

# Experiência de Realidade Virtual Imersiva no Ambiente CaveHollowspace do Lousal

Patrícia Bastos<sup>1</sup>  
pat.bastos0011@sapo.pt

Miguel Sales Dias<sup>2,3</sup>  
miguel.dias@microsoft.com

<sup>1</sup> ISCTE MEI/CGM 2008

<sup>2</sup>MLDC, Microsoft Language Development Center, Lisboa, Porto Salvo e <sup>3</sup>ISCTE, Lisboa,  
<http://www.microsoft.com/portugal/mldc>

## Sumário

*Este artigo descreve o ambiente de realidade virtual imersiva CaveH, instalado no Centro de Ciência Viva do Lousal, focando-se nas suas componentes e na sua concretização. Descreve também o processo de desenvolvimento experimental de um conteúdo interativo para esta plataforma, bem como a avaliação da usabilidade desse mesmo conteúdo, por comparação com uma experiência similar em realidade virtual não imersiva, mostrando-se a superioridade do ambiente imersivo, relativamente ao campo de visão, sensação de imersão, percepção 3D e síntese e distribuição de som.*

## Palavras-chave

*Realidade Virtual Imersiva, CAVE Hollowspace, Agregados Gráficos, Ambientes Virtuais Distribuídos, Sincronismo, Interfaces Tangíveis, Interface de Fala, Autoria de Jogos, Avaliação de Usabilidade.*

## 1. INTRODUÇÃO

Tomemos a definição de realidade virtual (RV) de Howard Rheingold, como uma experiência em que o utilizador é “rodeado por uma representação a três dimensões gerada por computador, sendo capaz de se movimentar no mundo virtual, de o ver de diferentes ângulos, alcançá-lo, agarrá-lo e de lhe modificar a forma”[Cruz-Neira92]. Ampliando esta definição à sensibilização de outros canais sensoriais, para além do visual, como o áudio, o cheiro, o tacto, a temperatura, a vibração (...), podemos estender a realidade virtual a um ambiente virtual (AV), o qual, dependendo da tecnologia utilizada, do posicionamento do utilizador na experiência, assim como dos mecanismos de interacção facultados, poderá ser imersivo ou não. Neste âmbito surge o projecto “CAVE Hollowspace do Lousal”. Devido a uma parceria única entre os sectores públicos, privados e académicos, em Portugal e no Brasil, uma mina desactivada de Pirite situada no Lousal (figura 1), na região do Alentejo, recebeu o primeiro sistema imersivo em larga escala da realidade virtual 3D instalado em Portugal (2007). Hoje, a “CAVE Hollowspace” (o nome desta infraestrutura), fornece a grupos de visitantes caracterizados pela sua heterogeneidade, uma experiência de aprendizagem interactiva sobre a actividade de mineração, assim como facilidades para a investigação científica, académica, e ainda para serviços à indústria, como o teste e a avaliação de produtos à escala real, usando as

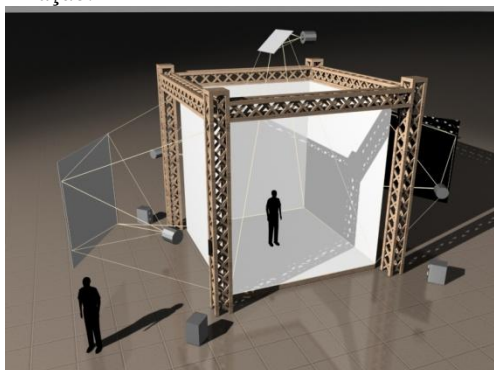
tecnologias mais avançadas da visualização 3D [Dias07]. Integrada no futuro centro de Ciência Viva do Lousal, esta infraestrutura entrou em operação experimental no centro da região Alentejana, em Dezembro de 2007. Trata-se da infraestrutura de visualização e interacção do tipo CAVE (figura 2) mais avançada de Portugal, sendo uma de cerca de duas centenas que existem actualmente no mundo e uma das três maiores da Europa, com instalações semelhantes em operação somente na Alemanha.



Figura 1 - A mina do Lousal hoje (Alentejo, Portugal).

A infraestrutura, que é parte integrante do Centro de Ciência Viva do Lousal (figura 3), é propriedade da Fundação Frederic Velge, uma associação da SAPEC, a companhia Belga dona da mina de Lousal (a qual estava em operação até os finais dos 80) e da câmara de Grândola em Portugal, sendo o seu administrador, o Dr. Fernando Fantasia. O Centro de Ciência Viva do Lousal

pertence à rede de Centros nacionais, sendo uma iniciativa do Ministério da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior, visando promover a educação e a cultura para a ciência e a tecnologia no país, bem como a sua disseminação.



**Figura 2: Estudo uma CAVE de 4 m3, com 5 planos de projecção e espelhos de 2.5 m2.**

A infraestrutura CaveH do Lousal, foi concebida com a coordenação de Professores e Investigadores de entidades do nosso Sistema Científico e Tecnológico e de Ensino, a saber, do DCTI/Departamento de Ciências e Tecnologias de Informação do ISCTE e do seu Centro de I&D ADETTI/ISCTE ([www.adetti.pt](http://www.adetti.pt)), Prof. Miguel Dias e investigador Rafael Bastos, bem como do DEI/Departamento de Engenharia Informática do IST/UTL, no contexto do Grupo de Investigação em Interfaces Multimodais Inteligentes do INESC-ID (<http://immi.inesc-id.pt>), Prof. Joaquim Jorge e Prof. João Madeiras Pereira, da Fundação da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Prof. Jorge Relvas e Prof. Fernando Barriga, da Petrobrás e da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Dr. Luciano Soares, contando ainda com o apoio do Grupo Português de Computação Gráfica, Eurographics Portuguese Chapter ([www.gpcg.pt](http://www.gpcg.pt)).



