

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INFORMÁTICA**

**ESTUDO E APLICAÇÃO DA TÉCNICA
DE STEERING BEHAVIORS NA
SIMULAÇÃO FÍSICA DE FLUIDOS EM
UM ESPAÇO TRIDIMENSIONAL**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Henrique Vicentini

Santa Maria, RS, Brasil

ESTUDO E APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE STEERING BEHAVIORS NA SIMULAÇÃO FÍSICA DE FLUIDOS EM UM ESPAÇO TRIDIMENSIONAL

por

Henrique Vicentini

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Informática
da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Mestre em Informática

Orientador: Prof. Dr. Cesar Tadeu Pozzer (UFSM)

Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Cordeiro d'Ornellas (UFSM)

**Dissertação de Mestrado Nº X
Santa Maria, RS, Brasil**

**Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Informática**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTUDO E APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE STEERING
BEHAVIORS NA SIMULAÇÃO FÍSICA DE FLUIDOS EM UM
ESPAÇO TRIDIMENSIONAL**

elaborada por
Henrique Vicentini

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Informática

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Cesar Tadeu Pozzer (UFSM)
(Presidente/Co-orientador)

Prof. Dr. Andrea Schwertner Charão (UFSM)

Prof. Dr. Benhur de Oliveira Stein (UFSM)

Santa Maria, maio de 2009 de .

"Perfection is reached not when there's nothing more to add but when there's no more to take out." — ANTOINE DE SAINT-EXUPÉRY, WIND, SAND AND STARS,
1939

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Informática
Universidade Federal de Santa Maria

ESTUDO E APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE STEERING BEHAVIORS NA SIMULAÇÃO FÍSICA DE FLUIDOS EM UM ESPAÇO TRIDIMENSIONAL

Autor: Henrique Vicentini

Orientador: Prof. Dr. Cesar Tadeu Pozzer (UFSM)

Co-orientador: Prof. Dr. Marcos Cordeiro d'Ornellas (UFSM)

Local e data da defesa: Santa Maria, maio de 2009 de

.

Resumo em português aqui.

Palavras-chave: Simulação de fluidos, steering behaviors, computação gráfica.

ABSTRACT

Master's Dissertation
b
Universidade Federal de Santa Maria

A
Author: Henrique Vicentini
Advisor: Prof. Dr. Cesar Tadeu Pozzer (UFSM)
Coadvisor: Prof. Dr. Marcos Cordeiro d'Ornellas (UFSM)

tract here.

Keywords: s.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Hierarquia do comportamento de movimentação	14
Figura 2.2 – Forças de direcionamento assimétricas	16
Figura 2.3 – Comportamento de <i>seek</i> e <i>flee</i>	17
Figura 2.4 – Comportamento de <i>pursuit</i> e <i>evasion</i>	18
Figura 2.5 – Comportamento de <i>Arrival</i>	19
Figura 2.6 – Vizinhança local	20
Figura 2.7 – Comportamento de separação (<i>separation</i>)	21
Figura 2.8 – Comportamento de coesão (<i>cohesion</i>)	21
Figura 2.9 – Comportamento de alinhamento (<i>alignment</i>).....	22
Figura 2.10 – Comportamento de (<i>flocking</i>)	23
Figura 3.1 – Formas de representação de fluidos.	26
Figura 3.2 – simulação de cardume por steering behaviors, visualização de padrões de dinâmica de fluidos [1].	27
Figura 3.3 – Simulação de pedestres utilizando OpenSteer	30
Figura 4.1 – Implementação: gravidade.....	32

LISTA DE TABELAS

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Motivação	11
1.2	Objetivos e Contribuição	12
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	Steering Behaviors	13
2.1.1	Modelos de <i>Steering Behaviors</i>	17
2.1.2	Comportamentos de grupo	20
2.2	Simulação de fluidos	23
2.2.1	SPH (smoothed particle hydrodynamics)	24
3	PROPOSTA	25
3.1	Entendimento do Problema	25
3.1.1	Relação entre as abordagens	25
3.1.2	Representação	26
3.1.3	Definição dos steerings	27
3.1.4	Controle da Entropia	28
3.2	Estratégias de implementação	28
3.2.1	OpenSteer	28
4	IMPLEMENTAÇÃO	32
4.1	Definição de forças	32
4.1.1	Gravidade	32
4.1.2	Coesão	33
4.1.3	Separação	34
4.1.4	Alinhamento	34
4.1.5	Interação com paredes do recipiente	34
5	RESULTADOS	36
6	CONCLUSÃO	37
6.1	Trabalhos futuros	37
	REFERÊNCIAS	38

1 INTRODUÇÃO

A animação de fluidos consiste na geração de uma sequência de imagens digitais que ilustram a evolução do fluido durante o tempo. Esta sequência de imagens deve ser capaz de representar o movimento do fluido de forma satisfatória e convincente, isso é, o fluido deve escoar com um grau de realismo necessário para o contexto em que a animação esta sendo empregada.

Segundo Neto [13], dificilmente este sistema apresenta solução analítica, o que obriga os especialistas a lançarem mão dos recursos da análise numérica e de métodos numéricos para discretizar o problema e obter uma solução com um nível de aproximação aceitável.

Em um caso particular de cenários envolvendo animações de fluidos, a utilização de métodos em Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) tem se mostrado um recurso valioso para os animadores, diminuindo o custo, bem como o tempo de produção de filmes e jogos. A dificuldade de alcançar no grau de realismo necessário em efeitos visuais envolvendo fluidos traz a necessidade de buscar métodos em DFC para auxiliar a geração desses efeitos.

Os métodos encontrados na literatura para animação de fluidos, baseados em modelos de DFC, são fundamentados nas equações de Navier-Stokes, com técnicas de discretização baseadas em diferença finitas implícitas [20] e explícitas [7], bem como em métodos Lagrangianos tais como Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [9] [12] e Moving-Particle Semi-Implicit (MPS) [15].

A utilização de forças para direcionar elementos em uma simulação de grupo foi proposta por Reynolds em 1999 [18] chamando-a de *steering behavior*. As simulações podem ser utilizadas em comportamentos como: busca, perseguição, fuga, perambular, aproximação, desvio de obstáculos e forças de direcionamentos relacionadas a grupo de personagens, aonde modelo proposto é estruturado em três forças, as quais direcionam

os elementos do grupo individualmente baseado na velocidade e posição dos elementos vizinhos, essas forças são: separação, alinhamento e coesão.

Em contrapartida as técnicas tradicionais de simulação de fluidos baseado em partículas utilizam a transferência de energia entre as partículas para realizar a simulação, as constantes trocas de forças (ou energia no caso da simulação física) entre os elementos movimentam as partículas.

Segundo Giraldi [8], as pesquisas em animação de fluidos pode ser dividida basicamente em três etapas. Primeiramente, a busca de novos modelos em DFC que sejam mais eficientes do ponto de vista da computação gráfica. Esta etapa envolve tanto a pesquisa de novos modelos físicos quanto o ajuste de modelos já conhecidos, sem perder de vista o fato de que o objetivo final é a geração de efeitos visuais, e não a descrição de fenômenos naturais (etapa a qual esse trabalho está diretamente relacionado). Após resolvidas às equações de fluidos numericamente, passa-se à fase de *rendering*, onde técnicas de visualização são aplicadas sobre os campos gerados. Finalmente, as técnicas utilizadas devem ser incorporadas a um software, com interface gráfica conveniente, a qual permita a utilização destes recursos.

1.1 Motivação

Técnicas de simulação de fluidos vêm sendo estudadas há vários anos junto com uma abordagem física o qual tenta simular o mundo real em ambientes virtuais. O aumento da capacidade de processamento dos sistemas computacionais tornou possível utilizar técnicas cada vez mais robustas e realistas de simulação e representação da realidade em ambientes virtuais interativos. Assim houve aumento da expectativa dos usuários por ambientações mais reais e condizentes com o mundo real. Por esse motivo torna-se indispensável buscar novas formas representar o mundo real nesses ambientes virtuais.

