

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO

GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DA COMPUTAÇÃO
CENTRO DE INFORMÁTICA

2006.1

SIMULAÇÃO VISUAL 3D DE FUMAÇA

TRABALHO DE GRADUAÇÃO EM COMPUTAÇÃO GRÁFICA

Aluno – Dinaldo Andrade Pessoa, dap2@cin.ufpe.br.
Orientador – Sílvio de Barros Melo, sbm@cin.ufpe.br.

05 de outubro de 2006

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

“Com estudo e trabalho pode o homem conquistar tesouros maiores do que os que se ocultam no seio da terra ou sob os abismos do mar.”

Frase retirada do conto “Tesouro de Bresa”, de Malba Tahan.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

RESUMO

Com a crescente demanda da indústria de efeitos especiais por representações gráficas convincentes, foi natural que a simulação visual de fluidos evoluísse. Evolução, essa, que levou a um estado da arte onde as simulações são fundamentadas em modelos baseados em física. Um consenso entre os pesquisadores é o uso das Equações de Navier-Stokes (geralmente acompanhada de modificações e extensões). É impressionante como, de uma forma natural, esses modelos físicos representam a movimentação dos fluidos, superando qualquer sistema de partículas convencional.

É nesse contexto que nosso trabalho se insere como uma forma de dominar o conhecimento envolvido na simulação de fluidos que, no nosso caso específico, é voltada para simulação visual 3D de fumaça. Esse trabalho culminou no desenvolvimento de uma aplicação que, além de conter a representação gráfica da fumaça em si, contém uma interface gráfica que permite ao usuário o controle sobre as configurações do modelo físico. Dessa forma, o usuário pode realizar experimentações e aprender como as configurações do modelo físico afetam a representação gráfica.

Palavras-chave: Computação Gráfica, Simulação, Modelo Físico, Fluidos, Fumaça.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, pois eles sempre prezaram pela minha educação e são os principais responsáveis por eu ter chegado onde estou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha família pelo apoio incondicional durante todo o desenvolvimento do trabalho.

Agradeço ao meu orientador, Sílvio Melo, por estar sempre presente me auxiliando e tirando dúvidas.

Agradeço aos testadores da aplicação desenvolvida durante o trabalho, Saulo (meu irmão) e Marcos, pelos *feedbacks* que me deram.

Agradeço novamente a Sílvio Melo e Saulo pelas contribuições feitas durante as revisões da monografia.

Agradeço a todos os meus amigos e minha namorada, Taciana, por me fazerem lembrar que existem outras coisas interessantes para se fazer além do trabalho de graduação.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	8
1.1 MOTIVAÇÃO.....	8
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO DE GRADUAÇÃO	8
1.3 RELEVÂNCIA DO TRABALHO	9
1.4 METODOLOGIA APLICADA	10
1.5 ORGANIZAÇÃO DA MONOGRAFIA.....	10
2. EVOLUÇÃO E ESTADO DA ARTE DA SIMULAÇÃO DE FLUIDOS	11
3. SOLUÇÃO PROPOSTA.....	12
3.1 MODELO FÍSICO.....	12
3.1.1 Discretização.....	14
3.1.2 Resolução das equações.....	16
3.2 RENDERIZAÇÃO.....	24
4. IMPLEMENTAÇÃO	26
4.1 TECNOLOGIA	26
4.2 PROJETO DE IMPLEMENTAÇÃO	26
4.2.1 Casos de Uso	26
4.2.2 Diagrama de Classes.....	30
4.2.3 Diagrama de Estados.....	31
5. RESULTADOS E PROBLEMAS ENCONTRADOS	32
6. TRABALHOS FUTUROS	33
REFERÊNCIAS	35
ANEXO A - IMAGENS DA APLICAÇÃO	37

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Cena do filme “Star Wars: Episode III”	8
Figura 1.2 – Simulação Visual 2D de Fumaça.	9
Figura 3.1 - Um grid à esquerda e um único voxel à direita.....	14
Figura 3.2 – Difusão entre células vizinhas.	19
Figura 3.3 – Advecção de uma única partícula.	20
Figura 3.4 – Advecção calculada retrocedendo no tempo.....	21
Figura 3.5 – Decomposição de Hodge.....	22
Figura 3.6 – Renderização de fatias do grid	25
Figura 4.1 – Casos de uso dos controles da simulação.	27
Figura 4.2 – Casos de uso dos termos do modelo físico.	27
Figura 4.3 – Casos de uso dos parâmetros estáticos.	28
Figura 4.4 – Casos de uso dos parâmetros dinâmicos.	30
Figura 4.5 – Diagrama de classes simplificado.....	31
Figura 4.6 – Diagrama de estados.....	32
Figura A.1 – Fumaça com a configuração padrão e um grid de 20x40x20.	37
Figura A.2 – Fumaça com opacidade 5 e um grid de 20x40x20.....	37
Figura A.3 – Fumaça com três fontes de vento definindo um caminho.....	38
Figura A.4 – Fumaça com duas fontes de densidade com suas respectivas fontes de temperatura.	38
Figura A.5 – Fumaça junto com a interface gráfica.....	39

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Operadores.	16
-------------------------------	----

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

1. Introdução

1.1 Motivação

A simulação de fluídos (fumaça, água, fogo, etc.) sempre foi de grande importância tanto para área gráfica (cinema, jogos, realidade virtual, etc.) quanto para área de engenharia (aerodinâmica, tensão, arrasto, etc.).

Podemos ver em filmes recentes de grande sucesso o uso de efeitos especiais de alta qualidade envolvendo fluidos. Como a fumaça exibida na Figura 1.1.



Figura 1.1 – Cena do filme “Star Wars: Episode III”.

Nossa motivação principal é a busca pelo domínio do conhecimento envolvido na simulação de fluidos que, no nosso caso específico, é aplicado à simulação de fumaça. O domínio e aprimoramento desse conhecimento têm como intuito criar outras possibilidades de aplicações (em jogos, por exemplo), o que é de nosso interesse particular.

Vale a pena salientar que nosso escopo se limita à área de computação gráfica, preocupando-se mais com o visual e deixando de lado questões de precisão nos cálculos, como ocorre na área de engenharia.

1.2 Objetivos do Trabalho de Graduação

Os objetivos do trabalho desenvolvido visaram a revisão bibliográfica da evolução e do estado da arte da simulação de fumaça, seguida de uma implementação da simulação visual 3D de fumaça. Essa implementação contou com uma interface gráfica interativa que permitiu a realização de experimentos na simulação. Os controles oferecidos pela interface são a ativação e desativação do cálculo de alguns termos das Equações de Navier-Stokes (ENS); a definição dos valores das constantes dos termos; e a adição de fontes de vento, de temperatura e

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

de densidade. Tudo isso permite aos usuários casuais um entendimento prático sobre o comportamento dos fluídos, além de permitir que usuários mais avançados avaliem as opções quanto ao impacto das configurações escolhidas no custo computacional visível das soluções (por exemplo, um usuário que deseje definir a solução mais detalhada e que ainda execute em tempo real).

Vale salientar que esse trabalho consiste em uma evolução de um trabalho passado desenvolvido durante a disciplina de Tópicos Avançados em Mídias, cujo escopo era a simulação visual 2D de fumaça, exibida na Figura 1.2.

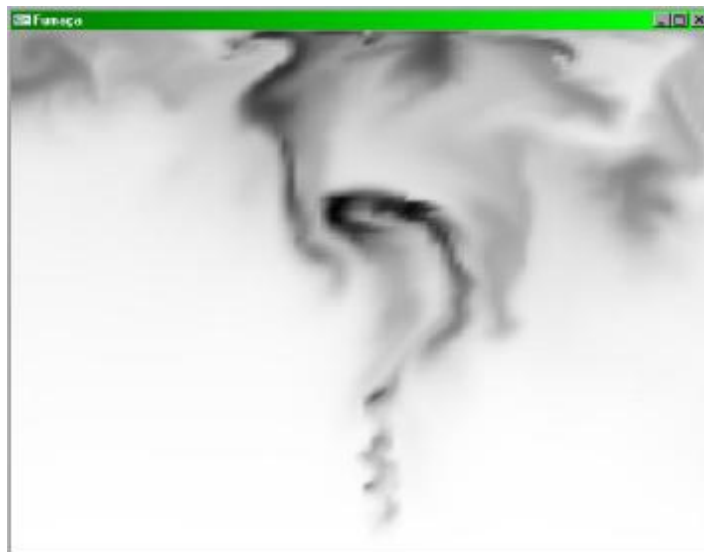


Figura 1.2 – Simulação Visual 2D de Fumaça.