**Figura 3- Uma antevisão do Centro de Ciência Viva do Lousal.**

Esta infraestrutura de visualização do Lousal, emergiu assim da investigação académica Portuguesa e Brasileira trabalhando em parceria e é baseada em plataformas Microsoft Windows e sistemas de projecção de Barco [BARCO]. Trata-se de um sistema múltiplo de retro-projecção estereoscópica, perfeitamente sincronizada, sobre um conjunto de ecrãs de grandes dimensões, dispostos em topologia de U. Esta tecnologia permite a grupos de dimensão até 14 pessoas, desfrutarem

colectivamente uma experiência de Realidade Virtual imersiva, por exemplo, num ambiente de entretenimento. Nesta experiência virtual será atribuído o papel de guia a um dos utilizadores, o qual terá em sua posse controlos interactivos tangíveis (Nintendo Wii e Nunchuk [Wii]), assim como um microfone que lhe possibilitará desencadear algumas acções pré-definidas, através reconhecimento de comandos de fala em Português ou noutra língua (utilizando o SDK da Microsoft desenvolvido no MLDC [www.microsoft.com/portugal/mldc](http://www.microsoft.com/portugal/mldc)). Será também seguido por 4 câmaras de infravermelhos, dispostas uma em cada canto da estrutura física, que captarão, recorrendo a marcas de tinta reflectora de infravermelhos usadas pelo guia, a pose da sua cabeça, mão e/ou tronco, adaptando-se a imagem projectada à posição da cabeça. Este ambiente, as suas componentes e concretização serão descritas na secção 2 deste artigo.

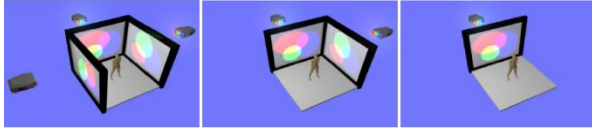
No entanto o potencial oferecido por esta infraestrutura tem um alcance muito mais vasto do que a sua utilização no contexto de uma visita ao Centro de Ciência Viva do Lousal, podendo servir áreas tão distintas como a pesquisa e a divulgação científica, modalidades de terapia alternativas nas ciências da saúde e indústrias críticas. Para tal foi desenhada e testada uma cadeia de desenvolvimento e disponibilização de conteúdos 3D interactivos, com comportamento de tempo real, que será descrita na secção 3. Apesar da experiência de imersão virtual ser avassaladora e extremamente positiva, a aprendizagem da navegação no ambiente virtual pode não ser imediata e um mau navegador pode conduzir a uma má experiência, induzindo inclusivamente efeitos de enjoo ao resto do grupo. Na secção 4, será apresentada a produção de uma cena 3D concreta para a CaveH do Lousal, com o respectivo estudo de avaliação da usabilidade, levado a cabo no contexto Universitário, onde se compara, numa tarefa simples de navegação virtual, uma experiência imersiva, com um cenário semelhante, mas em ambiente PC não imersivo. Por fim, na secção 5 extraem-se conclusões e apontam-se algumas direcções futuras.

## **2. CAVE AUTOMATIC VIRTUAL ENVIRONMENT<sup>1</sup>**

Uma CAVE (acrónimo de “Automatic Virtual Environment”) é um sistema de Realidade Virtual (RV) baseado em grandes superfícies de projecção, originalmente apresentado por Cruz-Neira, Dan Sandin e Tom DeFanti do Electronic Visualization Laboratory (EVL) da University of Illinois at Chicago, EUA, na conferência SIGGRAPH'92 [Cruz-Neira92]. Os autores definiram a CAVE como um sistema de RV que proporciona uma perspectiva de uma cena 3D virtual com um grande ângulo de visão e em visão binocular (ou estereoscópica), controlada pelo seguimento da posição e orientação da vista do utilizador e com controlo interactivo (proporcionado por uma diversidade de

<sup>1</sup> CAVE@University of Illinois at Chicago, EUA

interfaces pessoa-máquina). O nome CAVE é também uma referência à alegoria da caverna na obra “República” por Platão em que um filósofo contempla a percepção, realidade e a ilusão [Costa07].

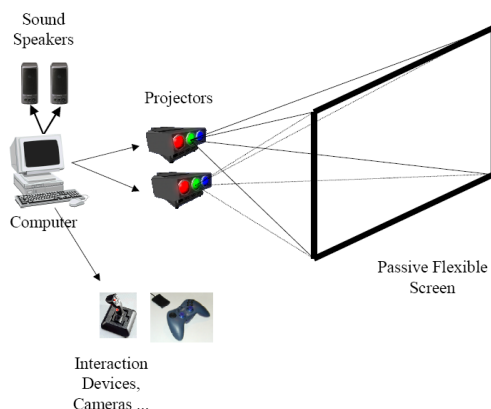


**Figura 4:** Estudo de uma CAVE com 1, 2 e 3 planos de projecção.

A CAVE é um sistema imersivo constituído por um cubo ou um paralelepípedo de dimensões variáveis, em que as faces do mesmo são planos de projecção de imagem (sendo as imagens geralmente retro-projectadas), existindo casos de CAVE com 1 a 6 planos de projecção (figura 4). No sentido de se otimizar o espaço útil da CAVE, são normalmente utilizados espelhos (que podem atingir 2.5m<sup>2</sup> de superfície), os quais deflectem os focos luminosos dos projectores de vídeo, dirigindo-os para os planos (telas) de projecção (figura 2).

Cada plano de projecção é tipicamente controlado por um computador e está relacionado com um ou dois projectores, com resoluções típicas em topologias cúbicas da ordem 1024x1024 pixel a 96Hz, sendo ainda possível a inclusão de som espacial 3D e de diversos dispositivos de interacção (figura 5). O utilizador situa-se no interior desse cubo e experimenta uma sensação de visualização e imersão num cenário virtual 3D, com um grande ângulo de visão (superior a 180°). É possível a interacção do utilizador com um mundo virtual, o qual se abstrai da existência do próprio cubo ou paralelepípedo como forma delimitadora do espaço, sem perder no entanto a noção do seu próprio corpo nesse espaço.

Todos estes factores conjugam-se para tornar a experiência imersiva rica. Devido às dimensões da CAVE, torna-se ainda possível a experiência imersiva simultânea a um grupo típico de 3 a 6 pessoas, embora somente um deles visualize uma perspectiva totalmente correcta.



