



FREDERICO ALBERTO FRANCO PINHEIRO

Licenciado em Engenharia Informática

SIMULAÇÃO DE FLUIDOS EM TEMPO REAL COM INTERAÇÃO COM CORPOS RÍGIDOS

REAL-TIME FLUID SIMULATION
WITH INTERACTION WITH RIGID-BODIES

MESTRADO EM ENGENHARIA INFORMÁTICA

Universidade NOVA de Lisboa
Maio, 2023



NOVA

NOVA SCHOOL OF
SCIENCE & TECHNOLOGY

DEPARTAMENTO
DE INFORMÁTICA

SIMULAÇÃO DE FLUIDOS EM TEMPO REAL COM INTERAÇÃO COM CORPOS RÍGIDOS

REAL-TIME FLUID SIMULATION
WITH INTERACTION WITH RIGID-BODIES

FREDERICO ALBERTO FRANCO PINHEIRO

Licenciado em Engenharia Informática

Orientador: Rui Nóbrega
Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology

Júri:

Presidente: João Carlos Gomes Moura Pires
Professor Associado, NOVA School of Science and Technology

Arguente: António Ramires Fernandes
Professor Auxiliar, Universidade do Minho

Orientador: Rui Pedro da Silva Nóbrega
Professor Auxiliar, NOVA School of Science and Technology

MESTRADO EM ENGENHARIA INFORMÁTICA

Universidade NOVA de Lisboa
Maio, 2023

PREVIEW

Simulação de fluidos em tempo real com interação com corpos rígidos

Copyright © Frederico Alberto Franco Pinheiro, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Rui Nóbrega, por ter acreditado e investido em mim, mostrando o apoio e disponibilidade para me guiar durante todo este processo.

À minha mãe, ao meu pai e irmã, que sempre estiveram ao meu lado para me apoiar e investir em toda a minha carreira académica, e principalmente, por sempre acreditarem em mim.

Aos meus familiares e amigos, que também estiveram sempre presentes para me apoiar e ajudar a superar dificuldades, tornando esta experiência muito mais memorável.

Aos animais de estimação que passaram na minha vida, que sempre estiveram prontos para me ouvir.

Aos criadores dos jogos que me apaixonam, por me mostrarem algo pelo qual lutar e me inspirarem a seguir a minha carreira de sonho.

E por último, a mim, por nunca desistir, e principalmente, por acreditar que os sonhos são possíveis.

“There must be a beginning of any great matter, but the continuing unto the end until it be thoroughly finished yields the true glory.” (Francis Drake)

PREVIEW

RESUMO

Simulação de fluidos é composta por um conjunto de técnicas e ferramentas que visam emular os comportamentos dos fluidos em diferentes cenários. Hoje em dia, existe uma vasta diversidade de aplicações que recorrem a esta classe de simulações, podendo ser usadas para investigações científicas e no entretenimento, como filmes e videojogos. Deste modo, simulações como estas, podem representar vários tipos de fluido, tais como: rios, oceanos, ventos, fluxos de corrente, ou lava. Como tal, para se proceder à criação de fluidos, têm de ser considerados diferentes aspectos do seu comportamento, como a velocidade, a densidade do fluido, a pressão do fluido ou o nível de viscosidade do mesmo.

Nesta dissertação pretende-se investigar técnicas de simulação de fluidos, bem como alguns dos contextos em que estas foram utilizadas, e deste modo, selecionar a melhor abordagem para implementar estas técnicas e respetivos algoritmos, num motor de jogos como o Unity. Assim, em conformidade com o mais recente crescimento dos motores de jogo, pretendemos mostrar que estes motores podem contribuir para uma melhor implementação interativa de uma simulação de fluidos e, em simultâneo, manter o rigor científico das simulações. Com este propósito em mente, são apresentadas quatro simulações de fluidos, ou seja, uma simulação inicial, implementada com três optimizações de interação entre partículas, com o objetivo de testar qual a abordagem que melhor se enquadra no objetivo pretendido por um possível utilizador.

A solução proposta, foi implementada recorrendo ao método de computação da mecânica de fluxos de fluido **CFD**, *Smoothed-particle hydrodynamics(SPH)* com o propósito de simular todo o corpo do fluido, com interação entre partículas. Esta interação foi calculada apoiando-se em quatro algoritmos de procura de vizinhança diferentes, um algoritmo que computa a interação entre todas as partículas, um que recorre à simetria de forças pela terceira lei de Newton, outro inspirado pelo método de simulações de Monte-Carlo e por fim, um método híbrido em que se recorre a uma grelha auxiliar responsável por realizar o mapeamento das partículas.

Palavras-chave: Simulações 3D, Simulação de fluidos, Simulação de fluidos em Unity, Simulações baseadas em grelhas, Simulações baseadas em partículas, **CFD, SPH**.

ABSTRACT

Fluid simulation is composed by a set of techniques and tools that aim to emulate the behavior of fluids in different scenarios. Nowadays, there is a wide variety of applications that use this type of simulations, which can be used for both scientific investigations and entertainment, such as movies and videogames. Simulations like these can represent various types of fluid, such as: rivers, oceans, winds, current flows, or even lava. As such, in order to create fluids, different aspects of their behavior must be considered, such as velocity, fluid density, fluid pressure or its viscosity level.

