

Animais → indivíduos e suas populações

Muito melhor que Simulador...

Parâmetros de cada espécie: onde estão os dados?

## ARQUITECTURA PARA SIMULAÇÃO DE CLASSES DE ANIMAIS EM REALIDADE VIRTUAL

↓  
su seleção entre biólogos zoológicos

Manuel Próspero dos Santos

ps@di.fct.unl.pt

Paulo Heleno

pheleno@virtual.dcea.fct.unl.pt

Departamento de Informática  
Faculdade de Ciências e Tecnologia  
Universidade Nova de Lisboa  
P-2825 Monte de Caparica

### Sumário

Pretende-se obter a visualização e a simulação, num ambiente de realidade virtual, de animais de diferentes espécies habitando um mesmo ecossistema. Esta comunicação propõe uma arquitectura de suporte com a finalidade de atingir tal objectivo. Cada animal comporta-se como um agente que interage, de maneira autónoma, com o ambiente dinâmico que o rodeia e com os outros animais. A aplicação concreta desta arquitectura é apresentada para a simulação duma pequena parte do ecossistema do estuário do rio Sado, onde se podem encontrar comunidades de golfinhos, tainhas e medusas. Estes animais foram modelados de acordo com as regras descritas na comunicação e a simulação em tempo real é executada sobre um sistema concreto de realidade virtual, o que permite ao utilizador uma exploração espacial do ecossistema à medida do seu interesse.

### 1. Introdução

A simulação, como reprodução artificial de um fenómeno natural, facilita a exploração de hipóteses através de uma experimentação em condições que podem ser controladas, nomeadamente com a eliminação de pormenores irrelevantes para o problema em causa. Suponhamos que nos interessa o estudo de um ambiente de vida animal, que sabemos poder ser influenciado por inúmeros factores. Ora um deles é, precisamente, a simples presença do observador humano.

A simulação de ambientes naturais faz uso, tradicionalmente, de macro-modelos. Nestes, os animais são vistos como populações ou grupos. Pelo contrário, a arquitectura concebida e desenvolvida pelo núcleo de computação gráfica do Departamento de Informática da FCT (DI), juntamente com o trabalho produzido por elementos do Grupo de Análise de Sistemas Ambientais (GASA), permite que a simulação se desenvolva em termos de um micro-modelo. A diferença está em que cada animal é simulado como o indivíduo que é, correspondendo por isso a um agente computacional. Será, então, devido às múltiplas interacções entre agentes que emergirão as propriedades dos grupos que levam a

comportamentos colectivos muito característicos em certas espécies animais. A movimentação de bandos de aves é um bom exemplo, de todos conhecido.

São os princípios básicos desta arquitectura que nos propomos apresentar nesta comunicação. A arquitectura de base e a sua implementação são orientadas por objectos, permitindo grande facilidade na expansão e modificação de componentes. Isso implica outras vantagens, como sejam as da reutilização de código, bem como a rápida alteração dos parâmetros da simulação do caso em estudo.

## 2. Enquadramento do Tema

A animação de bandos e manadas, baseada no modelo do actor em computação distribuída, foi apresentada como método de simulação deste tipo de grupos por Craig Reynolds [Rey87]. Os indivíduos considerados na simulação (denominados *bird-oids*, ou, mais simplesmente, *boids*) apenas estariam sujeitos ao cumprimento de três regras básicas, a saber: evitar a colisão, juntar-se ao grupo e acompanhar a sua velocidade. As formações assim emergentes comportar-se-iam como bandos naturais. Este trabalho veio demonstrar a importância real que terá, em animais artificiais, a ligação estreita entre a percepção e a selecção de uma acção a tomar. Entretanto, outros autores têm vindo a apresentar modelos destinados a simular diversos tipos de animais. São disso exemplo os sistemas com massas e molas de ligação para a representação de cobras e vermes [Mil88], bem como a simulação por agentes reactivos múltiplos para o caso de colónias de formigas [Dro92].

Outras propostas passam pela utilização de linguagens genéticas para criação de animais virtuais, com possibilidades evolutivas. É o caso apresentado por Karl Sims [Sim94], em que a adequação das diversas morfologias tem por base uma selecção orientada para uma finalidade específica, como seja nadar, saltar ou simplesmente andar. Embora os resultados possam ser interessantes, as criaturas assim geradas são morfologicamente muito diferentes dos animais reais, cuja simulação é a nossa principal finalidade. Nesse sentido, encontramos nos trabalhos de X. Tu e D. Terzopoulos [Tu94] um grande realismo na modelação. De facto, esses autores apresentam um enquadramento para a animação de peixes artificiais onde cada animal é modelado como um agente autónomo. O controlo desse agente é da responsabilidade de quatro blocos principais, assim designados: percepção, gerador de intenções, comportamento, e controlo motor. O movimento de um peixe para nadar, por exemplo, é obtido à custa da simulação das forças hidrodinâmicas que resultam da movimentação das barbatanas.

