



**Fabio Issao Nakamura**

**Animação Interativa de Fluido baseada em Partículas pelo  
Método SPH**

**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. Waldemar Celes Filho

Rio de Janeiro, março de 2007



**Fabio Issao Nakamura**

## **Animação Interativa de Fluido baseada em Partículas pelo Método SPH**

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. Waldemar Celes Filho**

Orientador

Departamento de Informática – PUC-Rio

**Prof. Marcelo de Andrade Dreux**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Bruno Feijó**

Departamento de Informática – PUC-Rio

**Prof. José Eugênio Leal**

Coordenador(a) Setorial do Centro Técnico Científico - PUC-Rio

Rio de Janeiro, 30 de março de 2007

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

### **Fabio Issao Nakamura**

Graduou-se em Engenharia da Computação pela PUC-Rio em 2004. Durante o mestrado foi bolsista CAPES e pesquisador no laboratório de Computação Gráfica, Tecgraf, em projetos financiados principalmente pela Petrobrás

#### Ficha Catalográfica

Nakamura, Fabio Issao

Animação interativa de fluido baseada em partículas pelo método SPH / Fabio Issao Nakamura ; orientador: Waldemar Celes Filho. – 2007.

64 f. : il. ; 30 cm

Dissertação (Mestrado em Informática)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

Inclui bibliografia

1. Informática – Teses. 2. Animação. 3. Simulação de fluidos. 4. SPH. I. Celes Filho, Waldemar. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Informática. III. Título.

CDD: 004

## Agradecimentos

Ao meu orientador prof. Waldemar Celes e ao prof. Marcelo de Andrade Dreux, que sempre me apoiaram e me orientaram para a conclusão deste trabalho.

Agradeço à minha família em especial à minha mãe, que sempre acreditou no meu potencial e sempre me deu forças para continuar.

Um obrigado especial à Patrícia, minha namorada, por estar sempre ao meu lado nos momentos mais difíceis em que eu mais precisei.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos.

## Resumo

Nakamura, Fabio Issao; Celes, Waldemar. **Animação Interativa de Fluido baseada em Partículas pelo Método SPH**. Rio de Janeiro, 2007. 64p. Dissertação de Mestrado - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Neste trabalho foi feito um estudo investigativo sobre animação de fluidos utilizando sistemas de partículas. Baseado nas propostas apresentadas por Muller et al., esta dissertação objetiva investigar e compreender o uso do método Lagrangeano baseado em partículas, conhecido como Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH), para simulação de fluidos. A validação do método foi feita através da implementação de uma biblioteca capaz de animar fluidos a taxas interativas. Para testar a eficácia e eficiência do método, a biblioteca desenvolvida permite a instanciação de diferentes configurações, incluindo o tratamento de colisões do fluido com obstáculos, o tratamento da interação entre dois fluidos distintos e o tratamento de forças externas exercidas pelo usuário via um mecanismo de interação.

## Palavras-chave

Animação; Simulação de Fluidos; SPH;

## Abstract

Nakamura, Fabio Issao; Celes, Waldemar. **Fluid Interactive Animation Based on Particle System using SPH Method**. Rio de Janeiro, 2007. 64p. MSc. Dissertation - Departamento de Informática, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This work investigates the use of particle-based system for fluid animation. Based on proposals presented by Müller et al., the goal of this dissertation is to investigate and fully understand the use of a Lagrangian method known as Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) for fluid simulations. A library has been implemented in order to validate the method for fluid animation at interactive rate. To demonstrate the method effectiveness and efficiency, the resulting library allows the instantiation of different configurations, including the treatment of fluid-obstacle collisions, interaction between two distinct fluids, and fluid-user interaction.

## Keywords

Animation; Fluid Simulation; SPH;

## Sumário

1	Introdução	13
2	Trabalhos Relacionados	15
3	Método SPH	19
3.1.	Formalismo Básico	19
3.2.	Aproximação por Partículas	21
3.3.	Propriedades da função de suavização	23
4	SPH em Animação de Fluido	26
4.1.	Modelagem de Fluidos com Partículas	26
4.1.1.	Cálculo da Massa específica	28
4.1.2.	Força de Pressão	28
4.1.3.	Força de Viscosidade	29
4.1.4.	Tensão Superficial	30
4.1.5.	Forças Externas	31
4.1.6.	Interação entre Fluidos	31
4.2.	Funções de Suavização	33
5	Implementação	36
5.1.	Estruturação da biblioteca	36
5.2.	Evolução do Sistema	38
5.3.	Discussão	40
6	Resultados	43
6.1.	Propriedades de Fluidos	43
6.1.1.	Volume	43
6.1.2.	Viscosidade	44
6.1.3.	Tensão Superficial	45

6.2. Copo de Água	47
6.3. Interação entre Fluidos	49
6.4. Quebra de Barragem	50
6.5. Descarga de Água	54
6.6. Custo Computacional	56
7 Conclusão	61
8 Bibliografia	63

