

# Simulação Comportamental de Pedestres Em Ambientes 3D Desconhecidos

Deusdado Leonel<sup>1</sup>, Belo Orlando<sup>2</sup>, Fernandes António<sup>3</sup>

leodeus@ipb.pt, obelo@di.uminho.pt, arf@di.uminho.pt

<sup>1</sup> Instituto Politécnico Bragança, Campus de St. Apolónia, 5301-854, Bragança, Portugal.

<sup>2</sup> Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057, Braga, Portugal.

<sup>3</sup> Universidade do Minho, Campus de Gualtar, 4710-057, Braga, Portugal.

**Resumo:** A disponibilização massiva de modelos virtuais na Internet, representativos da construção de cenários urbanos tridimensionais é, actualmente, uma das tarefas mais requisitadas no domínio da computação gráfica. Tende-se, agora, a evoluir para a inclusão de “vida artificial” nesses ambientes, demandando uma virtualização da “vida” envolvendo a geometria estática, pioneira nos jogos de computador. Esta tendência representa claramente um interesse crescente para vários tipos de análise, em diversas áreas de actividade, nomeadamente, em representações ditas públicas de uma sociedade virtual capaz de simular e actuar com ou sem determinados constrangimentos humanos que operam no mundo real. Nasce assim a possibilidade da interacção comportamental dos agentes aí inseridos com o ambiente envolvente, onde em ambos se projectam desenvolvimentos recorrendo à abordagem integrada de técnicas de sistemas inteligentes e especificações na área da Inteligência Artificial (IA) e Computação Gráfica (CG). Neste artigo apresentamos um modelo integrado de desenvolvimento nestas vertentes.

**Palavras chave:** Modelos virtuais; Sistemas Inteligentes; Agentes; CG.

## 1. Introdução

A construção de modelos virtuais de edifícios, bairros e até de cidades é, com a excepção dos jogos de computador, ainda muito pouco orientada para a integração de personagens virtuais que os habitem. O povoamento destes modelos com entidades possuindo níveis de autonomia associados às necessidades pretendidas da simulação é uma tarefa bastante árdua, envolvendo várias áreas em constante desenvolvimento, aqui, a indeterminabilidade e a complexidade do comportamento humano são sempre um problema para os modeladores. As simulações

computacionais, quando utilizam grandes multidões, com centenas ou milhares de indivíduos, requerem modelos simples e eficientes, mas que proporcionem uma descrição precisa da realidade, tal como os tipos de modelos que podemos encontrar em (Schreckenberg, 2002). Os esforços em representar o comportamento humano num ambiente virtual requerem por norma um modelo do processo da observação do mundo real e a consequente sintetização da informação recolhida. As decisões e acções deste tipo de modelos podem ser explicitamente programadas para as mais variadas alterações no ambiente comportamental. A *Inteligência Artificial* (IA) pode disponibilizar paralelamente um segundo modelo na “sensibilidade” de alguns aspectos do ambiente virtual, e permitir a tomada de decisão de mais alto nível sobre tudo aquilo que vai descobrindo. A maioria dos sistemas é formado a partir de uma combinação de dois modelos: como resposta a um subconjunto do estado do ambiente virtual baseado nos sentidos, e reagindo desde uma combinação de respostas programadas já planeadas, ou obtidas de forma heurística. Outro desafio claro é a progressão em termos de eficiência e desempenho da visualização da própria animação. Um sistema que possa incorporar e simular comportamentos humanos, e ao mesmo tempo apresentar um aspecto visual agradável e realista (com um *rendering* de qualidade e em tempo-real) das suas personagens virtuais, pode ajudar o utilizador a extrair conclusões mais exactas, a partir da observação do mundo em simulação, e usá-las de forma a otimizar o sector para o qual o modelo de simulação foi desenvolvido.