## 3. Animais Artificiais num Ecosistema Virtual

Por ecossistema virtual entendemos um ambiente tridimensional simulado que é composto por elementos topológicos, elementos ambientais, e, naturalmente, diferentes espécies animais e vegetais. O **Quadro 1** apresenta um tabela com alguns exemplos concretos na

classificação dos referidos elementos.

Quadro 1 - Exemplos de elementos de um ecossistema

Elementos			
Topológicos	Ambientais	Vegetais	Animais
mar	salinidade	erva	golfinho
rio	fonte de calor/frio	alga	tainha
lagoa	poluição	árvore	medusa
terreno	vento	...	...
...	corrente marítima		
	...		

Num ecossistema, os seus elementos deverão encontrar-se interligados por uma rede mais ou menos complexa, traduzindo as relações existentes. A mais óbvia é talvez a rede (ou cadeia) alimentar. Por exemplo, os herbívoros comem plantas e são comidos pelos carnívoros que, por outro lado, terão eventualmente outros predadores. Mas também são vulgares, como formas de interligação, a atracção e a repulsão entre seres. Há, ainda, animais que são atraídos por certos agentes ambientais, tais como fontes de calor, e repelidos por outros, nomeadamente os que se relacionam com a poluição.

Numa simulação, todos os elementos do ecossistema podem ter uma representação visual. Alguns deles, como sejam os terrenos, têm uma geometria estática, ao passo que outros poderão ser animados. É o que se passa com os animais, que se locomovem, e até mesmo com plantas e algas, cujos modelos devem poder responder às solicitações do vento e correntes submarinas, respectivamente. A maioria dos elementos ambientais corresponde a entidades que, normalmente, não podem ser vistas (e.g. temperatura, salinidade, vento). Contudo, e como característica dum processo de simulação em geral, podemos associar-lhes representações gráficas convencionais: vectores, sólidos primitivos, fitas coloridas, etc..

As interligações atrás referidas são modeladas por grafos que irão ligar os nós que representam classes de entidades, desde espécies animais e vegetais até tipos de agentes ambientais. Dado que a rede alimentar é de muita importância, deverá ser-lhe dada uma atenção especial. Os arcos nos grafos que relacionam as diferentes espécies animais ao longo dessa rede terão um peso associado, correspondendo à probabilidade de sucesso em caso de ataque.

#### 4. Modelação com Agentes Autónomos

Segundo uma definição de Blumberg e Galyean, um agente autónomo é um sistema computacional com um conjunto de objectivos que tenta satisfazer num ambiente complexo e dinâmico [Blu95]. Diz-se autónomo por poder sentir e actuar no ambiente, decidindo que acção tomar para alcançar os seus objectivos. É esse o motivo que nos leva a implementar os animais artificiais como agentes autónomos. Assim, em cada passo da simulação, cada animal escolhe uma acção para executar, com base no seu estado actual e na sua percepção

do mundo que o rodeia. A acção escolhida será executada por um sistema de controlo motor capaz de afectar a sua geometria. O modelo estrutural seguido está representado na Fig. 1.