A renderização de fluidos para um ambiente interativo ainda é um processo não trivial que requer grande gasto com processamento, assim técnicas de melhoria dos algoritmos existentes e a criação de novos paradigmas para tratar a solução de uma limitação é bem vinda para a indústria de jogos.

A simulação de fluidos para computação gráfica não é baseado em realismo físico da simulação mas sim no resultado visual obtido, assim esse trabalho busca representar fluidos através da interação entre as partículas de *behaviors*, Essa interação necessitará de

adequações nos comportamentos de forma que a combinação das forças resultem em uma simulação coerente de fluidos possibilitando o uso da técnica em tridimensionais de jogos ou animações.

1.2 Objetivos e Contribuição

O objetivo geral desse trabalho é desenvolver um método simplificado de simulação de fluidos, reduzindo processamento e a complexidade computacional requeridos na simulação, mantendo resultados satisfatórios que permitam utilizar o método na representação gráfica de fluidos. O método proposto é a aplicação da metodologia de *Steering Behaviors* na animação de fluidos para ambientes interativos. Esses ambientes podem ser jogos de computador e simulações em tempo real com o objetivo de aumentar a imersão do usuário no mundo virtual criado. Como essa metodologia ainda não foi validada em outros trabalhos, a validação da proposta como método para geração de fluidos é outra meta desse trabalho, contribuindo para a gama de opções de modelos DFC em tempo real.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Steering Behaviors

Em seu estudo de 1987 [18] Reynolds desenvolveu uma metodologia diferente dos caminhos pré programados existentes no tratamento comportamentais ligados a grupos de indivíduos. A simulação de grupos pode ser relacionado como uma modificação de um sistema de partículas e sua simulação é criada através de um sistema distribuído de um modelo comportamental, sistema esse parecido com um sistema natural de movimentação em grupo. A movimentação e escolha de caminho é feita através da percepção do ambiente em que o mesmo é inserido, as regras físicas e de movimentação e por um conjunto de comportamentos programados.

A utilização de forças para direcionar elementos em uma simulação de grupo foi proposta por Reynolds em 1999 [18] chamando-a de *steering behavior* a qual é uma versão melhorada de seu estudo de 1987. As simulações podem ser utilizadas em comportamentos como: busca, perseguição, fuga, perambular, aproximação, desvio de obstáculos e forças de direcionamentos relacionadas a grupo de personagens, aonde modelo proposto é estruturado em três forças, as quais direcionam os elementos do grupo individualmente baseado na velocidade e posição dos elementos vizinhos, essas forças são: separação, alinhamento e coesão.

O comportamento de personagens autônomos podem ser dividido em camadas comportamentais para melhor compreensão. Essas camadas podem ser vistas na figura 2.1, são elas: seleção de ação, direcionamento e locomoção.

- Seleção de ação: é responsável pela percepção do mundo e determinação de objetivos;
- Direcionamento: decompõem os objetivos em sub tarefas de movimentação (aprox-

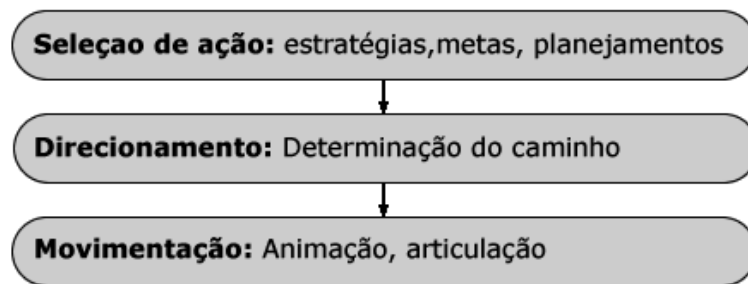


Figura 2.1: Hierarquia do comportamento de movimentação

imação do objetivo, desvio de obstáculos);

- Locomoção: utiliza as informações passadas pela camada de direcionamento para realizar o deslocamento físico do personagem.

O steering behavior é focado na camada do central de direcionamento o qual é responsável pelas forças que atuam sobre o elemento a fim de que ele alcance o objetivo inicial definido na camada de seleção de ação. Como forma de representar essa camada foi utilizado um modelo veicular simples. Esse modelo é simples o suficiente para representar os mais variados tipos de transporte ou formas de movimentação que se deseja.

O veículo é baseado em uma aproximação do ponto de massa. Essa abordagem proporciona um simples e computacionalmente barato modelo físico, porém o mesmo não pode ser considerado um modelo físico completo pois o mesmo é capaz de representar o momento linear (velocidade) mas não é capaz de representar o momento rotacional pois o veículo é representado por um ponto de massa não dimensional.

Um ponto de massa é definido pelas propriedades *position* e *mass* que representam respectivamente a posição e a massa do elemento. O veículo ainda possui a propriedade *velocity* representando a velocidade, a velocidade é modificada pela aplicação de forças. As forças e a velocidade aplicada ao veículo possuem um limitador, sendo esse a representação das limitações físicas do próprio veículo, como a aceleração, representada pela propriedade *max_force* e uma limitação de velocidade, causada pelo atrito ou outros fatores, representado pela propriedade *max_speed*. A orientação (*orientation*) representa a direção do veículo a qual junto com posição do veículo representa a coordenada espacial na qual o modelo geométrico do veículo pode ser anexado.

Simple Vehicle Model:

mass scalar

```

position vector
velocity vector
max_force scalar
max_speed scalar
orientation N basis vectors

```

A física do modelo veicular simples é baseada no FORWARD EULER INTEGRATION. A cada iteração da simulação, as forças determinadas pelo comportamento são aplicadas ao ponto de massa do veículo. Isso produz uma aceleração igual a força de deslocamento dividido pela massa do veículo. A aceleração é adicionada a antiga velocidade produzindo uma nova velocidade, a qual é truncada por `max_speed`. E por fim a velocidade é adicionada à antiga posição do veículo.

```

steering_force = truncate (steering_direction, max_force)
acceleration = steering_force / mass
velocity = truncate (velocity + acceleration, max_speed)
position = position + velocity

```

O modelo veicular simples mantém-se alinhado com a velocidade por ajustes incrementais das iterações prévias. O sistema local de coordenadas é definido em por quatro vetores: vetor posição especificando o local da origem, e três vetores de direção servindo como base vetorial do espaço. A base vetorial indica a direção e comprimento das unidades de coordenadas, no qual três direções mutualmente perpendicular relativas ao veículo. Esses eixos serão referenciados por *forward*, *up* e *side* (esses correspondem aos eixos x, y e z do R3).

Para manter o alinhamento com a velocidade em cada iteração, o vetor base deve ser rotacionado para a nova direção. Ao invés de usar rotações explícitas, o sistema local é reconstruído usando a combinação de substituição, aproximação e reortogonalização. A nova velocidade é utilizada para calcular a nova direção e uma nova aproximação para a nova direção de *up*. Utilizando o produto vetorial é reconstruído o no sistema vetorial base:

```

new_forward = normalize (velocity) approximate_up = normalize
(approximate_up) // if needed new_side = cross (new_forward,
approximate_up) new_up = cross (new_forward, new_side)

```

A ideia básica é que o *up* aproximado é quase perpendicular a nova direção de *forward*,

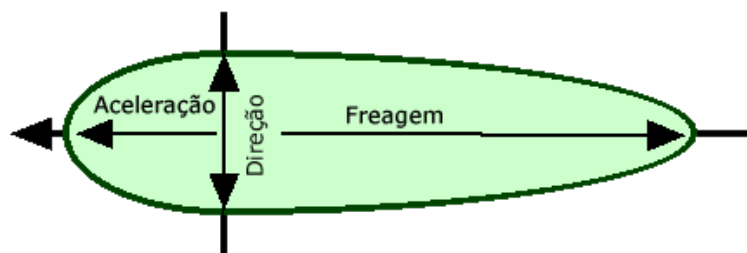


Figura 2.2: Forças de direcionamento assimétricas

porque as diferenças a cada iteração da orientação são tipicamente pequenas. A nova direção *side* será perpendicular ao novo *forward*, pela definição do produto vetorial. O novo *up* será o produto vetorial entre *forward* e *side* logo é perpendicular a cada um deles.