**Figura 5:** O controlo de um plano de projecção numa CAVE.

O efeito 3D dentro de uma CAVE deriva da projecção estereoscópica em cada plano. Existem dois tipos possíveis para esta projecção: a activa e a passiva. Na projecção activa, cada computador calcula duas imagens

distintas, tomadas em duas vistas próximas mas distintas e estas são enviadas em série para o projector estéreo. Este projecta sequencialmente uma imagem para ser vista pelo olho esquerdo, seguida por uma imagem dirigida ao olho direito. Os utilizadores estão equipados com óculos activos do tipo “shutter glasses” (que necessitam de uma bateria para funcionarem), os quais estão sincronizados com o computador por meio de emissores de infra-vermelhos montados à volta da CAVE. Quando o computador calcula a imagem da perspectiva esquerda, o óculo direito encerra e vice-versa. Como resultado, o sistema visual humano é estimulado com duas imagens diferentes recuperando o cérebro a informação da profundidade dos objectos em função da disparidade entre as duas imagens. No segundo tipo de projecção, a do tipo passivo, o computador controla dois projectores, os quais projectam duas imagens distintas e correspondentes ao olho esquerdo e direito, por exemplo, utilizando com polarizações diferentes do espectro visível das cores. Neste caso, as telas dos planos de projecção devem produzidas num material apropriado e os óculos dos utilizadores são totalmente passivos, podendo as respectivas lentes ser de material polarizado ou não, recebendo cada óculo, apenas a imagem correspondente ao seu olho.

A CAVE necessita de calcular correctamente todas as perspectivas referentes a todos os planos de projecção, em relação à pose do utilizador. Como este tem liberdade de movimentos no interior do espaço da CAVE (6 graus de liberdade: 3 em rotação e 3 em translação), torna-se necessário efectuar o seguimento da posição do mesmo. Existem diversas tecnologias de seguimento que se podem integrar na CAVE, tais como seguimento electromagnético, ultra-som, óptico, baseado em visão, etc, que exigem que o utilizador use um determinado sensor (normalmente colocado nos óculos). Como apenas um utilizador tem a sua posição seguida, os outros utilizadores simultâneos da CAVE devem permanecer perto do primeiro, para obterem as perspectivas aproximadamente correctas.

Um ou vários utilizadores da CAVE podem ainda controlar outros dispositivos de interacção pessoa-máquina com 6 graus de liberdade, que podem ser entendidos como uma versão 3D de um rato. Tais dispositivos são igualmente seguidos com tecnologias análogas às referidas para o seguimento do utilizador. Mediante paradigmas apropriados de interacção pessoa-máquina, esses dispositivos (por exemplo, um dispositivo físico em tudo semelhante a uma lanterna que permite orientar um foco de luz no ambiente virtual 3D), possibilitam a introdução de comandos ao sistema, tais como a selecção e identificação de objectos na cena 3D, ou o controlo da técnica de exploração e visita ao mundo virtual. Com efeito, durante a interacção com a CAVE, existe uma abstracção do espaço físico da CAVE, em relação a um espaço virtual, que pode ser tão extenso como se queira e, nomeadamente, muito maior que o espaço volumétrico da CAVE. A exploração desse mundo vasto requer uma técnica de navegação e

exploração, tais como o “voo”, a “caminhada” ou a “corrida”, as quais podem ser controladas através dos dispositivos de interacção referidos.

### 3. A CAVE-HOLLOWSPACE DO LOUSAL

O sistema Cave-HOLLOWSPACE do Lousal, está implantado no edifício em que anteriormente se localizavam os balneários e o laboratório da mina, numa sala artificialmente escurecida e ventilada, com capacidade para grupos de 14 pessoas, sendo, como se disse, o primeiro dispositivo de Realidade Virtual Imersiva desta escala em Portugal.

Nas figuras 6 e 7 podemos observar duas das infraestruturas de dimensões semelhantes existentes na Europa: a Ceasar Hologspace™ em Bonn (figura 6) e a Cave de RWTH Aachen (figura 7). A infraestrutura Ceasar Hologspace™ (Center of Advanced European Studies And Research) em Bonn (Alemanha, 2003), dispõe de um paralelepípedo de 5mx2.5mx2.5m reconfigurável com 7 segmentos retroprojectados de 2.5mx2.5m, suficiente para 10 utilizadores. Trata-se de um sistema baseado em computadores SGI, com projectores Barco Galaxy DLP projectors, em estéreo activo, com uniformidade e “blending” de cor no plano maior.

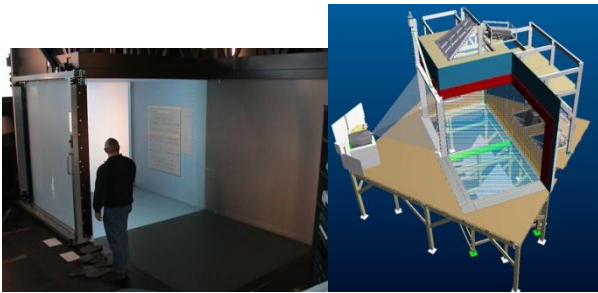


Figura 6 - A Ceasar Hologspace™ (Center of Advanced European Studies And Research) em Bonn (Alemanha, 2003).

A Cave de RWTH Aachen (Alemanha, 2004), dispõe de um paralelepípedo de 3.6m x 2.5m x 5m, cujo plano frontal pode ser reconfigurado para um Power Wall de 6.3m x 2.7m.

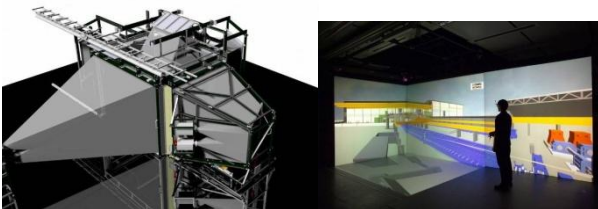


Figura 7 - A Cave de RWTH Aachen (Alemanha, 2004).