A estrutura do artigo vai ser organizada da seguinte forma: Secção 2 – Estado da arte e revisão literatura específica da área; Secção 3 – Geração de personagens virtuais já representativas de agentes; Secção 4 – Definição de comportamentos de alto nível; Secções 5 e 6 – Testes de simulação comportamental e Conclusões.

## **2. Background**

Na vasta e diferenciada literatura específica da área envolvendo simulação de agentes representando comportamento individual ou de grupo, inseridos em ambientes virtuais específicos, podemos demarcar simulações recorrendo a: regras bem definidas “*Rule-Based*”; métodos globais na simulação de pedestres; métodos comportamentais influenciados por questões físicas e sociais; ou ainda, associados a informações embebidas no ambiente. De seguida são mencionados alguns dos mais importantes nestas áreas de actuação.

O modelo proposto em (Reynolds, 1987) é provavelmente o mais famoso e o mais bem sucedido modelo de movimento em grupo, concebido especialmente para aglomerações de animais. Este modelo é baseado numa formulação muito simples de regras (*Rule-Based*) que cada entidade no grupo deve respeitar: Separação, Alinhamento e Coesão. Mais tarde, Tu e Terzopoulos (Tu, 1994) desenvolveram pesquisas na área da vida artificial com o objectivo de povoar um mundo marinho

virtual com peixes que caçam, fogem, reproduzem-se e vagueiam. Outro exemplo onde podemos encontrar na simulação comportamental entre grupos de seres vivos, é o caso da simulação do trabalho comunitário protagonizado pelas formigas. Baseado nesta ideia, Dorigo (Dorigo, 1997) desenvolveu o Ant Colony System (ACS). O ACS é um sistema de propósito geral, que pode ser também usado para resolver problemas de análise combinatória e comportamental associado a agentes virtuais representando humanos. Se nos posicionarmos numa área na qual se utilizam modelos mais realistas em simulações de entidades caracterizando humanos com base em regras bem explícitas, temos uma proposta muito concreta que se sobressai apresentada por Brogan e Hodgins (Brogan, 1997). Neste trabalho é descrito um algoritmo de controlo de movimentos para entidades com alguma “dinâmica significativa” aplicada a grupos de personagens.

Os métodos chamados de globais consideram a multidão como um todo, caracterizando o seu estado com propriedades de fluidez, como a densidade, velocidade, ou outras. Um exemplo claro deste tipo de método é apresentado em (Predtechensky, 1978) no qual também é possível encontrar algumas variantes, especialmente para casos de localização de congestionamentos e alocação de rotas para entidades virtuais. Em trabalhos mais recentes (Loscos, 2003) são implementadas técnicas que permitem a simulação até cerca de 10.000 agentes pedestres em tempo-real, através de uma visão macroscópica de comportamentos numa simulação sem apelo a qualquer tipo de pré computação. Nesse trabalho são também implementados alguns comportamentos “básicos” com visão global comportamental, em particular relativamente à localização de objectivos, seguimento de um líder, detecção de colisões e adaptação geral dos pedestres ao ambiente.

Muitas pessoas acreditam que o comportamento humano é caótico ou pelo menos irregular e não previsível (D. Helbing, P. Molnár, 1997). Helbing e Molnar (D. Helbing, P. Molnár, 1997) propuseram um modelo para simular estas condições, apresentado originalmente apenas com o propósito de gerar algum método de auto-organização capaz de ser observado no comportamento de multidões. Mais tarde, em 1997, em (D. Helbing, I.Farkas, T. Vicsek, 2000) foi proposto um outro modelo, de forças físicas e sócio psicológicas, adaptado com a intenção de representar o comportamento de multidões humanas em situações de pânico. Investigações mais recentes (Braun, 2003; Musse, 2005) apresentam a generalização do modelo de Helbing mas com o objectivo de incluir mais individualismo aos agentes.