O conceito do alinhamento da velocidade não especifica somente uma orientação. O grau de liberdade correspondente a rotação sobre o eixo *forward* (também conhecido como inclinação) permanece não limitado. Construindo um novo espaço local relativo ao primeiro é garantido que a inclinação permanece consistente. Definir o valor correto de inclinação requer heurísticas futuras, baseada na intenção de uso do modelo veicular.

Nesse sistema veicular simples, o sinal de controle passado da camada comportamental de direcionamento para a camada de movimentação consiste em exatamente um vetor quantidade: uma força de direcionamento desejada. Mais realísticos modelos veiculares poderão ter vários diferentes conjuntos de sinais de controles. Por exemplo um automóvel teria um volante de direção, acelerador e freio os quais cada um podem ser representados por quantidades escalares. É possível mapear um vetor força de direcionamento generalizado nesses sinais escalares: o componente *side* do vetor direcionamento pode ser interpretado como o sinal de direção, o *forward* pode ser mapeado para o acelerador caso positivo ou freio caso negativo. Esse mapeamento pode ser assimétrico, por exemplo um automóvel pode desacelerar através da frenagem muito mais rápido que acelerar através do impulso do motor como mostrado na Figura 2.2.

Por causa dessa concepção de alinhamento à velocidade, esse sistema veicular simples não pode simular efeitos como derrapagem. Além do mais esse modelo permite que o veículo gire com sua velocidade em zero, esse problema pode ser resolvido adicionando um limitador na mudança de orientação, ou limitando o componente de direcionamento lateral em velocidades baixas, ou simulado o momento de inércia.

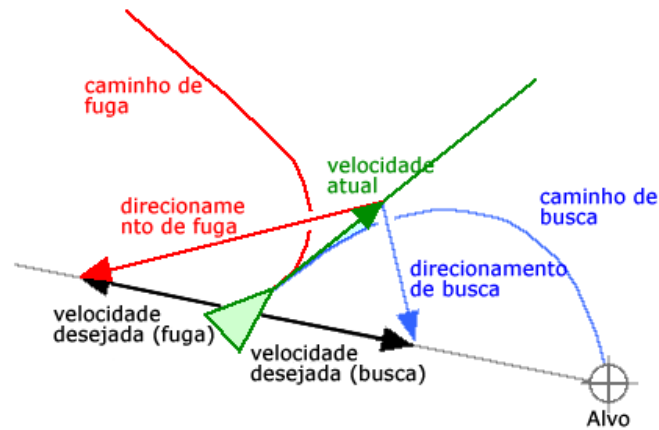


Figura 2.3: Comportamento de *seek* e *flee*

2.1.1 Modelos de *Steering Behaviors*

Para cada *steering behavior* específico assumiremos que a movimentação seja implementada pelo modelo veicular simples previamente descrito, o qual é parametrizada por um simples vetor força de direcionamento.

2.1.1.1 *Seek*

O comportamento *seek* (perseguição a um ponto estático) atua no direcionamento do personagem a uma posição fixa especificada no mundo virtual. Esse comportamento coordena o personagem em uma velocidade radialmente alinhada para o alvo. A velocidade desejada é um vetor na direção do personagem para o ponto de objetivo. O módulo da velocidade desejada pode ser `max_speed`, ou pode ser a velocidade corrente do personagem, dependendo da aplicação. O vetor de direcionamento é a diferença entre a velocidade desejada e a velocidade corrente do personagem conforme a Figura 2.3.

```
desired_velocity = normalize (position - target) * max_speed
steering = desired_velocity - velocity
```

Caso o personagem continue com o comportamento de *seek*, ele eventualmente passará pelo objetivo e após voltará para uma nova aproximação. Isso produzirá um movimento parecido com o movimento de moscas ao redor de uma lâmpada, diferente do comportamento de *arrival* a seguir.

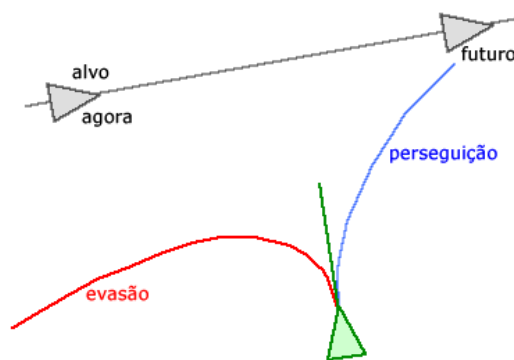


Figura 2.4: Comportamento de *pursuit* e *evasion*

2.1.1.2 *Flee*

O comportamento de *flee* é simplesmente o inverso do *seek*, atuando no direcionamento do personagem a se afastar de um ponto fixo especificado. A velocidade desejada apontará para a direção oposta formada entre o personagem e o ponto de objetivo verificado na Figura 2.3.

2.1.1.3 *Pursuit*

O comportamento de *pursuit* é similar ao *seek* exceto que o alvo é outro personagem móvel. Uma perseguição efetiva requer a previsão da futura posição do alvo. Uma das abordagens é usar um simples previsor que reavalia a cada iteração a futura posição do alvo. Como exemplo pode se usar um previsor linear baseado na velocidade o qual leva em conta que o alvo não mudará de direção durante o intervalo da previsão. O mesmo avalia a posição do personagem T unidades de tempo no futuro e ajusta a velocidade escalonando-a pelo período T previsto. O direcionamento de *pursuit* é um simples resultado da aplicação do comportamento de *seek* na posição prevista do alvo. Verifique a Figura 2.4.

A chave para a implementação do *pursuit* é o método usado para estimar o intervalo T de predição. No caso ideal o intervalo T deveria ser o tempo até a interceptação, mas o valor é desconhecido pelo fato do alvo realizar mudanças de rota imprevisíveis. T pode assumir um valor constante, o qual deve produzir melhor perseguição que o comportamento simples *seek* (o qual corresponde $T=0$). No entanto, para uma performance aceitável T deve ser maior quando o perseguidor está longe do objetivo, e menor quando ele está próximo. Outros métodos para estimar o valor de T podem ser utilizados dependendo do

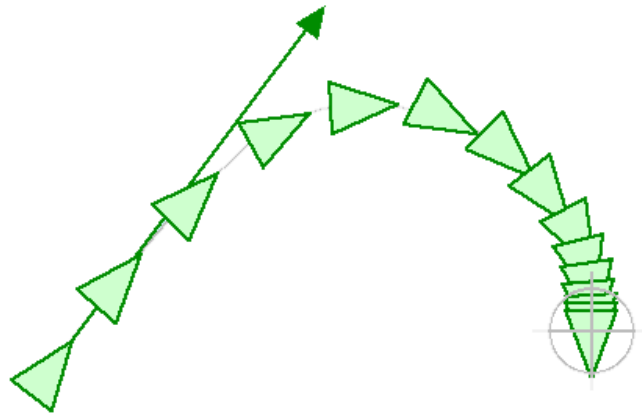


Figura 2.5: Comportamento de *Arrival*

ambiente no qual será aplicado e do comportamento esperado.

2.1.1.4 *Evasion*

O comportamento de *evasion* é análoga a de *pursuit*, exceto que o comportamento de *evasion* é utilizado para direcionar para longe da posição futura estimada.

