



**Thiago Valente Aguiar**

**Visualização da Fronteira entre Fluidos utilizando o  
Método SPH e o Algoritmo de Marching Cubes**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientador: Prof. Bruno Feijó

Rio de Janeiro  
Setembro de 2009



**Thiago Valente Aguiar**

## **Visualização da Fronteira entre Fluidos utilizando o Método SPH e o Algoritmo de Marching Cubes**

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

**Prof. Bruno Feijó**

Orientador

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Prof. Alberto Barbosa Raposo**

Departamento de Informática - PUC-Rio

**Prof. Marcelo de Andrade Dreux**

Departamento de Engenharia Mecânica - PUC-Rio

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 17 de setembro de 2009

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

### **Thiago Valente Aguiar**

Graduou-se em Ciência da Computação pela Universidade Federal de Viçosa. Desenvolveu como projeto de mestrado um método sobre a visualização de fronteira entre fluidos simulados por partículas. Trabalhou junto ao Tecgraf – PUC-Rio na área de Computação Gráfica e Automação de Projetos.

#### Ficha Catalográfica

Aguiar, Thiago Valente.

Visualização de Fronteira entre Fluidos utilizando o Método SPH e o Algoritmo de Marching Cubes / Thiago Valente Aguiar; orientador: Bruno Feijó. – Rio de Janeiro : PUC-Rio, Departamento de Informática, 2009

v., 58 f: il. ; 29,7 cm

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

Inclui referências bibliográficas.

1. Informática – Dissertação. 2. Computação Gráfica. 3. Fronteira entre Fluidos. 4. SPH. 5. Marching Cubes. I. Feijó, Bruno. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título

CDD: 004

Dedico este trabalho à minha mãe, Terezinha, pelo apoio  
aos estudos em todas as fases da minha vida.

## Agradecimentos

Ao meu orientador, professor Bruno Feijó, por me ajudar a traçar os caminhos deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, pelo direcionamento e avaliação deste estudo.

Ao CNPq pelo auxílio financeiro que me foi dado.

Ao laboratório Tecgraf pela oportunidade que me foi dada como pesquisador.

À minha família que sempre me apoiou nos estudos, em especial à minha mãe.

Ao meu pai e meu avô pela constante inspiração.

Às minhas irmãs por me darem uma força e um auxílio num momento tão necessário.

Aos meus amigos pela força e estímulo em finalizar mais esta etapa.

Ao meu amigo e irmão Vinícius Lopes Rodrigues pelo companheirismo em todas as fases de meu estudo.

## Resumo

Aguiar, Thiago Valente.; Feijó, Bruno.. **Visualização da Fronteira entre Fluidos utilizando o Método SPH e o Algoritmo de Marching Cubes**. Rio de Janeiro, 2009. 58p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

A modelagem de fluidos é frequentemente utilizada, tanto na engenharia como na área de efeitos especiais para cinema e TV, para simular fenômenos naturais, tais como fogo, explosões, fumaça, água e ar. Basicamente, esta modelagem utiliza métodos baseados em malhas, tais como volumes finitos e elementos finitos, ou métodos independentes de malhas baseados em partículas, tais como MPS e SPH. Uma questão comum nas técnicas de partículas é o problema de fronteiras entre fluidos, já que não há uma solução geral e satisfatória. O objetivo deste trabalho é propor uma nova técnica para a visualização da fronteira entre fluidos utilizando o método SPH (Smoothed-particle Hydrodynamics) e o algoritmo Marching Cubes. Testes são realizados para averiguar os custos computacionais envolvidos na geração e renderização da malha da fronteira.

## Palavras-chave

Simulação de fluidos; SPH; Marching Cubes; Fronteira entre Fluidos.

## Abstract

Aguiar, Thiago Valente.; Feijó, Bruno.. **Visualization of the boundary between Fluids using the SPH method and the Marching Cubes algorithm.** Rio de Janeiro, 2009. 58p. MScThesis - Department of Computer Science, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

In engineering and special effects for film and television, fluid modeling is frequently used to simulate natural phenomena, such as fire, explosions, smoke, water, and air. Basically, this modeling uses mesh-based methods, such as finite volumes and finite elements, or mesh-free methods based on particles, such as MPS and SPH. A common question among particle techniques is the problem of boundary between fluids, since there is no general and satisfactory solution available. The objective of this work is to propose a new technique for the visualization of the boundary between fluids using the SPH method (Smoothed-particle Hydrodynamics) and the Marching Cubes algorithm. Tests are made to investigate the computational costs involved in the generation and rendering of the boundary mesh.