Um exemplo da derivação de sistemas orientados por forças sociais, é sistema PetroSim (Musse, 2005), é um modelo de evacuação em tempo real utilizado em testes pela companhia petrolífera Brasileira – Petrobrás. Bouvier e Cohen (Bouvier, 1995) usaram uma proposta generalista de um sistema de partículas 3D na simulação de fluxos humanos num ambiente 2,5D. O modelo de Bouvier e Cohen mostrou-se suficientemente robusto para permitir simulações em larga escala. Mas,

por outro lado, os comportamentos individuais mantiveram-se demasiadamente simples.

Outros trabalhos mais recentes, como por exemplo o sistema comercial de maior sucesso em jogos de computadores neste tipo de abordagem, “Os Sims” (Forbus, 2001), utilizam objectos ou localizações que associam aos agentes comportamentos específicos. Já anteriormente, análogo ao conceito adjacente utilizado nos “Sims”, Kallmann e Thalmann (Kallmann, 1998), descreveram a ideia de objectos inteligentes como: objectos que fornecem um plano para o seu uso. Outras propostas, como por exemplo (Lau Manfred, 2005), (Tecchia, 2001), lidam com uma maior abstracção do ambiente de navegação, para ambientes estáticos e dinâmicos, representando o ambiente já conhecido num mapa/grelha de alturas em 2D. Este tipo de aproximações tiveram um efeito de grande êxito na sintetização de comportamentos em grupos para determinados tipos de seres vivos, mas, muitos deles tendem a não serem satisfatórios quando adaptados a pedestres humanos. Por exemplo, o estado dos *boids* torna-os cooperativos e com capacidade para partilharem o mesmo objectivo e preocupações. Em multidões humanas os objectivos poderão ser muito mais variados, o que significa que todos podem (tentam) evitar colisões, com um resultado final bastante diferente de um cardume de peixes. Isto é provavelmente devido a poucos pedestres partilharem o mesmo objectivo, e por todos tenderem a agir de certa forma mais individualista, não reforçando assim as regras de alinhamento e coesão.

Analisando a perspectiva da utilização de métodos globais, e ao contrário do mundo real, é perfeitamente razoável para um sistema de IA, ter uma entidade global que poderá ser directamente controlada, controlando assim muitas das personagens virtuais presentes na simulação. Tal como um esquema reduz a “pressão” aos recursos computacionais do sistema, quando comparado com um nível de controlo por unidade, esta gestão permite um maior detalhe no comportamento do grupo e uma maior profundidade no seu planeamento, perdendo no entanto em individualidade e imprevisibilidade a nível comportamental.

### **3. Geração de Personagens Virtuais Representativas de Agentes**

A aplicação resultante foi prevista para incorporar um grande número de agentes (até 10.000 agentes, sem perder realismo). Cada um destes agentes teria de ser independente nas decisões que tomasse (comportamento individual) bem como ser capaz de se enquadrar numa comunidade de entidades similares, “regendo-se” através das regras sociais e de grupo (comportamento de grupo) dessa comunidade. Antevendo, cada um dos estados destas entidades, teria de ser mantido em memória, gerindo informações associadas às suas próprias características individuais e de grupo, com o seu estado actual nas mais diversas situações envolvidas em tempo real. Todos estes estados terão um papel importante na

“disposição mental” do agente, influenciando a tomada de decisões em relação ao seu comportamento e interação num mundo partilhado com outros agentes virtuais (Figura 1). A geração destas entidades foi gerada a partir da biblioteca Cal3D (Cal3D, 2004) de Bruno Heidelberg.