In this thesis, we intend to investigate fluid simulation techniques as well as some of the contexts in which they are used. This way, we pretend to select the best approach to implement these techniques and respective algorithms in a game engine such as Unity. In line with the latest growth in game engines, we intend to show that these can contribute to a better interactive implementation of a fluid simulation and, at the same time, maintain the scientific rigor of the simulations. With this purpose in mind, four simulations of fluids are presented. These are, an initial simulation, implemented with three optimizations of interaction between particles, with the objective of testing which approach best fits the objective intended by a possible user.

The proposed solution was implemented using the fluid flow mechanics computation method **CFD**, *Smoothed-particle hydrodynamics*(**SPH**) to simulate the entire fluid body with interaction between particles. This interaction was calculated using four different neighborhood search algorithms, one algorithm that computes the interaction between all particles, one that resorts to the symmetry of forces by Newton's third law, another inspired by the Monte-Carlo simulation method and finally, a hybrid method using an auxiliary grid responsible for mapping the particles.

Keywords: 3D Simulation, Fluid simulation, Unity fluid simulation, Grid based simulations, Particle based simulations, **CFD**, **SPH**.

ÍNDICE

| | |
|---|------------|
| Índice de Figuras | x |
| Índice de Listagens | xiv |
| Siglas | xv |
| 1 Introdução | 1 |
| 1.1 Motivação | 3 |
| 1.2 Questões de Investigação | 3 |
| 1.3 Objetivos | 4 |
| 1.4 Contribuições | 5 |
| 1.5 Estrutura do Documento | 5 |
| 2 Enquadramento e Trabalho Relacionado | 7 |
| 2.1 Técnicas de Simulação de Fluidos | 7 |
| 2.1.1 Termos usados pelas Equações de Navier-Stokes | 8 |
| 2.1.2 Navier-Stokes | 9 |
| 2.1.3 The Momentum Equation | 9 |
| 2.1.4 Incompressible Equations | 11 |
| 2.1.5 Boundary Conditions | 12 |
| 2.1.6 Algoritmo de Simulação e Funcionamento | 14 |
| 2.2 Pontos de Vista de Simulação | 14 |
| 2.2.1 Visão de Lagrange - Modo de Sistema de Partículas | 17 |
| 2.2.2 Visão de Euler - Modo Grelha | 17 |
| 2.2.3 Simulações Baseadas em Partículas | 18 |
| 2.2.4 Smoothed Particles Hydrodynamics | 21 |
| 2.3 Simulações em Tempo Real | 22 |
| 2.3.1 Necessidades das Aplicações | 23 |
| 2.3.2 Técnicas para Simulações em Tempo Real | 24 |
| 2.4 Interação e Simulação Gráfica | 28 |

| | | |
|---------------------|--|-----------|
| 2.4.1 | Motores de Jogo | 29 |
| 2.4.2 | Simulação de Fluidos em Videojogos | 30 |
| 3 | Arquitetura de Sistema de Simulação de Fluidos | 33 |
| 3.1 | Descrição Geral | 33 |
| 3.2 | Requisitos do Sistema | 34 |
| 3.3 | Arquitetura do Sistema | 35 |
| 3.4 | Ferramentas e Técnicas | 38 |
| 3.5 | Simulação com Smoothed Particles Hydrodynamics | 39 |
| 3.5.1 | Navier-Stokes | 39 |
| 3.5.2 | Pressão e Viscosidade | 40 |
| 3.5.3 | Kernel Functions | 41 |
| 4 | Simulação de Fluidos com Interatividade | 44 |
| 4.1 | Otimizações da Simulação | 44 |
| 4.1.1 | Base | 46 |
| 4.1.2 | Simetria de Forças | 49 |
| 4.1.3 | Monte-Carlo | 51 |
| 4.1.4 | SPH Híbrido | 52 |
| 4.2 | Implementação do Sistema | 55 |
| 4.2.1 | Cenários de Simulação | 61 |
| 4.2.2 | Modos de Observação | 62 |
| 5 | Avaliação | 65 |
| 5.1 | Estatísticas e Análise de Desempenho | 65 |
| 5.1.1 | Especificação de Sistema | 65 |
| 5.1.2 | Análise Geral de Otimizações | 66 |
| 5.2 | Análise de Desempenho entre Algoritmos | 67 |
| 5.2.1 | Comparação de Desempenho das Otimizações | 67 |
| 5.2.2 | Otimizações de Simetria de Forças | 70 |
| 5.2.3 | Distribuição dos Intervalos de Tempo | 70 |
| 5.2.4 | Otimização de Monte-Carlo | 72 |
| 5.2.5 | Otimização Mista | 73 |
| 5.3 | Diferentes Comportamentos do Fluido | 75 |
| 5.3.1 | Observação de Cenários | 75 |
| 5.3.2 | Fluidos e suas Propriedades | 79 |
| 5.4 | Discussão | 82 |
| 6 | Conclusão | 86 |
| 6.1 | Trabalho Futuro | 87 |
| Bibliografia | | 89 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | | |
|------|--|----|
| 1.1 | Exemplo do comportamento de ondulação do fluido, quando condicionado pela ação de um obstáculo em movimento. | 6 |
| 2.1 | Imagen que mostra um exemplo da representação de cada <i>Boundary Condition</i> ¹ | 13 |
| 2.2 | Exemplo de uma forma artística usando FAB [44]. | 13 |
| 2.3 | Interpretação da janela, usando objeto fisico [44]. | 15 |
| 2.4 | Interpretação da janela, recorrendo ao método FAB [44]. | 15 |
| 2.5 | Representação do algoritmo de simulação. | 16 |
| 2.6 | Imagen que descreve o exemplo do artigo ² | 16 |
| 2.7 | Visão de Lagrange: Observa-se cada ponto do fluido enquanto este acompanha o fluxo do fluido e a variação das suas propriedades. | 17 |
| 2.8 | Representação do sistema de partículas ³ | 17 |
| 2.9 | Visão de Euler: Ficar num ponto fixo no espaço e observar o fluido mover-se através do volume. | 18 |
| 2.10 | Representação do sistema em grelha ⁴ | 18 |
| 2.11 | Explosão inicial [39]. | 19 |
| 2.12 | Propagação das chamas [39]. | 19 |
| 2.13 | Animação em 2D, onde a densidade pode ser representada pelo nível de cinzento, que ilustra uma ferramenta rígida a curtar um objeto deformável em duas partes [11]. | 20 |
| 2.14 | Exemplificação da variação de temperatura através da cor das partículas. Simulação composta por 3000 partículas que se espalharam ao serem expelidas pelo vulcão [45]. | 21 |
| 2.15 | Comparação entre <i>Weakly compressible</i> SPH (esquerda, 17k partículas) e o metodo sugerido, <i>Predictive-Corrective Incompressible</i> SPH (direita, 100k partículas) e com tempos de computação iguais [41]. | 22 |
| 2.16 | Funcionamento das <i>Wave Cages</i> [24]. | 25 |