As técnicas de perseguição e evasão dadas aqui tem a intenção de serem computacionalmente leves e são não-ótima, existem técnicas ótimas na literatura porém em um sistema natural a evasão é intencionalmente não-ótima com o objetivo de ser imprevisível, permitindo assim que frustre estratégias de perseguição previsíveis [3]

2.1.1.5 *Arrival*

O comportamento de *Arrival* é idêntico ao *seek* aonde o personagem está longe do objetivo. Porém ao invés de mover através do alvo com sua velocidade máxima, este comportamento causa uma diminuição de velocidade para o personagem conforme se aproxima do objetivo, eventualmente reduzindo a velocidade até parar no alvo, conforme mostrado na Figura 2.5. A distância a qual a desaceleração inicia é um parametro do comportamento. Esta implementação é similar ao *seek*: uma velocidade desejada é determinada direcionando o personagem para o objetivo. Fora do raio de parada a velocidade é cortada em `max_speed`, interior ao raio de parada, a velocidade é reduzida até atingir zero (ao encontrar o alvo).

```
target_offset = target - position
distance = length (target_offset)
ramped_speed = max_speed * (distance / slowing_distance)
```

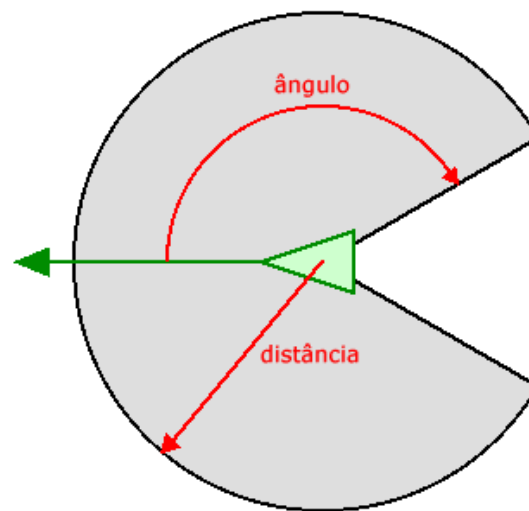


Figura 2.6: Vizinhança local

```
clipped_speed = minimum (ramped_speed, max_speed)
desired_velocity = (clipped_speed / distance) * target_offset
steering = desired_velocity - velocity
```

2.1.2 Comportamentos de grupo

Os próximos três *steering behaviors*: *separation*, *cohesion* e *alignment*, são destinados a grupos de personagens. Em cada caso, o *steering behavior* determina como o personagem reage com outro personagem em sua vizinhança local. Personagens fora da vizinhança local são ignorados. Como mostrados na Figura 2.6, a vizinhança é especificada por uma distância (*distance*) o qual define quando os dois personagens estão próximos, e um ângulo (*angle*) o qual define o campo de visão do personagem.

2.1.2.1 Separation

O comportamento de *separation* dá ao personagem a habilidade de manter certa distância de separação de outros personagens próximos. Esta pode ser usada para prevenir que personagens se aglomerem. Para calcular a força de separação, primeiro é realizada uma busca para encontrar personagens dentro da vizinhança especificada. Esta pode ser uma busca exaustiva de todos os personagens da simulação, ou pode ser utilizado algum tipo de partição espacial ou um sistema de cache para limitar a busca a personagens locais. Para cada personagem local, a força de repulsão é calculada pela subtração das posições entre o personagem e seus vizinhos, normalizando e aplicando um peso inversamente pro-

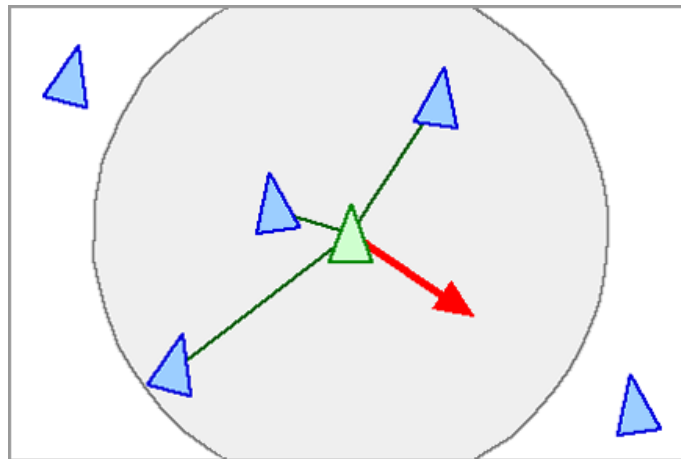


Figura 2.7: Comportamento de separação (*separation*)

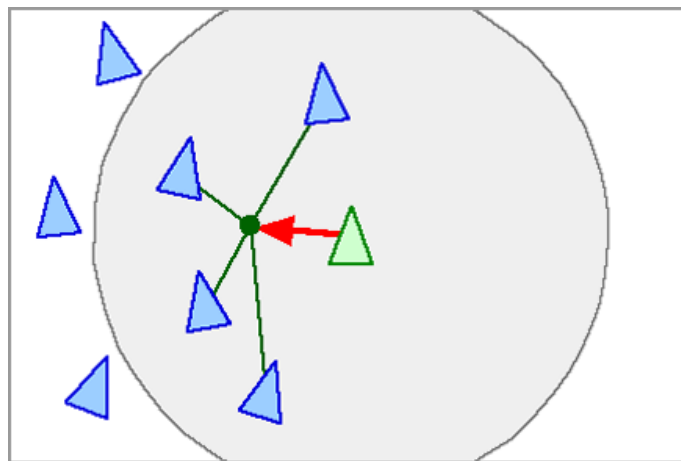


Figura 2.8: Comportamento de coesão (*cohesion*)

porcional à distância entre eles (r). A força de repulsão para cada personagem próximo é somada para produzir uma força de direcionamento global, veja a Figura 2.7.

2.1.2.2 *Cohesion*

O comportamento de *cohesion* dá ao personagem a habilidade de se aproximar de um grupo formado de outros personagens próximos, conforme Figura 2.8. No direcionamento para a coesão é realizada a busca de todos os personagens da vizinhança local (conforme descrito previamente para a separação na seção 2.1.2.1), calculando a posição média do grupo de personagens. A força de direcionamento pode ser aplicada na direção da posição média ou pode ser usada como objetivo para o comportamento de *seek* 2.1.1.1.

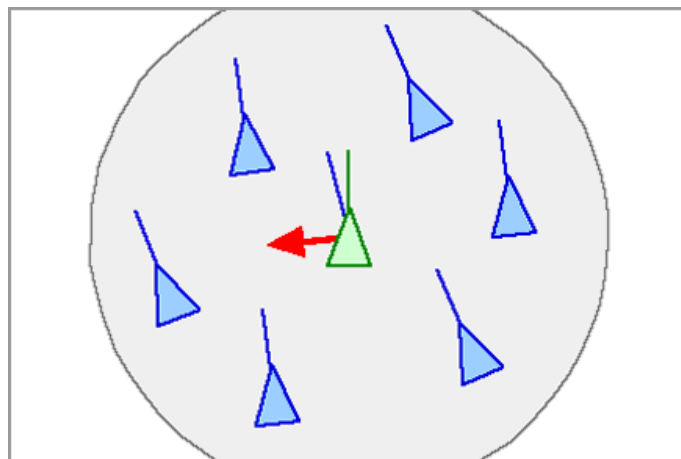


Figura 2.9: Comportamento de alinhamento (*alignment*)

2.1.2.3 Alignment

O comportamento de *alignment* dá ao personagem a habilidade de se alinhar com outros personagens próximos, como mostrado na Figura 2.9. O direcionamento de alinhamento é calculado buscando todos os personagens da vizinhança local (conforme descrito previamente para a separação na seção 2.1.2.1), calculando a média dos vetores velocidade de todos os personagens próximos. Essa média é a velocidade desejada, assim o vetor de direcionamento é a diferença entre a média e a velocidade atual do personagem. Esse direcionamento tenderá a girar nosso personagem alinhando com o grupo.

