre os métodos de Iluminação Global avaliados, sendo importante ressaltar duas delas: *Reconstruction Filter: Gaussian* e *Sampler: Independent Sampler*. A escolha do *Independent Sampler* foi devida a este ser o único método de amostragem compatível com o método MLT. É sabido – Keller (1997), Kollig e Keller (2002) – que outros métodos de amostragem, como o *Low Discrepancy Sampler*, podem produzir melhores resultados no mesmo espaço de tempo quando empregados nos métodos PT, BPT ou PPM por exemplo. Porém optou-se pelo uso do mesmo método de amostragem em todos os casos, a fim de focar a avaliação dos resultados exclusivamente na eficiência de cada método de Iluminação Global.

Outra condição a observar é que o tempo de síntese empregado em cada cena foi determinado caso a caso e de maneira a não ser suficiente para eliminar por completo o ruído das imagens de teste. Isto é intencional, pois desejou-se obter uma medida, em cada métrica, da eficácia de cada método na síntese de cada imagem.

Como as cenas propostas, com exceção da cena Cornell Box Espelhada, não existem no mundo real ou não possuem medições reais disponíveis, imagens de referência tiveram que ser também geradas por computador. Como a preocupação não é gerar uma imagem exata, mas sim produzir imagens agradáveis ao olhar humano, torna-se suficiente sintetizar as imagens de referência levando-se em conta todos os rebatimentos de luz possíveis na cena, gerando uma imagem praticamente livre de ruído. Esta é uma tarefa que exige muitas horas de processamento usando os métodos de Iluminação Globais em computadores atuais.

Outra observação importante é que cada cena foi analisada individualmente a fim de se constatar se um determinado método falharia em considerar caminhos importantes de rebatimentos de luz. Por exemplo, na cena Caixa com Esferas, devido à luz direcional e à presença de materiais especulares, existem rebatimentos que são impossíveis de serem amostrados pelo método PT – como reflexo de *caustics* – portanto este método não pode ser empregado para a geração da imagem de referência neste caso.

4.3.2 Experimento 2

Para a realização do Experimento 2 foram utilizados os mesmos computadores e as mesmas configurações comuns do sintetizador *Mitsuba*, assim como no Experimento 1. O experimento e os resultados completos foram publicados no trabalho de Meneghel e Netto (2015).

A proposta deste novo experimento foi de se traçar e analisar as curvas de convergência, segundo as métricas adotadas, do desempenho dos métodos de Iluminação Global nas cenas de testes.

O experimento se deu da seguinte maneira. Foi estipulado um tempo máximo para execução dos métodos em cada cena de teste, sendo que este tempo foi determinado a fim de que a maioria dos métodos superasse o índice de 0.9 na métrica SSIM. Para medição dos resultados, uma imagem de teste foi gerada a cada N segundos, sendo N igual a 6 segundos em cenas simples e igual a 20 segundos em cenas de complexidade moderada e alta.

A classificação da complexidade das cenas encontra-se na Tabela 4 no Capítulo 3, sendo que as cenas simples são: *Cornell Box Difusa*, *Espelhada* e *Glossy*, as de complexidade moderada são *Caixa com Esferas*, *Lafortune Bidirecional* e *Interior da Piscina*, e as de complexidade alta são *Dragão Especular* e *Glossy* e *Quarto de Veach*.

Em cenas simples, verificou-se que o tempo de execução de 30 minutos foi suficiente para traçar-se gráficos com as informações de convergência necessárias para as análises. Em cenas de complexidade moderada, estipulou-se um tempo de 60 minutos para tal tarefa. Em cenas de complexidade alta, resultados foram medidos durante um período de 120 minutos. No total foram geradas aproximadamente 70 mil imagens para produzir os gráficos de convergência dos

métodos de Iluminação Global nas três métricas escolhidas, em todas as cenas de teste empregadas.

Cabe ressaltar ainda outras modificações adotadas para a execução deste segundo experimento. A cena *Exterior da Piscina* não foi avaliada devido ao fato de ter uma combinação mista de características e ser de complexidade elevada, não agregando resultados indispensáveis para a análise. Outra modificação foi na cena *Dragão Glossy*, que teve o tipo de sua fonte luminosa alterada de *direcional* para *mapa ambiente*, elevando assim a complexidade da cena e gerando resultados mais interessantes para análise.

Com relação aos métodos de Iluminação Global empregados, duas foram as alterações principais: adaptação do método LT para tratar superfícies especulares diretamente visíveis pela câmera, e a implementação do método VCM.

Sobre o método LT, suspeitou-se que ele poderia apresentar um bom desempenho em casos gerais, porém a limitação de não sintetizar superfícies especulares diretamente visíveis pela câmera fazia com que o método sempre obtivesse índices ruins em todas as métricas. Para resolver esta limitação, optou-se por utilizar o método PT somente nestas superfícies problemáticas, deixando o método LT agir predominantemente na cena.

Sobre o método VCM, este foi implementado no *Mitsuba* pelo autor deste trabalho, mas vale ressaltar que a implementação é essencialmente uma tradução do método disponível em código aberto no *SmallVCM* – descrito com mais detalhes na Seção 2.8.3. Como este método é uma combinação de diversos métodos antecessores, na sua implementação foram criadas opções para utilização individual dos métodos de Iluminação Global que o compõe: LT, PT, BPT e PPM.

Como o *Mitsuba* não é capaz nativamente de salvar imagens intermediárias do progresso da síntese na maioria dos métodos, optou-se pelo emprego dos métodos disponíveis na implementação do VCM, pois este foi implementado pelo autor deste trabalho visando esta finalidade. O único método que foi empregado neste experimento sendo original do *Mitsuba* é o MLT, pois é um dos poucos que é capaz de nativamente salvar imagens parciais do progresso da síntese.

Foi adotado como padrão a resolução de 1024x768 pixels para as imagens sintetizadas, a fim de facilitar a comparação e análise de resultados entre diferentes casos de teste.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste Capítulo são apresentados os resultados dos Experimentos 1 e 2. As máquinas utilizadas nos experimentos possuem as seguintes especificações:

- Sistema operacional Windows 7 64 bits;
- Processador Intel® Xeon® CPU E5-2680 de 2.7 GHz, 8 núcleos e 16 threads, 20 Mb cache;
- Memória RAM de 24 Gb, DDR3 1600 MHz;
- Sintetizador *Mitsuba Renderer* versão 0.5.0 64 bits, sem modificações, via linha de comando, para o Experimento 1;
- Sintetizador *Mitsuba Renderer* versão 0.5.0 64 bits, com adaptações do autor, via linha de comando, para o Experimento 2;

5.1 Resultados do Experimento 1

Nesta Seção encontram-se tabelas de resultados contendo as imagens de teste sintetizadas usando os métodos de Iluminação Global escolhidos.

5.1.1 Resultados do Experimento 1 na Cena Cornell Box Difusa

Na cena Cornell Box Difusa todas as imagens foram geradas na resolução de 512×512 pixels. Por ser a cena mais simples, o tempo de execução de cada teste foi o menor, sendo aproximadamente de apenas 3,5 minutos. O método escolhido para se gerar a imagem de referência foi o PT, sendo executado com uma super amostragem durante 9 horas. Os resultados estão na Tabela 5.

Observou-se que todos os métodos tiveram um excelente desempenho em todas as métricas adotadas, porém resultados ligeiramente superiores foram obtidos pelo método PT, sendo que métodos baseados em integração de caminhos apresentaram melhores índices de qualidade em todas as métricas adotadas.

Entretanto com relação à imagem P_{map} produzida pela métrica HDR-VDP-2, nota-se que as imagens mais homogêneas na cor azul são as obtidas nos testes com os métodos PT, MLT e PPM.

Tabela 5 - Resultados do Experimento 1 nas cenas Cornell Box Difusa e Cornell Box Espelhada.