1.3 Relevância do Trabalho

Sabemos que o interesse do homem pelo estudo dos fluidos vem de muito tempo atrás. Contudo, na área de computação gráfica, vimos que, com a recente evolução da indústria de efeitos especiais cinematográficos, a demanda por representações gráficas convincentes de fluidos (entre eles, a fumaça) aumentou muito. Essa demanda impulsionou pesquisas na área e culminou na criação de modelos de alta qualidade utilizados em ferramentas comerciais, como o [RealFlow]. Existem, inclusive, empresas especializadas na criação de efeitos especiais de fluidos, como a [Fusion CI Studios].

Tendo em vista o crescimento do mercado de jogos e o aumento no grau de qualidade, principalmente no aspecto gráfico, essa demanda, naturalmente, também surgiu. No entanto, diferentemente de filmes, jogos necessitam de soluções que possam ser executadas em tempo real. Portanto, os modelos físicos, por possuírem um tremendo custo computacional de simulação, precisam antes adquirir escalabilidade; ou através do uso extensões de **hardware**, como Processadores **Multithread**, GPUs (**Graphics Processing Unit**) e PPU's (**Physics Processing Unit**); ou serem otimizados o bastante para executarem em condições mínimas estabelecidas.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

Implementações de simulação de fluidos em GPUs e PPU's já são uma realidade e apresentaram bons resultados: [Mark 2004] alcançou o resultado de uma simulação 2D implementada na GPU executar seis vezes mais rápida do que uma equivalente na CPU; a empresa [AGEIA] introduziu na sua PPU suporte à simulação de fluidos.

1.4 Metodologia Aplicada

Nossa metodologia consistiu na divisão do desenvolvimento do trabalho basicamente em três etapas, as quais foram detalhadas em atividades práticas:

1. Pesquisa
 - 1.1. Revisão bibliográfica;
 - 1.2. Documentação da pesquisa;
2. Desenvolvimento
 - 2.1. Definição dos requisitos (modelo físico, renderização, interface gráfica e tecnologia de implementação);
 - 2.2. Documentação dos requisitos;
 - 2.3. Definição dos casos de uso;
 - 2.4. Análise dos casos de uso (elaboração dos diagramas de sequência);
 - 2.5. Elaboração dos diagramas de classes e diagramas de estado;
 - 2.6. Documentação do projeto de implementação;
 - 2.7. Implementação do modelo físico;
 - 2.8. Implementação da renderização;
 - 2.9. Implementação da interface gráfica;
 - 2.10. Documentação dos resultados e problemas encontrados;
3. Relatório
 - 3.1. Redação da monografia

Vale salientar que foram de grande importância as atividades de documentação, pois cada artefato gerado serviu como um guia para as atividades posteriores e facilitou muito a redação da monografia.

1.5 Organização da Monografia

A monografia está organizada em seis capítulos. A seguir, uma breve descrição do conteúdo contido em cada capítulo:

Capítulo 1: Introdução

Apresentação da motivação, dos objetivos e da relevância do trabalho de graduação, juntamente com a metodologia aplicada. Finalizando com a descrição da organização da monografia.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

Capítulo 2: Evolução e Estado da Arte da Simulação de Fluidos
Breve história da simulação de fumaça, contendo as principais inovações introduzidas nos últimos anos.

Capítulo 3: Solução Proposta
Definições da solução proposta: o modelo físico e a forma de renderização.

Capítulo 4: Implementação
Documentação sobre a implementação, contendo as justificativas das escolhas em relação às tecnologias de implementação e a descrição do projeto de implementação.

Capítulo 5: Resultados e Problemas Encontrados
Explicação dos resultados obtidos e problemas encontrados na implementação da simulação visual 3D de fumaça.

Capítulo 6: Trabalhos Futuros
Sugestões de trabalhos futuros que buscam o aprimoramento do trabalho já desenvolvido.

2. Evolução e Estado da Arte da Simulação de Fluidos

As primeiras soluções para simulação de fluidos fizeram uso de vários artifícios para alcançarem seus resultados. Artifícios tais como: animação de um sistema de partículas, turbulência randômica, vortex acoplado com um solucionador da equação de Poisson, ENS em **grids** bidimensionais. Essa evolução ocorreu aproximadamente entre 1983 e 1997 e encontra-se bem relatada em [Stam 1999].

Em 1997, Foster e Metaxas mostraram as vantagens de se utilizar as ENS em **grids** tridimensionais [Foster e Metaxas 1997]. Contudo, a solução deles utilizava métodos numéricos explícitos para resolver as ENS. Isso fazia com que fosse necessário o uso de pequeníssimos passos de tempo em vista de tornar a simulação estável. Porém, passos de tempo muito pequenos inviabilizavam o tempo total de simulação. Apenas no ano de 1999, com o advento do método semi-Lagrangeano, introduzido por [Stam 1999], e o uso de métodos implícitos, as simulações adquiriram estabilidade e puderam utilizar passos de tempo maiores.

A partir de então, novos avanços foram estimulados: [Fedkiw et al. 2001] adicionou o chamado “confinamento de vorticidade” que reintroduz a energia perdida devido à dissipação numérica do método semi-Lagrangeano por meio de forças calculadas a partir do rotacional da fumaça; [Rasmussen et al. 2003] combinou **grids** de fumaça 2D de alta resolução com um campo vetorial de velocidade 3D gerado pelo espectro de Kolmogorov para simular fenômenos de

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

larga escala sem sobrecarregar os recursos de memória; [Losasso et al. 2004] utilizou uma técnica de refinamento de malhas, chamada Estrutura de Dados **Octree**, para capturar detalhes visuais localizados; [Treuille et al. 2003; McNamara et al. 2004 e Fattal et al. 2004] propuseram métodos que permitem o controle mais direto do animador sobre o comportamento da fumaça; [Liu et al. 2004] implementaram a simulação 3D com obstáculos complexos em tempo real diretamente na GPU (**Graphics Processing Unit**); [Selle et al. 2005] introduziu uma técnica híbrida que faz uso de vortex de partículas e **grids** para geração de efeitos altamente turbulentos como explosões. Esses trabalhos citados são os mais recentes na área de simulação de fluidos e englobam o estado da arte na área.

3. Solução Proposta

Nossa solução faz uso das Equações de Navier-Stokes (ENS) como forma de descrever a movimentação dos fluidos. Além da movimentação do fluido em si, nossa solução considera mais duas propriedades que ao mesmo tempo em que são transportadas através do fluxo do fluido, influenciam a sua movimentação. Essas propriedades são a densidade da fumaça, as partículas sólidas das cinzas resultantes de uma combustão, e a temperatura do fluido, medida da energia cinética associada à vibração aleatória das partículas do fluido. Vale a pena salientar a distinção de que “o ar é o fluido cujo fluxo transporta a densidade da fumaça e a temperatura”.

Para podermos visualizar a fumaça em si, nossa solução contou com uma representação gráfica que dá uma noção de 3D através da disposição em profundidade de primitivas gráficas retangulares e de uma forma de iluminação que considera o volume e a transparência da fumaça.

Para que a solução proposta alcançasse os objetivos estabelecidos, foi preciso definir o modelo físico e a forma de renderização. Todas essas definições serão explicadas a seguir.

3.1 Modelo Físico

Nosso modelo físico tomou como base matemática as ENS:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \frac{\nabla P}{r} + \nu \nabla^2 \mathbf{u}, \quad (2)$$

onde ν é a viscosidade, $\mathbf{u}$ é a velocidade, P é a pressão e r é a densidade. (1) garante que o fluido seja conservador de massa e (2) garante que o fluido seja conservador de momento.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

As equações acima representam apenas parte do comportamento desejado para a velocidade do ar (o fluxo do ar). Portanto, para completarmos nosso modelo em relação à velocidade, foi preciso adicionar mais alguns termos a (2), o que resultou em (4). Além disso, como nosso modelo também contempla a representação da densidade da fumaça e da temperatura do ar, foi preciso definir mais duas equações, as quais representam, respectivamente, o comportamento da densidade da fumaça (5) e o comportamento da temperatura do ar (6).

Dessa forma, as equações do nosso modelo são:

Velocidade

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} - \frac{\nabla P}{r} + \nu \nabla^2 \mathbf{u} + f_{vort} + f_{flut} + f_{usua}, \quad (4)$$

onde f_{vort} é a força de confinamento de vorticidade, f_{flut} é a força de flutuação e f_{usua} são as forças inseridas pelo usuário (fontes de vento).

Densidade

$$\frac{\partial r}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla r + k_r \nabla^2 r + r_{usua}, \quad (5)$$

onde k_r é a constante de viscosidade da densidade e r_{usua} é a densidade inserida pelo usuário.

Temperatura

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla T + k_T \nabla^2 T + T_{usua}, \quad (6)$$

onde k_T é a constante de viscosidade da temperatura e T_{usua} é a temperatura inserida pelo usuário.

