

**Gilberto Paiva de Medeiros Júnior**

**Composição de Imagens com Iluminação HDR através de  
um Aprimoramento da Técnica de Renderização Diferencial**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Informática da PUC-Rio.

Orientador: Prof. Bruno Feijó

Rio de Janeiro  
Fevereiro de 2009



**Gilberto Paiva de Medeiros Júnior**

**Composição de Imagens com Iluminação HDR através de  
um Aprimoramento da Técnica de Renderização Diferencial**

Dissertação apresentada como requisito parcial para  
obtenção do título de Mestre pelo Programa de Pós-  
Graduação em Informática da PUC-Rio. Aprovada pela  
Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Bruno Feijó**

Orientador

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Prof. Raul Feitosa**

Departamento de Engenharia Elétrica - PUC-Rio

**Prof. Marcelo Dreux**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 13 de fevereiro de 2009

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Gilberto Paiva de Medeiros Júnior**

Graduou-se em Ciência da Computação na UFF (Universidade Federal Fluminense) em 2005. Em 2006, ingressou no curso de mestrado em Computação Gráfica na PUC-Rio.

#### Ficha Catalográfica

Medeiros Júnior, Gilberto Paiva de

Composição de imagens com iluminação HDR através de um aprimoramento da técnica de renderização diferencial / Gilberto Paiva de Medeiros Júnior ; orientador: Bruno Feijó. – 2009.

127 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Informática)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

Inclui bibliografia

1. Informática – Teses. 2. Composição de imagens. 3. Renderização diferencial. 4. Cena composta. 5. Efeitos especiais. 6. HDR. 7. Composição. 8. Cinema. 9. TV. 10. Digital. I. Feijó, Bruno. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

## **Agradecimentos**

A Deus, pela força para a concretização do projeto,

Ao Professor Orientador Bruno Feijó, por todo apoio e parceria durante todas as etapas do projeto,

Aos professores e funcionários do Departamento, pela compreensão e ajuda em todos os momentos,

A todos os familiares e amigos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho, com carinho e dedicação.

## Resumo

Medeiros Júnior, Gilberto; Feijó, Bruno. **Composição de Imagens com iluminação HDR através de um aprimoramento da técnica de Renderização Diferencial**. Rio de Janeiro, 2009. 127p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este trabalho tem por objetivo apresentar uma melhoria à técnica estado-da-arte de composição de imagens usando Renderização Diferencial. Uma aplicação é desenvolvida usando imagens HDR, na qual combinar elementos virtuais e reais em uma única cena produz melhores resultados do que os obtidos pela técnica original. Inicialmente, este trabalho apresenta algumas técnicas de composição de imagens e conceitos sobre imagens HDR e iluminação baseada em imagens. Em seguida, a técnica original de Paul Debevec é apresentada através de seus cálculos e exemplos de composição de imagens. A melhoria proposta resume-se a adicionar mais uma imagem da cena ao conjunto de imagens utilizado pela técnica original. Esta melhoria é de grande importância para aplicações que necessitam de um alto grau de realismo, porque permite uma melhor integração entre as partes virtual e real de uma cena. Vários testes são apresentados que comprovam a eficácia da melhoria proposta.

## Palavras-chave

Composição de Imagens; Renderização Diferencial; Melhoria; Cena Composta; Efeitos Especiais; HDR; Composição; Cinema; TV; Digital.

## Abstract

Medeiros Júnior, Gilberto; Feijó, Bruno. **Image compositing with HDR lighting by improving the Differential Rendering technique**. Rio de Janeiro, 2009. 127p. Mastering Dissertation - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work aims to present an improvement to the image compositing state-of-the-art technique using Differential Rendering. An application is developed using HDR images, in which combining virtual and real elements into a single scene produces better results than the ones obtained by the original technique. Firstly, this work presents some techniques of image compositing, and concepts on HDR images and image-based lighting. Next, the original technique by Paul Debevec is presented through its calculations and examples of image compositing. The proposed improvement adds one more image to the set of images used by the original technique. This improvement is of great importance for applications that need a high degree of realism, because it allows a better integration between the virtual and real parts of a scene. Several tests are presented that prove the effectiveness of the proposed improvement.