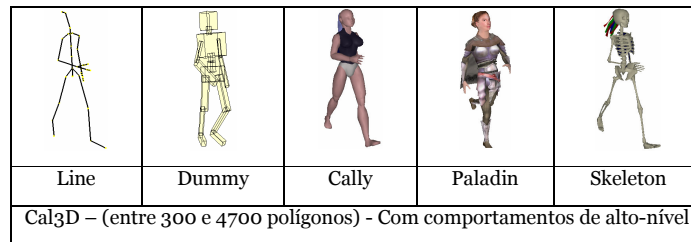


Figura 1 – Personagens virtuais disponíveis nas simulações

### 3.1. Níveis de Interação dos Agentes

Na relação entre comportamentos de alto e baixo nível, podem ser identificadas várias etapas de abstracção. Em cada uma destas etapas serão introduzidas faculdades, cada vez mais evoluídas, às entidades manipuladas. A Figura 2 mostra a chamada pirâmide de computação gráfica, onde os sucessivos níveis de abstracção introduzem crescentes “aptidões” às entidades manipuladas, que neste caso, em particular, serão consideradas agentes<sup>1</sup>.

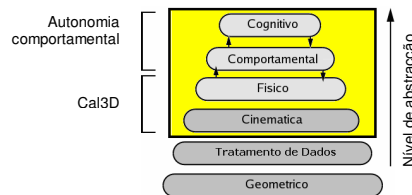


Figura 2 – Pirâmide de computação gráfica

As camadas inferiores, física e cinemática, foram implementadas na biblioteca Cal3D. As animações criadas são disponibilizadas às camadas superiores numa forma elementar, por exemplo, a deslocação bípede (o caminhar). O domínio

<sup>1</sup> Termo herdado para uma diferenciação de nível superior em relação aos avatares

principal aqui é, então, formado pelas restantes camadas, cognitiva, comportamental e física (para ligação aos níveis inferiores). Cada nível de abstracção proporciona informação ao seu nível superior e, de modo semelhante, cada nível controla o seu nível inferior.

Detalhando, o nível físico engloba o agente composto por sensores e actuadores. Aqui se estabelece o diálogo com o ambiente com base na dualidade percepção/acção. A este nível incorporam-se os processos comportamentais, introduzindo a actividade que converte o agente físico num agente situado. Cada comportamento está ligado a um conjunto de características extraídas dos sensores (os estímulos) e determina a acção a gerar, dependendo da configuração particular dos estímulos. O comportamento é, portanto, um ciclo sensitivo-motor que liga a percepção à acção (internamente) e a acção à percepção (externamente) através do ambiente. Finalmente, o nível cognitivo contém o conhecimento de vários processos que estruturam o conhecimento e gerem os comportamentos do nível comportamental. Este nível introduz a capacidade de racionalização e converte o agente situado num agente cognitivo, capaz de satisfazer os critérios de avaliação. Muito sucintamente um agente cognitivo pode ser pensado, como um sistema de estruturas auto-organizativas que se comunicam com o mundo externo através de determinadas interfaces especializadas, também por vezes denominadas de esquemas. Cada uma das interfaces do agente pode especializar-se em tratar os diferentes aspectos do meio ambiente onde o agente está inserido.

### **3.2. Implementação da Arquitectura de Suporte a Comportamentos de Alto-Nível**

Podemos agora definir um diagrama de nome “Módulo Agente” que representa a personagem virtual e o seu comportamento reactivo, e um outro diagrama que projecta a arquitectura na qual o módulo anterior se enquadra com o ambiente envolvente. De modo genérico, estes módulos podem ser representados pelos dois esquemas da figura 3. No módulo agente, podemos observar os fluxos de informação para e pelo agente, como ela é obtida, o seu processamento e as consequências desse processamento. O conhecimento do mundo é agora representado pelo esquema da direita, em que comportamentos de baixo nível serão projectados para representar uma arquitectura de suporte a comportamentos de mais alto nível. Esta arquitectura direcciona todas as pesquisas de baixo nível para o módulo Humano/Grupo, tais como o conhecimento do ambiente envolvente para detecção de colisões com o ambiente, localização global inter agentes para conseguir garantir uma navegação livre de colisões inter agentes, detectar objectivos de deslocação espacial, efectuar de forma dinâmica o traçado de rotas de deslocação tendo em conta, por exemplo, a direcção, pontos de guia e tempo.