2.1.2.4 Flocking

O comportamento de *flocking* é obtido pela combinação dos comportamentos de separação, coesão e alinhamento. Essa combinação é capaz de produzir modelos comportamentais como multidão, rebanho e cardumes [17]. Para algumas aplicações é suficiente a simples soma entre os três vetores para produzir um simples direcionamento de *flocking*. Porém para um melhor controle os três componentes são normalizados e posteriormente escalonados por três fatores individuais antes de soma-los. Como resultado, o comportamento de *flocking* é especificado por nove parâmetros numéricos: um peso (colaboração individual do comportamento), uma distância e um ângulo (para determinar a vizinhança, veja Figura 2.6) para cada um dos três comportamentos, conforme a Figura 2.10.

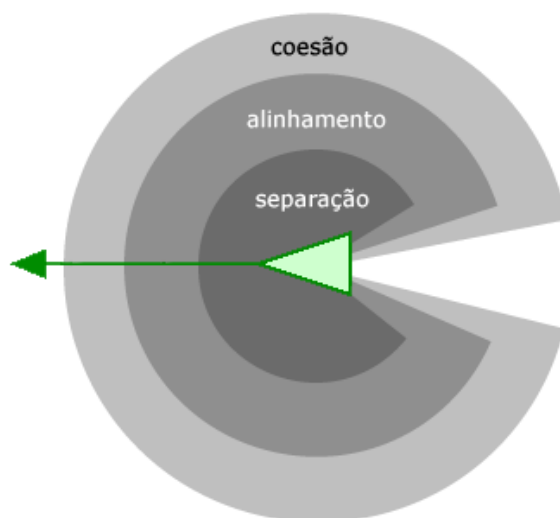


Figura 2.10: Comportamento de (*flocking*)

2.2 Simulação de fluidos

A Dinâmica de Fluidos Computacional (DFC) teve por origem no trabalho de Claude Navier (1822) e George Stokes (1845) os quais formularam a famosa equação de Navier-Stokes que descreve a conservação do momento. Em complemento a esta equação, duas equações adicionais são necessárias para simular fluidos, uma descreve a conservação de massa e outra a conservação de energia. Uma vez definidas as equações é possível empregar a tecnologia de hardware para solucionarlas numericamente. Técnicas de simulação de fluido para propósitos específicos vem sendo desenvolvidas no campo de computação gráfica. Em 1983, [16] introduziu o uso do sistema de partículas como técnica para modelar uma classe de objetos *fuzzy*. A partir desse várias aplicações utilizando abordagem Euleriana (baseada em malhas) e Lagrangeana (baseada em partículas) na simulação de fluidos para computação gráfica. Surgiram uso de partículas para animação de objetos deformáveis [4] e [23], animação de superfícies [2] e fluxo de lava [21]. A abordagem Euleriana tem se mostrado mais popular nos últimos anos para a simulação de fluidos em geral [20], água [6], [5], [22], objetos deformáveis [14]. Porém ainda existem poucas técnicas disponíveis para uso em sistemas interativos. O trabalho baseado em malha de Stam [20] foi certamente um passo importante para a simulação de fluidos em tempo real. Esse texto não tem por objetivo fazer uma revisão exaustiva dos trabalhos em animação computacional de fluidos. Os métodos encontrados na literatura para animação de fluidos via modelos de DFC, são fundamentados nas equações de Navier-Stokes, com técnicas

de discretização baseadas em diferença finitas implícitas [20] e explícitas [7], bem como em métodos Lagrangianos tais como Smoothed Particle Hydrodynamics (SPH) [9] [12] e Moving-Particle Semi-Implicit (MPS) [15]. Como documento adicional de referência para simulação de fluidos recomendo o relatório técnico de Giraldi [8].

2.2.1 SPH (smoothed particle hydrodynamics)

SPH (smoothed particle hydrodynamics) é um método computacional usado para simular fluxo de fluidos baseado em partículas [11]. O mesmo é usado em vários campos de pesquisa, incluindo astrofísica, balística, vulcanologia e oceanologia.

O método de SPH funciona dividindo o fluido em um conjunto de elementos discretos, denominados de partículas. Essas partículas possuem uma distância espacial (conhecida como *smoothing length*, tipicamente representado na equação por h), as quais suas propriedades são suavizadas por uma função de *kernel*. Isso significa que qualquer valor físico de uma porção qualquer do fluido pode ser obtido somando as propriedades relevantes de todas as partículas que se encontram nas proximidades do *kernel*.

A contribuição de cada partícula para uma propriedade é proporcional a sua distância com a partícula de interesse e sua densidade. Matematicamente, esta é governada pela função de *kernel* (representada por W). A função de *kernel* comumente usada inclui uma função gaussiana e uma spline cubica. A ultima função é exatamente zero para partículas mais afastadas que duas suavizações de distância (diferente da Gaussiana, aonde existe uma pequena contribuição a qualquer distância finita). Este tem como vantagem de economizar esforço computacional por não incluir menores contribuições de partículas distantes.

3 PROPOSTA

3.1 Entendimento do Problema

A proposta desse trabalho visa utilizar a técnica de *steering behaviors* na simulação de fluido, como previamente explicado essa técnica utiliza a combinação de forças de direcionamento para direcionar os elementos em um cenário. Em contrapartida as técnicas tradicionais de simulação de fluidos baseado em partículas utilizam a transferência de energia entre as partículas para realizar a simulação, as constantes trocas de forças (ou energia no caso da simulação física) entre os elementos movimentam as partículas.

A simulação de fluidos para computação gráfica não é baseado em realismo mas sim no resultado visual, assim a interação entre as partículas de *behaviors* adequando corretamente as forças podem resultar em uma simulação coerente para a utilização da mesma em ambientes tridimensionais de jogos ou animações. As forças e os próprios *steerings* devem ser modificados ou ajustados para que o resultado adequado seja alcançado.

Como linha de trabalho pode ser estudado o relacionamento dos *behaviors* da simulação com propriedades dos fluidos como exemplo: quais forças devem ser alteradas para mudarmos o comportamento de viscosidade do fluido, se é possível alterar a viscosidade trabalhando com as forças e o tamanho da região de interação dos *behaviors* ; ou a possibilidade de simularmos a interação de fluidos de densidades diferentes alterando as regiões de vizinhança dos elementos as forças que parametrizam essas regiões. O objetivo desse trabalho é de relacionar a possibilidade de simular algumas características ou casos específicos de fluidos utilizando a metodologia de direcionamento por forças.

3.1.1 Relação entre as abordagens

A interação de um corpo estranho com a superfície do fluido segue a ordem: repulsão das partículas que formam a superfície do fluido, afastamento do volume líquido para a

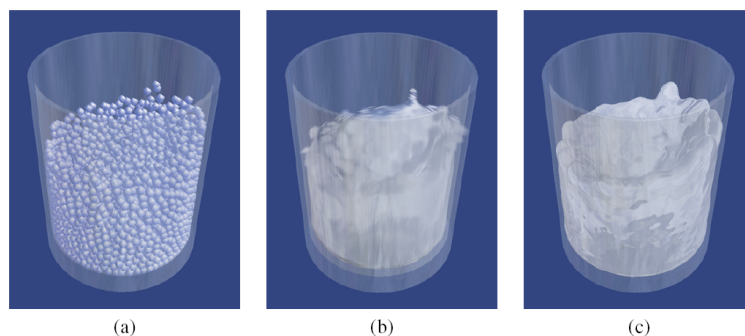


Figura 3.1: Formas de representação de fluidos.

entrada do novo corpo, retorno do fluido e preenchimento do espaço deslocado.

A repulsão pode ser relacionado com o comportamento de repulsão do *steering behaviors* aonde os elementos são repelidos ao entrarem na região de proximidade limite, o afastamento do fluido é similar à repulsão da primeira etapa, diferenciando na força de repulsão aplicada. A diferença de forças funcionará de forma automática por causa da velocidade de aproximação do corpo estranho, quanto maior a velocidade mais próximo do elemento o mesmo se situará ao ser computado as forças que atuarão sobre o elemento fazendo com que a força de repulsão seja relativamente alta quando comparado com a próxima etapa aonde ocorre a diminuição na velocidade do novo corpo (reação a força de repulsão dos elementos que já se encontram no recipiente) e os elementos são repelidos quando estão mais afastados.