Podemos notar que (5) e (6) não possuem o termo $-\frac{\nabla P}{r}$, pois este é utilizado apenas para forçar o campo vetorial de velocidade a ser conservador de massa, restrição explicitada por (3), a qual não se aplica aos campos escalares de densidade e temperatura.

A nossa implementação contempla todas as equações e seus respectivos termos mostrados. Adicionalmente, utilizando a interface gráfica, o usuário pode

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

ativar e desativar o cálculo de certos termos das equações para realização de experimentos.

3.1.1 Discretização

Antes de começarmos a resolver as ENS, foi preciso defini-las no espaço discreto e finito, o que consistiu em representar os campos vetoriais e escalares e os operadores associados de uma forma que pudessem ser implementadas computacionalmente. A seguir explicaremos como foi feita a discretização.

Campos Vetoriais e Escalares

Os campos vetoriais tridimensionais são funções $f(x,y,z)$ tais que $f: \mathcal{R}^3 \rightarrow \mathcal{R}^3$. A única diferença para os campos escalares está no número de dimensões do contradomínio, pois estes são funções $f(x,y,z)$ tais que $f: \mathcal{R}^3 \rightarrow \mathcal{R}$.

Suas formas discretas são nada mais do que a modificação direta do domínio para o conjunto dos números inteiros e a restrição do domínio ser finito. O que implicou em funções $f(x,y,z)$ tais que $f: Z^3 \rightarrow \mathcal{R}^3$, para campos vetoriais, ou tais que $f: Z^3 \rightarrow \mathcal{R}$, para campos escalares, com as restrições $x \in [0, x_{\max}]$, $y \in [0, y_{\max}]$, $z \in [0, z_{\max}]$.

A Figura 3.1 exibe um exemplo do **grid** 3D finito que os campos vetoriais e escalares se tornaram.

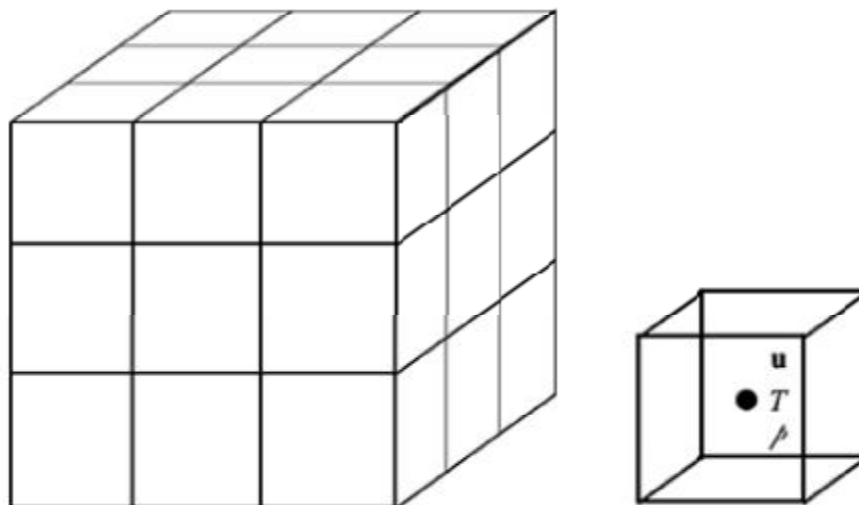


Figura 3.1 - Um **grid** à esquerda e um único **voxel** à direita.

Cada célula do **grid** é chamada de **voxel**. Todos os **voxels** são cubos com dimensões de tamanho h . O centro de cada **voxel** é o ponto de referência onde se

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

localizam as propriedades do fluido (velocidade, densidade e temperatura), como é exibido na Figura 3.1. Os valores das propriedades do fluido em pontos entre os centros são calculados a partir da interpolação entre os valores nos centros dos oito **voxels** mais próximos.

Operadores

Os operadores encontrados nas ENS são os de gradiente, divergente, Laplace e rotacional. Todos esses operadores são apenas extensões de um único operador, cuja forma resultante depende do contexto em que for aplicado. Este operador é representado pelo símbolo ***nabla*** (freqüentemente chamado de “del”) e é definido por $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$. A Tabela 3.1 exhibe como os operadores foram definidos na forma de diferenças finitas.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

Tabela 3.1 – Operadores.

Nome	Forma contínua	Forma de diferença finita
Gradiente	$\nabla r = \left(\frac{\partial r}{\partial x}, \frac{\partial r}{\partial y}, \frac{\partial r}{\partial z} \right)$	$\left(\begin{array}{c} \frac{r_{i+1,j,k} - r_{i-1,j,k}}{2dx} \\ \frac{r_{i,j+1,k} - r_{i,j-1,k}}{2dy} \\ \frac{r_{i,j,k+1} - r_{i,j,k-1}}{2dz} \end{array} \right)$
Divergente	$\nabla \cdot \mathbf{u} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial n}{\partial z}$	$\begin{array}{c} \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i-1,j,k}}{2dx} \\ + \frac{v_{i,j+1,k} - v_{i,j-1,k}}{2dy} \\ + \frac{n_{i,j,k+1} - n_{i,j,k-1}}{2dz} \end{array}$
Laplace	$\nabla^2 r = \frac{\partial^2 r}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 r}{\partial z^2}$	$\begin{array}{c} \frac{r_{i+1,j,k} - 2r_{i,j,k} + r_{i-1,j,k}}{(dx)^2} \\ + \frac{r_{i,j+1,k} - 2r_{i,j,k} + r_{i,j-1,k}}{(dy)^2} \\ + \frac{r_{i,j,k+1} - 2r_{i,j,k} + r_{i,j,k-1}}{(dz)^2} \end{array}$
Rotacional	$\nabla \times \mathbf{u} = \left(\frac{\partial n}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}, \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial n}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y} \right)$	$\left(\begin{array}{c} \frac{n_{i,j,k+1} - n_{i,j,k-1}}{2dy} - \frac{v_{i,j+1,k} - v_{i,j-1,k}}{2dz} \\ \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i-1,j,k}}{2dz} - \frac{n_{i,j,k+1} - n_{i,j,k-1}}{2dx} \\ \frac{v_{i,j+1,k} - v_{i,j-1,k}}{2dx} - \frac{u_{i+1,j,k} - u_{i-1,j,k}}{2dy} \end{array} \right)$

3.1.2 Resolução das equações

Equações com muitos termos, como as ENS, podem ser resolvidas como qualquer outro problema complexo, subdividindo-o em problemas menores. A técnica utilizada é a chamada “passos fracionados”. A idéia-chave consiste em resolver a equação original integrando uma sucessão de equações mais simples, cada uma com poucos termos do lado direito.

Dessa forma, a nossa solução ficou mapeada na resolução da seguinte seqüência de equações:

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

1. Forças externas: $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = f_{vort} + f_{flut} + f_{usua}$

2. Difusão: $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \nu \nabla^2 \mathbf{u}$

3. Projeção: $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{\nabla P}{r}$

4. Advecção: $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u}$

5. Projeção: $\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = -\frac{\nabla P}{r}$

Seguida pela resolução das equações envolvendo os campos de densidade e temperatura. Porém, abaixo exibimos apenas para o campo densidade, pois são idênticas para o campo de temperatura.

6. Fonte externa: $\frac{\partial r}{\partial t} = r_{usua}$

7. Difusão: $\frac{\partial r}{\partial t} = k_r \nabla^2 r$

8. Advecção: $\frac{\partial r}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla r$

A seguir explicaremos a resolução de cada equação separadamente.

- Forças externas

Confinamento de Vorticidade

Confinamento de vorticidade foi inventado por Steinhoff [Steinhoff et al. 1994] para computação numérica de fluxos turbulentos complexos em torno de helicópteros, onde não é possível adicionar **voxels** o bastante para resolver as características de pequena escala do fluxo com precisão.

Uma versão modificada foi introduzida por [Fedkiw et al. 2001] para adicionar de volta ao fluido a energia perdida devido à dissipação numérica do método semi-Lagrangiano.

O primeiro passo é calcular o rotacional do campo vetorial de velocidade,

$$\boldsymbol{\omega} = \nabla \times \mathbf{u}.$$

Depois, normaliza-se o gradiente do tamanho do rotacional,

$$\mathbf{N} = \frac{\nabla |\boldsymbol{\omega}|}{|\nabla |\boldsymbol{\omega}||},$$

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

o que resulta em um campo de vetores unitários que apontam na direção de regiões com maior rotacional.

Por fim, a magnitude e a direção da força aplicada ao fluido são calculadas por

$$f_{vort} = eh(\mathbf{N} \times \boldsymbol{\omega}),$$

onde $e > 0$ é um parâmetro de controle do usuário e h é a dimensão dos **voxels** do **grid**.