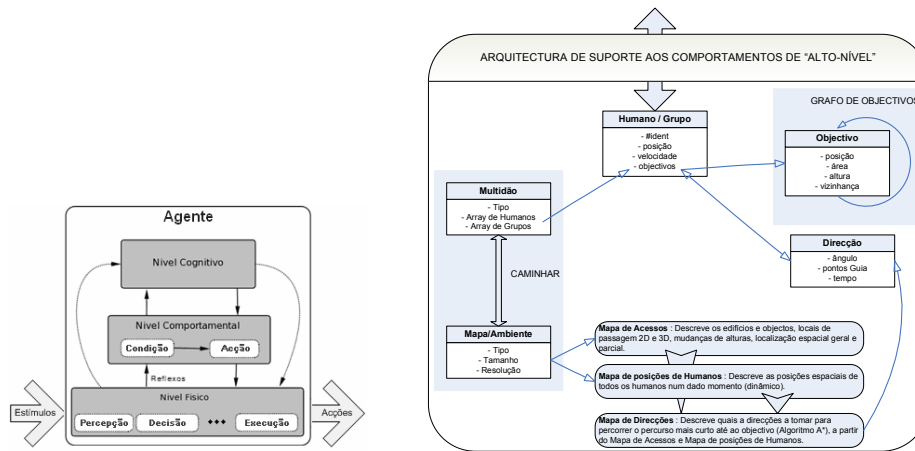


Figura 3 – Arquitectura de suporte a Comportamentos de mais alto nível e Módulo Comportamental

#### 4. Comportamentos de Alto Nível – Máquina de Estados

Os Sistemas Multi-agente (SMA) possuem habitualmente uma complexidade estrutural e de funcionamento bastante considerável, sendo usualmente impossível determinar à partida, o conjunto de comportamentos e as actividades concretas que irão ser executadas pelo sistema. Entre exemplos sobejamente conhecidos de processos de investigação e de desenvolvimento abarcando este tipo de conhecimento, encontram-se os trabalhos de Nick Jennings, Mike Wooldridge, Gerhard Weiss, G. O'Hare, entre muitos outros, destacando-se daqui os trabalhos (O'Hare, 1996; Weiss, 1999; Wooldridge, 2001). Independentemente de serem colaboradores ou competidores, os agentes que integram um SMA irão interagir uns com os outros – um requisito operacional mínimo. Esta interacção não é indesejada, mas sim intrínseca ao próprio conceito de agente que pressupõe a sociabilidade do SMA como forma de um agente atingir os seus próprios objectivos. Actualmente, uma das formas mais vulgares de implementar agentes reactivos baseia-se no uso de máquinas de estados (Sweetser, 2003). A forma mais popular de descrever uma arquitectura apoiada em máquinas de estados é recorrendo a autómatos finitos deterministas (AFD) (Rabin, 2001) ou, mais especificamente, usando transdutores, que não são mais que um AFD em que a cada transição se pode associar um símbolo de saída (Sweetser, 2003). Desta forma, torna-se mais fácil estruturar o estado de uma “mente” virtual, e conseguir simular determinados comportamentos, pois a partir de cada estado, existe um conjunto de estímulos-resposta diferentes associados.

Poderá ser aqui exemplificada a transição de estados de um agente que, partindo de uma situação de repouso, e ao receber um determinado estímulo ou estímulos, é efectuada uma transição para o estado que o estímulo recebido determinou. Se por exemplo, evolui para um estado “Calmo”, e recebe um estímulo para conversar com alguém, ele continua calmo se a conversa correr bem, senão pode mudar para o estado “Neutro” ou “Furioso”. Por outro lado, se receber a indicação para magoar e lutar com alguém, ele poderá devolver uma mensagem a dizer que não actuará de acordo, porque está contente e, possivelmente, mudará de estado. É um exemplo bastante simples, mas, contudo, revela alguns dos estados que podem ser modelados na aplicação prática deste trabalho usando transdutores – dependendo do estado actual, também é possível ter várias respostas diferentes face a um mesmo estímulo.