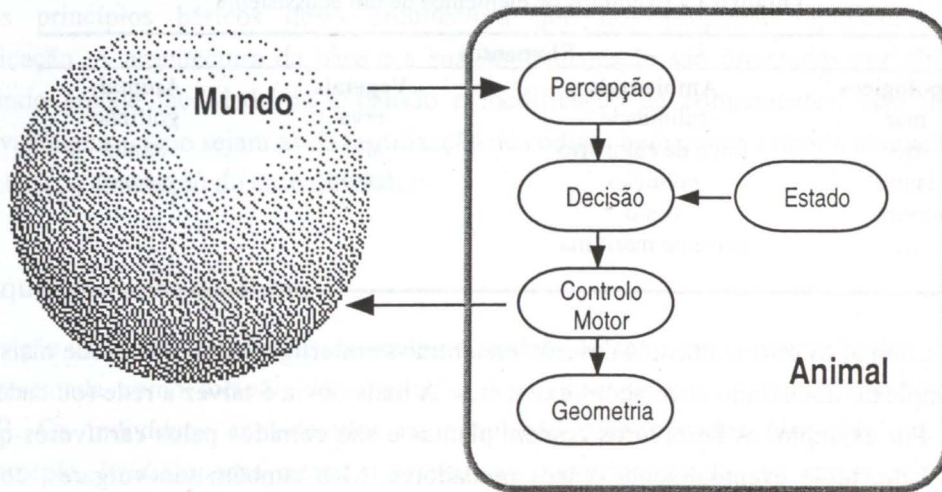


Fig. 1 - Modelo de controlo de um animal virtual

No processo de controlo de um animal artificial, não são exclusivamente a percepção e o estado que importam, uma vez que há grande influência dos hábitos da espécie em causa. Explicam-se, assim, as preferências genéricas de uma certa espécie: a desova em águas tranquilas ou a procura sistemática de lugares escuros são disso exemplo. Chegamos, então, à conclusão que a diferença entre estado e hábito é que o primeiro é uma propriedade do animal enquanto indivíduo, ao passo que o segundo tem a ver com preferências comuns a todos os exemplares dessa espécie. Nesse sentido, um hábito pode considerar-se estático, ao contrário do estado, que se vai alterando ao longo do tempo.

## 5. Estrutura de um Animal Artificial

Nesta secção analisa-se mais pormenorizadamente cada um dos componentes estruturais do modelo esquematizado na Fig. 1 e que se pretende mostrar como adequado na representação e simulação de animais num ambiente de realidade virtual.

### 5.1 Módulo de Percepção

O conhecimento sobre o mundo é obtido pelo animal através da informação que lhe é transmitida pelos seus sensores. Na arquitectura que propomos, os animais artificiais têm acesso directo à base de dados das entidades e daí, por simulação dos diversos tipos de sensores, obter a tal informação necessária. A função do sensor pode ser concebida para movimento, som, temperatura, luz, etc.. Se for caso disso, pode modelar-se sensores com ruído, nos quais a informação sofrerá propositadamente distorções, imitando assim melhor os sensores reais.

Como acontece com os verdadeiros animais, os nossos seres artificiais têm uma percepção local e limitada do ambiente. Por essa razão, e para se conseguir uma melhor eficiência, realizámos uma divisão espacial da base de dados do mundo em células distintas. Uma solução semelhante foi proposta por T. Sepúlveda na dissertação de mestrado [Sep96]. Em cada célula guardam-se as entidades que, no momento, ocupem o seu espaço interno. Deste modo, um animal só precisará de interrogar as células vizinhas que estejam abrangidas pelo seu alcance perceptual. O resultado do processo de percepção será um modelo local do mundo contendo a informação relevante para o resto do processo de controlo do animal.

## 5.2 Módulo de Estado

Definiu-se o estado de um animal a partir de um conjunto de variáveis internas consideradas básicas: *Hunger*, *Health* e *Energy*. A dinâmica de cada uma delas é da responsabilidade de uma função que controla as correspondentes variações no tempo.

A variável *Hunger* aumenta proporcionalmente ao apetite do animal e diminui quando o animal come. Abaixo de um certo nível considerado normal, o valor de *Health* aumenta lentamente com o tempo, e diminui na presença de entidades prejudiciais (como a poluição) ou quando o animal sofre um acidente (como seja uma forte colisão). Quanto a *Energy*, geralmente diminui com o tempo a uma taxa proporcional ao esforço desenvolvido no momento e aumenta quando o animal descansa ou se alimenta, o que, noutros termos, poderemos considerar como um esforço negativo. Considera-se que o animal morre quando *Health* ou *Energy* atinjam o valor zero.

As equações utilizadas para exprimir a dinâmica das referidas variáveis básicas são as seguintes:

$$Hunger(t+\Delta t) = Hunger(t) + Appetite \cdot \Delta t - CaloriesEaten \quad (1)$$

$$Health(t+\Delta t) = Health(t) + AdjustHealth(t) \cdot \Delta t - Harmful(t) \quad (2)$$

$$Energy(t+\Delta t) = Energy(t) - EffortRate(t) \cdot \Delta t \quad (3)$$

Na segunda equação usou-se a função *AdjustHealth*, que assume um valor positivo constante se *Health* estiver abaixo do seu valor nominal. Por outro lado, *Harmful* dará conta da acumulação de todas as contribuições dos diversos agentes prejudiciais, ponderadas pela distância e pelo grau de influência do agente no indivíduo, juntamente com os danos provocados por acidentes.

Para além destas variáveis básicas, outras poderão ser também definidas para cada espécie. É de supor, por exemplo, que uma espécie com predadores tenha uma variável *Fear*, reflectindo assim o medo em relação a esses predadores. Ou então, querendo modelar igualmente o comportamento sexual, poderíamos recorrer a uma variável adicional *Libido*. Estas duas últimas propostas fazem já parte do modelo de Tu e Terzopoulos [Tu94].