Flutuação

Ambas a densidade e a temperatura influenciam a velocidade do fluido. A densidade faz com que a gravidade puxe a fumaça para baixo, enquanto temperaturas quentes tendem a fazê-la subir.

Uma equação simples calcula esse efeito,

$$f_{flut} = -a r \mathbf{y} + b(T - T_{amb}) \mathbf{y},$$

onde a , b e T_{amb} (temperatura ambiente) são parâmetros de controle do usuário e $\mathbf{y} = (0,1,0)$ é o vetor vertical.

Usuário

As forças inseridas pelo usuário são capturadas pela interface gráfica e diretamente adicionadas ao campo de velocidade.

- Difusão

A difusão consiste na troca de grandezas de certa propriedade (densidade, temperatura e velocidade) entre espaços vizinhos de um fluido. Por exemplo, o café em pó, quando colocado dentro de um copo de leite, tende a se “difundir” em todas as direções possíveis dentro do leite. A Figura 3.2 exhibe como ocorre a difusão em um **grid** 2D finito.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

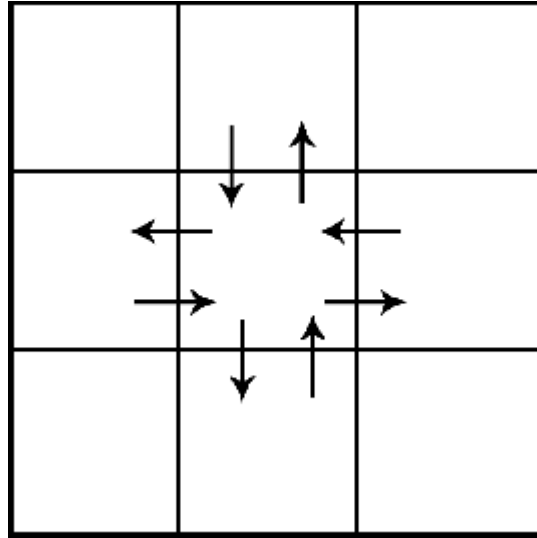


Figura 3.2 – Difusão entre células vizinhas.

O passo de difusão, representado por

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} = \nu \nabla^2 \mathbf{u},$$

poderia ser calculado diretamente através do método de Euler [Weisstein],

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t + dt) = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t) + \nu dt \nabla^2 \mathbf{u}(\mathbf{x}, t).$$

Contudo, a simulação se tornaria instável com o uso de valores grandes de ν e dt . A solução para este problema é seguir a formulação feita por [Stam 1999] que utiliza um método implícito. A idéia chave é retroceder no tempo calculando qual o campo de velocidade no tempo $t + dt$ que atualizado por $-dt$ seria igual ao campo de velocidade inicial no tempo t , ou seja, calcular

$$\mathbf{u}(\mathbf{x}, t) = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t + dt) - \nu dt \nabla^2 \mathbf{u}(\mathbf{x}, t + dt),$$

equivalente a

$$(\mathbf{I} - \nu dt \nabla^2) \mathbf{u}(\mathbf{x}, t + dt) = \mathbf{u}(\mathbf{x}, t), \quad (7)$$

onde $\mathbf{I}$ é a matriz identidade. Essa equação tem um formato semelhante a um tipo de equação bastante conhecida, chamada de equação de Poisson. Sua resolução será explicada na subseção Equação de Poisson, que pode ser encontrada no final desta seção.

Essa formulação é bem adequada, pois se mantém estável para quaisquer valores de ν e dt . De fato, o método de Euler por si só é mais simples e eficiente.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

Contudo, ele obrigaria o uso de passos de tempo tão pequenos que o tempo total de simulação se tornaria maior do que quando calculássemos algumas dezenas de iterações de algum método padrão para resolver o sistema linear resultante da equação de Poisson.

- **Advecção**

A advecção consiste no transporte de certa propriedade seguindo o fluxo do fluido. Por exemplo, uma mancha de óleo, quando presente em um rio, tende a seguir a correnteza. A Figura 3.3 exibe como ocorre a advecção em um **grid** 2D finito.

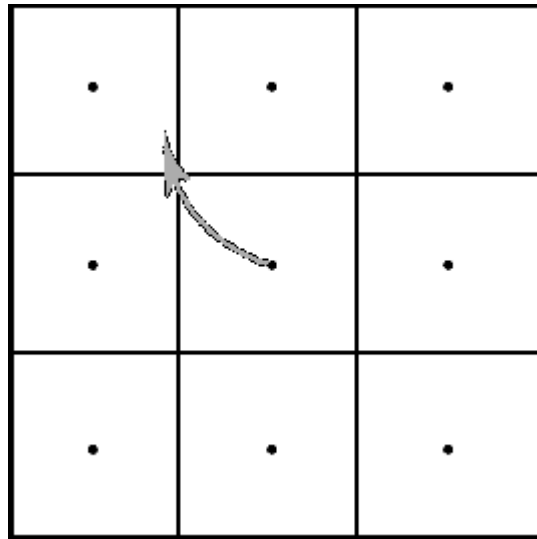


Figura 3.3 – Advecção de uma única partícula.

O passo de advecção, representado por

$$\frac{\partial r}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla r ,$$

poderia ser calculado utilizando diretamente algum método implícito.

Porém, um truque mais esperto pode ser utilizado para facilitar as coisas. A idéia é considerar que as propriedades são representadas por partículas localizadas nos centros dos **voxels** que se deslocam através do campo de velocidade. A cada passo de tempo, elas percorrem certo caminho e as grandezas da propriedade na antiga posição são simplesmente deslocadas para a nova posição. Então, para alguma propriedade **q**,

$$\mathbf{q}(\mathbf{x} + dt\mathbf{u}(\mathbf{x}, t), t + dt) = \mathbf{q}(\mathbf{x}, t) .$$

Contudo, como pode ser percebido, o método de Euler estaria sendo utilizado e, assim como no passo de difusão, acarretaria em instabilidade para

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

valores grandes de dt , podendo até “explodir” a simulação quando $\|d\mathbf{u}(\mathbf{x}, t)\| > h$. Adicionalmente, teríamos dificuldades ao tentarmos redistribuir as partículas nos centros dos **voxels**, já que, após a advecção, elas não necessariamente estariam nas posições centrais, como é exibido na Figura 3.3. A solução para este problema é o uso de um método implícito. A idéia chave é considerar as partículas da propriedade no tempo $t+dt$ (todas nos centros dos **voxels**), calcular qual era a posição delas no tempo t e, depois, deslocar as grandezas da sua posição no tempo t para a sua posição no tempo $t+dt$, ou seja, calcular

$$\mathbf{q}(\mathbf{x}, t+dt) = \mathbf{q}(\mathbf{x} - dt\mathbf{u}(\mathbf{x}, t), t).$$

A Figura 3.4 exibe como ocorre a advecção utilizando o método implícito apresentado.

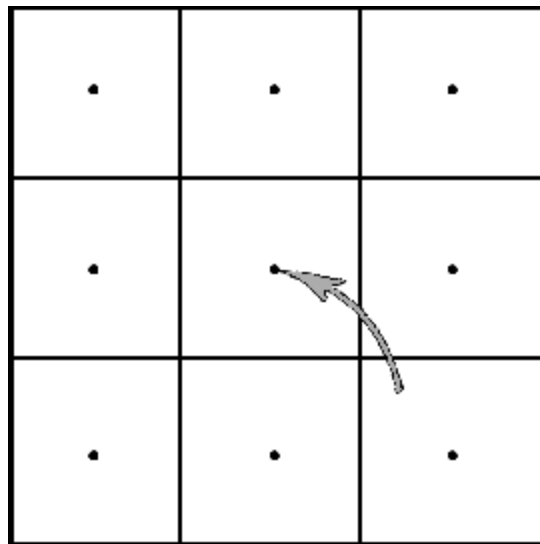


Figura 3.4 – Advecção calculada retrocedendo no tempo.

Quando as partículas estão em posições entre os centros dos **voxels**, uma simples interpolação é utilizada para calcular as grandezas das propriedades que elas carregam.

Essa formulação foi introduzida por [Stam 1999] e deu um passo à frente no estado da arte da simulação de fluidos. Sua maior contribuição é manter a simulação estável mesmo com o uso de valores arbitrários de passo de tempo.