Nas experiências práticas deste trabalho, e de modo a poder controlar uma entidade virtual, a estrutura básica do sistema envolvido segue o paradigma de “percepção – decisão – acção” (ou o usado pelo exército “observação – orientação – decisão – acção”). Este modelo da fluência entre a informação e a acção conduz-nos ao esquema de interacção com o ambiente virtual descrito pela Figura 4, no qual cada módulo tenta simular fraquezas, forças da percepção humana e o seu processamento cognitivo, incluindo reacções instintivas, erros de percepção, degradação da memória, decisões dependentes do contexto, inferência, entre outras.

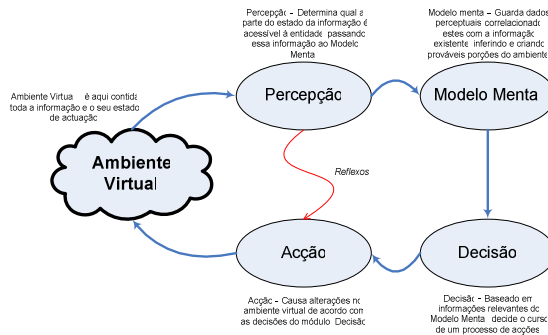


Figura 4 – Modelo 4 módulos de IA

## 5. Testes de Simulação Comportamental

Para testar algumas das variedades de comportamento disponíveis e acoplados aos diferentes agentes envolvidos nas simulações, foi utilizado, num primeiro exemplo, o modelo 3D de um parque automóvel (figura 5A), como ambiente de simulação, e dois tipos de agentes de simulação diferentes (Paladin e Cally – Figura 1).

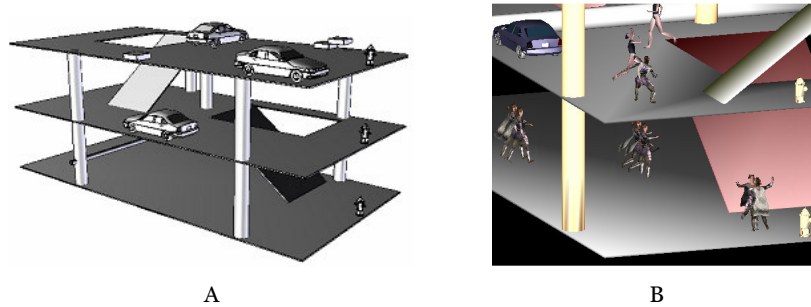


Figura 5A – Mundo virtual 3D – multi-nível; 5B – Simulação exemplificativa de alguns comportamentos desenvolvidos pelos agentes

Para cada agente é necessário fazer a especificação do conjunto de animações providenciadas pela biblioteca de animação, e a sua associação às acções exequíveis. Existe ainda a característica importante de implementação de acções concorrentes entre si, donde poderão surgir novas situações, imprevisíveis ou não.

Cada agente possui um conjunto de propriedades pessoais que caracterizam o seu estado interno. Estas propriedades podem ser atribuídas no algoritmo e utilizadas para modelar o seu comportamento (por exemplo fugir de um agente agressivo), podem ser elas: estado (parado ou em andamento), localização (valor x, y, z actual), destino (valor x, y, z destino), velocidade, força, simpatia, grupo a que pertence, etc. Os valores destas propriedades podem variar numa escala de 1/10, de modo a proporcionar uma tendência (dinâmica) maior ou menor em executar determinadas acções de acordo com os parâmetros do seu estado interno.