## Lista de figuras

- Figura 1 Trabalho de Müller *et al.* [24]. O enchimento do copo com a água é simulado a uma taxa de 5 quadros por segundo. Imagens extraídas de [24]. 17
- Figura 2 Alguns exemplos obtidos no trabalho de Müller *et al.* [26], demonstrando a interação entre fluidos. A esquerda fluidos com massas específicas diferentes são misturados, ao meio a simulação de um “*lava lamp*” e à direita a interação entre 3 fluidos, água, ar e a chama. Imagens extraídas de [26]. 17
- Figura 3 As partículas claras possuem massa específica de repouso  $X$ . As partículas escuras possuem massa específica de repouso  $2X$ . As setas indicam o gradiente de massa específica e conseqüentemente o gradiente de pressão resultante na interface dos fluidos. 32
- Figura 4 Gráfico da função de suavização  $W_{\text{poly6}}$  e suas derivadas usada por Müller *et al* [24]. O eixo das ordenadas representa o valor da função de suavização e o eixo das abscissas representa a distância entre os pontos. O gráfico mais à esquerda representa a função de suavização. O gráfico do meio representa o gradiente de  $W_{\text{poly6}}$  e o mais à direita representa o Laplaciano de  $W_{\text{poly6}}$ . 33
- Figura 5 Gráfico da função de suavização  $W_{\text{Spike}}$  e suas derivadas usada por Müller *et al* [24]. O eixo das ordenadas representa o valor da função de suavização e o eixo das abscissas representa a distância entre os pontos. O gráfico mais à esquerda representa a função de suavização. O gráfico do meio representa o gradiente de  $W_{\text{Spike}}$  e o mais à direita representa o Laplaciano de  $W_{\text{Spike}}$ . 34
- Figura 6 Gráfico da função de suavização  $W_{\text{viscosity}}$  e suas derivadas usada por Müller *et al* [24]. O eixo das ordenadas representa o valor da função de suavização e o eixo das abscissas representa a distância entre os pontos. O gráfico mais à esquerda representa a função de suavização. O gráfico do meio representa o gradiente de  $W_{\text{viscosity}}$  e o mais à direita representa o Laplaciano de  $W_{\text{viscosity}}$ . 35
- Figura 7 Estruturação da biblioteca desenvolvida. 36
- Figura 8 A célula cinza clara possui a partícula de interesse. A busca para

determinar quais partículas estarão interagindo com a partícula de interesse será feita na própria célula e nas células em cinza escuro. 37

Figura 9 Uma caixa enchida com um fluido representado por 8000 partículas. A linha reta (em branco) foi utilizada para a amostragem dos valores da norma do vetor normal à superfície e de Cs. 40

Figura 10 O gráfico com os valores da norma do vetor normal à superfície amostrados em diferentes pontos do fluido. O eixo das abscissas do gráfico representa o eixo X. 41

Figura 11 O gráfico com os valores do campo de cor (Cs) amostrados em diferentes pontos do fluido. O eixo das abscissas do gráfico representa o eixo X. 41

Figura 12 Comparação entre o volume dos fluidos. O fluido da imagem à esquerda possui volume de 50 litros e o fluido da imagem à direita possui volume de 10 litros. 44

Figura 13 Configuração inicial do fluido utilizado no experimento. 44

Figura 14 Diferença de comportamento entre o fluido menos viscoso (imagem à esquerda) e o fluido mais viscoso (imagem à direita). 45

Figura 15 A imagem à esquerda ilustra um fluido com o valor do coeficiente de tensão superficial 0 e à direita o mesmo fluido com o valor do coeficiente de tensão superficial 1. 46

Figura 16 A imagem de cima, ilustra um fluido com o valor do coeficiente de tensão superficial 0 e a imagem de baixo o mesmo fluido com o valor do coeficiente de tensão superficial 1. 46

Figura 17 Três instantes da simulação. As imagens da esquerda mostram os resultados obtidos no trabalho desenvolvido. As imagens da direita foram retiradas do trabalho de Müller *et al.*[24]. 48

Figura 18 Comparação entre os resultados obtidos e os resultados obtidos em [26]. As imagens da esquerda foram obtidas através da biblioteca desenvolvida, e as imagens da direita foram retiradas de [26]. 49

Figura 19 Instante inicial da simulação. Um fluido está confinado por uma barragem. A imagem mais acima foi retirada de [17]. A imagem do meio mostra a visualização ortográfica da simulação e a imagem mais abaixo mostra a vista perspectiva da simulação. 51

- Figura 20 Instante após a abertura da barragem em que o fluido encontra-se com o obstáculo (rampa). A imagem mais acima foi retirada de [17]. A imagem do meio mostra a visualização ortográfica da simulação e a imagem mais abaixo mostra a vista perspectiva da simulação. 52
- Figura 21 O fluido interagindo com a rampa (obstáculo) formando uma onda. A imagem mais acima foi retirada de [17]. A imagem mais acima foi retirada de [17]. A imagem do meio mostra a visualização ortográfica da simulação e a imagem mais abaixo mostra a vista perspectiva da simulação. 53
- Figura 22 Instante que a comporta é aberta para vazão da água. A imagem da esquerda foi retirada de [17], a imagem do meio e a imagem da direita são a vista ortográfica e perspectiva, respectivamente, da simulação obtida neste trabalho. 54
- Figura 23 Neste instante devido à forte força de pressão as partículas de água são expelidas pelo compartimento aberto formando uma cavidade. A imagem da esquerda foi retirada de [17], a imagem do meio e a imagem da direita são a vista ortográfica e perspectiva, respectivamente, da simulação obtida neste trabalho. 55
- Figura 24 Diferença entre os resultados obtidos em [17] e os resultados obtidos neste trabalho. A imagem da esquerda foi retirada de [17], a imagem do meio e a imagem da direita são a vista ortográfica e perspectiva, respectivamente, da simulação obtida neste trabalho. 55
- Figura 25 Gráfico dos dados apresentados na Tabela 2. 57
- Figura 26 Gargalo da simulação com 1000 partículas. 58
- Figura 27 Identificação do gargalo com 4000 partículas. 59
- Figura 28 Identificação do gargalo com 8000 partículas. 59

## Lista de tabelas

Tabela 1 Os principais atributos das partículas de um fluido presentes neste trabalho. Os últimos 3 atributos são necessários para o caso de interação entre fluidos (Seção 4.1.6). 38

Tabela 2 Valores obtidos na comparação entre o número de partículas e o tempo médio de simulação por passo. 56