| | |
|---|----|
| 2.17 Output de um modelo de <i>Shallow water</i> . Na esquerda está representada a força aplicada pelo utilizador e à direita estão os respetivos campos de densidade e velocidade [28]. | 27 |
| 2.18 Na figura pode ver-se um personagem de um jogo a fazer surf enquanto as ondas se quebram em tempo real [49]. | 27 |
| 2.19 Simulação a 5 <i>frames</i> por segundo, com 3000 partículas [34]. | 28 |
| 2.20 Cima: Aglomeração de partículas devido às deficiências da vizinhança, Baixo: Com o termo de Pressão artificial é notável a melhoria na distribuição das partículas e da tensão da superfície [32]. | 29 |
| 2.21 Simulação de fluidos criada no Houdini ⁵ | 31 |
| 2.22 Criação da <i>mesh</i> usando <i>casting</i> ao longo da normal da superfície ⁶ | 31 |
| 2.23 Criação da <i>mesh</i> usando <i>casting</i> em direção à câmara ⁷ | 32 |
| | |
| 3.1 Arquitetura geral do sistema. | 36 |
| 3.2 Arquitetura geral do ponto de vista do utilizador. | 36 |
| 3.3 Arquitetura geral do ponto de vista do sistema. | 37 |
| 3.4 Esquema que ilustra o comportamento dos <i>Smoothing Kernels</i> para métodos de SPH no caso de um ambiente 3D [3]. | 41 |
| 3.5 Representação gráfica dos <i>smoothing kernels</i> : <i>poly6</i> , <i>spiky</i> e <i>viscosity</i> respetivamente da esquerda para a direita. As linhas mais grossas mostram os <i>kernels</i> , as finas o seus gradientes e por fim, as linhas interrompidas representam os seus Laplacianos [34]. | 43 |
| | |
| 4.1 Figura de exemplo, onde é possível observar uma câmara, diversas primitivas e luzes, no motor de jogos Unity. | 57 |
| 4.2 Figura onde é possível observar a associação da Tag SPHCollider, ao Quad "Floor". | 57 |
| 4.3 Figura onde é possível observar as várias componentes necessárias para o controlo e criação do fluido. | 58 |
| 4.4 Figura onde é possível observar as várias propriedades necessárias para a simulação de um fluido. | 59 |
| 4.5 Figura onde é possível observar as várias propriedades necessárias para criação de uma grelha de simulação de fluidos. | 61 |
| 4.6 Exposição gráfica da Spatial hash grid onde as partículas são mapeadas em células de tamanho uniforme [13]. | 61 |
| 4.7 Diferentes cenários implementados no simulador. | 63 |
| 4.8 Figura onde é possível observar o efeito de interação entre as partículas, onde, a vermelho é representada a partícula em foco, e em verde, as que estão a interagir com o foco no momento. | 64 |
| 4.9 Figura onde é possível observar o efeito de espuma e onde é possível observar as partículas que se movimentam mais rapidamente, no momento. | 64 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 5.1 Número de quadros por segundo FPS a que cada algoritmo executa cada quantidade de partículas a simular nos primeiros 100 quadros, durante todas as etapas de simulação. | 69 |
| 5.2 Tempo total, decorrido durante todas as etapas de simulação do fluido, nos primeiros 100 quadros e para cada quantidade de partículas a simular. | 69 |
| 5.3 Tempo decorrido ao simular as partículas com o algoritmo de "Simetria"nos 100 primeiros <i>frames</i> , comparando os resultados das duas abordagens, com e sem simetria das forças. Nota:Valores acima das retas, representam a abordagem sem Otimização de Muller. Valores abaixo das retas, representam a abordagem com Otimização de Muller. | 71 |
| 5.4 Tempo decorrido ao simular as partículas com o algoritmo de "Monte-Carlo"nos 100 primeiros <i>frames</i> , comparando os resultados das duas abordagens, com e sem simetria das forças. Nota:Valores acima das retas, representam a abordagem sem Otimização de Muller. Valores abaixo das retas, representam a abordagem com Otimização de Muller. | 71 |
| 5.5 Tempo decorrido na etapa de instanciação das partículas, considerando diferentes quantidades de partículas a simular nos primeiros 100 quadros da simulação. | 72 |
| 5.6 Tempo decorrido na etapa de simulação das partículas, considerando diferentes quantidades de partículas a simular nos primeiros 100 quadros da simulação. | 72 |
| 5.7 Tempo decorrido a executar os primeiros 100 quadros da simulação de Monte-Carlo dependo da percentagem de interações a considerar. | 73 |
| 5.8 Aglomerado de partículas causado pelo défice de interações, considerando apenas 20% das interações de Monte-Carlo. | 74 |
| 5.9 Tempo decorrido durante nos primeiros 100 quadros da simulação do fluido, considerando diferentes dimensões de grelha e número de partículas. | 76 |
| 5.10 Tempo decorrido na etapa de contrução da grelha, considerando diferentes dimensões de grelha e número de partículas. | 76 |
| 5.11 Tempo decorrido na etapa de alocação das partículas na grelha, considerando diferentes dimensões da grelha e número de partículas. | 76 |
| 5.12 Etapas de interação do fluido na Caixa simples. | 77 |
| 5.13 Etapas de interação do fluido no Plano inclinado. | 78 |
| 5.14 Etapas de interação do fluido na Câmara de ondas. | 80 |
| 5.15 Etapas de interação do fluido na Câmara de ondas, ao interagir com a placa em movimento. | 81 |
| 5.16 Etapas de interação do fluido na Câmara com obstáculos. | 82 |
| 5.17 Comportamento e interação das partículas de um fluido com <i>Rest density</i> de 1000 e viscosidade de 1 procurando simular um fluido menos viscoso, como é o caso da água. | 83 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| 5.18 Comportamento e interação das partículas de um fluido com <i>Rest density</i> de 1500 e viscosidade de 1000 procurando simular um fluido mais viscoso, como o mel ou a lava. | 84 |
|---|----|