- **Projeção**

Para que nosso fluido seja incompressível, é necessário que o mesmo obedeça a restrição de

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0.$$

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

Após os cálculos e aplicações das tantas equações mostradas anteriormente, raramente o campo de velocidade será conservador de massa. O que faremos no passo de projeção é aplicar uma operação baseada em um artifício puramente matemático, resultante da decomposição de Hodge: todo campo vetorial de velocidade pode ser representado como a soma de um campo vetorial conservador de massa e um campo vetorial gradiente, ou seja,

$$\mathbf{u} = \mathbf{w} + \nabla P \quad (8)$$

que implica em

$$\mathbf{w} = \mathbf{u} - \nabla P. \quad (9)$$

A Figura 3.5 exibe como um campo vetorial 2D conservador de massa possui os espirais característicos de fluidos.



Figura 3.5 – Decomposição de Hodge.

Em vista de resolvermos (9), $\mathbf{u}$ é o próprio campo de velocidade corrente, o qual já temos disponível. Desta forma, nosso problema se resume a calcular P para depois subtrair seu gradiente.

Se aplicarmos o operador ∇ em ambos os lados de (8),

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = \nabla \cdot \mathbf{w} + \nabla^2 P.$$

Como $\nabla \cdot \mathbf{w} = 0$,

$$\nabla^2 P = \nabla \cdot \mathbf{u}. \quad (10)$$

Novamente, nos deparamos com uma equação de Poisson a ser resolvida. Após obtermos P a partir de (10), resolvemos (9) para obtermos $\mathbf{w}$ e o consideramos como sendo o novo campo vetorial de velocidade.

O passo de projeção é fundamental para que o fluido tenha um bom visual contendo espirais.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

- Equação de Poisson
Esse tipo de equação é bem conhecido e possui sempre o formato

$$\nabla^2 \mathbf{x} = \mathbf{b}.$$

Sua discretização resulta em um sistema linear com o formato

$$\mathbf{Ax} = \mathbf{b},$$

o qual pode ser resolvido por algum método iterativo padrão já conhecido, como: Gradiente Conjugado, **Multigrid** e Jacobi. Os dois primeiros possuem propriedades melhores de convergência. Contudo, nossa solução utilizará Jacobi, por ser o mais simples e de fácil implementação. O funcionamento deste método consiste em começar com uma solução inicial para o sistema; calcular iterativamente $\mathbf{x}$ a partir de $\mathbf{b}$ e do próprio $\mathbf{x}$; e, após um número determinado de iterações, convergir para a solução final aproximada. Para isso, nós inicializamos os valores de $\mathbf{x}$ com zero e consideramos $\mathbf{b}$ como sendo a solução inicial para começarmos a calcular as iterações.

Mesmo as equações (7) e (10) sendo diferentes, ambas podem ser colocadas no formato em que, para uma dada iteração k , cada variável do sistema linear seja calculada por

$$x_{i,j,k}^{(k+1)} = \frac{x_{i+1,j,k}^{(k)} + x_{i-1,j,k}^{(k)} + x_{i,j+1,k}^{(k)} + x_{i,j-1,k}^{(k)} + x_{i,j,k+1}^{(k)} + x_{i,j,k-1}^{(k)} + ab_{i,j,k}}{b},$$

onde, para a equação de pressão, $a = -h^2$, $b = 6$, x representa P e b representa $\nabla \cdot \mathbf{u}$; enquanto para equação de difusão, $a = \frac{h^2}{vdt}$, $b = 6 + a$ e ambos x e b representam a propriedade sendo difundida. Dessa forma, futuramente um procedimento poderá ser parametrizado para resolver ambas as equações.

- Estado Inicial

Como as equações diferenciais só modelam a atualização do sistema a partir de um dado estado, foi preciso definir o estado inicial do sistema (para velocidade, temperatura e pressão) e, a partir daí, computarmos sua evolução com o passar do tempo. Para nossa solução, iniciamos todas as variáveis com valores iguais à zero.

- Condições de Fronteira

Como a fumaça está contida em um espaço finito, as equações de Poisson têm que ser resolvidas neste mesmo espaço. Isto implica na necessidade de utilizarmos as condições de fronteira de Neumann para obtermos uma solução correta. Essas condições implicam em

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

$$\frac{\partial P}{\partial \mathbf{n}} = 0,$$

onde $\mathbf{n}$ é o vetor normal da fronteira.

A fronteira está definida nas faces entre os **voxels** mais externos do **grid** e os seus vizinhos mais internos. Desta forma, na fronteira horizontal superior do **grid**, a forma de diferença finita dessa derivada fica

$$\frac{P_{i,j+1,k} - P_{i,j-1,k}}{2h} = 0,$$

que resulta em

$$P_{i,j+1,k} = P_{i,j-1,k}.$$

Portanto, os valores de P nos **voxels** mais externos são simplesmente igualados aos valores dos vizinhos mais internos. O mesmo vale para todas as outras fronteiras.

3.2 Renderização

A nossa forma de renderização da fumaça é simples e eficiente, fazendo uso do **hardware** gráfico através de [OpenGL] (**Open Graphic Library**).

Basicamente, o que fazemos é renderizar quadriláteros (GL_QUADS), onde cada vértice representa um centro de **voxel** do **grid** e tem a cor definida a partir da densidade e da iluminação contida naquele **voxel**. Para cada quatro **voxels** vizinhos na vertical ou horizontal, renderizamos um desses quadriláteros.

Dessa forma, poderíamos renderizar três conjuntos de quadriláteros ao mesmo tempo, cada conjunto com uma orientação (a normal) distinta: os alinhados com o vetor mundial x, os alinhados com z e os alinhados com y. Contudo, para um dado instante, nossa solução renderiza apenas o conjunto de quadriláteros que tiver a orientação mais alinhada com a posição da câmera. A Figura 3.6 exibe como a renderização funciona.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

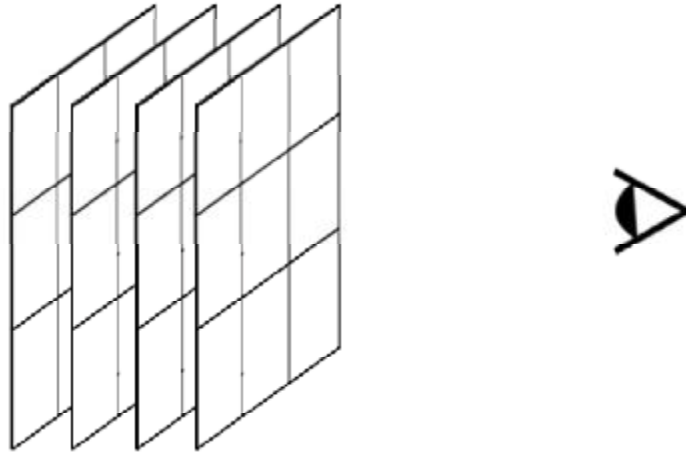


Figura 3.6 – Renderização de fatias do **grid**.

Para simularmos auto-sombreamento, definimos uma forma simples e eficiente de calcular a iluminação volumétrica da fumaça. Nós consideramos três luzes brancas direcionais: uma na vertical alinhada com o vetor mundial y ; e duas na horizontal, uma alinhada com o vetor x e outra alinhada com o vetor z . Seus raios atravessam todo **grid** e se dissipam à medida que atravessam **voxels** que contenham densidade de fumaça. Para cada **voxel** atravessado na vertical (similarmente para horizontal), a luz decai de acordo com a equação

$$L_{i,j-1,k} = T_{i,j,k} L_{i,j,k},$$

onde $T_{i,j,k} = \exp(-r_{i,j,k}h)$ representa a transparência de um dado **voxel**, r é a densidade e h é a dimensão de um **voxel**.

Por fim, a cor de um vértice é então calculada por

$$C_{i,j,k} = C_{fumaça} L_{i,j,k},$$

onde $C_{fumaça}$ é a cor da fumaça, e seu **alpha** é calculado por

$$alpha_{i,j,k} = 1 - T_{i,j,k}.$$

Calculamos o **alpha** para podermos fazer uso da funcionalidade de **blending** do **hardware** gráfico, a qual serviu para representar a transparência da fumaça.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

4. Implementação

Nossa aplicação teve como requisito a restrição de rodar em tempo real (ou algo próximo disso). Esse foi o fator fundamental que nos guiou nas decisões sobre a tecnologia de implementação.

Todavia, o projeto de implementação foi feito para ser facilmente implementado em qualquer linguagem de programação orientada a objetos, embora possa ser naturalmente convertido e implementado em alguma linguagem de programação que segue um paradigma diferente.

As considerações sobre as tecnologias escolhidas e a descrição do projeto de implementação encontram-se a seguir.

4.1 Tecnologia

Nossa solução foi totalmente implementada na linguagem de programação [C++], utilizando duas bibliotecas: [Qt] para interface gráfica com o usuário e OpenGL para renderização, como já foi citado anteriormente.