Para proporcionar o ambiente de Realidade Virtual Imersiva, o sistema terá de dar resposta às seguintes premissas:

- Imagens consolidadas projectadas com muito alta resolução (mais de 8.3 milhões de pixel);
- Visão estereoscópica;
- Perfeita sincronização e alinhamento da perspectiva das várias projecções;

- Produção de imagens com técnicas de síntese de imagem avançadas recorrendo a computação na GPU (iluminação e sombreamento Phong, gestão de luzes dinâmicas, sombras, efeitos atmosféricos com sistemas de partículas, simulação de água e charcos, *skydome*, *motion blur*, *light maps*), a partir de cenas 3D de alta complexidade em tempo real (mais de 3 milhões de triângulos);
- Seguimento da posição do utilizador guia e ajuste da perspectiva das diversas imagens calculadas, ao seu ponto de vista;
- Interacção com vários utilizadores ao mesmo tempo, utilizando interfaces tangíveis (Wii e Nunchuck da Nintendo [Wii]) e interacção com comandos de fala;
- Gestão do som 3D espacial, sua distribuição e sincronização, com a acção que se desenrola no cenário 3D.

Para esse efeito foram instalados uma estrutura física de projecção e distribuição de som com topologia 7.1, dispositivos de interacção pessoa-máquina, um agregado de computadores e uma camada aplicacional, que em conjunto irão endereçar estes requisitos.

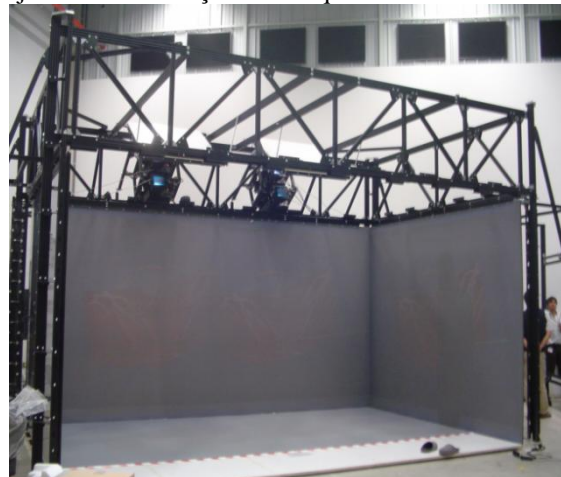


Figura 8 - Estrutura física da CaveH do Centro de Ciência Viva do Lousal: 12 projectores, visualização estéreo, 4 faces de visualização (1 face de pavimento).

### 3.1 Infraestrutura e Arquitectura

#### 3.1.1 Infraestrutura de Projecção

A configuração física da CAVE-Hollowspace de Lousal (Figura 8) que aparentemente tem 4 planos de projecção, inclui na realidade 6 planos de projecção numa disposição em forma de U: tem dois planos verticais (coplanares) retroprojectados na parte dianteira com 17,6% de sobreposição horizontal (247 pixel), o que equivale a 5.6 m x 2.7 m de superfície de projecção ou 2553x1050 pixel, mais dois planos projectados no pavimento (com as mesmas dimensões dos anteriores, equivalendo ao rebatimento horizontal dos primeiros) e, ainda, um plano retroprojectado em cada lado (3.4 m x 2.7 m, ou 1400x1050 pixel). O sistema é controlado por uma rede de 8 computadores de alto desempenho gráfico 3D que conseguem gerar uma imagem estereoscópica sintética consolidada de 8.3 milhões de pixel em tempo real (a 60 imagens por segundo – 60 Hz, o que equivale a 498

milhões de pixel por segundo). Nesta infraestrutura já foram processados cenários 3D com 3 milhões de triângulos a 60 Hz, significando 180 milhões de triângulos processados por segundo, numa imagem com qualidade fotorrealista. Existem sete altifalantes que distribuem som espacial 3D, numa topologia de som 7.1, que inclui 1 *sub-woffler* de 800 Watt, 3 altifalantes na trave horizontal superior à entrada da CaveH, 2 altifalantes no chão em cada viga lateral da mesma entrada e 2 altifalantes no mesmo plano horizontal das 3 referidas inicialmente, mas a 3 metros da entrada. Para apresentações públicas, um contador de histórias navega num ambiente virtual interactivo, para audiências com o limite de 14 visitantes. Para a investigação académica e industrial, o sistema pode acomodar até 4 a 6 pessoas dentro da área imersiva, em ambiente colaborativo. O sistema comporta, como se disse, 6 painéis de projecção, formando uma estrutura paralelepédica aberta em U com 5.6m x 2.7m x 3.4 m, dentro da qual os intervenientes se podem movimentar. A cada painel estão associados 2 projectores DLP, com resolução SXGA (1400x1050), 5000 Lumens e contraste de 1:2000, num total de 12. Os painéis verticais são retroprojectados para evitar as sombras dos intervenientes, ao passo que os projectores do plano do chão estão projectados frontalmente. A alta resolução da imagem é assim garantida por estes dispositivos.

Para obter a visualização estéreo, característica fundamental para a sensação de imersão no ambiente virtual, é utilizado o sistema Infitec passivo [INFITEC], isto é: as cores do espectro visível são divididas em seis intervalos, dois para cada cor primária, e a cada olho é associado um intervalo de cada uma das cores. São adicionados aos projectores e às lentes dos óculos dos utilizadores filtros de passa banda específicos para separar as imagens a serem percebidas por cada olho (Figura 9). Os dois projectores transmitem concorrentemente as imagens filtradas do olho direito e esquerdo [Soares08].



Figura 9 – Visualização e interação na CaveH do Lousal.  
@Pedro Faria Lopes 2008

### 3.1.2 Agregado de Computadores

Num experiência virtual deste tipo vai haver a necessidade de sintetizar, em tempo real (~60 HZ), cenas 3D extremamente complexas, compostas por diversos milhões de polígonos, efeitos especiais em tempo real, animação, estando ainda sujeitas à interação com o

utilizador, para o que é preciso uma capacidade computacional muito elevada.