PREVIEW

ÍNDICE DE LISTAGENS

| | | |
|------|--|----|
| 4.1 | Estrutura de dados de uma partícula. | 45 |
| 4.2 | Estrutura de dados de um <i>collider</i> | 45 |
| 4.3 | Algoritmo de instanciação de partículas. | 46 |
| 4.4 | Algoritmo que calcula a densidade e a pressão das partículas. | 47 |
| 4.5 | Algoritmo que calcula as forças da densidade, pressão e gravidade a atuar em cada partícula. | 47 |
| 4.6 | Método que calcula a posição das partículas com integração do tempo. . | 48 |
| 4.7 | Método que calcula a posição e velocidade das partículas ao interagir com um obstáculo. | 49 |
| 4.8 | Método que aplica as posições calculadas das partículas às reais partículas a simular. | 49 |
| 4.9 | Cálculo do valor aleatório responsável por definir a distribuição probabilístico. | 52 |
| 4.10 | Método que converte a posição da partícula para uma posição da grelha. | 54 |
| 4.11 | Método que converte as coordenadas 3D para um índice 1D. | 54 |
| 4.12 | Método que converte as coordenadas 3D para um índice 1D. | 56 |

SIGLAS

CFD Computational Fluid Dynamics (Dinâmica de Fluidos Computacional)

FAB Fluxed Animated Boundary (Animação de Fronteiras de Fluxos)

FFT Fast Fourier Transformation (Transformação rápida de Fourier)

FPS Frames per second (Quadros por Segundo)

PBD Position Based Dynamics (Dinâmica Baseada na Posição)

SPH Smoothed particle hydrodynamics (Hidrodinâmica de Partículas Suavizadas)

PREVIEW

INTRODUÇÃO

Existem diversos tipos de simulações do mundo real, por exemplo as simulações de fluidos, a formação de galáxias, ou até mesmo, simulações de Monte Carlo. Entre estas, uma das mais solicitadas é a de Simulação de Fluidos, que pode ser utilizada para as mais diversas finalidades. Ao longo dos anos, surgiram duas formas principais de interpretar esta categoria de simulações, a Animação de fluidos e a Dinâmica de Fluidos Computacional, **CFD** (Computational Fluid Dynamics) que podem acabar por ser confundidas, mas na realidade, uma é usada principalmente para efeitos visuais, enquanto a outra, serve, de facto, para estudar o comportamento dos fluidos de uma forma mais rigorosa e científica, respetivamente.