Ambas as bibliotecas foram escolhidas por serem consideradas padrões independentes de plataforma, por serem de fácil uso (Qt oferece uma ferramenta de **design drag'n'drop** para implementação da interface gráfica) e por não apresentarem problemas de licença (Qt possui uma licença **Open Source** que se enquadra no nosso caso).

4.2 Projeto de Implementação

O nosso projeto de implementação procurou ser simples e objetivo, pois, mesmo a simulação de fumaça sendo complexa do ponto de vista matemático, este é um trabalho simples do ponto de vista de engenharia de **software**.

4.2.1 Casos de Uso

Dividimos os casos de uso em quatro grupos que serão explicados a seguir:

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

1. Controles da Simulação

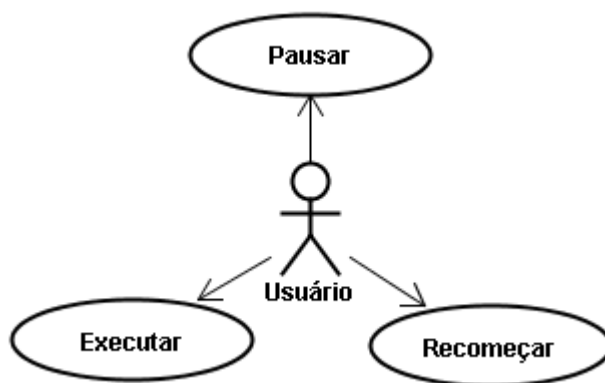


Figura 4.1 – Casos de uso dos controles da simulação.

- **Pausar**
Permite pausar a simulação.
- **Recomeçar**
Permite retornar a simulação ao estado inicial.
- **Executar**
Permite continuar a simulação.

2. Termos do Modelo Físico

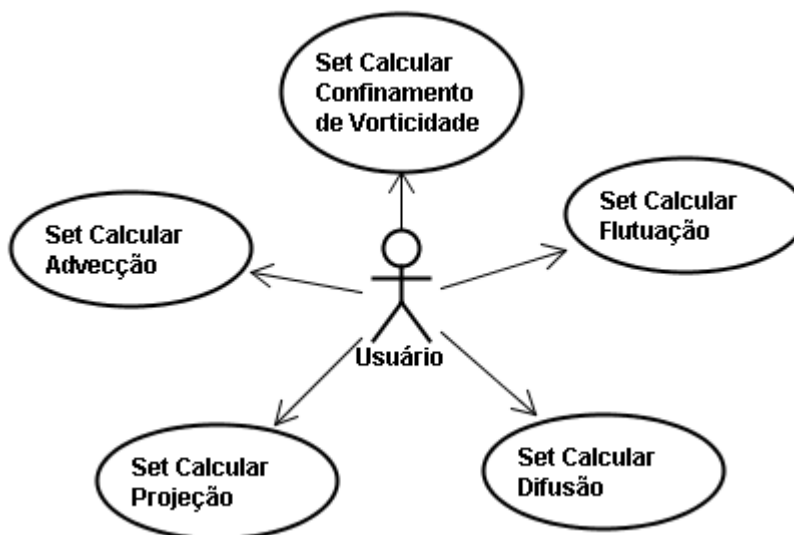


Figura 4.2 – Casos de uso dos termos do modelo físico.

- **Set Calcular Confinamento de Vorticidade**
Permite ativar ou desativar o cálculo do termo de confinamento de vorticidade.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

- **Set Calcular Flutuação**
Permite ativar ou desativar o cálculo do termo de flutuação.
- **Set Calcular Difusão**
Permite ativar ou desativar o cálculo do termo de difusão.
- **Set Calcular Projeção**
Permite ativar ou desativar o cálculo do termo de projeção.
- **Set Calcular Advecção**
Permite ativar ou desativar o cálculo do termo de advecção.

3. Parâmetros Estáticos

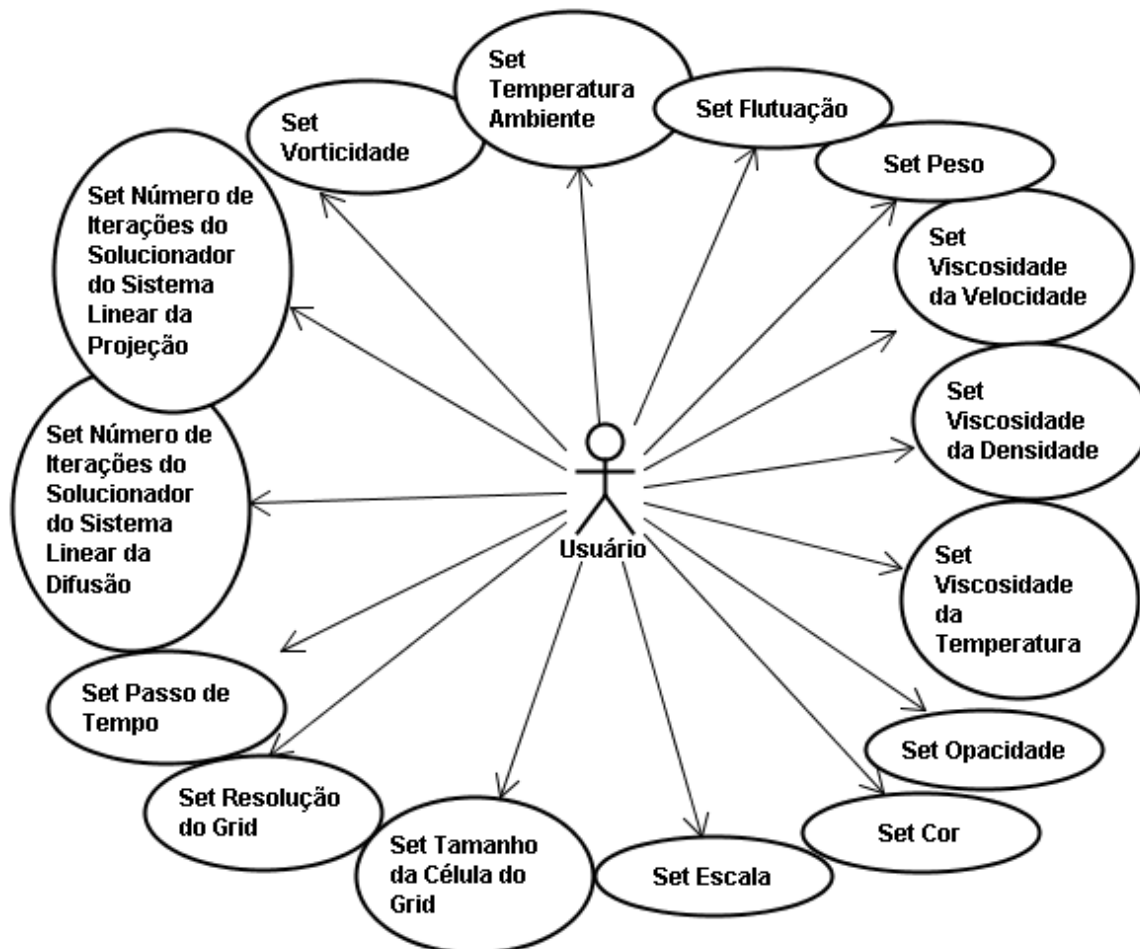


Figura 4.3 – Casos de uso dos parâmetros estáticos.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

- **Set Temperatura Ambiente**
Permite modificar a temperatura ambiente. Quanto maior o valor, mais a fumaça irá descer.
- **Set Flutuação**
Permite modificar o quanto a fumaça deve flutuar. Quanto maior o valor, mais a fumaça irá subir.
- **Set Peso**
Permite modificar o quanto a fumaça pesa. Quanto maior o valor, mais a fumaça irá descer.
- **Set Viscosidade da Velocidade**
Permite modificar a viscosidade da velocidade. Quanto maior o valor, menos a velocidade irá se difundir.
- **Set Viscosidade da Densidade**
Permite modificar a viscosidade da densidade. Quanto maior o valor, menos a densidade irá se difundir.
- **Set Viscosidade da Temperatura**
Permite modificar a viscosidade da temperatura. Quanto maior o valor, menos a temperatura irá se difundir.
- **Set Opacidade**
Permite modificar a opacidade da fumaça.
- **Set Cor**
Permite modificar a cor da fumaça.
- **Set Escala**
Permite definir os valores da transformação de escala aplicada a fumaça.
- **Set Tamanho da Célula do *Grid***
Permite modificar a dimensão das *voxels* do *grid*.
- **Set Resolução do *Grid***
Permite modificar a resolução do *grid*.
- **Set Passo de Tempo**
Permite modificar o passo de tempo da simulação.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

- **Set Número de Iterações do Solucionador do Sistema Linear da Difusão**
Permite modificar o número de iterações do solucionador do sistema linear da difusão. Quanto maior o valor, mais precisa será a difusão.
- **Set Número de Iterações do Solucionador do Sistema Linear da Projeção**
Permite modificar o número de iterações do solucionador do sistema linear da projeção. Quanto maior o valor, mais precisa será a projeção.
- **Set Vorticidade**
Permite modificar o quanto a fumaça deve ser turbulenta. Quanto maior o valor, mais efeitos de turbulência a fumaça terá.