Para dar resposta à necessidade de produção e distribuição de gráficos 3D, garantindo consistência dos dados, cujas imagens sintéticas seriam projectadas na infraestrutura, ao manuseamento da interacção e seguimento do utilizador e gestão da síntese e distribuição de som espacial, foi instalado um agregado de computadores correndo sistemas operativos Microsoft e ligados por uma rede Ethernet Gigabit (1Gbps), seguindo uma topologia híbrida de cliente/servidor (centralizada) e mestre/escravo (replicada) descrita em [Pires07], que passamos a pormenorizar, sem prejuízo de uma leitura da referência anterior para uma análise mais completa. O sistema dispõe adicionalmente, de um servidor de processamento e armazenamento com 16 CPU e 16Gb de memória. Este servidor está dedicado à recepção e gestão das imagens originadas pelas 4 câmaras de infra-vermelhos dispostas para o sistema de seguimento do utilizador. O controlo do som espacial é realizado pelo nó de áudio/vídeo. O sistema dispõe de um servidor de processamento e armazenamento com 16 CPU e 16Gb de memória. Este servidor está dedicado à recepção e gestão das imagens originadas pelas 4 câmaras de infra-vermelhos dispostas para o sistema de seguimento do utilizador, bem como a tarefas computacionalmente pesadas (como o cálculo da física Newtoniana). O controlo do som espacial é realizado pelo nó de áudio/vídeo.

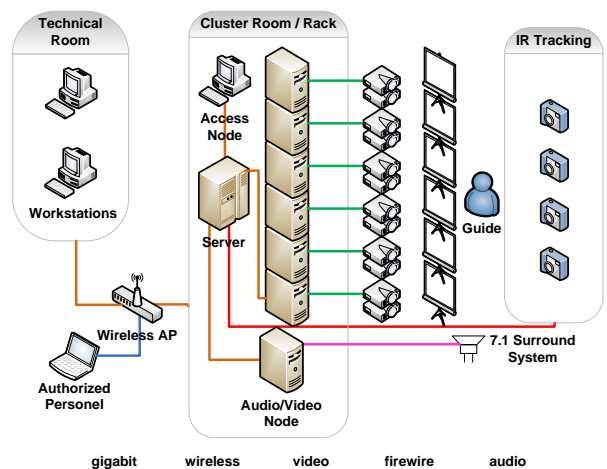


Figura 10 – Diagrama da rede da CaveH do Lousal.

O agregado computacional (figura 10) compõe-se de 6 nós gráficos, dual-core AMD® Athlon 64-bits, com 2.6 GHz, 4 GByte de memória e 2 placas PCI Express Nvidia 8800 GTX 768Mbyte. Cada uma destas placas gráficas está ligada a um projector e é gerida pela camada lógica de controlo da CaveH, sendo cada par de projectores responsáveis pela projecção dos olhos direito/esquerdo gerido por cada um destes computadores, no esquema referido de estereoscopia passiva Infitec.

Em tempo de arranque é atribuída a função de mestre a um dos nós que se encarrega de distribuir o grafo de cena a todos os outros nós que vão executar exactamente a

mesma aplicação de forma síncrona, produzindo resultados iguais, já que a camada lógica de controlo da CaveH garante consistência causal do grafo de cena no ambiente distribuído e sincronismo nas ordens de actualização das imagens a serem projectadas.

Seguidamente o nó mestre fica responsável por manusear todas as mudanças de estado resultantes da interacção pessoa-máquina ou do desenrolar da aplicação e de as propagar aos outros nós, através de mensagens que exigem banda estreita, sendo estas mudanças processadas em paralelo por todos eles, novamente de forma síncrona. Esta topologia reduz o tráfego na rede, tomando partido das capacidades dos diversos nós de executarem as mesmas operações sobre um grafo de cena complexo. Com esta arquitectura de ambiente distribuído e técnicas de organização espacial do grafo de cena e algoritmos de aceleração 3D apropriados, fica assegurada a velocidade de processamento necessária à disponibilização dos gráficos em tempo real, a uma taxa garantida de 60Hz.

No entanto, a distribuição de mensagens entre o nó mestre e os nós escravos, levanta o problema da sincronização de todos os nós. Esta será garantida pela camada lógica da CaveH, que disponibiliza um serviço de sincronismo de dados e de produção de imagens sintéticas às aplicações que correm na infraestrutura, como será explicado adiante.

Estão ainda instaladas três máquinas adicionais, sendo uma para administração da aplicação e da rede e duas para desenvolvimento.

### 3.2 A Camada Lógica da Cave Hollowspace do Lousal

Para garantir o sincronismo do grafo de cena 3D no ambiente distribuído do agregado e o sincronismo da produção de imagens, é preciso cumprir dois requisitos: primeiro, a disponibilidade e o sincronismo de dados (*data lock*), isto é, que todos os nós disponham dos recursos necessários para produzir a mesma imagem; segundo, o sincronismo de imagem, ou seja, que o façam exactamente ao mesmo tempo.

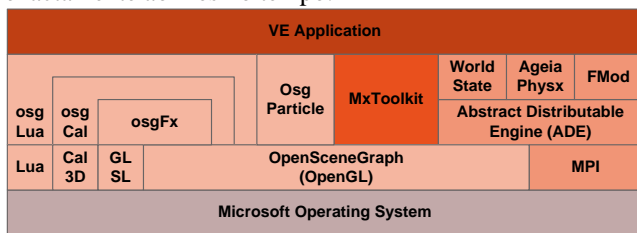


Figura 11 – Módulos aplicativos desenvolvidos [Pires 07].

#### 3.2.1 A Disponibilidade e o Sincronismo de Dados

Um elemento lógico de inicialização do sistema, o CaveHSpawner irá distribuir e controlar a execução da aplicação distribuída. Os recursos desta (cenários 3D ou mapas, fontes de som espacial ou omnidireccional, *scripts* de controlo de animação, modelos 3D hierárquicos ou não, texturas...), residem num directório local (CDATA) que o CaveHSpawner irá distribuir, a nosso pedido, por todos os nós escravos do agregado. Depois de estarem todos actualizados, selecciona-se a

aplicação distribuída a executar, sendo gerado pelo CaveHSpawner um ficheiro de configuração que será distribuído por todos os nós do agregado.