## Keywords

Fluid simulation; SPH; Marching Cubes; Boundary between fluids

# Sumário

1	Introdução	14
2	Trabalhos Relacionados	17
2.1	SPH	17
2.2	Visualização Volumétrica	19
2.2.1	<i>Rendering</i> Direto	19
2.3	Extração de Superfícies	20
2.4	Marching Cubes	22
3	SPH	25
3.1	Introdução	25
3.2	Equações Governantes	26
3.3	Função de Suavização	27
3.4	Modelagem das Equações	28
3.4.1	Força de Pressão	29
3.4.2	Força de Viscosidade	30
3.4.3	Força da Gravidade	30
3.4.4	Força de Tensão Superficial	30
4	Marching Cubes	32
4.1	Introdução	32
4.2	O Algoritmo	32
4.2.1	Marching Squares	32
4.2.2	Marching Cubes	34
5	Sistema Proposto	37
5.1	Identificação da Interface	37
5.2	Geração da Malha de Triângulos	38
5.3	Suavização da Malha	41
6	Resultados	45
6.1	Identificação de Partículas da Interface	46
6.2	Malha sem Suavização	47
6.3	Malha com Suavização	47
6.4	Custo Computacional	48
7	Conclusão e Trabalhos Futuros	51
8	Bibliografia	53
	Apêndice	57



## Lista de Figuras

Figura 1	Separador de Produção. Imagem cedida pela Petrobras	15
Figura 2	Simulação de SPH realizada no trabalho de Müller (2003)	18
Figura 3	Esquema do algoritmo de Ray-Casting. Os cubos menores representam as frações das cores e opacidades acumuladas do volume de dados	20
Figura 4	Representação do algoritmo Conexão de Contornos. Conexão das iso-linhas entre os planos de corte ou "fatias"	21
Figura 5	Esquerda: Imagem de uma iso-superfície ideal. Direita: Imagem gerada pelo algoritmo de " <i>Cuberille</i> "	22
Figura 6	Torus interligados gerados pelo algoritmo de Chernyaev (à esquerda) e pelo de Lewiner (à direita) – Imagem retirada de Lewiner et al (2003)	24
Figura 7	Representação do raio de influência de uma partícula	26
Figura 8	Esquerda: Partícula no interior do fluido sofre forças por todos os lados. Direita: Partícula da superfície não recebe forças em todos os lados, gerando a força de tensão superficial	31
Figura 9	Representação de uma iso-superfície	32
Figura 10	Exemplo da iso-linha gerada com o algoritmo Marching Squares com $N=0$ . Os números em cada vértice representam o seu peso $W$	33
Figura 11	Lookup table do algoritmo Marching Squares. Pontos pretos representam valores positivos e brancos valores negativos	33
Figura 12	Ambiguidade apresentada pela lookup table do algoritmo Marching Squares	34
Figura 13	Planos de corte de um cubo lógico utilizado no algoritmo	

de Marching Cubes	34
Figura 14 - Construção da superfície através de vértices do cubo	35
Figura 15 - Padrões estabelecidos por Lorensen (1987) para formar a lookup table	35
Figura 16 - Imagens de dois torus geradas a partir do algoritmo de Lewiner (2003). Na esquerda: a superfície construída. Na direita: a representação da malha	36
Figura 17 - Identificação de partículas que fazem parte da interface entre os fluidos	37
Figura 18 - Influência de partículas no cálculo da equação 3.19. Na esquerda: partículas dentro do fluido influenciam partículas vizinhas de mesmo polo. Na direita: partículas da interface influenciam partículas vizinhas de polos diferenciados	38
Figura 19 - Representação da separação das partículas e distinção das partículas pertencentes a iso-superfície	39
Figura 20 - Representação bidimensional dos vértices representantes das partículas da interface no grid	39
Figura 21 - Representação bidimensional da influência de vértices representantes em vértices vizinhos	40
Figura 22 - Detalhe do raio de influência	40
Figura 23 - Malha com extremidades de aparência cúbica	41
Figura 24 - Representação dos vértices vizinhos numa malha de triângulos	42
Figura 25 - Representação da nova posição do vértice e a referência de sua posição antiga com uma iteração do Laplaciano	42
Figura 26 - Malha após o algoritmo de suavização Laplaciano	43
Figura 27 - Apresentação das normais dos vértices da malha de triângulos após a suavização	44
Figura 28 - Apresentação detalhada das normais dos vértices da malha de triângulos após a suavização	44
Figura 29 - Simulação de dois fluidos imiscíveis utilizando a biblioteca de Nakamura (2007)	45
Figura 30 - Vista horizontal das partículas candidatas a fazerem parte	

da interface	46
Figura 31 - Vista por cima das partículas candidatas a fazerem parte da interface	46
Figura 32 - Resultado obtido com a biblioteca de Lewiner <i>et al</i> (2003)	47
Figura 33 - Detalhe para um retângulo perdendo área quando se torna chanfrado	47
Figura 34 - Comparação entre malhas. Esquerda: malha sem suavização. Direita: malha após a suavização	48
Figura 35 - Esquerda: Simulação do SPH com "metaballs". Direita: Resultado da malha obtida da simulação após a suavização	48
Figura 36 - Gráfico que compara a eficiência da geração da malha na renderização de quadros na simulação	49
Figura 37 - Gráfico que compara a eficiência da suavização na renderização de quadros na simulação	50
Figura A1 - Gráficos da função de suavização 3.14 e de suas derivadas de primeira e segunda ordem	57
Figura A2 - Gráficos da função de suavização 3.16 e de suas derivadas de primeira e segunda ordem	57
Figura A3 - Gráficos da função de suavização 3.18 e de suas derivadas de primeira e segunda ordem	58

## Lista de Tabelas

Tabela 1 - Comparação das taxas de quadros por segundo dos 3  
modos

49

*Happiness is not an absence of problems;  
but the ability to deal with them*

*Jack Brown*