4. Parâmetros Dinâmicos

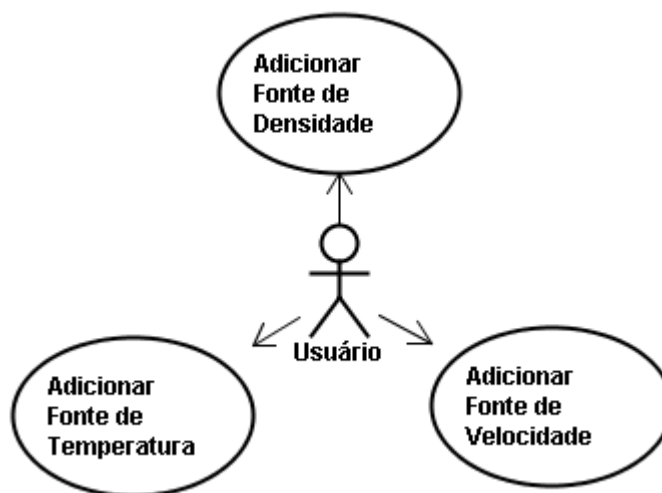


Figura 4.4 – Casos de uso dos parâmetros dinâmicos.

- **Adicionar Fonte de Densidade**
Permite adicionar uma fonte de densidade.
- **Adicionar Fonte de Velocidade**
Permite adicionar uma fonte de velocidade (fonte de vento).
- **Adicionar Fonte de Temperatura**
Permite adicionar uma fonte de temperatura.

4.2.2 Diagrama de Classes

O diagrama de classes, como era de se esperar, ficou simples, contendo apenas seis classes que serão explicadas a seguir:

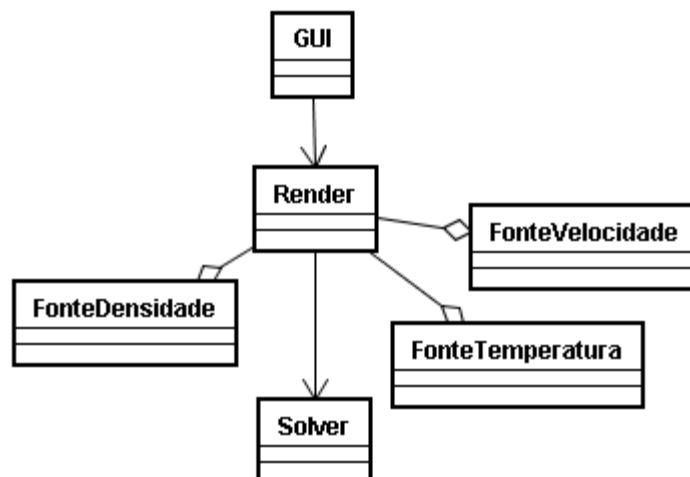


Figura 4.5 – Diagrama de classes simplificado.

- **GUI**
Classe que abstrai a implementação da interface gráfica.
- **Render**
Classe que renderiza a fumaça e, por consequência, contém informações sobre o visual da fumaça (cor, escala, posição e opacidade) e as fontes de velocidade, densidade e temperatura.
- **Solver**
Classe que simula o modelo físico da fumaça e, por consequência, contém informações sobre a configuração do modelo e seus respectivos parâmetros.
- **FonteDensidade**
Classe que representa uma fonte de densidade.
- **FonteTemperatura**
Classe que representa uma fonte de temperatura.
- **FonteVelocidade**
Classe que representa uma fonte de velocidade.

4.2.3 Diagrama de Estados

O nosso diagrama de estados busca mostrar uma visão geral da atualização do estado do sistema (considerando apenas as classes Render e Solver) durante a simulação da fumaça.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

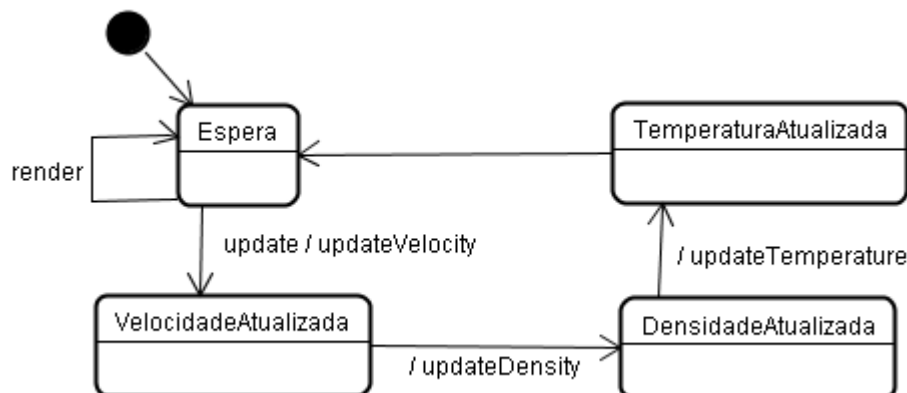


Figura 4.6 – Diagrama de estados.

O que acontece é que o sistema se mantém no estado de Espera até que um evento de render ou update aconteça. No caso de render, o sistema volta imediatamente para o estado de Espera; enquanto no caso de update, o sistema segue em sucessivas mudanças de estado, passando pelos estados de VelocidadeAtualizada, DensidadeAtualizada e TemperaturaAtualizada, posteriormente voltando ao estado de Espera.

5. Resultados e Problemas Encontrados

Foi notável a forma como as ENS representaram de forma natural o comportamento da fumaça, ao contrário de soluções procedurais que apenas tentam copiar a sua movimentação de forma falsa (um sistema de partículas convencional). Esses resultados nos levam a pensar nas vantagens e possibilidades de outros modelos físicos serem explorados em outros tipos de simulações.

Analisando visualmente os resultados da aplicação desenvolvida, vimos que o comportamento baseado em física acompanhado de nossa renderização conseguiu representar de forma satisfatória a fumaça. Tanto em relação à simulação do comportamento como a sua visualização. O ANEXO A - contém várias imagens da aplicação.

No entanto, alguns detalhes de incoerência com a realidade impediriam a integração imediata da nossa simulação com algum ambiente virtual. O primeiro problema está na representação gráfica, o qual deriva do fato de termos utilizado **grids** finitos para representar campos vetoriais e escalares; isso fez com que a fumaça ficasse enclausurada dentro de uma caixa invisível e tivesse, nos limites dessa caixa, a notável transição entre a região com fumaça (dentro da caixa) e a região sem fumaça (fora da caixa). O segundo problema também é visual, o qual deriva da forma como utilizamos as primitivas gráficas de OpenGL na renderização; as GL_QUADS, primitivas que foram renderizadas como fatias dispostas em profundidade, quando localizadas nos limites do **grid**, fazem com que o usuário perceba o fatiamento e sinta que a representação está incoerente. Por último, um problema de performance surge no caso do usuário configurar a

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

simulação com um **grid** de alta resolução. Todavia, as questões de otimização não foram abordadas durante a implementação da aplicação.

Além dos resultados técnicos citados anteriormente, algumas experimentações foram feitas. Fazendo uso da interface gráfica da aplicação para realizá-los, foi possível notar os efeitos das diferentes configurações do modelo físico ao ativarmos e desativarmos o cálculo de alguns termos das ENS e modificarmos seus respectivos parâmetros. Vimos que os termos de Confinamento de Vorticidade, Flutuação e Advecção são essenciais para um bom modelo de fumaça, enquanto o termo de Projeção se mostrou necessário para garantia da estabilidade da simulação e de movimentos espirais característicos de fluídos, entretanto, podendo ser desativado em situações onde a performance se torna um ponto de maior relevância. Por fim, o termo de Difusão se mostrou inútil em **grids** tão esparsos como os que nós utilizamos (por volta de 20x30x20), a carga computacional introduzida com o seu uso não compensa os mínimos resultados exibidos.