### 5.3 Módulo de Controlo Motor

A arquitectura proposta por Blumberg e Galyean [Blu95] serviu de base ao módulo de controlo motor, possuindo dois níveis de abstracção. O mais elevado é o nível de comportamento, enquanto que o outro é o nível de habilidade motora.

#### 5.3.1 Nível de Comportamento

Este nível contém actividades orientadas por objectivos, tais como “evitar obstáculo”, “evitar predador” ou “perseguir objectivo”, cuja definição se realiza em termos de acções atómicas.

Os comportamentos complexos ficam activos durante vários passos da simulação, sendo todos os comportamentos, neste nível, considerados incrementais. Listamos, de seguida, os nomes (em inglês) dos comportamentos básicos que implementámos:

- *Collision Avoidance*
- *Predator Avoidance*
- *Hazard Avoidance*
- *Breathe*
- *Eat*
- *Rest*
- *Group*
- *Wander*

O primeiro, *Collision Avoidance*, tenta afastar o animal de possíveis colisões com obstáculos estáticos ou com o próprio terreno. Obviamente, *Predator Avoidance* só existirá para as espécies com predadores. Nesse caso é responsável por escolher e executar uma estratégia adequada em reacção a um predador que apareça, podendo envolver fuga, imobilização, agrupamento, ocultação ou luta. *Hazard Avoidance* é muito semelhante ao comportamento de evitar colisões e desvia o animal de zonas potencialmente perigosas. *Breathe*, como a palavra indica, é um comportamento que se prende com a necessidade dos animais respirarem. No caso particular dos mamíferos marinhos, e numa situação de imersão, a respiração pode forçá-los a locomoverem-se. Quanto ao comportamento *Eat*, nele estão envolvidos outros comportamentos parciais, que poderemos ilustrar com *move towards food*, para um animal em geral, ou *chase prey*, para um predador em particular, e ainda *bite* ou *chew*. Também *Rest* poderá incluir outros comportamentos parciais, como sejam *stop* e *move towards a safe place*. Para as espécies com hábitos de grupo, como os peixes que nadam em cardume e as aves que voam em bandos, o comportamento *Group* mostra-se activo, envolvendo então três outros comportamentos mais básicos:

- *Group centering*, responsável pela movimentação de um indivíduo em direcção ao centro da formação dos vizinhos mais próximos;
- *Velocity matching*, que tenta igualar o vector velocidade do indivíduo com a

média do dos seus vizinhos mais próximos;

- *Dynamic collision avoidance*, para evitar a colisão com os próprios vizinhos que se deslocam no grupo.

Por último, consideramos que *Wander* (com o sentido de vaguear) é o comportamento por omissão, verificando-se sempre que os estímulos internos ou externos não induzam nenhum dos outros comportamentos.

### 5.3.2 Nível de Habilidade Motora

O nível de habilidade motora, ao receber as informações do nível superior, transforma as acções atómicas em animação e movimento do modelo geométrico do animal. Considerámos, assim, as sete seguintes acções atómicas:

- *Turn Right*
- *Turn Left*
- *Turn Up*
- *Turn Down*
- *Move Towards*
- *Accelerate*
- *Break*

As acções que levam um animal a avançar ou a desviar a sua trajectória são, obviamente, imprescindíveis. Mas, efectivamente, *Move Towards* pode considerar-se uma acção de mais alto nível, uma vez que poderá usar as acções de desvio para conduzir o indivíduo em direcção ao ponto especificado pelo nível de comportamento. Em relação às duas últimas acções atómicas, *Accelerate* e *Break*, elas irão alterar a velocidade do animal. De notar que a velocidade tem que ser limitada para o valor máximo característico da espécie em causa.

### 5.4 Módulo de Decisão

Como o próprio nome sugere, o módulo de decisão recebe informação sobre o estado, a percepção, os hábitos e o comportamento corrente para produzir um novo comportamento ou decidir manter o actual.

Dado que há situações em que a vida do animal está em perigo, é natural que a decisão possa deixar para segundo plano a escolha de comportamentos que resolvam necessidades não tão imediatas. Nesse sentido, somos levados a criar uma escala de prioridades para os comportamentos. No nosso sistema optámos por cinco níveis, enumerados de seguida por ordem decrescente:

- Prioridade 1: *Collision avoidance*
- Prioridade 2: *Predator avoidance / Hazard avoidance / Breathe*
- Prioridade 3: *Eat / Rest*
- Prioridade 4: *Group*

### Prioridade 5: *Wander*

Em cada nível, a decisão pode basear-se, quer na intensidade do estímulo, quer no valor da distância ao objectivo ou ao perigo, conforme for o caso.