## Keywords

Image Compositing; Differential Rendering; Improvement; Composited Scene; Special Effects; HDR; Compositing; Movies; TV; Digital

# Sumário

1 Introdução	18
1.1. Composição de imagens e efeitos especiais	18
1.1.1. A composição de imagens em efeitos especiais para o cinema	19
1.1.1.1. Os primeiros efeitos especiais no cinema	19
1.1.1.2. Os efeitos na era digital do cinema	25
1.2. O problema de iluminação na composição de imagens	28
1.3. O presente trabalho	34
1.4. Organização da dissertação	34
2 Aplicando técnicas de composição de imagens	36
2.1. Composição de imagens em fotografias	36
2.2. Composição de imagens no cinema	37
2.3. Composição de imagens utilizando objetos virtuais	38
3 Trabalhando com imagens digitais	40
3.1. Imagens LDR	40
3.2. Imagens HDR	41
3.2.1. Gerando uma imagem HDR	42
3.2.2. Comparando imagens LDR e HDR	43
4 Iluminando uma cena	47
4.1. Introdução à técnica de <i>Image-Based Lighting</i>	47
4.2. Capturando a iluminação real	49
4.3. Iluminando objetos sintéticos através do pacote <i>Radiance</i>	52
4.3.1. Criando uma cena no <i>Radiance</i>	53
5 Integrando objetos sintéticos à cena real	55
5.1. A iluminação da cena	55
5.2. O modelo baseado em luz da cena	56
5.3. Utilizando a radiância da cena para iluminar objetos	57

5.4. Exemplo – iluminando objetos sintéticos	57
5.4.1. O ambiente de iluminação HDR	58
5.4.2. O resultado obtido	58
5.4.3. Resultado obtido com uma coleção de objetos	60
5.5. A subdivisão da cena	61
5.5.1. A cena distante	62
5.5.2. A cena local	62
5.5.3. Os objetos sintéticos	63
5.5.4. Esquema com as subdivisões da cena	63
5.6. Compondo a cena	64
6 Renderização Diferencial	68
6.1. A necessidade de utilizar a técnica	68
6.2. Os cálculos introduzidos pela técnica	70
6.3. Estimando as propriedades de reflectância da cena local	74
7 Melhoria na Composição por Renderização Diferencial	77
7.1. A necessidade de uma melhoria	77
7.2. Correção da falha na técnica de Composição por Renderização Diferencial	79
8 Casos de teste	82
8.1. Geração dos parâmetros de entrada	82
8.2. Caso de teste 1: a galeria Uffizi	83
8.3. Caso de teste 2: a catedral	89
8.4. Caso de teste 3: a cozinha	95
8.5. Caso de teste 4: a garrafa de refrigerante	102
9 Conclusões	109
9.1. O estudo desenvolvido	109
9.2. Benefícios	110
9.3. Trabalhos futuros	110
10 Referências bibliográficas	112



11 Apêndice	120
11.1. A aplicação desenvolvida	120
11.1.1. A implementação	120
11.1.1.1. A interface	120
11.1.2. O funcionamento da aplicação	125
11.1.2.1. Pseudocódigo	126

## Lista de figuras

- Figura 1 – Composição de um cenário formado por pinturas em vidro, uma projeção de filme e uma marionete articulada. Esta figura é editada a partir da original disponível em Rickitt (2000) e Deneroff (2008). 20
- Figura 2 – Ilustração de pôster do filme *King Kong* (1933). Esta figura é adaptada da original obtida em San Diego Natural History Museum [ca. 2007]. 20
- Figura 3 – Miniatura utilizada no filme *King Kong* (1993) para representar um braquiossauro (figura extraída de San Diego Natural History Museum [ca. 2007]). 21
- Figura 4 – Esquema representativo da técnica *Rear Projection*. Na figura, pode-se observar que atrás da janela do trem há uma projeção de filme em uma tela (figura extraída de Brockway (2007)). 22
- Figura 5 – Cena do filme *E O Vento Levou* (1939) na qual a técnica de *Rear Projection* foi utilizada para “inserir” os atores no meio de um grande incêndio (figura extraída de Jawetz (2004)). 22
- Figura 6 – Representação do funcionamento da técnica de *Chroma Key*, na qual os atores são filmados em frente à tela azul (figura extraída de Long Road (2007), referente ao filme *300*). 23
- Figura 7 – Cenas nas quais foi empregada a técnica de *Chroma Key* para compor imagens. Da esquerda para a direita e de cima para baixo os filmes são os seguintes: *Os Dez Mandamentos* (Battaille, 2007), *E.T. – O Extraterrestre* (ET20 2002), *Star Wars – Uma Nova Esperança* (Vega Transports 2006) e *De Volta para o Futuro* (Poisony 2008). 24
- Figura 8 – *Chroma Key* utilizada a partir do surgimento do cinema digital: a tela de fundo possui a cor verde (MediaCollege [ca. 2008]). 25
- Figura 9 – Efeito gênese criado por um sistema de partículas desenvolvido para o filme *Jornada nas Estrelas II: A Ira de Khan* (1982). Esta figura foi obtida em Johnson (2008). 26
- Figura 10 – Sequência do filme *O Jovem Sherlock Holmes - O Enigma da Pirâmide* (1985) na qual um cavaleiro medieval, personagem gerado por computador, salta de um vitral na janela. Esta sequência foi editada