O retorno se dá de forma similar a repulsão, como as partículas foram comprimidas com o deslocamento lateral as mesmas saem de uma região de estabilidade e são forçadas a entrar em uma região de repulsão entre os elementos vizinhos fazendo com que eles sejam forçados a se reorganizar e preencher os espaços vazios do recipiente.

3.1.2 Representação

A representação realista é muito importante para uma melhor visualização dos elementos, porém a mesma é somente deve ser levada em consideração após um resultado satisfatório na simulação. A representação dos elementos será dada através de esferas, as esferas representarão as partículas do fluido as quais por métodos previamente utilizados por Müller [12] podem ser usadas para formar uma superfície do fluido as quais podem ser vistas na Figura 3.1. Na Figura 3.1 (a) verificamos as partículas utilizadas na simulação realizada, em (b) foi utilizada a técnica de *marching cubes* [10]. O trabalho tem

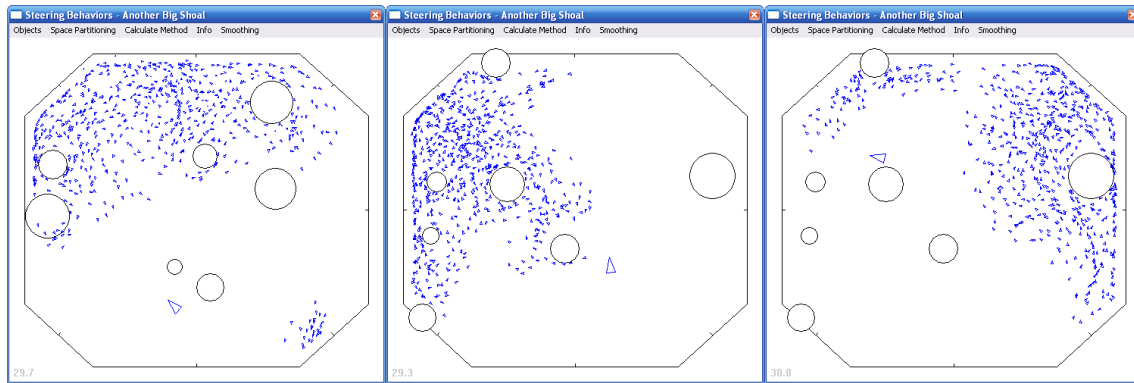


Figura 3.2: simulação de cardume por steering behaviors, visualização de padrões de dinâmica de fluidos [1].

por objetivo buscar o realismo da simulação de fluidos para computação gráfica e não de representação visual o qual pode ser tratado posteriormente, por esses motivos as técnicas de criação de superfícies não serão tratadas nesse trabalho.

3.1.3 Definição dos steerings

Em visualizações de simulação foram constatados semelhanças na dinâmica da movimentação de comportamento em grupo (*flocking*) com a simulação de fluidos, alguns desses elementos podem ser visualizados na Figura 3.2 aonde foi constatado linhas de fluxo dos elementos (denominados boids triângulos menores em azul) através dos obstáculos ao se afastarem do raio de ação de um suposto predador (triângulo azul maior), esse comportamento de *evasion* somado ao comportamento de *flocking* gerou o turbilhonamento ao interagir com as paredes e obstáculos do cenário. Esse turbilhonamento é semelhante os resultados dos métodos DFC gerados pela interação das partículas entre si e o escoamento de um fluido através dos elementos do cenário. Essa visualização foi verificado em um ambiente bidimensional, porém o conceito será ampliado e testado em um ambiente tridimensional.

A abordagem inicial será a utilização das forças de direcionamento que compõem o comportamento de *flocking* padrão, isso é, coesão, repulsão e alinhamento. A força de coesão fará com que os elementos tendam a permanecer unidos, comportamento relacionado ao asfado do comportamento físico de fluidos. A força de separação manterá os mesmos afastados evitando que os mesmos se aglomerem em um único corpo, lembrando que os elementos que forma uma simulação de *steering behaviors* não restringe a sobreposição de elementos ou que os mesmos atravessem um ao outro, por isso a força de separação

se torna importante na simulação de fluidos. A força de alinhamento não será utilizada a princípio, essa força faz com que os elementos tendam a permanecer alinhados com o grupo esse comportamento, portanto, poderá ocasionar instabilidade sendo que ao adicionar alguma força ao sistema que venha a modificar a estabilidade do grupo (adição de mais líquido ao recipiente ou de jogar um objeto estranho dentro do mesmo) os elementos tenderão, como primeira reação, a se deslocarem todos para a direção em que estão alinhados fazendo com que os elementos se desloquem para uma direção não esperada. Essa força será estudada e verificado se o seu comportamento corresponde ao esperado nessa análise prévia.

3.1.4 Controle da Entropia

Falar do problema de adição constante de energia ao sistema, e falar que é uma característica do próprio sistema de steering behaviors criar novas forças para simular o comportamento dos elementos, sendo necessário um controle para que o sistema se estabilize.

3.2 Estratégias de implementação

Como base de implementação é necessário a implementação dos comportamentos de direcionamentos necessários como base programacional da solução proposta, surgiu a proposta da criação de um sistema de behaviors próprio o qual resultou na compreensão do funcionamento da biblioteca OpenSteer. O OpenSteer é uma biblioteca desenvolvida em C++ destinada a ajudar a implementação de steering behaviors para personagens autônomos aplicado a jogos e animação. A escolha do uso da biblioteca OpenSteer se deve pelos seguintes fatores: implementação validada e testada, desenvolvido pelo Craig Reynolds criador da técnica de *steering behaviors*, sua implementação abrange as especificações e técnicas especificadas no trabalho original [18].

3.2.1 OpenSteer

Esta seção resumirá os componentes relevantes do framework criado por Reynolds denominado OpenSteer. OpenSteer é uma biblioteca *open source* de componentes que facilita a construção de ambientes para jogos e simulações multi-agentes que façam uso de *steering behaviors* para personagens autônomos. Esses agentes podem representar personagens (humanos, animais), veículos (carros, aviões, espaçonaves) ou outros tipos de agentes móveis. OpenSteer é multiplataforma, suportando atualmente Linux, Windows

e Mac OS X, informações não encontrado nesse documento podem ser encontradas na página do projeto [19].

OpenSteer prove um kit de ferramentas para *steering behaviors*, definidas em termos de um agente móvel chamado *vehicle*. Para permitir uma fácil integração com engines de jogos existentes o OpenSteer pode ser adicionado como uma camada ou por herança de código. O mesmo foi criado para ser utilizado por programadores e não da suporte como ferramenta interativa de produção.

3.2.1.1 OpenSteerDemo

Em adição a biblioteca, OpenSteer fornece uma aplicação interativa chamada OpenSteerDemo o qual possui vários behaviors implementados e prove um ambiente que facilita a visualização de resultados e facilidade para corrigir problemas através de sua interface. O OpenSteerDemo é desenvolvido em C++ e usa a API Gráfica OpenGL e todas as chamadas OpenGL são separadas em um módulo possibilitando a troca da mesma caso seja necessário.

O OpenSteerDemo é baseado em uma arquitetura *plug-in*, isso é, módulos podem ser facilmente adicionados. Um *plug-in* para OpenSteerDemo especifica várias ações genéricas requeridas pelo OpenSteerDemo framework: *open*, *close*, *reset*, *run one simulation step*, *display one frame*, etc, o mesmo também define as classes veículo e gerencia a simulação.

O sistema de *plug-in* do OpenSteerDemo permite que o desenvolvedor crie rapidamente um protótipo de um comportamento durante o *game design*.