De acordo com a decisão, os comportamentos executados podem levar, no entanto, a situações de oscilação ou de “*dead-lock*”. Se dois comportamentos com igual prioridade tiverem também estímulos de intensidade igual, podem alternar a sua execução sem concluírem os objectivos desejados. Pode tentar-se resolver este problema introduzindo uma certa persistência no comportamento que for escolhido, permitindo desse modo que ele se mantenha activo a não ser que algo mais importante apareça entretanto. A nível de implementação, isso pode conseguir-se com o conceito de histerese: uma vez activo, um comportamento ganhará um bónus em relação aos outros que tenham igual prioridade, os quais agora só poderão ser escolhidos se o respectivo estímulo passar a ser muito mais forte. É claro que os valores para a persistência devem ser escolhidos com muito cuidado, pois valores excessivos podem levar a que certas acções comportamentais esperadas numa situação real sejam negligenciadas na simulação.

Por outro lado, também será útil incluir a noção de fadiga. Se um animal persegue uma presa mas sem capacidade de a alcançar, não deverá permanecer com este comportamento indefinidamente. A função de fadiga será aplicada ao comportamento activo e limitará a sua duração. Se no intervalo de tempo que for atribuído as acções desencadeadas pelo comportamento não alcançarem os objectivos deste, o comportamento ficará inibido por um certo período de tempo (o chamado tempo de recuperação) e dará lugar a um novo comportamento.

## 6. Estruturas de Dados do Ecosistema Virtual

Por via da metodologia da programação orientada pelos objectos, os elementos do ambiente virtual são representados por classes. A hierarquia destas é mostrada no diagrama da Figura 3, onde se usa a notação OMT de Rumbaugh et al. [Rum91]. Nele, os rectângulos representam classes de objectos e os triângulos denotam herança. Quanto aos losangos, a sua função é indicar agregados, que são objectos complexos constituídos por outros mais simples.

No seu todo, o ecossistema é representado pela classe *World*. Ela inclui a topologia e outras entidades, além dos parâmetros globais do domínio de simulação, tais como a luz ambiente, o vento ou a temperatura. A classe *Topology* é constituída por um terreno, em malha de polígonos, e outros acidentes topográficos, como rios ou mar. A superclasse de todos os objectos elementares no ecossistema é *Entity*. Os seus únicos atributos são a posição e a orientação no espaço tridimensional. *Static Object* é a classe de todos os objectos que se não movem, ao passo que *Dynamic Entity* é a superclasse para as entidades activas, muito concretamente animais e outros objectos dinâmicos, tais como plantas. Usamos a classe



*Species* para especificar as interligações entre os animais e para armazenar os valores dos parâmetros que caracterizam uma dada espécie, como sejam velocidades médias, alcance perceptual e nível de apetite, entre outros. Quanto à classe *Animal*, também ela é um agregado, compondo-se de quatro outras classes: *Perception*, *State*, *Decision* e *Motor Control*. São estas mesmas classes que implementam os quatro módulos do modelo de controlo de um animal a que se refere a Fig. 1.

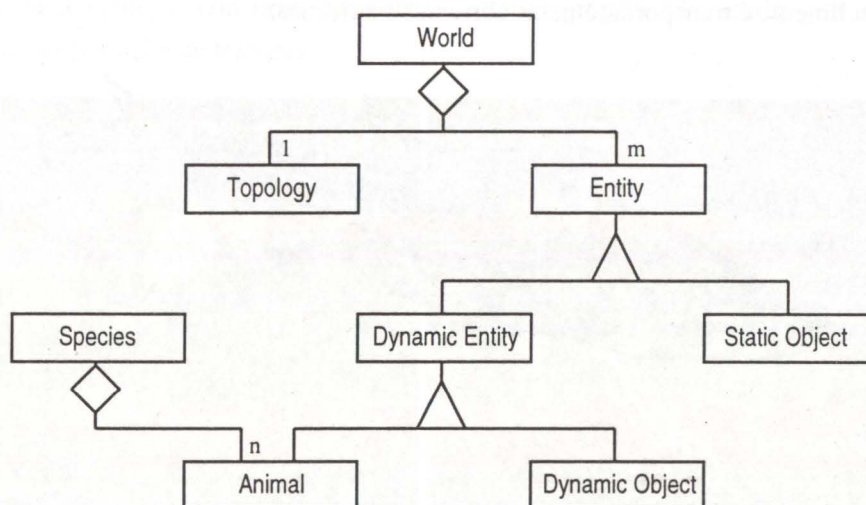


Fig. 2 - Estrutura do ecossistema virtual.