- a partir da original obtida em Hormby (2007). 26
- Figura 11 – Quatro cenas do filme *Jurassic Park* nas quais foram utilizados modelos e composição digitais para integrar a atuação dos atores à animação dos dinossauros. Esta seqüência de imagens foi editada a partir das originais obtidas em: (1) - (Wright 2008); (2) - (Ellis 2008); (3) - (Wright 2008); e, (4) - (Anon., 2007). 27
- Figura 12 - Experiência pioneira de Gene Miller com mapa de reflexão fotográfico: (a) ambiente real; (b) bola reflexiva sendo fotografada; (c) cachorro renderizado com o mapa de reflexão. Extraído de Miller (2006). 29
- Figura 13 - Câmera HDR de escaneamento panorâmico SPHEROCAM HDR (26 F-stops, resolução até 50 megapixels - 10.600 pixels horizontal por 5.300 pixels vertical), com saída Radiance (.hdr) e OpenEXR (.exr). Imagem e informações adaptadas de Spheronvr (2008). 30
- Figura 14 - Técnica de geração de sonda de luz de Debevec e Malik (1997). (a) câmera comum com esfera reflexiva (bolas industriais cromadas de 5 cm ou bolas ornamentais de jardim de 15-30cm, encontradas no varejo); (b) geração de mapa de radiância a partir de fotografias com aberturas diferentes da Grace Cathedral, São Francisco (c); (d) sonda de luz da Grace Cathedral, com variação dinâmica de 200000:1. Material extraído de Debevec (2001). 31
- Figura 15 - Composição de objetos sintéticos em fotografias usando sondas de luz HDR. (a) modelo geométrico do objeto sintético; (b) iluminação do objeto com fundo de floresta; (c) iluminação do objeto com fundo de museu. As sondas usadas estão indicadas no canto superior esquerdo. Material extraído de Debevec (2001). 32
- Figura 16 – Seqüência de imagens LDR de uma mesma cena, editada a partir das imagens originalmente obtidas em Dykes (2007). 43
- Figura 17 - Imagem HDR obtida através do conjunto de imagens LDR apresentado na figura 16 (Dykes 2007). 43
- Figura 18 - Comparação entre a imagem LDR (acima) e a imagem HDR (abaixo) de uma mesma cena (Crane 2006). 44
- Figura 19 - Imagem HDR apresentando regiões com diferentes quantidades

de incidência de luz. Esta imagem foi editada a partir da imagem original obtida em Wika (2006).	45
Figura 20 - Imagem LDR possuindo um alto nível de exposição (Wika 2006).	45
Figura 21 - Imagem LDR possuindo um baixo nível de exposição (Wika 2006).	46
Figura 22 - Exemplo de superfície esférica cujo interior possui uma imagem mapeada. Esta figura foi editada a partir da original obtida em Stafford (2007).	48
Figura 23 - Sistema de captura de imagens a partir de uma esfera reflexiva (Anon. [sem data]).	49
Figura 24 - Esfera metálica refletindo todo o ambiente a sua volta: a metade anterior, região à frente da esfera, e a metade posterior, região atrás da esfera (Wikibooks 2007).	50
Figura 25 - Exemplo de sonda de luz obtida fotografando-se uma esfera metálica (Smashmethod 2004).	50
Figura 26 - Seqüência de imagens panorâmicas geradas para este trabalho a partir da sonda de luz apresentada na figura 25.	51
Figura 27 - Imagem HDR obtida a partir do light probe apresentado na figura 25. Esta imagem foi editada a partir da original obtida em Smashmethod (2004).	52
Figura 28 - Traçado de raios realizado pelo <i>Radiance</i> para calcular a iluminação incidente nas superfícies a partir do ambiente. Esta figura foi editada a partir da original obtida em Debevec (2002).	53
Figura 29 - Mapa de radiância onidirecional apresentado em três níveis de exposições (Debevec 1998).	58
Figura 30 - Representação de um objeto sintético, com diferentes propriedades de material, iluminado pelo mapa de radiância apresentado na figura 29 (Debevec 1998).	59
Figura 31 - Detalhe de sombras ligeiramente diferentes produzidas sobre o objeto em (c) apresentado na figura 30. Esta imagem foi editada a partir da original obtida em Debevec (1998).	59
Figura 32 - Detalhe dos reflexos produzidos pelas fontes de luz sobre os objetos em (d) e em (e) apresentados na figura 30. Esta imagem foi editada a partir da original obtida em Debevec (1998).	60
Figura 33 - Coleção de objetos virtuais iluminados por dois ambientes	