A crescente procura por estas simulações, provém do facto de, ao contrário do que se possa imaginar, a simulação de fluidos propõe muito mais aplicações para além dos efeitos visuais. De facto, antes mesmo do setor da computação gráfica começar a trabalhar nesta área, já se modelavam estes fluidos de uma forma ativa, com uma abordagem mais algébrica. Nos anos 50 e 60 um grupo de investigação liderado por Francis H. Harlow desenvolveu métodos como *particle-in-cell* [18], *fluid-in-cell* [16], *vorticity-stream function* [12] e *marker-and-cell* [19] sendo estes métodos uma visão numérica para simular fluxos de fluido transitórios e bidimensionais. Além disso, muito antes desta década, entre os anos de 1750 e 1850, já os físicos Euler, Navier e Stokes tinham chegado às conhecidas equações de Navier-Stokes, usadas para modelar de forma precisa a maioria dos fluxos de fluidos que ocorrem na natureza. Desde então, tem-se vindo a aprofundar cada vez mais a sua investigação, descobrindo-se mais funcionalidades para as equações por de trás destes fluidos, podendo-se descrever de uma forma física, problemas em áreas como a engenharia ou até mesmo modelar correntes de água no oceano, o comportamento da água em canos ou inclusivamente, o ar que passa pelas asas de um avião. Um bom exemplo que demonstra esta importância e até mesmo necessidade, é um estudo realizado por uma equipa de investigadores [52], que consiste num modelo de interação entre glaciares e o próprio oceano, para a criação de tsunamis por parte da fragmentação de *icebergs*. Este estudo explora uma das muitas características que se pode querer representar num fluido, que é a interação de sólidos com o fluido em questão. Para isso, foi criado um método

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

com o objetivo de modelar uma fragmentação dinâmica do *iceberg* por parte de uma combinação da gravidade com a flutuação do mesmo, e ainda, a propagação da ondulação em formato de *tsunamis* produzida por esta fragmentação. Este artigo, para além de poder vir a dar grande contribuição para a comunidade científica, na recente questão das mudanças climáticas e ainda possibilita melhorar a avaliação de perigos para regiões costeiras e que medidas tomar para a sua mitigação [52].

Outro setor, que nos últimos anos tem vindo a recorrer à simulação de fluidos com elevada frequência é o do Entretenimento, onde os filmes e videojogos tentam alcançar ambientes digitais mais realistas e apelativos para os consumidores.

Inicialmente, de forma a reproduzir efeitos de água, estes tinham de ser desenhados em computadores, à mão e imagem por imagem, devido à complexidade que as equações para calcular as físicas de um fluido apresentam. Isto até 1998, em que *AntZ*¹ se torna um dos primeiros filmes de animação a utilizar fluidos computados por computadores, apesar da sua complexidade e exigência para a época². Após esta iniciativa, em 1999 Jos Stam, [43] criou o que se vem a tornar a base para todo este mercado. O que Stam demonstrou neste estudo, foi uma forma mais simples das equações das dinâmicas de fluidos (fluid-dynamics equations) e que não exigem computadores tão potentes. Esta revolução levou a uma integração destas funções em softwares de animação, que contribuíram para o desenvolvimento dos efeitos visuais de grandes filmes, como foi o caso do Lord Of The Rings e do Pirates of the Caribbean. Contudo, esta abordagem apresentava algumas limitações em relação ao controlo que os animadores tinham sobre o fluido, e o tipo de fluido que era possível produzir, já que era impossível lidar com fluidos como a água³. Desde então, tem-se vindo a realizar várias investigações com o objetivo de melhorar estes resultados, e assim, proporcionar efeitos cada vez mais realistas, deixando os consumidores ainda mais impressionados.

De facto, recentemente, simulações de fluidos são cada vez mais usadas neste setor. Bons exemplos que o demonstram, foi a sua utilização para a representação da água e neve, respetivamente, nos filmes da Disney, Moana (2016)⁴ e Frozen (2013)⁵. Dito isto, as aplicações de computação gráfica não precisam de gerar resultados fisicamente corretos (ao contrário das CFD) desde que estes pareçam convincentes e casualmente atraentes para o observador. Estas aplicações podem variar entre simulações em tempo real posteriormente integradas em videojogos e simulações ultrarrealistas, usadas principalmente em efeitos especiais na indústria cinematográfica.

¹AntZ, imdb, Link:https://www.imdb.com/title/tt0120587/?ref_=nv_sr_srsq_0, último acesso: fev 2022

²Guinness World Records, Link:<https://www.guinnessworldrecords.com/world-records/first-film-with-digital-water>, último acesso: fev 2022

³Popular science, Link: <https://www.popsci.com/entertainment-gaming/article/2008-02/and-oscar-goes-fluid-simulation-algorithms/>, último acesso: fev 2022

⁴Moana, imdb, Link: https://www.imdb.com/title/tt3521164/?ref_=fn_al_tt_1, último acesso: fev 2022

⁵Frozen, imdb, Link: https://www.imdb.com/title/tt2294629/?ref_=fn_al_tt_1, último acesso: fev 2022