Para suportar o funcionamento de uma aplicação distribuída, foram desenvolvidos os seguintes módulos lógicos [Pires 07], esquematizados na figura 11.

- OpenSceneGraph [OSG] – Gere o grafo de cena 3D e já tem incorporados Nodekits de efeitos gráficos especiais tais como simulação de sistemas de partículas, programação em GLSL [Kessenich06] (GPU) e animação de esqueletos através da ligação com a biblioteca Cal 3D [CAL3D]. Este grafo de cena possui um suporte avançado para o carregamento de diversos tipos de modelos geométricos (3D Studio, Lightwave, Wavefront OBJ, COLLADA, VRML 1.0, etc) bem como imagens (PNG, JPEG, TGA, TIFF, GIF, BMP, etc), através de um sistema de *plugins*. Permite também o interface com Lua [LUA] para o desenvolvimento de *scripts* de acções, recorrendo a um mecanismo de *triggers*.

- MX-Toolkit [Dias03] – É o módulo responsável pela interacção com o utilizador, gerindo o seu seguimento e suportando diversas modalidades de interacção pessoa-máquina, como o reconhecimento de fala da Microsoft ou interfaces tangíveis como a Wii e Nunchuck da Nintendo [Wii].

- Módulo de Simulação Distribuído – Inclui a biblioteca ADE (Abstract Distributed Engine) [Pires07], suportando simultaneamente as topologias cliente/servidor e mestre/escravo, tendo sido desenvolvida propositadamente para este projecto, para proporcionar um interface com os vários subsistemas necessários ao funcionamento da aplicação distribuída:

- *World State* – Gere a pose do avatar, o tempo de cada *frame* do agregado, a informação proveniente de dispositivos de interacção, como a Wii e Nunchuck ou a fala, bem como o comando de saída para que a aplicação termine em simultâneo em todos os nós.
- FMod [FMod] – Gere os efeitos sonoros e auralização.
- Ageia Physx [AGEIA] – Resolve as questões relativas à detecção de colisões, gravidade, deformação de objectos, utilizando a simulação da Física Newtoniana dos corpos rígidos e deformáveis.

- MPI [MPI] – Padrão de comunicações que permite garantir a troca fiável e síncrona de mensagens entre camadas aplicacionais.

- *VE Application* – É a aplicação distribuída principal que é executada concorrentemente em todos os nós, desencadeada pelo CaveHSpawner. Esta, tem três fases distintas:

**Fase 1** de inicialização, na qual em cada nó é lido o ficheiro de configuração, com a definição inicial da pirâmide de visualização 3D, a atribuição de responsabilidades à máquina local; é inicializada a resolução da placa gráfica; é inicializado o core do ADE e os motores de física (Ageia Physx), som (FMod) e

*World State*; é carregado a cena 3D e são inicializados os interfaces de utilizador (wii, speech).

**Fase 2**, em que a aplicação entra no ciclo de simulação, na qual o servidor recebe os eventos de entrada provenientes da interacção com o utilizador, actualiza as diversas pirâmides de visualização dos nós gráficos (duas por cada nó, em virtude da estereoscopia passiva), executa as chamadas aos motores disponibilizados pela ADE e, memoriza ainda, todas as alterações ao grafo de cena, para serem distribuídas pelo agregado (como por exemplo, se um objecto teve indicações para mudar de cor em dado momento, essa informação deve ser actualizada coerentemente em todos os nós gráficos). Como estes motores só estão disponíveis no mestre este é o único que as executa, ficando os nós que sabem que são escravos, numa função passiva.

**Fase 3**, na qual todas os eventos de alteração do grafo de cena, pirâmides de visualização, etc., são serializadas no mestre e transmitidas a todos os nós escravos de forma garantidamente síncrona. No momento em que todos os nós gráficos estiverem sincronizados com as alterações recebidas do mestre, começam todos a sintetizar a imagem, com as mesmas condições iniciais e o mesmo estado do grafo de cena, garantido causalidade no par estéreo de imagens a serem produzidas e posteriormente projectadas.

Após a *Fase 3*, fica deste modo garantido que todos os nós escravos têm acesso a todos os recursos necessários para produzir a cena, assim como toda a informação sobre alterações à mesma, garantindo-se assim o sincronismo de dados (*data lock*), figura 12.

### 3.2.2 O Sincronismo de Imagem

Depois de garantir a coerência das cenas projectadas em cada nó falta agora garantir o perfeito sincronismo entre os nós, para que estas apareçam como uma única imagem de alta definição sem irregularidades tanto nas zonas de sobreposição como nas esquinas de junção dos ecrãs. Para tal são desenvolvidos mecanismos dos níveis de sincronização: *gen-lock* e *frame-lock* [Soares 06], como se pode ver na Figura 12.

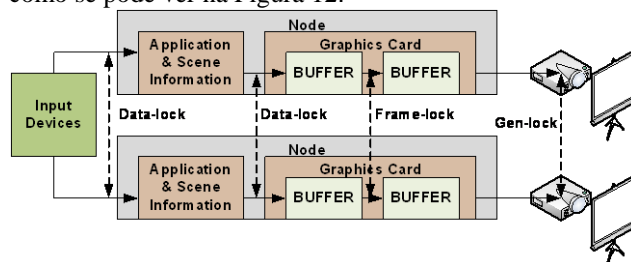


Figura 12 – Níveis de Sincronismo [Pires 07].

*Gen-lock*: Controla a sincronização de todos os projectores do agregado, isto é garante através de um protocolo hardware entre as placas gráficas, que todos os projectores projectem simultaneamente.

*Frame-Lock* (ou *swap-lock*) – cada placa gráfica tem duas memórias tampão (*buffers*), em que uma está a ser escrita pela aplicação e a outra está pronta para ser descarregada para o dispositivo de visualização, após o que é feita a troca (*swap*) de funções dessas memórias. O

mecanismo de *frame-lock* da CaveH, garante o sincronismo da descarga e troca entre os *buffers* (isto é, todos os nós fazem *swap buffer* ao mesmo tempo), evitando por exemplo, que seja projectada uma imagem sintetizada num tempo passado em qualquer nó.