diferentes Debevec (1998).	60
Figura 34 - Detalhe dos reflexos gerados pelo ambiente e pelos demais objetos virtuais sobre a esfera metálica apresentada na figura 33. Estas duas imagens foram editadas a partir das originais obtidas em Debevec (1998).	61
Figura 35 - Detalhe das cores das fontes de luz refletidas na esfera negra apresentada na figura 33. Esta imagem foi editada a partir da original obtida em Debevec (1998).	61
Figura 36 - Esquema representando o método utilizado para adicionar objetos virtuais à cena real. Este esquema foi editado a partir do original disponível em Debevec (1998).	64
Figura 37 - Posicionamento da esfera espelhada sobre o local no qual serão dispostos os objetos sintéticos (Debevec 1998).	65
Figura 38 – Construindo um modelo baseado em luz a partir do mapeamento dos valores de radiância, captados pela sonda de luz, sobre o ambiente a sua volta (Debevec 1998).	66
Figura 39 – Mapeamento do modelo exemplificado na figura 38 sobre o interior de uma caixa, que poderia estar representando o interior de um quarto (Debevec 1998).	66
Figura 40 – Obtendo a imagem que corresponderá ao background da cena (Debevec 1998).	66
Figura 41 – A cena local, disposta abaixo dos objetos sintéticos (a bola espelhada e o bracelete dourado), aparece visível na composição em virtude de possuir propriedade de material diferente da propriedade do material da cena distante (mesa de madeira).	69
Figura 42 – Imagem de <i>background</i> da cena (Debevec 1998).	70
Figura 43 – Imagem da cena local, sem os objetos, iluminada pelo modelo baseado em luz (Debevec 1998).	71
Figura 44 – Objetos sintéticos e cena local dispostos sobre a imagem de <i>background</i> (Debevec 1998).	72
Figura 45 – Aparência final da cena local (LS <sub>final</sub> ) calculada pela equação (4).	72
Figura 46 – Cena final resultante da aplicação da técnica de Renderização Diferencial (Debevec 1998).	73
Figura 47 – Representação gráfica dos cálculos realizados pela equação (5).	74

Figura 48 – Destaque em vermelho para a presença da cena local na imagem final gerada pela técnica original.	78
Figura 49 – Cena local detalhada pelo retângulo vermelho.	79
Figura 50 – Imagem a partir da qual os objetos sintéticos são copiados para a representação da cena final.	80
Figura 51 – Imagem, sem a representação da cena local, a partir da qual os objetos são copiados através dos cálculos da melhoria sugerida.	81
Figura 52 - Cena local com objetos sintéticos disposta sobre a cena real (LSobj).	83
Figura 53 - Silhueta dos objetos sintéticos (ObjMatte).	84
Figura 54 - Cena real (LSb).	84
Figura 55 - Objetos sintéticos dispostos sobre a cena real (noLS). Esta é a imagem adicional utilizada pela melhoria sugerida.	85
Figura 56 - Cena local iluminada pela cena real (Lsprobe).	85
Figura 57 – Cena local iluminada por fonte de luz arbitrária (LSnoobj).	86
Figura 58 – Imagem HDR da cena final produzida.	86
Figura 59 – Detalhes da cena real refletidos nos objetos sintéticos.	87
Figura 60 – Cena local com objeto sintético X Cena final.	88
Figura 61 – Cena local X Cena final.	88
Figura 62 – Cena local final X Cena final.	88
Figura 63 – Comparação entre a técnica original de Renderização Diferencial e a técnica com a melhoria proposta.	89
Figura 64 – Cena local com objetos sintéticos disposta sobre a cena real (LSobj).	90
Figura 65 - Silhueta dos objetos sintéticos (ObjMatte).	90
Figura 66 - Cena real (LSb).	91
Figura 67 - Objetos sintéticos dispostos sobre a cena real (noLS). Esta é a imagem adicional utilizada pela melhoria sugerida.	91
Figura 68 - Cena local iluminada pela cena real (Lsprobe).	92
Figura 69 - Cena local iluminada por fonte de luz arbitrária (LSnoobj).	92
Figura 70 – Imagem HDR da cena final produzida.	93
Figura 71 – Detalhes da cena real refletidos nos objetos sintéticos.	93
Figura 72 – Cena local com os objetos sintéticos X Cena final.	94
Figura 73 – Cena local X Cena final.	94