1.1 Motivação

Uma das razões pela qual os videojogos atraem tantas pessoas, é que tal como nos filmes, é possível criar mundos virtuais com as mais variadas características, sejam elas a aparência com o mundo real, ou algo completamente fictício. Os videojogos ainda têm a particularidade de oferecer ao utilizador a capacidade de interagir verdadeiramente com esses mundos e com aquilo que os rodeia. Sendo que, os fluidos surgem em praticamente toda a parte da natureza, como o oceano, o fumo, ou, até mesmo, uma pequena lareira, adicionar funcionalidades com a capacidade de reproduzir estes fenómenos, torna-se cada vez mais crucial para tornar os ambientes imersivos. Criar estes efeitos de fluidos, por si só, pode ser bastante desafiante e demorado, especialmente, para que sejam convincentes. Quando se fala de videojogos, para além destas características, ainda se deseja que seja possível interagir com o fluido em tempo real. Para isto acontecer, é necessário recorrer a algoritmos muito mais eficientes que os das simulações descritas anteriormente. É necessário que sejam capazes de criar os fluidos de forma convincente e ainda de forma rápida e em tempo real, tornando a sua tarefa muito mais complicada. Outro fator que contribui para a dificuldade de implementar a simulação de um fluido, fisicamente guiado, é que para atingir uma simulação rápida, a utilização de múltiplas *threads* é muitas vezes o recurso predileto, o que para um utilizador menos experiente em paralelização pode originar grandes problemas ao realizar uma adaptação da aplicação para uma arquitetura *multi-core*.

Todos os fatores acima referidos, geram um problema para um determinado grupo de utilizadores que pretenda criar para o seu jogo ou aplicação, uma simulação de fluidos fisicamente guiada, com interação e computada em tempo real, sem que para isso tenha de recorrer a paralelização. Considerando as necessidades e fatores anteriormente citados, nesta dissertação propõe-se, com recurso a um motor de jogo, a criação de um simulador de fluidos, com diversas otimizações e parametrizações, de forma a que seja possível adicionar a um jogo e ou aplicação, uma simulação de um fluido regido pelas **CFD** (Computational Fluid Dynamics) sem o recurso a paralelização, de forma a que seja admissível a interação em tempo real com outros objetos rígidos. O motivo para a utilização destes motores, deve-se ao seu mais recente crescimento tecnológico e ao elevado nível de acessibilidade, tendo-se tornado uma das principais ferramentas utilizadas para o desenvolvimento deste tipo de aplicações interativas.

1.2 Questões de Investigação

O foco desta dissertação foi investigar diferentes métodos de simulação de fluidos, em diversos contextos, e de seguida, definir, implementar e testar estes algoritmos e possíveis otimizações. Para guiar este trabalho de investigação, arquitetura e implementação do sistema que se propõe, foram definidas certas perguntas de investigação que são enumeradas e contextualizadas no seguimento da presente secção.

Como sugerido, para guiar a nossa investigação, foram definidas as seguintes questões:

Q1: Será possível criar uma simulação de fluidos interativa num motor de jogos, mantendo o comportamento fisicamente realista e esperado da simulação.

Q2: Como criar um sistema de simulação de fluidos parameterizáveis, numa cena tridimensional, que possibilite personalização.

Q3: Quais os melhores algoritmos de simulação de fluidos, gerados por interação de partículas, para reproduzir uma simulação eficiente, realista e adequada ao cenário/comportamento que se pretende simular.

A primeira questão, tem como finalidade esclarecer se um motor de jogos é capaz de comportar um simulador de fluidos e desta forma justificar a sua utilização, aplicabilidade, e como dispor de um sistema de simulação de fluidos pode ser uma mais valia para estas completas ferramentas de desenvolvimento.

A questão seguinte, remete para o modo como se pretende que o sistema implementado seja capaz de simular diversas classes de fluidos líquidos. Esta questão pretende esclarecer como o nosso sistema será implementado, para que o fluido e cena disponham de uma variada lista de parâmetros de especificação.

Para finalizar, a terceira e última questão apresentada, está relacionada com o modo como o algoritmo de simulação de fluidos está implementado, tendo à sua disposição diversas otimizações que devem ser analisadas, com o objetivo de comparar a sua eficiência e verificar quais os cenários em que cada uma das implementações pode demonstrar um melhor rendimento, em comparação com as demais alternativas.

1.3 Objetivos

Com o objetivo de responder às questões de investigação anteriormente estabelecidas, procedeu-se à implementação de um sistema de simulação de partículas em tempo real, guiadas por CFD com três otimizações dispares com base nas tão conhecidas equações de Navier-Stokes. Posto isto, considerando as questões de investigação anteriormente definidas, o desenvolvimento desta dissertação, foi dividido na seguinte lista de objetivos:

1. Investigação das bases e evolução do estado atual das simulações de fluidos guiadas por CFD e as suas contribuições em aplicações interativas, como é o caso dos vídeo jogos.
2. Definição de uma lista de funcionalidades e propriedades a serem implementadas, e distinção das diferentes otimizações aplicadas na computação do fluido.
3. Planeamento dos diferentes cenários de simulação, especialmente desenhados com a finalidade de colocar em prova as diferentes funcionalidades anteriormente estabelecidas.

4. Implementação de um simulador de fluidos com diferentes níveis de otimização, guiado por CFD, que cumpre com os diferentes requisitos delineados anteriormente, e que seja capaz de correr a simulação em tempo real, com interação e com diferentes variáveis totalmente parametrizáveis.
5. Avaliação do protótipo finalizado, através de diferentes estatísticas, com o objetivo de analisar a qualidade dos resultados e visualização dos diferentes cenários simulados, de forma a verificar os diferentes comportamentos suportados pelo fluido.