## 7. A Simulação de um ecossistema concreto

A motivação para a concepção e desenvolvimento desta arquitectura resultou da necessidade de simular animais reais no âmbito do projecto COAST, da responsabilidade do GASA [Câm95] e com a colaboração do núcleo de computação gráfica do DI [Gom96]. Passado cerca de um ano em relação à sua primeira versão, a arquitectura foi totalmente reconfigurada para, numa forma consistente e eficiente, poder responder à simulação numa larga variedade de situações [Ali77].

No referido projecto COAST, o que estava em causa era o ecossistema costeiro no estuário do rio Sado. Adoptando-o aqui como caso em estudo, o nosso ecossistema virtual simulará uma reduzida parte desse estuário. Como espécies animais representativas de tal ecossistema escolhemos três: golfinho, tainha e medusa (ou alforreca).

### 7.1 Apresentação das espécies simuladas

O golfinho é da espécie *Tursiops truncatus*. Trata-se de um carnívoro que se alimenta de várias espécies de peixes e crustáceos, além de chocos e enguias. Atinge normalmente um comprimento até 3 metros e, em média, só precisa de emergir para respirar de 2 em 2 minutos.

A tainha, da espécie *Mugil cephalus*, é um peixe muito comum no estuário do Sado e vive em cardume. Mede aproximadamente 30 centímetros e alimenta-se de pequenos organismos filtrados da água ou do lodo. O seu maior predador é o golfinho.

Muito vulgar no estuário é também a medusa, da espécie denominada *Catostylus tagi*. O corpo caracteriza-se por uma simetria radial, podendo ir até 50 centímetros de diâmetro. O comportamento normal duma medusa resume-se a um movimento bastante lento, sendo um animal que facilmente é transportado pelas correntes marítimas.

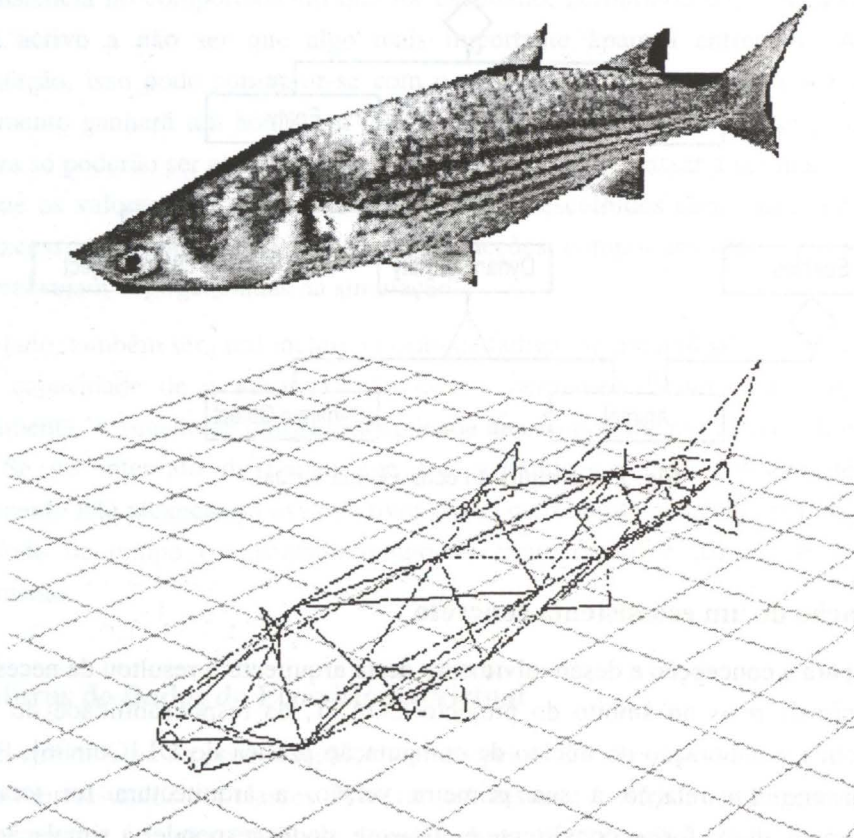


Fig. 3 - Modelação de uma tainha em 3D, utilizando texturas fotográficas.

As classes que representam estes animais são derivadas da classe *Animal* fazendo uso do mecanismo de herança. O modelo do golfinho inclui uma variável de estado que representa o oxigénio. O seu valor diminui sempre que o animal se encontra submergido e aumenta quando ele regressa à superfície. O comportamento altamente prioritário *Breathe* torna-se activo quando o nível de oxigénio é mais baixo que um dado limite. Se esse nível atingir o valor zero, o animal morrerá. Por outro lado, assumimos que o golfinho não possui predadores no ecossistema em estudo, ao contrário da tainha. Assim sendo, esta última espécie precisa de ter disponível o comportamento *Predator Avoidance*, dando-lhe a oportunidade de escapar aos golfinhos. Na Fig. 3 pode ver-se o modelo tridimensional construído para a tainha, com e sem as texturas fotográficas nele aplicadas.