	<i>Imagem de teste e erro</i> RMS	<i>Índice SSIM</i> 0 1	<i>P_map e Q_MOS</i> 0 1	<i>Imagem de teste e erro</i> RMS	<i>Índice SSIM</i> 0 1	<i>P_map e Q_MOS</i> 0 1
PT LT BPT MLT PPM	0.002	0.99	99.4%	0.026	0.92	52.0%
	0.003	0.99	98.2%	0.068	0.87	13.2%
	0.003	0.99	97.7%	0.026	0.93	52.1%
	0.005	0.98	93.3%	0.027	0.89	51.9%
	0.009	0.98	83.9%	0.030	0.92	49.1%
Imagens de referência	Cornell Box Difusa: Superfícies difusas e luz do tipo área			Cornell Box Espelhada: Superfícies difusas, perfeitamente reflexivas e luz do tipo área		

Tabela 6 - Resultados do Experimento 1 nas cenas Cornell Box Glossy e Caixa com Esferas.

	<i>Imagem de teste e erro RMS</i>	<i>Índice SSIM</i> 0 1	<i>P_map e Q_MOS</i> 0 1	<i>Imagem de teste e erro RMS</i>	<i>Índice SSIM</i> 0 1	<i>P_map e Q_MOS</i> 0 1
Imagens de referência
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%

	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%

Imagens de referência	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%

	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%

	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%

	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%

	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%

	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%
	0.003	0.99	97.6%	0.026	0.95	31.2%
	0.007	0.97	79.9%	0.077	0.72	7.3%
	0.005	0.98	92.3%	0.008	0.98	78.9%
Imagens de referência						
	0.003	0.99	97.3%	0.088	0.93	35.6%
	0.005	0.99	92.1%	0.163	0.89	8.3%

Tabela 7 - Resultados do Experimento 1 nas cenas Dragão Especular e Dragão Glossy.

	Imagem de teste e erro RMS	Índice SSIM 0 1	P_map e Q_MOS 0 1	Imagem de teste e erro RMS	Índice SSIM 0 1	P_map e Q_MOS 0 1
PT	0.048	0.83	71.9%	0.072	0.65	43.6%
LT	0.301	0.55	2.7%	0.111	0.69	8.3%
BPT	0.051	0.87	66.4%	0.060	0.80	56.1%
MLT	0.091	0.75	21.4%	0.200	0.51	4.3%
PPM	0.053	0.90	42.8%	0.077	0.82	28.5%
Imagens de referência	Dragão Especular: caustics gerado por luz tipo mapa ambiente			Dragão Glossy: caustics refletido por material com desfoque		

Tabela 8 - Resultados do Experimento 1 nas cenas Exterior da Piscina e Interior da Piscina.

	<i>Imagem de teste e erro RMS</i>	<i>Índice SSIM</i> 0 1	<i>P_map e Q_MOS</i> 0 1	<i>Imagem de teste e erro RMS</i>	<i>Índice SSIM</i> 0 1	<i>P_map e Q_MOS</i> 0 1
PT
	0.072	0.59	65.2%	0.593	0.08	3.9%
LT
	0.362	0.38	3.1%	0.008	0.98	99.3%
BPT
	0.080	0.60	56.4%	0.019	0.92	95.9%
MLT
	0.072	0.75	30.5%	0.162	0.36	25.7%
PPM
	0.046	0.83	66.2%	0.016	0.95	91.3%
Imagens de referência
	<u>Exterior da Piscina</u> : caustics visto através de refração (caminhos LSDSE)			<u>Interior da Piscina</u> : visualização de caustics puro (caminhos LSDE)		

Tabela 9 - Resultados do Experimento 1 nas cenas Quarto de Veach e Lafortune Bidirecional.

	Imagem de teste e erro RMS	Índice SSIM 0 1	P_{map} e Q_{MOS} 0 1	Imagem de teste e erro RMS	Índice SSIM 0 1	P_{map} e Q_{MOS} 0 1
PT			0.048 0.50 64.7%			0.010 0.93 97.7%
LT			0.128 0.39 5.9%			0.082 0.95 19.1%
BPT			0.041 0.55 76.3%			0.007 0.98 96.9%
MLT			0.046 0.64 46.7%			0.014 0.91 90.8%
PPM			0.070 0.58 21.8%			0.020 0.97 84.1%
Imagens de referência	Quarto de Veach: toda iluminação é indireta e passa por pequena abertura			Lafortune Bidirecional: iluminação é predominantemente indireta		

Outra observação importante são as silhuetas dos objetos presentes nas imagens produzidas pelas métricas SSIM e HDR-VDP-2 no método PPM. Tal fenômeno se deve ao fato de não ter havido tempo suficiente para reduzir o raio de busca de fótons, especialmente nas regiões limites dos objetos.

A partir deste caso de teste pode-se concluir que em cenas simples, com fontes luminosas fáceis de serem encontradas e na presença apenas de materiais difusos, o método PT é o mais eficiente, portanto recomendado.

5.1.2 Resultados do Experimento 1 na Cena Cornell Box Espelhada

A cena Cornell Box Espelhada representa um caso especial neste trabalho pois é o único cenário de testes no qual estão disponíveis medições reais da luminosidade da cena, o que tornou possível a reconstrução da fotografia obtida no mundo real. Tais medidas foram fornecidas pelos experimentos de Pattanaik et al. (1997), e a fotografia original foi recriada – exibida como imagem de referência na Tabela 5. Cabe ressaltar que a fotografia teve que passar por um processo de correção de *gamma* e ajuste de luminosidade, a fim de que a intensidade luminosa das imagens sintetizadas correspondesse o mais próximo da fotografia recriada.

Esclarecido este processo, notou-se que nenhuma imagem de teste produzida está perfeitamente livre de erro, podendo-se destacar dois principais motivos: pequenas diferenças no alinhamento dos objetos na cena e incorreta consideração do objeto maior como perfeitamente espelhado.

Neste teste as imagens foram geradas na resolução de 512×512 pixels. O tempo para a execução de cada método de Iluminação Global foi de 7 minutos, e a imagem de referência empregada foi a própria fotografia da cena obtida no mundo real. Resultados completos estão apresentados na Tabela 5.

Assim como no caso de teste anterior, observa-se que todos os métodos tiveram um desempenho muito bom em todas as métricas adotadas, com exceção do método LT que falha completamente ao sintetizar superfícies perfeitamente especulares diretamente visíveis pela câmera. Apenas nas imagens do índice P_{map} produzidas pela métrica HDR-VDP-2 observa-se alguma diferença de luminosidade nas paredes e no teto, independentemente do método utilizado.

É possível notar também um maior rigor da métrica HDR-VDP-2 com relação ao índice SSIM, pois a média das medidas de qualidade perceptual foi de cerca de 50% no HDR-VDP-2 e cerca de 90% no SSIM.

Outro ponto interessante a se notar é que o método PPM, baseado em estimativa de densidade, apresentou resultados equivalentes aos métodos baseados em integração de caminhos (PT, BPT e MLT). Isto pode indicar que, com a introdução de objetos especulares na cena, métodos baseados no espalhamento de fótons começam a se mostrar eficientes.

5.1.3 Resultados do Experimento 1 na Cena Cornell Box Glossy

Os resultados desta cena de teste, apresentados na Tabela 6, também foram gerados na resolução 512×512 pixels, sendo permitido que cada método fosse executado por aproximadamente 8 minutos. A imagem de referência foi gerada utilizando-se o método BPT durante quase 8 horas de processamento.

As observações são praticamente as mesmas das duas cenas anteriores. Todos os métodos produziram resultados muito bons e equivalentes neste cenário, exceto o método MLT que obteve uma nota ligeiramente inferior na métrica HDR-VDP-2. Os maiores índices de qualidade foram obtidos pelos métodos PT e BPT, seguidos de PPM e LT, porém é interessante observar que o método PPM foi o que produziu a imagem de probabilidade de detecção mais neutra (azul) dentre todos os métodos.

A introdução de caminhos tipo GG parece não ter imposto dificuldades para nenhum método analisado, porém cabe ressaltar que não há presença de *caustics* detalhado na cena. Continua-se, portanto, a observar que com a introdução de materiais reflexivos – neste caso com desfoque – os métodos baseados em estimativa de densidade começam a se tornar mais eficientes, equiparando-se aos métodos *unbiased*, do ponto de vista da qualidade perceptual.