Ainda a nível comportamental é estabelecido o modo como o agente interage com o mundo e os outros agentes. As instruções definidas serão interpretadas criando-se uma estrutura de dados que constitui o modelo mental ('cérebro') da personagem de acordo com o modelo da Figura 4. O algoritmo desenvolvido, possibilita a geração autónoma de comportamentos não determinísticos, através de um conjunto de instruções, onde a cada uma é associada um peso, ou por outras palavras, uma probabilidade de acontecer. Com base nestas probabilidade uma instrução (ou um conjunto delas) é escolhida e executada.

Por último, existem as decisões, que definem as regras pelas quais cada agente se rege. Estas regras determinam a execução da Acção quando a Condição associada for satisfeita. De um ponto de vista simplista uma condição é uma comparação entre propriedades (internas ou externas) ou valores.

Retomando agora ao exemplo da simulação dos dois tipos de agentes inseridos no ambiente 3D escolhido, podemos observar alguns destes tipos de especificações de autonomia expostos (Figura 5B). Inicialmente foram adicionados nesta simulação exemplificativa agentes agindo em grupo, e outros individualmente num primeiro momento.

Podemos verificar no piso superior, um agente “Cally” e um “Paladin” em confronto. Estes após o encontro (definido num raio de detecção, podendo ser variável entre os vários tipos de agentes e a sua condição interna) e uma comunicação inicial, produziram determinados comportamentos hostis originando a luta entre ambos. Não muito longe dali (também dentro de um raio pré-definido) um outro agente Cally acorre à zona de luta, após confirmar (através da percepção ou comunicação inter-agente) que outra personagem do seu grupo está em estado de combate e provavelmente necessitando de ajuda. No piso inferior, e ao início da rampa que permite aceder ao piso superior, dois agentes movimentando-se e agindo de modo individual encontram-se ocasionalmente, trocam cumprimentos enquanto se aproximam (tarefas simultâneas), e possivelmente poderão formar um grupo e agir deste modo a partir daqui (devido ao seu estado actual ser propenso ou não a novos relacionamentos). Mais ao fundo, e ainda no piso inferior, um dos grupos de agentes dirige-se para uma localização específica indicada pelo programador. O grupo mais atrasado persegue-os, pois têm por missão inicial seguir e reagir aos comportamentos do grupo à sua frente (grupo líder).

## **6. Conclusões**

Com base na arquitectura de suporte a comportamentos de alto-nível, providenciada pelos desenvolvimentos descritos e testados nas secções anteriores deste artigo, foi criada uma linguagem de definição de conduta para as personagens, possibilitando uma forma simples e intuitiva de aplicação de comportamentos a estas personagens, mas com elevado potencial e liberdade, resultando numa plataforma de criação de personagens virtuais “humanas” mais credíveis a nível comportamental.

Ao permitir que os vários componentes que integram a definição de um agente (e as suas propriedades) sejam acedidos pela linguagem, e aliando o conjunto de instruções de alto nível (condições e decisões) implementadas, desenvolveu-se uma estrutura com potencial para utilização em diversas áreas. Através da utilização de transdutores, a linguagem permite a criação de scripts “estáticos”, contendo uma série de acções a realizar, como que argumentos de um filme virtual. O

conhecimento do mundo, do estado interno e externo, aumenta tal utilização podendo criarem-se também scripts “dinâmicos” onde o argumento não é determinístico, e depende unicamente da situação, do tempo, e do estado interno no momento.

O sistema de processamento cognitivo foi organizado em quatro módulos muito específicos: percepção, modelo mental, decisão de objectivos e a resolução de acções a executar. Cada um destes, tenta anexar virtudes e fraquezas da percepção humana e o seu processamento cognitivo associado, incluindo reacções instintivas, erros de percepção, degradação da memória, decisões dependentes do contexto, inferência, entre outros.