1.4 Contribuições

As principais contribuições alcançadas por esta dissertação, são a utilização de diferentes algoritmos de busca e interação de partículas, como forma de otimizar as computações necessárias para a criação de simulações de fluidos com o método de *Smoothed-particle hydrodynamics* (SPH). Estas otimizações permitem que o utilizador crie diferentes formas de simulação de fluidos, com certos níveis de velocidade computacional, sem recorrer à utilização de computação paralela. Com estas otimizações, é possível criar uma simulação apenas guiada pela interação independente das partículas, assim como, recorrer a uma grelha estática auxiliar na busca das partículas em interação. Em adição, também criámos diversas áreas de simulação para que seja possível observar os diferentes cenários/comportamentos suportados pelo nosso simulador. Assim, com uma lista de propriedades de fluido completamente personalizáveis, é possível criar diferentes comportamentos como a ondulação da água, fluxos em cascata, ou uma simples queda de um grande volume de fluido líquido, tal como pode ser observado no exemplo da Figura 1.1. Por fim, terminada a implementação do nosso simulador, foram realizadas diversas comparações estatísticas entre as diferentes otimizações disponíveis, sendo possível chegar a algumas conclusões em relação à aplicabilidade destas otimizações, tal como o grau de eficácia entre si. Para além das avaliações estatísticas anteriormente citadas, também foi importante a avaliação dos nossos fluidos quando colocados nos diferentes cenários de simulação.

1.5 Estrutura do Documento

Este capítulo inicial, introduz o contexto e a motivação para o desenvolvimento desta dissertação, onde é apresentada uma pequena introdução histórica da simulação de fluidos, assim como, a importância desta área de investigação e quais as oportunidades que origina nos diferentes setores. Por sua vez, é feita uma pequena descrição do problema, juntamente com as questões que este origina. Por fim, com base nas questões apresentadas, são propostos os objetivos a cumprir e as principais contribuições que se pretendem alcançar.

Segue-se o segundo capítulo, onde são estabelecidas algumas noções básicas da área e a apresentação de alguns trabalhos relacionados. Começa-se pela apresentação das

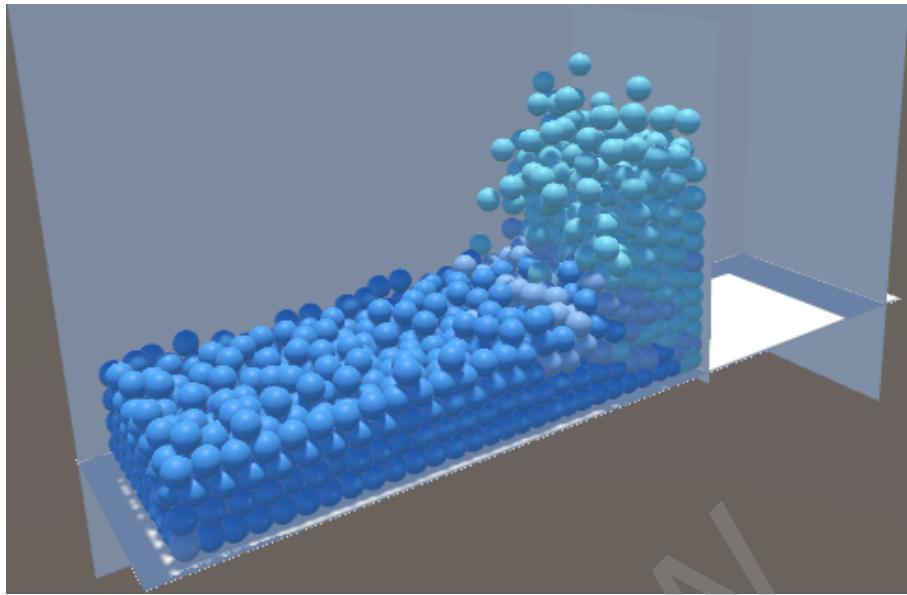


Figura 1.1: Exemplo do comportamento de ondulação do fluido, quando condicionado pela ação de um obstáculo em movimento.

equações de Navier-Stokes, Boundary Conditions, seguido-se da explicação dos principais pontos de vista no que toca às simulações. Passa-se então, para as simulações em tempo real e termina-se numa secção para a Interação e Computação gráfica, onde será descrito o funcionamento geral de um motor de jogos e alguns videojogos.

O terceiro capítulo, começa com uma descrição mais detalhada do sistema que se propõe neste estudo, onde são apresentados os requisitos, a arquitetura, as principais ferramentas, e por último, é explicada em maior detalhe, a teoria utilizada como base de desenvolvimento do sistema implementado. No quarto capítulo, é descrito o funcionamento geral do sistema, juntamente com os atributos necessários para a sua utilização. De seguida, é apresentada a implementação e o funcionamento de cada um dos algoritmos implementados, seguindo-se uma secção onde são descritos os diversos cenários e modos de observação que o nosso sistema de simulação de fluidos pode oferecer.