O resultado inferior obtido pelo método MLT pode ser devido à presença de caminhos com múltiplas interações do tipo G (*glossy*), sendo que as perturbações em busca de fontes luminosas não se mostraram eficientes neste caso em que a fonte emissora de luz é muito fácil de ser encontrada.

5.1.4 Resultados do Experimento 1 na Cena Caixa com Esferas

As imagens de teste da cena Caixa com Esferas foram geradas na resolução de 512×512 pixels, após 14 minutos de execução de cada método escolhido, sendo apresentadas na Tabela 6. A imagem de referência foi gerada após o emprego de aproximadamente 10 horas de esforço computacional no método PPM, que disparou no total 20 bilhões de fótons na cena. Tal método foi escolhido pois todos os demais métodos baseados na integração de caminhos, como PT ou BPT, falhariam em capturar rebatimentos importantes de luz presentes na cena, como *caustics* e seu reflexo.

Os melhores índices foram obtidos pelo próprio método PPM, seguido de BPT e PT, sendo que os piores resultados ficaram por conta dos métodos LT e MLT. Vale ressaltar que de acordo com o índice HDR-VDP-2, juntamente com as imagens de percepção da qualidade produzidas por ambas as métricas perceptuais, o método PPM apresentou resultados muito superiores a todos os demais.

Ficou claro nas imagens produzidas pela métrica SSIM que o método PT falhou em capturar alguns caminhos importantes de rebatimentos de luz. Também pelas mesmas imagens nota-se que o método BPT chegou muito próximo do resultado de referência, sugerindo que o emprego de uma taxa de amostragem mais elevada o faria convergir para uma solução de alta qualidade perceptual. Desta maneira, pelos alto índice obtido na métrica SSIM e moderado índice na métrica HDR-VDP-2, pode-se concluir que a desconsideração de alguns rebatimentos de luz pelos métodos baseados em integração de caminhos pode também produzir imagens com elevadas taxas de qualidade percebida.

Já o método LT surpreendentemente foi capaz de produzir uma imagem com baixo nível de ruído, de acordo com a métrica SSIM, capturando todo o *caustics* e seus subseqüentes rebatimentos, produzindo uma imagem de teste muito próximo da referência – exceto apenas pela visualização direta das duas esferas especulares. E novamente o método MLT produziu uma imagem com alto nível de ruído, provavelmente pela alta importância de grandes superfícies reflexivas nesta cena, perturbando caminhos em busca de uma fonte luminosa que não é tão difícil de ser encontrada.

Como conclusão deste teste pode-se afirmar que na presença predominante de objetos especulares, produzindo efeitos detalhados de *caustics* na imagem final, métodos de estimativa de densidade são os mais eficientes, portanto recomendados.

5.1.5 Resultados do Experimento 1 na Cena Dragão Especular

Os resultados foram obtidos na cena Dragão especular após 29 minutos de execução de cada método, gerando imagens de teste na resolução 800×800 pixels apresentadas na Tabela 7. A imagem de referência foi gerada pelo método BPT após 10 horas de esforço computacional.

O melhor resultado na métrica SSIM foi obtido pelo método PPM, seguido do métodos BPT e PT, com resultados ligeiramente inferiores. Quanto à métrica HDR-VDP-2, observou-se a ordem inversa: o melhor resultado foi obtido pelo método PT, ligeiramente à frente dos resultados dos métodos BPT e PPM. O método LT falhou totalmente em sintetizar o objeto do dragão, por ser perfeitamente refrativo. Já o método MLT, ainda que tenha produzido bons resultados, obteve índices inferiores a todos os outros métodos em ambas as métricas perceptuais empregadas.

Concluiu-se portanto que em cenas com *caustics* desfocado, neste caso devido ao emprego de luz do tipo mapa ambiente, tanto métodos baseados em integração de caminhos, com exceção do LT, quanto métodos baseados em estimativa de densidade produzirão os melhores resultados. Estratégias de mutação de caminhos, como utilizadas no método MLT, não se mostraram eficientes nesta cena, pois a fonte de luz era muito fácil de ser encontrada.

5.1.6 Resultados do Experimento 1 na Cena Dragão Glossy

Na cena Dragão Glossy, as imagens de testes foram geradas com resolução de 800×600 pixels. Foi permitido que cada método de Iluminação Global fosse executado durante 15 minutos, produzindo os resultados apresentados na parte direita da Tabela 7. A imagem de referência foi produzida pelo método BPT depois de cerca de 60 horas de processamento, a fim de se eliminar completamente o ruído no reflexo *glossy-glossy* presente nesta cena.

Os métodos que obtiveram melhor desempenho na métrica SSIM foram, nesta ordem, o PPM e o BPT. Porém na métrica Q_{MOS} do HDR-VDP-2, os maiores índices foram obtidos pelo método BPT, seguido do PT e então PPM. E ao observar-se a imagem P_{map} , de probabilidade de detecção de diferenças, verificou-se uma qualidade superior no método BPT, e em seguida os métodos PPM e LT. Conclui-se portanto que os dois melhores métodos neste caso foram o BPT e o PPM.

O método LT foi capaz de gerar muito bem os efeitos de *caustics*, conforme observado na imagem da métrica SSIM, porém apresentou grandes problemas na síntese de superfícies com desfoque diretamente visíveis pela câmera, diminuindo significativamente os índices de qualidade. Outro método que falhou claramente foi o MLT, provavelmente por gerar perturbações, na presença de materiais do tipo especular com desfoque, em busca de uma fonte luminosa muito fácil de ser encontrada.

A partir de criteriosa análise dos resultados produzidos por esta cena de teste, concluiu-se que na presença de *caustics* com desfoque, tanto o método BPT quanto o PPM podem ser empregados, pois produzirão os melhores resultados. Convém lembrar que o tipo de ruído apresentado por cada classe de métodos é diferente: de baixa frequência por métodos de estimativa de densidade, e de alta frequência por métodos de integração de caminhos.

5.1.7 Resultados do Experimento 1 na Cena Exterior da Piscina

Na cena de teste Exterior da Piscina, cada método de Iluminação Global foi executado por 14 minutos, gerando imagens de resolução 800×600 pixels, apresentadas na Tabela 8. A imagem de referência foi produzida após 64 horas de execução do método PT. Novamente o emprego do elevado esforço computacional foi necessário para se eliminar o ruído na imagem de referência.

Observou-se que o método PPM produziu os melhores resultados em todas as métricas adotadas, sendo que os demais métodos baseados em integração de caminhos – PT, BPT e MLT – com exceção do LT, interessantemente obtiveram índices de qualidade equivalentes, independente da métrica adotada. O método LT falhou totalmente nesta cena por não ser capaz de sintetizar superfícies perfeitamente especulares diretamente visíveis pela câmera.

Pode-se concluir, portanto, que na presença de caminhos SDS, ou seja, *caustics* detalhado sendo refratado ou refletido, ocupando grande área da imagem sintetizada, mesmo na presença de luz do tipo mapa ambiente, métodos baseados em estimativa de densidade produzem os melhores resultados. E com relação aos métodos baseados em integração de caminhos, qualquer opção, exceto LT, produzirá resultados equivalentes.

5.1.8 Resultados do Experimento 1 na Cena Interior da Piscina

As imagens de teste da cena Interior da Piscina foram produzidas após 4 minutos de execução de cada método, sendo geradas na resolução de 800×600 pixels, produzindo os resultados apresentados na Tabela 8. A imagem de referência foi sintetizada pela execução do método LT durante 7 horas.

Os melhores resultados na métrica SSIM foram produzidos pelos métodos LT, seguido de PPM e BPT. De acordo com a métrica HDR-VDP-2, os resultados de melhor qualidade perceptual foram obtidos pelos métodos LT, seguido de BPT e PPM. Ficou claro ainda o fracasso total, conforme esperado, do método PT ao sintetizar esta cena, produzindo uma imagem quase sem informação alguma de luminosidade. A cor azul quase imperceptível na imagem pode ter sido causada por imprecisões (aproximações em operações matemáticas) ao calcular os rebatimentos dos caminhos dentro da piscina.