## 7.2 Visualização

Os diversos elementos presentes na simulação são representados através de modelos poligonais tridimensionais. A alguns destes modelos são aplicadas texturas. A utilização de texturas, para além de aumentar o realismo visual, permite-nos, nomeadamente, fazer a diferenciação de animais que, embora tenham geometrias semelhantes, pertencem a espécies diferentes. Esta diferenciação é particularmente útil nos peixes. Já outros animais, como o golfinho ou a medusa, têm uma geometria bastante própria não sendo, por isso, muito importante a utilização de texturas.

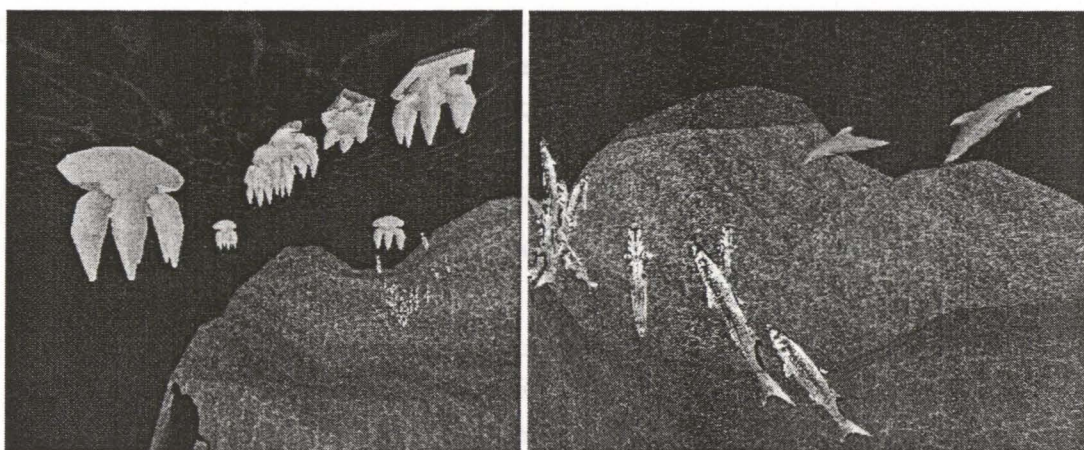


Fig. 4 - Imagens de uma simulação com tainhas, golfinhos e medusas.

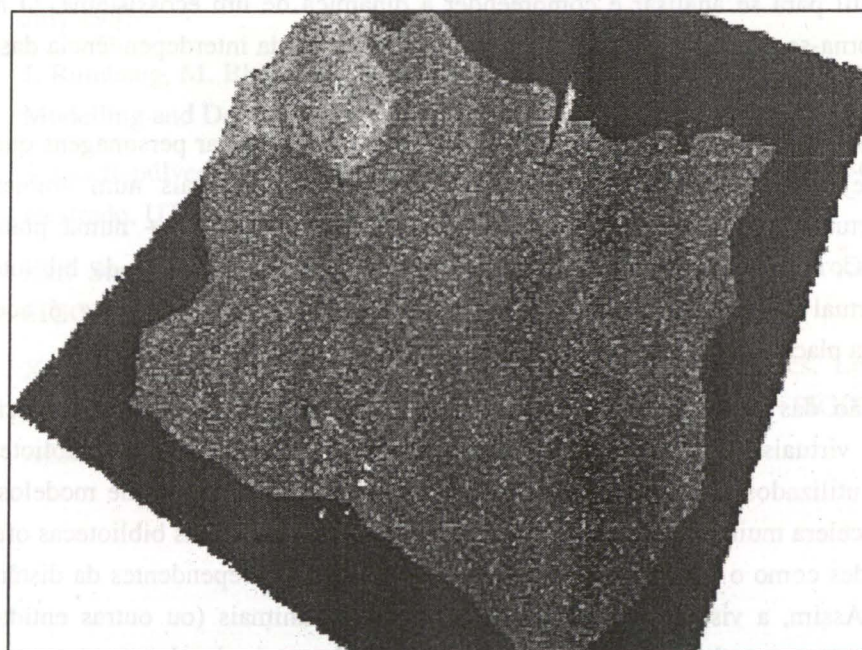


Fig. 5 - Vista parcial, em perspectiva, do ecossistema simulado.

Outros modelos onde poderá ser interessante a utilização de texturas são os terrenos e a superfície do mar. Neste último é possível utilizar um polígono com uma textura que sugira a ondulação e tenha transparência, de modo a permitir, mesmo do exterior, a observação das cenas subaquáticas.