Adicionalmente, neste trabalho também foram planeados, experimentados e auferidos resultados considerados satisfatórios, para a possibilidade de definição de grupos de acções conjuntas complementares, e disjuntas concorrenciais, estabelecendo limites e transições naturais entre estas. Finalmente e em termos de adequação e escalabilidade, pode considerar-se que a plataforma desenvolvida, poderá ser utilizada em vários campos de actuação, como por exemplo: jogos de computador, simulação de multidões, simulação de ambientes urbanos, estudo de espaços em edifícios, interfaces de comunicação, criação de ambientes históricos, arqueológicos, sociais, etc.

## **Referencias**

- Bouvier, E., E. Cohen. (1995). Simulation of Human Flow with Particle Systems. Paper presented at the Proceeding of Simulators International XII, Phoenix, AZ.
- Braun, A., S. Musse, B. Bodmann. (2003). Um modelo Para Comportamentos Individuais em Simulação de Multidões. Revista Scientia, São Leopoldo, RS, Brasil, 14(1).
- Brogan, D., J. Hodgins. (1997). Group Behaviors for Systems with Significant Dynamics. Autonomous Robots, vol 4, pp 137-153.
- Cal3D. (2004). <http://cal3d.sourceforge.net>.
- Dorigo, M., L.M. Gambardella. (1997). Ant Colony System: A Cooperative Learning Approach to the Traveling Salesman Problem. Paper presented at the IEEE Transactions on Evolutionary Computation.
- Forbus, K., W. Wright. (2001). Some notes on programming objects inTheSims. In N. University (Ed.).
- Helbing, D., I.Farkas, T. Vicsek. (2000). Simulating Dynamical Features of Escape Panic. Nature, 407.

- Helbing, D., P. Molnár. (1997). Self-organization phenomena in pedestrian crowds. Paper presented at the F. Schweitzer (ed.), Gordon and Breach, London.
- Kallmann, M., D.Thalmann. (1998). Modeling objects for interaction tasks. Paper presented at the Eurographics Workshop on Animation and Simulation 1998.
- Lau Manfred, J. K. (2005). Behavior Planning for Character Animation. Paper presented at the ACM SIGGRAPH / Eurographics Symposium on Computer Animation, Los Angeles, CA.
- Loscos, C., D. Marchal, A. Meyer. (2003). Intuitive Crowd Behaviour in Dense Urban Environments using Local Laws. Paper presented at the Tpcg.
- Musse, S., et al. (2005). PetroSim - Um Sistema para Simulação de Multidões em Situações de Emergência. Revista Petro & Química - Petróleo - Gás - Petroquímica - Química, Nº 268, 60-65.
- O'Hare, G., N. Jennings. (1996). Foundations of Distributed Artificial Intelligence. Hardcover.
- Predtechensky, V. M., A.I. Milinsky. (1978). Planning for foot traffic flow in buildings. New Delhi, 1978: Amerind Publishing Co.
- Rabin, S. (2001). Implementing a State Machine Language. Paper presented at the AI Game Programming Wisdom (ed. S. Rabin), Charles River Media, Hingham, MA.
- Reynolds, C. (1987). Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model. Paper presented at the SIGGRAPH 87, Computer Graphics 21(4).
- Schreckenberg, M., S. Sharma. (2002). Pedestrian and Evacuation Dynamics: Germany: Springer-Verlag New York, Inc.
- Sweetser, P. (2003). Current AI in games: A review. School of ITEE, University of Queensland.
- Tecchia, F., C. Loscos, R. Conroy, Y. Chrysanthou. (2001). Agent Behaviour Simulator (ABS): A Platform for Urban Behaviour Development. Paper presented at the Games Technology 2001(GTEC'2001), Hong Kong.
- Tu, X., D. Terzopoulos. (1994). Artificial Fishes: Physics, Locomotion, Perception, Behavior. Paper presented at the Computer Graphics: Proceedings of SIGGRAPH'94, ACM Press.
- Weiss, G. (1999). Multiagent Systems: A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence. MIT Press.
- Wooldridge, M. (2001). Introduction to Multi-Agent Systems. Paperback.