Também, durante os experimentos realizados, descobrimos que certas configurações levam a simulação a explodir. Essas configurações serão explicadas a seguir:

- Vorticidade com valores grandes

Naturalmente explode, pois este parâmetro é utilizado para nada mais do que fazer uma escala nas velocidades envolvidas na turbulência da fumaça. Portanto, valores grandes fazem com que as velocidades assumam valores que fazem com que a fumaça se desloque em distâncias maiores até do que as dimensões do **grid**;

- Desativação da Advecção seguida da sua reativação enquanto o Confinamento de Vorticidade ou a Flutuação estiverem ativadas

Também explode, pois enquanto a velocidade, a densidade e a temperatura não se deslocam devido à desativação da Advecção, a magnitude da velocidade se acumula localmente devido ao Confinamento de Vorticidade e a Flutuação estarem ativadas. Isso faz com que, quando reativada, a Advecção desloque todas as propriedades da fumaça utilizando valores de velocidade que percorrem distâncias maiores até do que as dimensões do **grid**.

6. Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros a serem realizados podem focar em quatro possíveis pontos sugeridos a seguir:

1. Correção dos problemas na representação gráfica

O problema da caixa invisível poderia ser resolvido com uma interpolação que fizesse uma transição suave entre a região com fumaça e a região sem fumaça.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

Enquanto, o problema do usuário perceber o fatiamento precisaria de uma análise mais apurada em vista de encontrar uma solução.

2. Melhoria da interface gráfica

Detalhes como o **feedback** visual das posições das fontes e o **feedback** visual dos sistemas de coordenadas global e local facilitariam a tarefa de configuração da simulação. Adicionalmente, informações contidas em uma opção de ajuda que explicassem todos os parâmetros do modelo físico e da renderização seriam de grande valia.

3. Uso de extensões de **hardware**

Na prática, a opção mais viável de uso de uma extensão de **hardware** seria implementar toda simulação em uma das linguagens de **shader** disponíveis: HLSL (**High Level Shader Language**) da Microsoft para Direct3D, GLSL (**OpenGL Shading Language**) para OpenGL ou Cg da NVidia para ambas as APIs.

4. Simulação de outros fluidos

Outros fluidos, como água e fogo, também possuem uma grande demanda de representações gráficas convincentes. Qualquer evolução do trabalho nesse sentido seria valiosa. O embasamento teórico é o mesmo da simulação de fumaça, mas cada tipo de fluido possui suas especificidades que precisam ser consideradas.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

Referências

AGEIA. Disponível em: <http://www.ageia.com/>. Último acesso: 07/09/2006.

C++. Disponível em: <http://www.cplusplus.com/>. Último acesso: 07/09/2006.

FATTAL, R. e LISCHINSKI, D. 2004. "Target-Driven Smoke Animation". *Proceedings of the 2004 SIGGRAPH Conference*, 441-448.

FEDKIW, R., STAM, J., e JENSEN, H. W. 2001. "Visual Simulation of Smoke". *Proceedings of the 2001 SIGGRAPH*, 15-22.

FORSTER, N., e METAXAS, D. 1997. "Modeling the Motion of a Hot Turbulent Gas". *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series*, 181-188.

Fusion CI Studios. Disponível em: <http://www.fusioncis.com/>. Último acesso: 07/09/2006.

MARK, J. H. 2004. "GPU Gems", cap. 38 "Fast Fluid Dynamics Simulation on the GPU". Addison-Wesley Professional. Disponível em: http://download.developer.nvidia.com/developer/SDK/Individual_Samples/Demos/OpenGL/src/gpgpu_fluid/docs/GPU_Gems_Fluids_Chapter.pdf. Último acesso: 07/09/2006.

LIU, Y., LIU, X. e WU, E. 2004. "Real-Time 3D Fluid Simulation on GPU with Complex Obstacles". *Computer Graphics and Applications, 12th Pacific Conference on (PG'04)*, 247-256.

LOSASSO, F., GIBOU, F. e FEDKIW, R. 2004. "Simulating Water and Smoke with an Octree Data Structure". *Proceedings of the 2004 SIGGRAPH Conference*, 457-462.

MCNAMARA, A., TREUILLE, A., POPOVIC, Z. e STAM, J. 2004. "Fluid Control Using the Adjoint Method". *Proceedings of the 2004 SIGGRAPH Conference*, 449-256.

OpenGL. Disponível em: <http://www.opengl.org/>. Último acesso: 07/09/2006.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

Qt. Disponível em: <http://www.trolltech.com/products/qt> . Último acesso: 07/09/2006.

RASMUSSEM, N., NGUYEN, D., GEIGER, W. e FEDKIW, R. 2003. "Smoke Simulation For Large Scale Phenomena". ***Proceedings of ACM SIGGRAPH 2003***, 703-707.

RealFlow. Disponível em: <http://www.nextlimit.com/realflow/index.htm>. Último acesso: 07/09/2006.

SELLE, A., RASMUSSEM, N. e FEDKIW, R. 2005. "A Vortex Particle Method for Smoke, Water and Explosions". ***Proceedings of ACM SIGGRAPH 2005***, 910-914.

STAM, J. 1999. "Stable Fluids". ***SIGGRAPH 99 Conf. Proc., Annual Conf. Series***, 121-128.

STEINHOFF, J. e UNDERHILL, D. 1994. "Modification of the Euler equations for 'vorticity confinement': Application to the computation of interacting vortex rings". ***Physics of Fluids***, 2738-2744.

TREUILLE, A., MCNAMARA, A., POPOVIC, Z. e STAM, J. 2003. "Keyframe Control of Smoke Simulations". ***Proceedings of ACM SIGGRAPH 2003***, 716-723.

WEISSTEIN, E. W. "Euler Forward Method". Disponível em: <http://mathworld.wolfram.com/EulerForwardMethod.html>. Último acesso: 07/09/2006.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006

ANEXO A - Imagens da Aplicação



Figura A.1 – Fumaça com a configuração padrão e um **grid** de 20x40x20.



Figura A.2 – Fumaça com opacidade 5 e um **grid** de 20x40x20.

Trabalho de Graduação	Versão: 1.1
Simulação Visual 3D de Fumaça	Data da versão: 05/10/2006



Figura A.3 – Fumaça com três fontes de vento definindo um caminho.



Figura A.4 – Fumaça com duas fontes de densidade com suas respectivas fontes de temperatura.

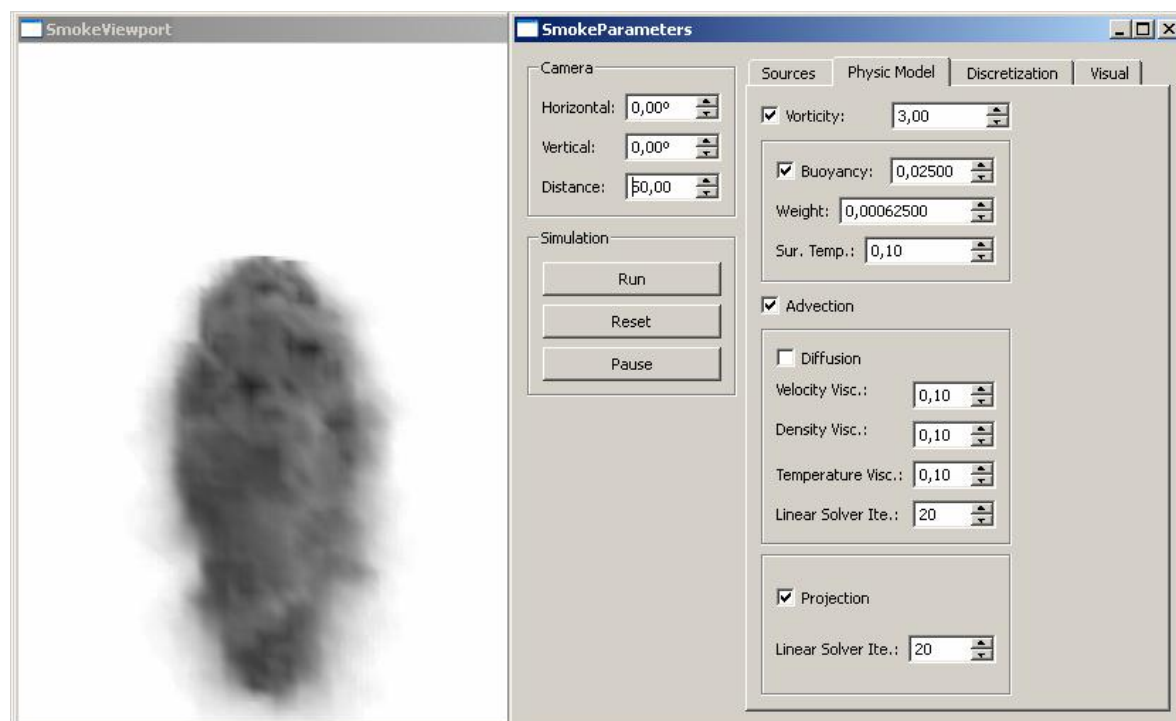


Figura A.5 – Fumaça junto com a interface gráfica.