Como esperado, o método LT obteve os melhores resultados, afinal esta cena foi construída para demonstrar um caso particular em que este método se sobressai: visualização direta de *caustics* detalhado. Entretanto outros métodos baseados em estimativa de densidade, no caso o PPM, também foram capazes de produzir excelentes resultados. O método BPT também gerou imagens de alta qualidade percebida, mesmo tendo empregado muito esforço computacional na tentativa frustrada de conectar caminhos originados na câmera à fonte luminosa.

5.1.9 Resultados do Experimento 1 na Cena Quarto de Veach

Na cena de teste Quarto de Veach a resolução das imagens geradas foi de 1280×720 pixels, sendo que o tempo de síntese das imagens de teste foi de 22 minutos. A imagem de referência foi gerada após 61 horas de processamento com o

emprego do método BPT, a fim de minimizar o ruído. Os resultados estão apresentados na Tabela 9.

Os melhores resultados em todas as métricas empregadas foram obtidos pelos métodos MLT e BPT. Porém é interessante notar que na métrica SSIM o método PPM obteve o segundo melhor resultado e na métrica HDR-VDP-2 o método PT ficou em segundo lugar. Ambos os métodos apresentaram uma irregularidade na classificação, sendo considerados, portanto, mais ineficientes de maneira geral do que os métodos bidirecionais. Ficou claro também neste caso a diferença de tipos de ruídos, de alta e baixa frequência, gerados por cada classe de métodos, apresentados em detalhes na Figura 35.

Constatou-se uma superioridade do método MLT neste cenário, o que já era esperado pois esta cena foi construída exatamente para se demonstrar a eficiência deste método em casos cujas fontes luminosas são muito difíceis de serem encontradas.

Figura 35 - Diferentes tipos de ruído. (a) referência. (b) alta frequência. (c) baixa frequência.

5.1.10 Resultados do Experimento 1 na Cena Lafortune Bidirecional

Os resultados foram obtidos na cena Lafortune Bidirecional após 13 minutos de execução de cada método, produzindo imagens na resolução de 768×576 pixels, apresentadas na Tabela 9. A imagem de referência foi produzida pelo método PT após aproximadamente 7 horas de execução.

Desconsiderando os resultados obtidos pelo método LT, pois este falhou totalmente em sintetizar os objetos perfeitamente reflexivos diretamente visíveis pela câmera, os melhores resultados na métrica SSIM foram obtidos pelos métodos BPT e PPM, à frente dos métodos PT e MLT. Porém na métrica HDR-VDP-2, os melhores resultados do índice Q_{MOS} são atribuídos aos métodos PT e BPT, seguidos do MLT

e PPM. Como não houve uma correspondência entre estas classificações, a imagem *P_map* foi analisada, revelando-se que os métodos BPT e PPM produziram mapas de tonalidade azul claramente mais homogêneos que os demais métodos.

Como conclusão deste caso de teste, verificou-se portanto que, num cenário de predominância de iluminação indireta e materiais difusos, porém sem grande dificuldade em se encontrar as fontes luminosas, os métodos BPT e PPM são os mais adequados, ligeiramente à frente do método PT.

5.2 Resultados do Experimento 2

5.2.1 Resultados do Experimento 2 na Cena Cornell Box Difusa

Na cena *Cornell Box Difusa* a imagem de referência foi gerada pelo método PT após 7 horas de síntese. Os resultados estão exibidos na Figura 36. Nota-se que todos os métodos convergem para a imagem de referência. Apesar de métodos baseados na integração de caminhos terem produzido imagens com menor erro RMS, pode-se observar que com o emprego de métricas perceptuais todos os métodos, com exceção do MLT, convergem para a nota máxima após 30 minutos de cálculo.

O método PT converge mais rapidamente pois os demais métodos empregam esforço tentando encontrar caminhos que transportam informação luminosa na cena, porém neste caso estes caminhos estão presentes em todos os lugares e são facilmente encontrados. Observa-se também que as curvas de qualidade dos métodos BPT e VCM às vezes avançam em passos como “degraus”. Isto pode ser devido ao grande peso computacional de cada interação, demorando mais de 6 segundos para gerar a próxima imagem de teste. Sobre o método MLT, este demonstrou um grande atraso o início da síntese devido à etapa de pré-processamento do cálculo da iluminação geral média da cena – estágio necessário apenas para métodos baseados em MLT.

5.2.2 Resultados do Experimento 2 na Cena Cornell Box Espelhada

A partir dos resultados obtidos na cena *Cornell Box Espelhada* pode-se chegar aproximadamente às mesmas conclusões do teste anterior – ver Figura 37.

Figura 36 - Convergência dos métodos na cena Cornell Box Difusa.

Figura 37 - Convergência dos métodos na cena Cornell Box Espelhada.

Figura 38 - Convergência dos métodos na cena Cornell Box Glossy.

Figura 39 - Convergência dos métodos na cena Caixa com Esferas.

Figura 40 - Convergência dos métodos na cena Dragão Especular.

Figura 41 - Convergência dos métodos na cena Dragão Glossy.

Figura 42 - Convergência dos métodos na cena Interior da Piscina.

Figura 43 - Convergência dos métodos na cena Quarto de Veach.

Figura 44 - Convergência dos métodos na cena Lafortune Bidirecional.

A imagem de referência foi produzida pelo método BPT após 9 horas de processamento. Neste caso, devido à introdução de um objeto espelhado, o método PT perdeu sua superioridade em todas as métricas adotadas. BPT, PPM e LT convergiram mais rapidamente para a solução de referência.

Pode-se concluir que, com a introdução de materiais perfeitamente especulares, métodos que traçam caminhos a partir de fontes luminosas tornam-se mais eficientes. Vale ressaltar que o método PPM neste caso obteve as melhores taxas de convergência em ambas métricas perceptuais empregadas.

5.2.3 Resultados do Experimento 2 na Cena Cornell Box Glossy

Na cena *Cornell Box Glossy*, em que existem duas caixas reflexivas com desfoque refletindo uma à outra, ficou claro que em todas as métricas adotadas o método BPT foi o que obteve melhores resultados – ver Figura 38 – tanto em termos de erro absoluto quanto da qualidade percebida. A imagem de referência foi gerada através do método PT durante 12 horas de computação.

Métodos baseados em estimativa de densidade, dos quais era-se esperado produzirem melhores resultados em casos como este, falharam por causa da baixa intensidade do desfoque dos materiais – entretando o método VCM apresentou resultados muito bons na métrica SSIM, obtendo a segunda melhor curva de convergência logo atrás do método BPT.

5.2.4 Resultados do Experimento 2 na Cena Caixa com Esferas

As curvas geradas na cena *Caixa com Esferas* são mais interessantes pois neste caso nem todos os métodos convergem para a solução correta. Os resultados são apresentados na Figura 39. Nesta cena estão presentes efeitos que são impossíveis de serem amostrados por métodos baseados na integração de caminhos, como o *caustics* gerado por luz refletida, e *caustics* refletido. Pode-se claramente chegar a esta conclusão examinando-se como o erro RMS decai em cada caso.

Métodos baseados na estimativa de densidade – PPM e VCM – apresentaram as melhores taxas de convergência de acordo com as métricas perceptuais. Particularmente o método VCM se sobressaiu neste caso pois é capaz de melhor

abordar todos os tipos de rebatimento de luz gerados por interações entre superfícies difusas, perfeitamente especulares e especulares com desfoque.

Observou-se também que o método MLT encontrou dificuldades para descobrir caminhos que transportassem luz entre superfícies perfeitamente especulares e especulares com desfoque. A imagem de referência foi gerada através do método PPM após 24 horas de síntese.

5.2.5 Resultados do Experimento 2 na Cena Dragão Especular

Na cena *Dragão Especular* o efeito mais difícil de ser gerado é o *caustics* produzido pela fonte luminosa do tipo mapa ambiente atravessando um objeto que possui material similar ao vidro. Ao observar as curvas de comportamento do erro RMS na Figura 40, é possível notar uma região estacionária no método PT. Isto se deve ao fato de todos os caminhos do espalhamento de luz nesta cena serem eficientemente tratados, com exceção apenas do *caustics*, o qual necessita de muitas amostras, e portanto tempo, para convergir para a solução de referência. Este comportamento também pode ser observado nas curvas das métricas perceptuais.