O quinto capítulo, começa por explicar as diferentes métricas de avaliação selecionadas para testar o funcionamento de cada um dos algoritmos e cenários. Deste modo, é realizada a avaliação e descrição do comportamento e os resultados observados no teste das referidas métricas. Adicionalmente, segue-se uma secção final, onde é possível observar os diferentes fluidos em interação com os diferentes cenários, resultando assim, nos comportamentos suportados pelos fluidos do nosso sistema. Para finalizar, no sexto capítulo, é apresentada a conclusão que se retira de todos os testes e cenários implementados, e consequentemente, as perguntas de investigação propostas serão respondidas com base nos resultados obtidos.

ENQUADRAMENTO E TRABALHO RELACIONADO

O objetivo que se pretende atingir com este capítulo é fornecer uma visão geral em relação as áreas de estudo relacionadas com simulação de fluidos. Assim, será feita uma pequena análise histórica de determinados trabalhos relevantes para o objetivo da presente dissertação, que em combinação com fundamentos teóricos referentes ao comportamento de fluidos, poderão servir como base para o desenvolvimento se um simulador de fluidos. Em primeiro lugar, será feita uma breve passagem pela definição e história das simulações de fluidos e que questões estas acatam. Seguidamente, serão analisados os principais conceitos como base para a computação de fluidos. Com todas a noções anteriores enunciadas, serão apresentadas diversas técnicas de implementação de simulações de fluidos juntamente com os requisitos destes sistemas. Para finalizar, será feita uma breve explicação do que consiste um motor de jogos e serão analisadas algumas implementações de fluidos em dois dos principais video jogos do mercado. Será ainda explicada, de que forma estas simulações causam tanto impacto na referida indústria.

2.1 Técnicas de Simulação de Fluidos

Existem fluxos de fluido por praticamente todo o lugar que se possa imaginar, podendo estes ser o simples ar que se respira, como os rios e oceanos que nos rodeiam. Para além destes impressionantes fenómenos e da sua interação com objetos rígidos, inclusivamente com seres vivos, podem ser gerados pequenos salpicos de água e até mesmo gases, como o fumo de uma fogueira e inclusive, as próprias chamas. Deste modo, pelo fato de todos estes fenómenos estarem presentes no dia a dia, rapidamente os fluidos se tornaram uma importante parte na computação gráfica.

Esta importância, advém da necessidade de através da simulação de fluidos se ter uma melhor percepção de como estes funcionam e assim, se desenvolverem novas tecnologias com base nesse conhecimento. Uma área para a qual a simulação de fluidos também tem ganho bastante importância é a indústria de desenvolvimento de videojogos, visto que

um dos seus principais objetivos é criar mundos cada vez mais imersivos para os jogadores. Originando assim, a demanda por essas tecnologias para motores de jogos, como é o caso do Unity e até mesmo do Unreal. Com este objetivo em mente, Jos Stam [42] afirma que, apesar de já existirem vários modelos que têm a finalidade de simular efeitos que se assemelhem com fluidos, apresentando ainda um método que consistia em renderizar partículas como texturas, estes modelos apresentam um problema que consiste na dificuldade que existe em animar estas mesmas partículas de forma convincente.

Posto isto, acredita-se que a melhor alternativa para resolver este problema, seja o recurso a abordagens com base na física dos fluxos de fluidos. Estas abordagens, que começaram a ser desenvolvidas desde 1750, originaram as incompressíveis equações de Navier-Stokes que continuam líderes no que toca à simulação de fluidos.

2.1.1 Termos usados pelas Equações de Navier-Stokes

Advecção: A movimentação do fluido faz com que o mesmo transporte objetos e outros fluidos, seguindo o seu fluxo. Imagine-se que, ao esguichar corante para um fluido em movimento, o corante é transportado ou adveccionado, ao longo do campo de velocidade do fluido.

Nas Navier-Stokes, o termo de Advecção transporta a velocidade de um ponto para outro no seu campo de velocidade. Isto significa que esta é responsável por ajudar a evolução do campo de velocidade, no decorrer do tempo.

Pressão: As moléculas de um fluido podem mover-se em volta umas das outras e tendem a espremer e a comprimir-se. Isto acontece quando uma força é aplicada ao fluido, apesar de não percorrer o fluido completo de forma instantânea. Ao invés disso, as moléculas que se encontram mais próximas do ponto de aplicação da força empurram as que se encontram mais distantes e, devido a este fenómeno, a pressão aumenta. Como a pressão é a força por unidade de área, qualquer pressão no fluido naturalmente leva à sua aceleração.

Difusão: Ao interagirmos com os fluidos do mundo real, é perceptível que nem todos têm a mesma espessura. Perante este facto, é costume dizer-se que fluidos espessos possuem maior viscosidade. A viscosidade é a medida de quanto um fluido resiste para fluir. Essa resistência resulta na difusão do momento (e, portanto, da velocidade), e por isso, é chamada difusão. Por outras palavras, podemos ver esta força, como a força responsável por fazer uma partícula do fluido mover-se na velocidade média das suas partículas vizinhas.

Forças externas: Por fim, temos as forças externas aplicadas ao fluido. Estas forças podem ser forças locais ou Forças de corpo (*Body forces*). As forças locais são aplicadas a uma região específica do fluido, por exemplo, a força de uma ventoinha a soprar o ar. Por outro lado, as Forças de corpo, são aplicadas de forma constante por todo o fluido. Um bom exemplo de uma força desta classe é a própria gravidade.