

**Otávio de Pinho Forin Braga**

**Uma Arquitetura para Síntese de  
Imagens Fotorrealistas baseada em  
Técnicas de Monte Carlo**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA**

**Programa de Pós-graduação em Informática**

Rio de Janeiro  
Abril de 2006

**Otávio de Pinho Forin Braga**

**Uma Arquitetura para Síntese de Imagens  
Fotorrealistas baseada em Técnicas de Monte  
Carlo**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática da PUC-Rio

Orientador : Prof. Marcelo Gattass  
Co-Orientador: Prof. Paulo Cezar Pinto Carvalho

Rio de Janeiro  
Abril de 2006



**Otávio de Pinho Forin Braga**

**Uma Arquitetura para Síntese de Imagens  
Fotorrealistas baseada em Técnicas de Monte  
Carlo**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-graduação em Informática do Departamento de Informática do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Marcelo Gattass**

Orientador

Departamento de Informática — PUC-Rio

**Prof. Paulo Cezar Pinto Carvalho**

Co-Orientador

IMPA

**Prof. Waldemar Celes Filho**

PUC-Rio

**Prof. Marcelo Dreux**

PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro Técnico Científico — PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de Abril de 2006

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

### **Otávio de Pinho Forin Braga**

Em agosto de 1999 ingressou no curso de Engenharia de Computação da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, graduando-se no fim de 2003. No semestre seguinte à graduação entrou para o Programa de Pós-graduação em Informática da mesma universidade. Durante grande parte de seus anos de graduação e mestrado, de 2000 a 2005, trabalhou no grupo TecGraf/PUC-Rio, principalmente em projetos na área de visualização 3D.

#### Ficha Catalográfica

Braga, Otávio

Uma Arquitetura para Síntese de Imagens Fotorrealistas baseada em Técnicas de Monte Carlo / Otávio de Pinho Forin Braga; orientador: Marcelo Gattass; co-orientador: Paulo Cezar Pinto Carvalho. — Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2006.

v., 85 f: il. ; 29,7 cm

1. Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Informática.

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Tese. 2. Computação Gráfica. 3. Fotorrealismo. 4. Iluminação Global. 5. Ray Tracing. 6. Monte Carlo. I. Gattass, Marcelo. II. Carvalho, Paulo Cezar Pinto. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. IV. Título.

CDD: 004

## Agradecimentos

Ao meu orientador, Marcelo Gattass, pelos inúmeros conselhos, pela confiança e, principalmente, pela paciência demonstrada ao longo dos anos.

Ao professor Waldemar Celes, com quem trabalhei durante grande parte dos anos no TecGraf, por tudo isso e pela liberdade e pelo incentivo que me deu para iniciar a pesquisa que resultou nesta dissertação.

Ao TecGraf, pelo excelente ambiente de trabalho.

Ao CNPq, pela ajuda financeira ao longo do curso.

À PUC-Rio, onde encontrei todos os recursos imagináveis para a minha formação.

À minha família, pelo incentivo e apoio incondicional sem o qual este trabalho não seria realizado.

## Resumo

Braga, Otávio; Gattass, Marcelo; Carvalho, Paulo Cezar Pinto.  
**Uma Arquitetura para Síntese de Imagens Fotorrealistas baseada em Técnicas de Monte Carlo.** Rio de Janeiro, 2006.  
85p. Dissertação de Mestrado — Departamento de Informática,  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Um dos principais objetivos da computação gráfica é a geração de imagens fotorrealistas, ou seja, imagens indistinguíveis das de uma capturada por uma câmera real ou, mais ambiciosamente, imagens que provocam a mesma sensação no sistema visual de um observador quando olhando diretamente para uma cena. Aplicações incluem o projeto de iluminação, a arquitetura, a realidade virtual e a indústria do cinema.

Esse trabalho apresenta a arquitetura de um sistema capaz de resolver, por técnicas de Monte Carlo, a equação do transporte da luz, essencialmente uma aproximação das equações de Maxwell para ótica geométrica.

Além de ser um *renderer* funcional, o sistema é implementado na forma de um *framework* em cima do qual pode-se facilmente experimentar idéias na área de síntese de imagens fotorrealistas, como, por exemplo, diferentes materiais, geometrias, estruturas de aceleração e estratégias de integração.

## Palavras-chave

Computação Gráfica. Fotorrealismo. Iluminação Global. Ray Tracing. Monte Carlo.

## Abstract

Braga, Otávio; Gattass, Marcelo; Carvalho, Paulo Cezar Pinto. **An Architecture for Photorealistic Image Synthesis based on Monte Carlo Techniques**. Rio de Janeiro, 2006. 85p. MSc Thesis — Department of Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

One of the main goals in computer graphics is to create photorealistic images, that is, images indistinguishable from the ones captured by a real camera, or, more ambitiously, images that cause the same sensation on the visual system of an observer looking directly at a scene. Applications include illumination design, architecture, virtual reality and the movie industry.

This work presents the architecture of a renderer that solves by Monte Carlo techniques the light transport equation, essentially a geometric optics approximation of Maxwell's equations.

The system is not only a functional renderer but also a framework where we can easily experiment new ideas in photorealistic image synthesis, such as new materials, geometries, acceleration structures and integration techniques.

## Keywords

Computer Graphics. Photorealism. Global Illumination. Ray Tracing. Monte Carlo.

# Sumário

1	Introdução	10
1.1	A natureza da luz	11
1.2	Modelos para a luz	14
1.3	Aplicações	15
1.4	Histórico do fotorrealismo na computação gráfica	15
1.5	Organização da dissertação	18
2	A física do transporte da luz	20
2.1	Radiometria	20
2.2	Espalhamento da luz	24
2.3	Emissão de luz	29
2.4	A equação do transporte da luz	30
2.5	A equação de medição	34
3	Traçado estocástico de caminhos	38
3.1	Formulação por integral de caminhos	38
3.2	Caminhos como cadeias de Markov	40
3.3	Roleta russa	43
3.4	Traçado de caminhos e a equação de medição	45
4	Arquitetura do sistema	48
4.1	O ciclo de amostragem do filme	48
4.2	O núcleo da geometria	51
4.3	Estratégias para calcular a radiância	53
4.4	Materiais	53
4.5	Fontes de luz	57
4.6	Traçado estocástico de caminhos	58
5	Resultados	62
6	Conclusão e trabalhos futuros	68
	Referências Bibliográficas	69
A	Integração de Monte Carlo	76
A.1	Quadratura determinística	76
A.2	Um breve histórico	77
A.3	Integração de Monte Carlo	78
A.4	Técnicas de redução da variância	81
B	Exemplos de Descrição de Cena	82



## Lista de figuras

2.1	Relação entre o elemento de área da superfície e a área projetada	22
2.2	Elementos de área	23
2.3	Espalhamento de um fóton em uma superfície	25
2.4	Geometria de uma câmera	35
3.1	Solução da equação do transporte da luz como uma integral de caminhos	39
3.2	Equação de medição como uma integral de caminhos	46
4.1	O ciclo de amostragem do filme	50
5.1	Comparação entre a iluminação direta e a global	64
5.2	Iluminação indireta capturada na reflexão de uma superfície especular	64
5.3	Ruído em cena difusa	65
5.4	Ruído com superfície especular	66
5.5	Geometria complexa	67

*Aqueles que se enamoram da prática sem cuidar da ciência são como o timoneiro que embarca sem leme nem bússola. Jamais saberá com certeza para onde vai.*

**Leonardo da Vinci**