Para o interface de comunicações da biblioteca ADE foi seleccionado o padrão de comunicações MPI (Message Passing Interface) sobre TCP/IP, na concretização MPICH [MPICH], que permite o processamento paralelo. Em cada nó vai ser arrancado um serviço, que irá escrever, via MPICH, numa área partilhada de memória residente no mestre, o estado em que está a escrita do *buffer* local da placa gráfica. Deste modo, fica activa uma barreira de sincronismo que garante o *frame-lock*. Na figura 13 podemos observar o resultado da produção do par estéreo na CaveH do Lousal, bem como uma costura entre o plano frontal e o plano lateral direito.

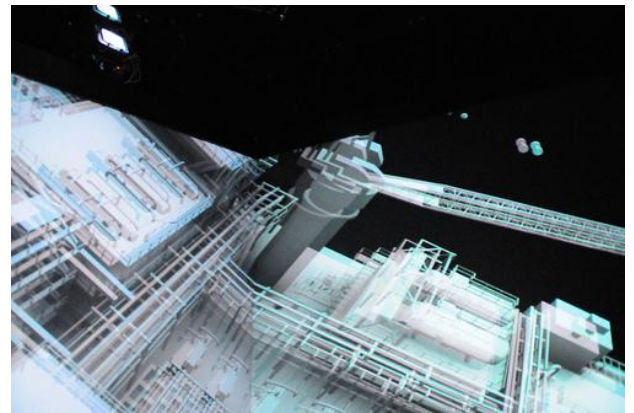


Figura 13 – Produção do par estéreo na CaveH do Lousal. Podemos observar uma costura entre o plano frontal e o plano lateral direito. @Pedro Faria Lopes 2008

## 4. DESENVOLVIMENTO DE CONTEÚDOS PARA A CAVEH

A figura 14 representa as diversas ferramentas, atribuição de competências e fases necessárias para a cadeia completa de produção de conteúdos [Pires07] para a infraestrutura.

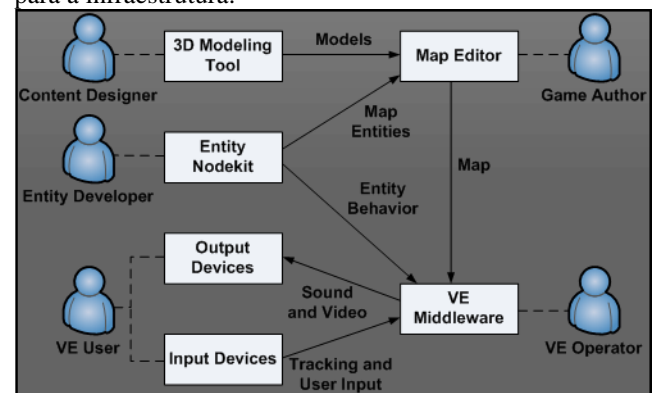


Figura 14 – Cadeia Colaborativa de Desenvolvimento [Pires07].

Para o trabalho de autoria de conteúdo para a infraestrutura, foi utilizado um PC com 2Gb de Ram e placa gráfica NVIDIA 8600M GS 256MB, com MS

Windows Vista, no qual foram utilizadas as seguintes ferramentas: Visual Studio .Net 2003 com C++, AutoDesk 3ds Max 9 [3DS], OpenSceneGraph 2.0 (OSG), GtkRadiant 1.5.0 [GTK] e CaveHSpawner.

#### 4.1 Modelação e Desenho de Objectos

Os objectos OSG a serem colocados na cena 3D podem ser gerados de dois modos distintos:

- Por programação em C++ recorrendo às classes disponíveis nas bibliotecas do OSG, exportando o grafo de cena para um ficheiro .osg, sendo este processo mais adequado a primitivas mais simples ou a efeitos tipo explosões, luzes, fumo.
- Por modelação no sistema de autor, 3D Studio, sendo depois o modelo directamente exportado para um objecto OSG.

#### 4.2 Autoria

Depois de criados, os objectos são disponibilizados à ferramenta de autoria GtkRadiant, pela colocação dos modelos originais e respectivos objectos OSG nos directórios de trabalho desta. Esta ferramenta, foi desenvolvida pela id Software para programação e desenho de vídeo jogos (como por exemplo o Quake 3), permitindo dispor os objectos na cena e posicionar o avatar, num sistema de coordenadas do mundo, como se pode ver na figura 15, onde está representado o interior de uma mina.

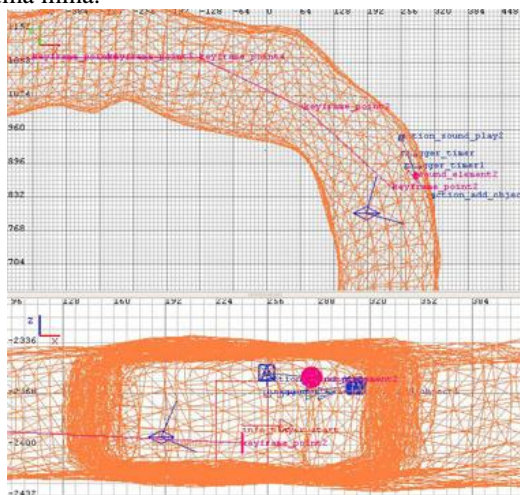


Figura 15 – Vista de planos ortogonais no ambiente GtkRadiant.

Neste ambiente de autoria podemos, entre outras coisas, dotar os objectos de movimentos cinemáticos, associando-os a posições chave posicionadas ao longo do caminho a percorrer, com os respectivos tempos associados, interpoladas por uma curva spline para produzir um movimento suave. Na figura 16, podemos visualizar um cubo azul que representa um interpolator que nos dá o início da deslocação.

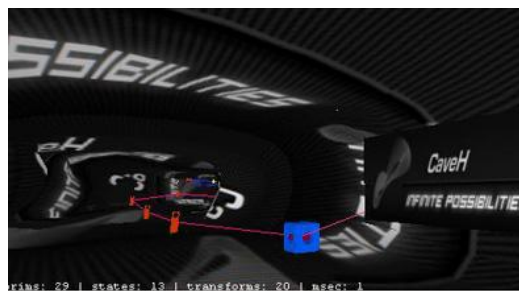


Figura 16 – Ambiente GtkRadiant: posicionamento dos objectos associados a uma deslocação.