O OpenSteerDemo possui um sistema de relógio interno com dois tipos de contagem diferentes: *real time* e *simulation time*. O tempo de simulação é normalmente segue o tempo real da simulação mas também pode ser pausada, congelando a simulação. Pausando a simulação permite examinar as informações em detalhes ou reposicionar a câmera. O relógio pode continuar sua execução de três formas diferentes conforme descritas abaixo:

- *Frame rate* variável: utilizado para visualização de simulações em tempo real. As atualizações ocorrem o mais rápido possível. Os passos da simulação são proporcionais ao tempo passado desde o último update;
- *Frame rate* fixo: utilizado para visualização de simulações em tempo real. As

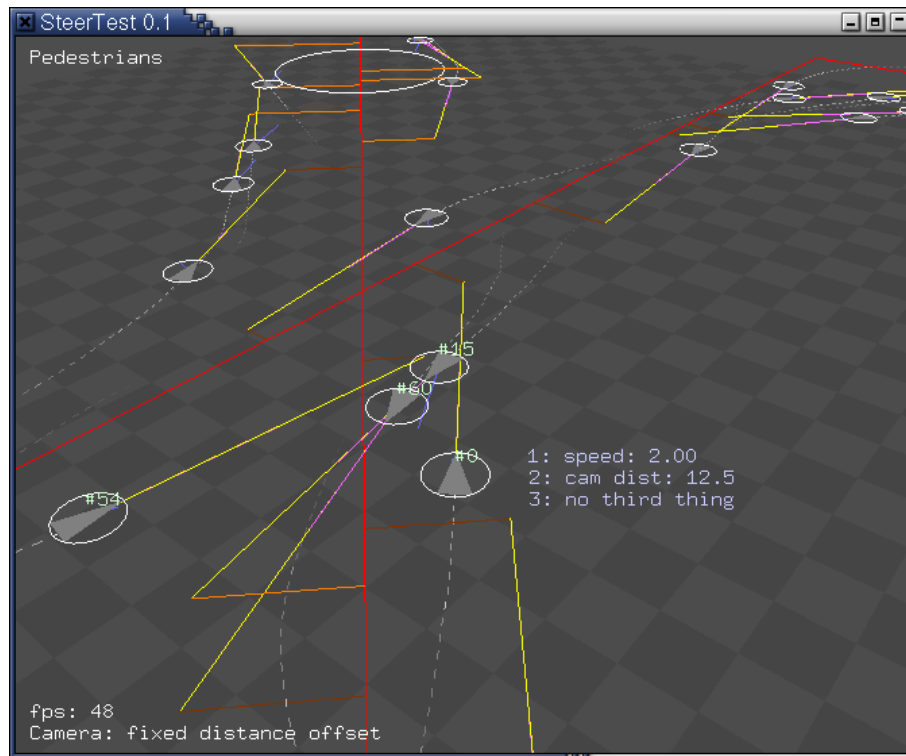


Figura 3.3: Simulação de pedestres utilizando OpenSteer

atualizações são forçadas a ocorrer em quantias fixas de *frame rate* aguardando até o início do próximo frame. Caso o update leve muito tempo o mesmo deve aguardar até o início da próxima janela de atualização;

- Modo de animação: Para executar passos fixos da simulação, geralmente não é em tempo real, ignorando o tempo real para produzir resultados consistentes da simulação.

A Figura 3.3 mostra uma simulação de pedestres em um ambiente bidimensional utilizando o framework. Esse exemplo faz parte dos *plug-in* que acompanham o OpenSteerDemo.

3.2.1.2 Funcionalidades não implementadas

Alguns comportamentos principais detalhados no artigo de Reynolds [18] não foram implementadas ainda no OpenSteer. São eles: *offset pursuit*, *arrival*, *wall following*, *containment*, *flow field following* e *leader following*. Outros comportamentos citados de passagem no artigo não foram implementados.

O OpenSteer não prove uma restrição de não penetração em outros elementos (obstáculos e outros veículos) o que pode ocasionar falhas visuais na simulação.

Alguns componentes da API do OpenSteer não estão documentados além dos comentários existentes nos arquivos de cabeçalho (*header files*).

4 IMPLEMENTAÇÃO

4.1 Definição de forças

4.1.1 Gravidade

Para simulação de grupo de elementos em um sistema de *steering behaviors* a força gravitacional no mundo usualmente não é relevante para o resultado esperado, porém em uma representação gráfica de fluidos a gravidade é necessária e sua contribuição para a representação de fluidos importante para para a obtenção do fluxo e representação dos elementos corretamente. A gravidade foi implementada como uma força que age constantemente sobre todos os elementos do sistema. Essa força faz com que os elementos formem um fluxo na direção de atuação da força. A figura 2.1 representa a implementação da gravidade no sistema.

A gravidade é aplicada a cada atualização do elemento, a qual é aplicada como um simples vetor força em direção ao eixo Y negativo.

```
// per frame simulation update
void update (const float currentTime, const float elapsedTime)
{
    // steer to flock and avoid obstacles if any
    applySteeringForce (steerToFlock (), elapsedTime);

    applySteeringForce (gravity (), elapsedTime);
}

Vec3 gravity(void)
{
    Vec3 gravity = Vec3(0, -10, 0);
    return gravity;
}
```

Figura 4.1: Implementação: gravidade

4.1.2 Coesão

A coesão consiste em uma região, geralmente mais externa, na qual os elementos tendem a se aproximar do centro do grupo. A coesão entre as partículas faz com que as mesmas tendam a não se separar do grupo de vizinhança. Esse agrupamento é esperado entre os elementos que compõem a simulação, pois o arrasto ou movimentação de um grupo de partículas faz com que as partículas em sua volta se desloquem em forma de torrente causado pelo arrasto dos elementos em movimento. Em nossa implementação estudamos a força de coesão nas seguintes condições:

- Comportamento original: os elementos se atraem com igual força não importando em qual região de vizinhança o elemento se encontra, nesse caso em especial o comportamento de agrupamento dos elementos funcionava conforme esperado, porém com a força de separação (verificar a implementação da separação 4.1.3) adicionando força de forma exponencial ao inverso da distância entre os elementos o sistema tende a não se estabilizar.
- Força exponencial: os elementos são atraídos através de uma força exponencial proporcional à distância entre os elementos do grupo, assim quanto mais afastado do centro e mais próximo da fronteira da região de vizinhança maior será a força de atração entre os elementos, e quanto mais próximo da região de separação menor a força fazendo com que os elementos encontrem uma região de transição estável entre a força de separação e coesão. Esse comportamento atuará como um facilitador na solução do problema de estabilização das forças internas do sistema ver seção 4.1.5.1.

Além das modificações comportamental dos *steering behaviors* citadas, foram realizadas modificações na região de atuação da força e coesão e no seu peso na contribuição final na força resultante do processo de interação com os demais elementos. Com essas modificações espera-se chegar a representação da viscosidade de um fluido. Esse resultado é esperado pelo fato de que a região de coesão é determina a resistência em que os elementos são capaz de separar do grupo principal, quanto menor o for a colaboração na força final de interação mais fácil é da partícula se separar do grupo a qual ele pertence e quanto maior a sua contribuição, mais coeso é o grupo.

4.1.3 Separação

A força de separação tende a afastar os elementos quando internos à região de separação. A força de separação é um elemento importante na simulação de fluidos, a mesma vem em substituição da transferência de energia pela colisão dos elementos na simulação física de partículas. Como no steering behaviors os elementos não trabalham com colisão é necessária uma força capaz de separar os elementos quando muito próximos ou quando em rota de colisão. Essa força é diretamente proporcional ao inverso da distância ao quadrado fazendo com que a mesma cresça rapidamente ao se aproximar de outro elemento, resultando na separação de ambos os elementos. A região de atuação da força de separação corresponde com a distância esperada em que as partículas permaneçam separadas uma das outras, analogamente podemos relacionar com a densidade do fluido, pois quanto mais próximas as partículas se estabilizarem mais difícil será deslocá-las na interação com outros elementos, dado que a força de repulsão do grupo a um elemento novo é maior devido ao somatório das forças resultantes do grupo.