No caso de *caustics* diretamente visível através da câmera, mesmo sendo sabido que métodos baseados em estimativa de densidade são os mais recomendados, observou-se que os métodos BPT e LT adaptado produziram equivalentemente bons resultados.

Novamente pode-se notar que o método VCM converge mais rapidamente e precisamente para a solução de referência, e que a computação extra do método MLT não acarreta de maneira eficiente na descoberta de caminhos que carregam luz. A imagem de referência foi produzida pelo método BPT após 30 horas de síntese.

5.2.6 Resultados do Experimento 2 na Cena Dragão Glossy

Na cena *Dragão Glossy* pode-se observar, de acordo com a Figura 41, o mesmo comportamento de convergência das curvas do que no exemplo anterior, porém um pouco mais óbvio neste caso.

Devido às superfícies especulares com desfoque diretamente visíveis pela câmera – e os efeitos gerados pela luz incidente nestas – os métodos iniciados nas fontes luminosas como LT e PPM não apresentaram bom desempenho. Esta combinação de efeitos foi melhor abordada no método VCM seguido do método BPT. O método MLT novamente apresentou um desempenho ruim, devido aos mesmos motivos explicados no caso anterior. A imagem de referência foi produzida pelo método BPT após 60 horas.

5.2.7 Resultados do Experimento 2 na Cena Interior da Piscina

A cena *Interior da Piscina*, cujos resultados são apresentados na Figura 42, é a visualização direta do *caustics* gerado por uma luz direcional, e seu subsequente espalhamento nas paredes da piscina.

O método PT falha completamente pois não consegue construir nenhuma conexão válida à fonte luminosa devido à presença da superfície da água. O método LT se sobressai neste caso pois nenhum esforço computacional é empregado na busca de caminhos que carregam informação luminosa. O método PPM também apresentou resultados muito bons porém devido ao fato de computar a densidade de fótons dentro de um (pequeno) raio de busca, o *caustics* produzido perde seu detalhe fino, tornando-se um pouco borrado.

Com exceção dos métodos PT e MLT, os demais métodos possuem aproximadamente a mesma taxa de convergência em todas as métricas empregadas. A imagem de referência foi gerada com o emprego do método LT por um período de 9 horas.

5.2.8 Resultados do Experimento 2 na Cena Quarto de Veach

A cena *Quarto de Veach* foi construída especificamente para demonstrar um caso em que o método MLT se sobressaísse. Entretanto isto não foi o que se constatou, de acordo com resultados apresentados na Figura 43. O método MLT apresentou resultados comparáveis aos demais métodos apenas na métrica SSIM. Ao se analisar a curva de erro RMS, pode parecer que o método MLT não está convergindo para a solução correta. Porém ele está de fato convergindo, apenas numa taxa muito mais lenta que os demais métodos.

Com exceção dos métodos MLT e LT, este último sendo muito ineficiente em casos como este – com forte iluminação indireta vindo de fora do cenário – constatou-se que todos os métodos tiveram um desempenho igualmente bom em todas as métricas adotadas. A imagem de referência foi sintetizada pelo método BPT após 57 horas de computação.

5.2.9 Resultados do Experimento 2 na Cena Lafortune Bidirecional

A última cena analisada, a *Lafortune Bidirecional*, revelou resultados curiosos, ao analisar-se as curvas e imagens apresentadas na Figura 44. Esta é uma cena com forte iluminação indireta porém que possui as fontes luminosas no interior do quarto, fazendo com que a maioria dos raios luminosos rebata muitas vezes no cenário. Esta combinação de características faz com que a descoberta das fontes luminosas seja difícil quando caminhos são iniciados pela câmera, mas rebatimentos são extremamente fáceis de serem gerados a partir das fontes luminosas.

Portanto métodos iniciados nas fontes luminosas obtiveram melhor desempenho, em particular o método LT adaptado obteve o menor erro RMS e a maior taxa de convergência na métrica SSIM, um pouco melhor apenas que o método BPT. Outros bons resultados foram observados pelos métodos PPM e VCM, apesar de serem um pouco piores devido à presença e tamanho (pequeno) de objetos especulares não serem tão relevantes.

A imagem de referência foi gerada pelo método BPT após 16 horas de computação. Era esperado que o método MLT produzisse bons resultados devido à forte iluminação indireta porém, ao invés disso, apresentou os piores resultados. Uma possível explicação para isso seria o grande peso computacional em gerar mutações nos caminhos, resultando em novos caminhos com contribuição luminosa que teriam sido encontrados de qualquer maneira através de exploração aleatória (Monte Carlo).

5.3 Resumo Comparativo dos Resultados

A Tabela 10 consolida um resumo dos resultados obtidos.

Tabela 10 - Quadro comparativo dos resultados nas cenas de teste.

Cena e Complexidade*	Principais Características	Métodos Mais Eficientes
1 Cornell Box Difuso ★	Cena simples, materiais difusos, iluminação simples do tipo área.	PT, BPT
2 Cornell Box Espelhada ★★	Cena simples, materiais perfeitamente difusos e reflexivos, iluminação simples.	BPT, PPM
3 Cornell Box Glossy ★★★	Cena simples, materiais difusos e reflexivos com desfoque, interações GG.	BPT, VCM
4 Caixa com Esferas ★★★★★	Efeitos complexos como <i>caustics</i> detalhado, reflexos e materiais <i>glossy</i> , luz do tipo direcional.	VCM, PPM, BPT
5 Dragão Especular ★★★	<i>Caustics</i> desfocado devido à luz tipo mapa ambiente, causado por objeto perfeitamente especular.	VCM, PPM, BPT
6 Dragão Glossy ★★★★★	Reflexo desfocado de <i>caustics</i> desfocado, interações GG tipo refração-reflexão.	VCM, BPT, PT
7 Exterior da Piscina ★★★★★	Predominância da visualização de caminhos SDS – <i>caustics</i> refratado – e luz do tipo mapa ambiente.	PPM, BPT, PT
8 Interior da Piscina ★★★	Visualização de <i>caustics</i> detalhado na presença de luz direcional	LT, BPT, VCM
9 Quarto de Veach ★★★★★	Materiais simples, extrema dificuldade em se encontrar a fonte luminosa.	VCM, BPT, PT
10 Lafortune Bidirecional ★★	Iluminação predominantemente indireta, materiais difusos, baixa dificuldade.	LT, BPT, VCM

* Número de estrelas varia de 1 a 5 indicando complexidade crescente.

5.4 Guia de Recomendações Gerais

Como conclusão deste Capítulo, e com base na análise dos resultados apresentados, tanto particularmente em cada cenário de testes como de maneira consolidada no resumo anterior, foi criado um Guia de Recomendações Gerais para ser seguido pelo usuário que recebe a tarefa de sintetizar imagens a partir de uma dada cena virtual.

O guia é apresentado na Tabela 11. O usuário deve consultá-lo, procurando nele características presentes na cena virtual que tem em mãos. Ao encontrar características semelhantes, obterá uma recomendação de qual método de

Iluminação Global poderá ser empregado, com algumas observações relevantes sobre características presentes na cena.

Tabela 11 - Guia de Recomendações Gerais dos métodos de Iluminação Global mais adequados, dadas as principais características da cena.

Características da Cena	Casos de Teste	Métodos Sugeridos
• materiais difusos	• Cornell Box Difuso	1º. PT ou BPT
• materiais difusos • poucos materiais especulares • sem caustics	• Cornell Box Espelhada • Cornell Box Glossy	1º. BPT ou PT 2º. LT: se luz contida na cena
• caustics desfocado	• Dragão Especular • Dragão Glossy	1º. VCM ou BPT 2º. PPM: se material especular 2º. PT: se material glossy
• caustics detalhado	• Caixa com Esferas • Interior da Piscina	1º. VCM ou PPM 2º. LT ou BPT
• caustics refletido ou refratado	• Caixa com Esferas • Dragão Glossy • Exterior da Piscina	1º. VCM ou BPT 2º. PPM
• predominância de luz indireta	• Lafortune Bidirecional	1º. BPT ou VCM 2º. LT: se luz contida na cena
• luz muito difícil de ser encontrada	• Quarto de Veach	1º. MLT 2º. BPT ou VCM

5.5 Sugestões de Emprego dos Métodos de Iluminação Global

5.5.1 Sugestões para Casos Gerais

Observou-se que os métodos **BPT** e **VCM** apresentaram os melhores resultados, de maneira geral, nas cenas de testes propostas.