A cada acção dos animais está usualmente associada uma sequência pré-animada. A acção *move toward* referida na secção 5.3.2 corresponderá, num quadrúpede, a uma animação de um tal animal a andar (ou a correr). Num peixe ela irá corresponder a uma animação do mesmo a nadar e no caso de uma ave veríamos uma animação dessa ave a voar.

A Fig. 4 é constituída por duas imagens que foram obtidas durante um processo de simulação no nosso ecossistema virtual. Este ocupa um espaço limitado por um paralelepípedo rectângulo, parcialmente visualizado, de cima e em perspectiva, na Figura 5. Com tecnologia de realidade virtual, o utilizador poderá viajar em qualquer zona do ambiente e observar o comportamento dos animais da posição que for escolhendo. Poderá ainda “congelar” qualquer instante da simulação e continuar a exploração do ecossistema, agora reduzido à sua dimensão espacial.

## 8. Conclusões

A simulação de um ecossistema natural com diversos animais pode ser um problema muito complexo. Felizmente que, na maior parte das vezes, é apenas necessário simular-se uma parte do ecossistema. A arquitectura que apresentamos nesta comunicação pode ser uma ferramenta útil para se analisar e compreender a dinâmica de um ecossistema. O modelo subjacente torna-se especialmente vantajoso na compreensão da interdependência das várias entidades que participam na simulação.

A arquitectura proposta também é um mecanismo eficaz para animar personagens que, cada vez mais, se deseja aparentarem certa credibilidade como animais num ambiente de realidade virtual. A implementação está a ser desenvolvida em C++ numa plataforma Intergraph PC, com Dual Pentium Pro a 200 MHz. Usa-se a versão 6 da biblioteca de realidade virtual WorldToolkit, da empresa Sense8. A fase de *rendering* é acelerada mediante uma placa de aceleração de OpenGL, também da marca Intergraph.

A visualização das cenas, frequentemente complexas e que resultam da simulação dos ecossistemas virtuais, é facilitada, de algum modo, pelo *hardware* e pelas bibliotecas de visualização utilizados. O *hardware* está optimizado para a texturização de modelos 3D e, além disso, acelera muitas das operações necessárias à visualização. As bibliotecas oferecem funcionalidades como o suporte de múltiplos níveis de detalhe dependentes da distância ao observador. Assim, a visualização de grandes grupos de animais (ou outras entidades) é facilitada porque, a grande distância, são utilizados modelos mais simples e sem texturas.

## Referências

- [Ali77] M.A. Ali ed, "Sensory Ecology", Plenum Press, New York, 1977
- [Blu95] Bruce Blumberg, Tinsley A. Galyean, "Multi-Level Direction of Autonomous Creatures for Real-Time Virtual Environments", Computer Graphics: Proceedings of SIGGRAPH'95, ACM Press, August 1995
- [Câm95] António Câmara, Nelson Neves, "Exploring Virtual Ecosystems", Environmental Systems Analysis Group (GASA) technical report, 1995
- [Dro92] Alexis Drogoul, Jacques Ferber, "Multi-Agent Simulation as a Tool for Modeling Societies: Application to Social Differentiation in Ant Colonies", Artificial Social Systems - Lecture Notes in Artificial Intelligence, MAMMAW92, p.3-23, 1992
- [Gom96] José Miguel Gomes, "Um Sistema de Peixes Artificiais Autónomos", Relatório técnico do Projecto de final de curso, Departamento de Informática, FCT-UNL, 1996
- [Mil88] Gavin S. P. Miller, "The Motion Dynamics of Snakes and Worms", Computer Graphics: Proceedings of SIGGRAPH'88, Vol. 22, No. 4, ACM Press, p.169-173, August 1988
- [Rey87] Craig Reynolds, "Flocks, Herds and Schools: A Distributed Behavioral Model", Computer Graphics, Proceedings of SIGGRAPH'87, 21(4), p.25-34, ACM Press, July 1987
- [Rum91] J. Rumbaugh, M. Blaha, W. Premerlani, F. Eddy, W. Lorensen, "Object-Oriented Modelling and Design". Prentice Hall, 1991
- [Sep96] Tiago Sepúlveda, "Actores Sintéticos em Ambientes Virtuais", Dissertação de mestrado, UTL-IST, 1996
- [Sim94] Karl Sims, "Evolving Virtual Creatures", Computer Graphics: Proceedings of SIGGRAPH'94, p.15-22, ACM Press, July 1994
- [Tu94] Xiaoyuan Tu, Demetri Terzopoulos, "Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception, Behavior", Computer Graphics: Proceedings of SIGGRAPH'94, ACM Press, p.43-50, July 1994