Figura 74 – Cena local final X Cena final.	95
Figura 75 - Comparação entre a técnica original de Renderização Diferencial e a técnica com a melhoria proposta.	95
Figura 76 - Cena local com objetos sintéticos disposta sobre a cena real (LSobj).	96
Figura 77 - Silhueta dos objetos sintéticos (objmatte).	97
Figura 78 - Cena real (LSb).	97
Figura 79 - Objetos sintéticos dispostos sobre a cena real (noLS). Esta é a imagem adicional utilizada pela melhoria sugerida.	98
Figura 80 - Cena local iluminada pela cena real (Lsprobe).	98
Figura 81 - Cena local iluminada por fonte de luz arbitrária (LSnoobj).	99
Figura 82 – Imagem HDR da cena final.	99
Figura 83 – Detalhe dos reflexos produzidos nas superfícies dos objetos sintéticos, assim como as sombras produzidas por estes objetos.	100
Figura 84 – Cena local com objetos sintéticos X Cena final.	101
Figura 85 – Cena local sem objetos X Cena final.	101
Figura 86 – Cena local final com objetos X Cena final.	101
Figura 87 - Comparação entre a técnica original de Renderização Diferencial e a técnica com a melhoria proposta.	102
Figura 88 - Cena local com objetos sintéticos disposta sobre a cena real (LSobj).	103
Figura 89 - Silhueta do objeto sintético (objmatte).	103
Figura 90 - Cena real (LSb).	104
Figura 91 - Objetos sintéticos dispostos sobre a cena real (noLS). Esta é a imagem adicional utilizada pela melhoria sugerida.	104
Figura 92 - Cena local iluminada pela cena real (Lsprobe).	105
Figura 93 - Cena local iluminada por fonte de luz arbitrária (LSnoobj).	105
Figura 94 – Imagem HDR da cena final.	106
Figura 95 – Detalhe da interação entre o objeto sintético e a cena real.	106
Figura 96 – Cena local com objeto sintéticos X cena final.	107
Figura 97 – Cena local sem objeto sintético X Cena final.	107
Figura 98 – Cena local final com objeto sintético X Cena final.	108
Figura 99 - Comparação entre a técnica original de Renderização Diferencial e a técnica com a melhoria proposta.	108

Figura 100 – Interface da aplicação.	121
Figura 101 – Menu “File” presente na interface da aplicação. Este menu permite escolher e salvar cenas; além disso, permite sair da aplicação.	121
Figura 102 – Menu secundário responsável pelo controle das imagens apresentadas na interface.	122
Figura 103 – Botões de controle da cena local; e, uma imagem da cena local (cilindro verde), com o objeto sintético (chaleira), sobre o <i>background</i> (garrafa de refrigerante).	122
Figura 104 – Botões de controle da cena original e final, botão de controle do nível de exposição e imagem da cena final gerada.	123
Figura 105 – Tela que permite escolher o formato da imagem a ser salva: HDR ou BMP.	123
Figura 106 – Mensagem apresentada após salvar a imagem no mesmo diretório da cena escolhida.	124
Figura 107 – Menu “Help” presente na interface da aplicação responsável por exibir algumas informações específicas sobre a aplicação.	124
Figura 108 – Barra de status com informações sobre o andamento da geração das imagens.	124
Figura 109 – Barra de status com informações sobre o nível de exposição da imagem.	125



De algum modo, eu não creio na existência de uma altura impossível de ser escalada por um homem que conheça o segredo de transformar sonhos em realidade. Esse segredo especial, ao meu ver, pode ser resumido por quatro C's. São eles: Curiosidade, Confiança, Coragem, e Constância, sendo o mais importante destes a Confiança. Quando você acredita em algo, acredite por completo, implicitamente e inquestionavelmente.

Walt Disney