- **BPT:** 1º ou 2º melhor desempenho em todos os casos de teste;
- **VCM:** 1º ou 2º melhor desempenho em casos não simples.

5.5.2 Sugestões para Casos Específicos

Com relação aos demais métodos avaliados, as indicações de uso, tomando como base os resultados obtidos nos casos de teste deste estudo, são:

- **PT**: indicado para cenas simples, com predominância de materiais difusos;
- **LT**: indicado em casos de *caustics* detalhado ou forte iluminação indireta contida no ambiente;
- **MLT**: indicado somente se a fonte luminosa for extremamente difícil de ser encontrada, e for exterior à cena;
- **PPM**: mostrou-se sempre inferior a algum outro método – BPT ou VCM por exemplo – portanto o emprego de outro método é preferível.

6 CONCLUSÕES

Sintetizar imagens fotorrealistas de maneira eficiente, que sejam convincentes ao público-alvo e livres de ruído, é ainda hoje uma tarefa de grande dificuldade que não está solucionada por completo. O presente trabalho abordou em detalhes o processo de *Síntese de Imagens* fotorrealistas para as áreas de *Animação e Efeitos Visuais*, dentro da *Computação Gráfica*.

Foram apresentados os conceitos de *Cena Virtual* e detalhadas todas suas etapas de construção, ressaltado quais habilidades são exigidas dos responsáveis em cada fase do processo. O objetivo primário deste trabalho foi apresentado, sendo o de auxiliar o usuário na produção do melhor resultado possível, ou seja, uma imagem de alta qualidade, dados os recursos disponíveis.

Para tanto, foi feito um estudo de diversos trabalhos das últimas três décadas que buscaram atingir objetivos semelhantes. Foi levantado o histórico de evolução de métodos de *Iluminação Global*, desde suas origens nos métodos *Traçadores de Raios* e na formulação da *Equação do Transporte de Luz*, ambos introduzidos nos anos 80. A fim de criar as bases para o melhor entendimento dos métodos de Iluminação Global, foi apresentado brevemente o método *Monte Carlo* de integração, e conceitos de *Amostragem por Importância*.

Foram apresentados em detalhes nove métodos de Iluminação Global que pertencem ao estado da arte no campo da Síntese de Imagens, e em seguida cinco deles foram escolhidos para serem avaliados por este trabalho: *Path Tracing*, *Light Tracing*, *Bidirectional Path Tracing*, *Metropolis Light Transport* e *Progressive Photon Mapping*. Foram também levantados os conjuntos de sintetizadores existentes: comerciais, proprietários e de código aberto. Foi feito um breve estudo sobre como os sintetizadores de hoje se beneficiam de todos os recursos computacionais disponíveis, envolvendo *Paralelismo*, *Máquinas em Rede* e *Plataformas Dedicadas*.

Com o intuito de validar os métodos, foram propostas dez cenas de testes, com características variáveis de complexidade, BSDFs e tipos de fontes luminosas, a fim de englobar uma ampla gama de situações existentes na produção de conteúdo para Animação e Efeitos Visuais, através das quais se pretendeu explorar os pontos fortes e fracos de cada método avaliado.

Para a verificação dos resultados, e auxiliando na definição de qualidade de imagens, foram empregadas duas métricas perceptuais comumente utilizadas para

este propósito: o *Índice de Similaridade Estrutural* e o *Previsor de Diferenças Visuais*, sendo que este último fornece duas medidas de qualidade: uma imagem de probabilidade de detecção de diferenças por pixel, P_{map} , e uma nota geral da qualidade, Q_{MOS} , sendo que ambas medidas não necessariamente estão relacionadas. Foram apresentadas suas formulações e detalhados o funcionamento e aplicação de cada uma.

No Experimento 1 as cenas de teste foram sintetizadas usando os métodos de Iluminação Global avaliados com exceção do VCM (pois ainda não havia sido implementado), fixando-se o tempo de execução em cada caso. Os testes foram executados em máquinas com exatamente a mesma configuração a fim de que os resultados fossem obtidos numa mesma base de comparação e da maneira mais justa possível. Verificou-se que em muitos casos de teste o emprego de duas métricas, e até mesmo das três medidas da qualidade – SSIM, P_{map} e Q_{MOS} – foi essencial para uma melhor interpretação dos resultados. Entretanto sentiu-se a necessidade de se analisar o comportamento da evolução dos métodos em função do tempo e de características das cenas, e para tanto, elaborou-se um segundo experimento.

No Experimento 2 foram traçadas curvas de convergência dos métodos de Iluminação Global em cada caso de teste, para cada métrica adotada, com a finalidade de se observar quais métodos convergem para a solução correta dadas certas características presentes nas cenas, analisando-se também o comportamento da convergência: se mais rápido, se logarítmico, se em passos, etc.

Na análise dos resultados, foram revelados os métodos mais adequados para diversas configurações típicas de Cenas Virtuais, sendo finalmente proposto um *Guia de Recomendações Gerais* para o usuário que possui a tarefa de sintetizar uma Cena Virtual qualquer. Desta maneira, espera-se ter atingido o objetivo proposto deste trabalho, ainda que não de maneira definitiva, restando em aberto vários caminhos para pesquisas futuras, detalhados a seguir.

6.1 Ferramenta para Classificar Cenas

Uma proposta de pesquisa futura seria o desenvolvimento de uma ferramenta ou método que classificasse uma cena virtual qualquer com relação às suas características predominantes, pois tendo uma classificação precisa, poderia ser

sugerido ao usuário o emprego do método de Iluminação Global mais adequado para realizar a síntese daquela cena.

A cena poderia ser analisada com relação aos tipos de efeitos que ela apresenta. Numa etapa de pré-processamento poderiam ser identificados os tipos de BSDFs presentes e predominantes. Caso fossem identificados materiais especulares, poderia haver uma segunda etapa envolvendo um Traçador de Raios, a fim de determinar se haverá a presença de *caustics* na imagem final. Por fim, seria necessário classificar o *caustics* com relação ao nível de detalhe, se nítido ou com desfoque, se ele sofre outros rebatimentos como reflexo ou refrações, etc. Tendo estas informações classificadas e quantificadas – com relação à sua influência e predominância na imagem final – um método de Iluminação Global adequado poderia ser sugerido para se realizar a síntese das imagens.

A cena poderia também ser analisada com relação à dificuldade de se encontrar fontes luminosas. Seria necessário uma etapa envolvendo um método bidirecional que tentasse conectar caminhos originados na câmera com caminhos originados nas fontes luminosas. Levando-se em conta o percentual de caminhos válidos e o tamanho médio destes por exemplo, poderia ser sugerido ao usuário o emprego de métodos bidirecionais ou baseados em MLT.

Indo mais a fundo, poderia ser construído um espaço N-dimensional que relacionasse características de cenas virtuais versus métodos de Iluminação Global com um conjunto dos seus principais parâmetros versus qualidade do resultado obtido pela síntese da cena em cada método. Este espaço poderia ser populado com diversos casos de teste a fim de se identificar nele regiões que concentram cenas com características semelhantes. Por fim este espaço poderia ser explorado construindo-se variações das cenas e de parâmetros, com o objetivo de identificar e prever tendências de comportamento da qualidade das imagens sintetizadas. Se estas tendências fossem identificadas, o classificador poderia utilizar desta inteligência adquirida para melhor classificar quaisquer novas cenas propostas.

6.2 Ferramenta para Exploração Automática de Parâmetros

Dada uma cena virtual qualquer, uma proposta de pesquisa futura seria um estudo sobre a exploração automática de métodos de Iluminação Global e seus parâmetros, aplicados na síntese das imagens desta cena. Tal exploração

automática poderia possuir algum mecanismo de Inteligência Artificial ou Adaptatividade, testando a síntese da cena com o emprego de alguns métodos, analisando o progresso da síntese conforme o tempo de processamento, prevendo o comportamento futuro (com emprego de mais amostras por exemplo), identificando tendências, revelando estratégias que irão fracassar ou que convergirão para o resultado ótimo. A ferramenta poderia devolver ao usuário um conjunto métodos de Iluminação Global eficientes em cada caso, juntamente com seus parâmetros ótimos – a fim de se produzir imagens com a qualidade desejada – e uma estimativa de tempo para a síntese de todas as imagens.