4.1.4 Alinhamento

A força de alinhamento direciona os elementos a se alinharem com o grupo que pertence a região de alinhamento. Para os primeiros testes a mesma não está sendo utilizada, pois para o comportamento das partículas o alinhamento das mesmas não representa uma contribuição importante para o sistema.

4.1.5 Interação com paredes do recipiente

Existem duas abordagens que tratam a interação dos elementos com as paredes do recipiente, abordagem por forças ou uma restrição de movimentação dos elementos.

Na abordagem por forças o sistema se torna mais genérico, facilitando a interação com os elementos do cenário pois basta determinar uma força restritiva nas paredes do recipiente para que o líquido permaneça em seu interior, essa abordagem possui problemas como a não garantia de que os elementos não atravessarão os limites determinados pois para isso necessitam somente de uma força maior que a força de restrição.

Em contra partida existe a limitação por restrição de movimentação, isso é, não permitindo que os elementos saiam do espaço definido como recipiente, essa proposta possui a vantagem de que nenhum elemento sairá pelas paredes do recipiente, porém haverá a

necessidade de definir uma forma de restrição adicional ao sistema diferente do sistema de forças.

Essas abordagens necessitam de análise para corpos não líquidos que interagirão com o sistema (pedra jogada dentro de um copo de água) pois é necessário definir como esse corpo propagará a informação para os elementos da simulação da existência de um corpo estranho em seu meio, a abordagem de forças é uma abordagem mais genérica, pois basta definir um elemento novo no ambiente o qual possui uma força de repulsão ao se aproximar das regiões definidas como limite espacial do corpo.

4.1.5.1 Estabilidade e entropia

O problema de instabilidade ocorre pelo funcionamento básico do *steering behavior*, o mesmo não utiliza a energia existente no elemento na adição das forças de interação com a vizinhança, a força é criada fazendo com que o sistema não se estabilize. A criação de forças é uma característica intrínseca ao funcionamento do *steering behavior* fazendo com que a mesma não possa ser alterada ou removida, sendo necessário desenvolver uma metodologia baseada em forças para que essas a entropia do sistema se estabilize. Algumas regras foram definidas para que o sistema tendesse ao equilíbrio, essas regras são de perda e adição de energia ao sistema.

- Perda de energia pelo sistema. Como no mundo real o atrito e a interação das moléculas fazem com que o sistema tenda a se estabilizar, em nossa abordagem os elementos perdem sua velocidade quando próximos a outros elementos (caracterizando a viscosidade) e quando interagindo com a parede do recipiente (caracterizando o atrito com outros elementos)
- Adição de energia somente. A força somente será criada quando for necessária e guardando as proporções dos eventos.

5 RESULTADOS

6 CONCLUSÃO

6.1 Trabalhos futuros

- relacionar os *behaviors* da simulação com propriedades dos fluidos como exemplo: quais forças devem ser alteradas para mudarmos o comportamento de viscosidade do fluido, se é possível alterar a viscosidade trabalhando com as forças e o tamanho da região de interação dos *behaviors* ;
- possibilidade de simularmos a interação de fluidos de densidades diferentes alterando as regiões de vizinhança dos elementos as forças que parametrizam essas regiões.
- portabilidade para uso de GPU
- aplicação de técnicas de rendering para visualização dos resultados

REFERÊNCIAS

- [1] Mat Buckland. *Programming Game AI by Example*. Wordware Publishing, Inc., 2004.
- [2] Jean christophe Lombardo and Claude Puech. Oriented particles: A tool for shape memory objects modelling. In *In Proc. Graphics Interface*, pages 255–262, 1995.
- [3] D. Cliff and G. Miller. Co-evolution of pursuit and evasion ii: Simulation methods and results, 1995.
- [4] Mathieu Desbrun and Marie paule Gascuel. Smoothed particles: A new paradigm for animating highly deformable bodies. In *EG Workshop on Animation and Simulation*, 1996.
- [5] Douglas Enright, Stephen Marschner, and Ronald Fedkiw. Animation and rendering of complex water surfaces. In *SIGGRAPH '02: Proceedings of the 29th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 736–744, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [6] Nick Foster and Ronald Fedkiw. Practical animation of liquids. In *SIGGRAPH '01: Proceedings of the 28th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 23–30, New York, NY, USA, 2001. ACM.
- [7] Nick Foster and Dimitris Metaxas. Modeling the motion of a hot, turbulent gas. In *SIGGRAPH '97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 181–188, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [8] Gilson A. Giraldi, Antonio Lopes Apolinario Jr., Antonio A. F. Oliveira, and Raul

- Feijó. Animação de fluidos via técnicas de visualização científica e mecânica computacional. Technical report, Laboratório Nacional de Computação Científica, 2005.
- [9] M. B. Liu, G. R. Liu, and K. Y. Lam. Constructing smoothing functions in smoothed particle hydrodynamics with applications. *J. Comput. Appl. Math.*, 155(2):263–284, 2003.
 - [10] William E. Lorensen and Harvey E. Cline. Marching cubes: A high resolution 3d surface construction algorithm. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 21(4):163–169, 1987.
 - [11] J.J Monaghan. An introduction to sph. *Computer Physics Communications*, 48,(1):88–96, 1988.
 - [12] Matthias Müller, David Charypar, and Markus Gross. Particle-based fluid simulation for interactive applications. In *SCA '03: Proceedings of the 2003 ACM SIGGRAPH/Eurographics symposium on Computer animation*, pages 154–159, Aire-la-Ville, Switzerland, Switzerland, 2003. Eurographics Association.
 - [13] Algemiro A. S. Neto, Gilson A. Giralddi, and Antonio Lopes Apolinario Jr. Animation of fluids through smoothed particle hydrodynamics. Technical report, Laboratório Nacional de Computação Científica, 2005.
 - [14] Daniel Nixon and Richard Lobb. A fluid-based soft-object model. *IEEE Comput. Graph. Appl.*, 22(4):68–75, 2002.
 - [15] Simon Premoze, Tolga Tasdizen, James Bigler, Aaron Lefohn, and Ross T. Whitaker. Particle-based simulation of fluids. *EUROGRAPHICS*, 22(3), 2003.
 - [16] W. T. Reeves. Particle systems - a technique for modeling a class of fuzzy objects. In *ACM Transactions on Graphics*, 1987.
 - [17] Craig W. Reynolds. Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model. In *SIGGRAPH 1987, Computer Graphics*, 1987.
 - [18] Craig W. Reynolds. Steering behaviours for autonomous characters. In *Game Developers Conference 1999*, 1999.
 - [19] Craig W. Reynolds. Opensteer: Steering behaviors for autonomous characters, 2003.

- [20] Jos Stam. Stable fluids. In *SIGGRAPH '99: Proceedings of the 26th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pages 121–128, New York, NY, USA, 1999. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co.
- [21] Dan Stora, Pierre olivier Agliati, Marie paule Cani, Fabrice Neyret, and Jean dominique Gascuel. Animating lava flows. In *in Graphics Interface*, pages 203–210, 1999.
- [22] Tsunemi Takahashi, Heihachi Ueki, Atsushi Kunimatsu, and Hiroko Fujii. The simulation of fluid-rigid body interaction. In *SIGGRAPH '02: ACM SIGGRAPH 2002 conference abstracts and applications*, pages 266–266, New York, NY, USA, 2002. ACM.
- [23] David Love Tonnesen. *Dynamically coupled particle systems for geometric modeling, reconstruction, and animation*. PhD thesis, Toronto, Ont., Canada, Canada, 1998. Adviser-Terzopoulos,, Demetri.