6.3 Avaliar Erro em Vídeos Gerados pela Síntese de Imagens

O presente trabalho é um estudo sobre qualidade perceptual de imagens produzidas a partir do emprego de métodos de Iluminação Global. Porém nada foi levantado sobre a qualidade do vídeo produzido a partir de uma seqüência de imagens sintetizadas. Neste contexto, qualidade do vídeo não tem relação com a qualidade do codificador do vídeo, e sim com erros variantes no tempo introduzidos por métodos de Iluminação Global em cada imagem sintetizada.

Podem haver inúmeras fontes de erro – artefatos que distraem o olhar – ao variar-se no tempo a posição dos objetos ou das luzes da cena. Tais erros temporais podem ser variações abruptas, em quadros sucessivos, na síntese de fenômenos como *caustics*, rebatimentos indiretos de luz, etc., que causam a impressão de certas regiões da imagem estarem tremendo ou piscando no decorrer do vídeo.

6.4 Melhorias ou Novas Propostas de Métodos de Iluminação Global

Uma outra via de pesquisas futuras seria apresentar melhorias em algum método existente, ou até mesmo propor um novo método de Iluminação Global. Para tanto, seria necessário a utilização de um ambiente que dispusesse da implementação de todos os principais métodos existentes, contendo ferramentas para realizar testes, observações, produzindo relatórios, indexando resultados, etc.

Idealmente o pesquisador deveria ser capaz de implementar os principais métodos existentes, ou pelo menos dominar todos os conceitos envolvidos e ter

bons conhecimentos em programação, a fim de criar ou modificar um ambiente existente para cumprir tal tarefa.

Tendo este ambiente, o pesquisador poderia estudar variações dos métodos, novas estratégias de amostragem e construção de caminhos, simplificações no processo, emprego de técnicas de aprendizado, utilização simultânea de diversos métodos na mesma cena, etc., tal como feito nos trabalhos de Vorba et al. (2014), que resultou na proposta de um novo método denominado OLPM – *On-Line Learning of Parametric Mixture Models* – e Hachisuka et al. (2014) resultando na proposta MMLT – *Multiplexed Metropolis Light Transport* – ambos não abordados devido ao recente surgimento durante a finalização do presente trabalho.

REFERÊNCIAS

- ARVO, J.; KIRK, D. *Particle transport and image synthesis*. Proceedings of SIGGRAPH'90, ACM, p. 63–66, 1990.
- ARVO, J.; TORRANCE, K.; SMITS, B. *A framework for the Analysis of Error in Global Illumination Algorithms*. Proceedings of the 21st annual conference on Computer graphics and interactive techniques. ACM. p. 75-84. 1994.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 15602:2007 versão corrigida 2008: Televisão Digital Terrestre – Codificação de Áudio, Vídeo e Multiplexação – Parte 1: Codificação de Vídeo*. Brasil. 2008.
- CARR, N.; HALL, J.; HART, J. *The Ray Engine*. Proceedings of the ACM SIGGRAPH'02/EUROGRAPHICS'02 Conference on Graphics Hardware, p. 37-46. 2002. ISBN 1-58113-580-7.
- CIE STANDARD – Commission Internationale de l'Eclairage. *Technical Report. CIE 171:2006. Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs*. França, 2006.
- CLINE, D.; EGBERT, P. *A Practical Introduction to Metropolis Light Transport*. Technical Report: Department of Computer Science, Brigham Young University. May 2005.
- COOK, R. L., PORTER, T.; CARPENTER, L. *Distributed Ray Tracing*. Computer Graphics Proceedings of SIGGRAPH'84, p. 137-145, July 1984.
- DALY, S. *Visible Differences Predictor: an Algorithm for the Assessment of Image Fidelity*. SPIE/IS&T 1992 Symposium on Electronic Imaging: Science and Technology. International Society for Optics and Photonics, p. 2-15. 1992.
- DRAGO, F.; MYZKOWSKI, K. *Validation Proposal for Global Illumination and Rendering Techniques*. Computers & Graphics, v. 25, n. 3, p. 511-518, 2001.
- DUTRÉ, P.; LAFORTUNE, E.; WILLEMS, Y. *Monte Carlo Light Tracing with Direct Computation of Pixel Intensities*. In: 3rd International Conference on Computational Graphics and Visualisation Techniques. p. 128-137. 1993.
- GEORGIEV, I., KRIVÁNEK, J., DAVIDOVIC, T.; SLUSALLEK, P. *Light Transport Simulation with Vertex Connection and Merging*. Journal ACM Transactions on Graphics (TOG), Proceedings of ACM SIGGRAPH ASIA'12, Volume 31 Issue 6, Article No. 192. Nov. 2012.
- GORAL, C.; TORRANCE, K.; GREENBERG, D.; BATTAILE, B. *Modeling the Interaction of Light Between Diffuse Surfaces*. Computer Graphics Proceedings of SIGGRAPH'84, p. 213-222, July 1984.

- HACHISUKA, T.; JENSEN, H. *Stochastic Progressive Photon Mapping*. In: ACM Transactions on Graphics (TOG). p. 141. ACM, 2009.
- HACHISUKA, T.; KAPLANYAN, A.; DACHSBACHER, C. *Multiplexed Metropolis Light Transport*. In: ACM Transactions on Graphics (TOG), v. 33, n. 4, p. 100. 2014.
- HACHISUKA, T.; OGAKI, S.; JENSEN, H. *Progressive Photon Mapping*. In: ACM Transactions on Graphics (TOG). p. 130. ACM, 2008.
- HACHISUKA, T.; PANTALEONI, J.; JENSEN, H. *A Path Space Extension for Robust Light Transport Simulation*. ACM Transactions on Graphics (TOG), 31(6), 191. 2012.
- HASTINGS, W. *Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and their Applications*. Biometrika, v. 57, n. 1, p. 97-109, 1970.
- HECKBERT, P. S. *Adaptive Radiosity Textures for Bidirectional Ray Tracing*. In: ACM SIGGRAPH Computer Graphics. ACM. p. 145-154, 1990.
- HUB, R. *Efficient Methods for Computing Complex Global Illumination Effects*. Master Thesis, Czech Technical University in Prague, 2013. 95 p.
- INTERNATIONAL TELECOMMUNICATION UNION. *Recommendation ITU-R BT.2020 (06/2014)*: Parameter values for ultra-high definition television systems for production and international programme exchange. Suíça. Jun. 2014.
- JAKOB, W. *Mitsuba Renderer*. 2010. Disponível em: <<http://www.mitsuba-renderer.org>>. Acesso em: 01 fev. 2015.
- JENSEN, H.; CHRISTENSEN, N. *Photon Maps in Bidirectional Monte Carlo Ray Tracing of Complex Objects*. Computers & Graphics, v. 19, n. 2, p. 215-224, 1995.
- JENSEN, H. *Global Illumination using Photon Maps*. Proceedings of the EUROGRAPHICS'96 Workshop on Rendering Techniques, p. 21-30. 1996. ISBN:3-211-82883-4.
- JENSEN, H. *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*. AK Peters. 2001.
- KAJIYA, J. *The Rendering Equation*. Computer Graphics Proceedings of SIGGRAPH'86, p. 143-150, Aug. 1986.
- KELEMEN, C.; SZIRMAY-KALOS, L.; ANTAL, G.; CSONKA, F. *A Simple and Robust Mutation Strategy for the Metropolis Light Transport Algorithm*. In Computer Graphics Forum (Vol. 21, No. 3, pp. 531-540). Blackwell Publishing, Inc. Sept. 2002.
- KELLER, A. *Quasi-Monte Carlo Methods for Photorealistic Image Synthesis*. Shaker, 1997.
- KHODULEV, A. *Comparison of Two Methods of Global Illumination Analysis*. Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences. 1996.

KOLLIG, T.; KELLER, A. *Efficient Bidirectional Path Tracing by Randomized Quasi-Monte Carlo Integration*. Springer Berlin Heidelberg, 2002.

KRISTENSEN, J. Conversão do curta-metragem Big Buck Bunny para padrão 4K, estereoscópico a 60 fps, em 2013. Disponível em: <<http://bbb3d.renderfarming.net>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

LAFORTUNE, E. *Mathematical Models and Monte Carlo Algorithms for Physically Based Rendering*. PhD Dissertation, Feb. 1996. ISBN 0-591-90780-1.

LAFORTUNE, E.; WILLEMS, Y. *Bi-Directional Path Tracing*. In: Proceedings of CompuGraphics. p. 145-153. 1993.

LEHTINEN, J.; KARRAS, T.; LAINE, S.; AITTALA, M.; DURAND, F.; AILA, T. *Gradient-Domain Metropolis Light Transport*, ACM Transactions on Graphics (TOG), v. 32, n. 4, p. 95, 2013.

MAAMARI, F.; FONTOYNONT, M.; ADRA, N. *Application of the CIE Test Cases to Assess the Accuracy of Lighting Computer Programs*. Energy and buildings, v. 38, n. 7, p. 869-877, 2006.

MANTIUK, R.; KIM, K.; REMPEL, A.; HEIDRICH, W. *HDR-VDP-2: A Calibrated Visual Metric for Visibility and Quality Predictions in all Luminance Conditions*. In ACM Transactions on Graphics (TOG), Vol. 30, No. 4, p. 40. Aug. 2011.

MATUSIK, W.; PFISTER, H.; BRAND, M.; MCMILLAN, L. *A Data-Driven Reflectance Model*. Computer Graphics Proceedings of SIGGRAPH'03, p. 759-769, Jul. 2003.

MCNAMARA, A.; CHALMERS, A.; TROSCIANKO, T.; GILCHRIST, I. *Comparing Real & Synthetic Scenes Using Human Judgements of Lightness*. Springer Vienna, p. 207-218. 2000.

MCNAMARA, A. *Exploring Visual and Automatic Measures of Perceptual Fidelity in Real and Simulated Imagery*. ACM Transactions on Applied Perception (TAP), v. 3, n. 3, p. 217-238, 2006.

MENEGHEL, G.; NETTO, M. *A Comparison of Global Illumination Methods Using Perceptual Quality Metrics*. Graphics, Patterns and Images (SIBGRAPI), 2015 28th SIBGRAPI Conference on. IEEE, 2015.

METROPOLIS, N.; ROSENBLUTH, A.; ROSENBLUTH, M.; TELLER, A.; TELLER, E. *Equation of State Calculations by Fast Computing Machines*. The journal of chemical physics, 21(6), p. 1087-1092. 1953.

MÜLLER, G.; MASETH, J.; SATTLER, M.; SARLETTE, R.; KLEIN, R. *Acquisition, Synthesis and Rendering of Bidirectional Texture Functions*. Computer Graphics Forum (EUROGRAPHICS State of the Art Report), p. 83-109. 2005.

NETTO, M. *Development of High Performance Parallel Graphical Applications with Efficient Parallel Processing and Adaptive Techniques*. PhD Dissertation, Nov. 1997. ISBN 3-8265-3827-7.

- NICODEMUS, F. *Directional Reflectance and Emissivity of an Opaque Surface*. Applied Optics, Volume 4 Issue 7, p. 767-775. 1965.
- PATTANAIK, S.; FERWERDA, J.; TORRANCE, K.; GREENBERG, D. *Validation of Global Illumination Solutions Through CCD Camera Measurements*. In Proceedings of the Fifth Color Imaging Conference, Society for Imaging Science and Technology, p. 250-253. Nov. 1997.
- PHARR, M.; HUMPHREYS, G. *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. 2nd Edition, Morgan Kaufmann, 2010.
- SHIRLEY, P. *State of the Art in Monte Carlo Ray Tracing for Realistic Image Synthesis*, SIGGRAPH'01 Course Notes, p. 15-38, 2001.
- SMITS, B.; JENSEN, H. W. *Global Illumination Test Scenes*. University of Utah Technical Report UUCS-00-013, 2000.
- STANFORD 3D SCANNING REPOSITORY, THE. Publicly Available Models. Stanford University. Disponível em: <<http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/>>. Acesso em: 01 fev. 2015.
- SZIRMAY-KALOS, L.; KOVÁCS, L.; ABBAS, A. *Testing Monte-Carlo Global Illumination Methods with Analytically Computable Scenes*. Winter School of Computer Graphics Conf. Hungria. 2001.
- TRUMBULL, D.; MUREN, D. *High-Frame-Rate Cinema, Impacts on Art and Technology*. Lecture Notes on ACM SIGGRAPH'12 Session. 2012.
- ULBRICHT, C.; WILKIE, A.; PURGATHOFER, W. *Verification of Physically Based Rendering Algorithms*. Computer Graphics Forum. Blackwell Publishing Ltd, p. 237-255. 2006.
- VEACH, E. *Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation*. PhD Dissertation, Stanford University. Dec. 1997.
- VEACH, E.; GUIBAS, L. *Bidirectional Estimators for Light Transport*. Photorealistic Rendering Techniques. Springer Berlin Heidelberg, p. 145-167. 1995.
- VORBA, J.; KARLÍK, O.; ŠIK, M.; RITSCHER, T.; KRIVÁNEK, J. *On-line Learning of Parametric Mixture Models for Light Transport Simulation*. ACM Transactions on Graphics (TOG), v. 33, n. 4, p. 101, 2014.
- WANG, Z.; BOVIK, A.; SHEIKH, H.; SIMONCELLI, E. *Image Quality Assessment: from Error Visibility to Structural Similarity*. Image Processing, IEEE Transactions on, 13(4), p. 600-612. 2004.
- WHITTED, T. *An Improved Illumination Model for Shaded Display*. Communications of the ACM, Volume 23 Issue 6, p. 343-349, June 1980.

REFERÊNCIAS COMPLEMENTARES

ALTA TAXA DE QUADROS POR SEGUNDO. High Frame Rates. EUA. Disponível em: <<http://www.dcmovies.com/Recommended Practice/>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

ART OF RENDERING. EUA. Histórico de diversos sintetizadores levantado em abr. 2012. Disponível em: <<http://www.fxguide.com/featured/the-art-of-rendering/>>. Acesso em: 01 de fev. 2015.

BLENDER FOUNDATION. Holanda. Projetos com conteúdo de domínio público. Disponível em: <<http://www.blender.org/features/projects/>>. Acesso em: 01 de fev. 2015.

BIG BUCK BUNNY. Curta-metragem produzido por Blender Foundation. Holanda. Abr. 2008. 10 min. Full HD.

COLBERT, M.; PREMOZE, S.; FRANÇOIS, G. *Importance Sampling for Production Rendering*. Lecture Notes on ACM SIGGRAPH'10 Course. Aug. 2010. Disponível em <<http://webstaff.itn.liu.se/~perla/Siggraph2010/content/courses/>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

CRANE, K. *Importance Sampling for Monte Carlo Ray Tracing*. Lecture Notes on ACM SIGGRAPH'06 Course CS 419. Aug. 2006. Disponível em <<http://www.learningace.com/doc/1822412/ffbe9672035595d87341d740bd7273f1/mc419>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

FOX RENDER FARM. Empresa que oferece serviço de síntese de imagens. Disponível em: <<http://www.foxrenderfarm.com>>. Acesso em: 01 de fev. 2015.

REBUS RENDER FARM SERVICE. Empresa que oferece serviço de síntese de imagens. Disponível em: <<http://www.rebusfarm.net>>. Acesso em: 01 fev. 2015.

TEARS OF STEEL. Curta-metragem produzido por Blender Foundation. Holanda. Set. 2012. 12 min. Full HD.

THE HOBBIT: An Unexpected Journey. Longa-metragem produzido por New Line Cinema. Dirigido por Peter Jackson. Nova Zelândia. Dez. 2012. 169 min. 4K, estereoscópico, 48 quadros por segundo.

ZYNC INC. Empresa que oferece serviço de síntese de imagens. Disponível em: <<https://www.zyncrender.com>>. Acesso em: 01 fev. 2015.