Podemos também adicionar *triggers*, que por definição serão despoletados por diversos tipos de eventos, tais como o desenrolar do tempo ou a aproximação de um determinado objecto, nomeadamente o avatar. A estes *triggers* podem-se associar diversos tipos de acções que podem ser executadas sobre um objecto OSG, ou ainda a uma *action\_sound\_play*, por sua vez associada a um ficheiro .wav que será tocada.

No exemplo da figura 17, o cubo A, corresponde ao desencadear de um sistema de partículas representando pedras a saltar, ao mesmo tempo que é despoletado um *trigger* associado ao som drill.wav, de uma broca perfurando uma massa de minério.

O GtkRadiant produz um cenário 3D (mapa) em que estão referenciados os modelos e os objectos OSG enriquecidos com propriedades de simulação, tais como, fontes de som espacial, ou condições fronteira para a simulação física Newtoniana.



Figura 17 – GtkRadiant – posicionamento de objectos associados a *triggers*, acções e sons.

##### 4.2.1 Execução

O CaveHSpawner compila o mapa produzido pelo GTK Radiant, englobando todos os objectos e propriedades referenciados, produzindo como saída um ambiente de jogo do tipo Quake 3, visível na figura 18, que será carregado e distribuído pelos nós escravos da topologia descrita nos pontos anteriores em tempo de execução, por um visualizador dedicado à CaveH, que propõe uma interacção multimodal pessoa-computador, baseada em interfaces tangíveis Wii e Nunchuck e no reconhecimento de fala. Este visualizador tem a capacidade de ser executado também em ambiente PC, proporcionando uma metáfora de interacção de navegação virtual, utilizando o teclado e o rato.



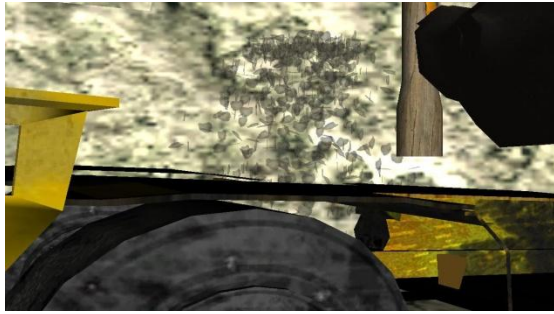


Figura 18 – Imagens do conteúdo produzido para a CaveH do Lousal, visualizadas no ecrã de computador.

### 5. VALIAÇÃO DA USABILIDADE DO SISTEMA CAVEH

Para analisar o impacto da experiência de imersão virtual no sistema CaveH, comparando uma mesma tarefa simples realizada em ambiente PC ou em ambiente CAVE, foi conduzida uma experiência com cinco indivíduos voluntários, estudantes de Engenharia Informática do ISCTE, com experiência de utilização de jogos digitais, na faixa etária dos 20 anos. Na primeira parte da experiência, os utilizadores interagiram livremente com uma cena de um jogo simples criado de acordo com as técnicas apresentadas na secção 4, visualizada no ecrã de um portátil, representada na Figura 19, tendo como dispositivos de interacção o teclado e o rato.

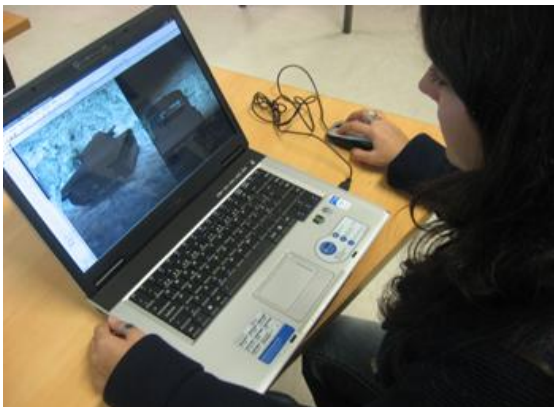


Figura 19 – Interacção com teclado e rato.

Na segunda parte do estudo, deslocaram-se ao Lousal para experimentarem a mesma cena e o mesmo tipo de tarefa, no ambiente CaveH. Primeiro foi dada a cada um dos indivíduos a oportunidade de se familiarizarem com o ambiente, de se adaptarem à imagem e aos óculos estereoscópicos, de utilizarem os comandos Wii e Nunchuck e o dispositivo de interacção por fala. Para tal foram visualizando cenas variadas estáticas, versando variados temas, desde a reconstrução de monumentos históricos a complexas plataformas petrolíferas, tendo o utilizador a possibilidade de se orientar e navegar por entre os objectos. Seguidamente, cada um dispôs de 10 minutos para interagir com a cena em estudo, utilizando todos os dispositivos de interacção, nomeadamente o comando de voz para invocar objectos de interacção (na Figura 20 podemos visualizar o exemplo da invocação da lupa).

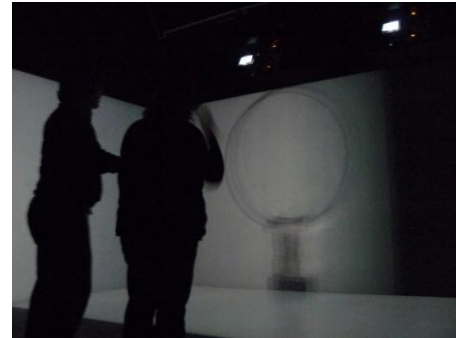


Figura 20 – Projecção no ambiente CaveH do Lousal.

Logo após esta experiência foi dado a preencher a cada um dos indivíduos um questionário de satisfação, do qual se passam a apresentar os valores médios dos respectivos resultados (Tabela 1).

<b>A. Como compara a visualização no CaveH com a visualização no ecrã de computador, relativamente aos seguintes pontos?</b>	
a) Campo de visão	1,2
b) Qualidade da visualização apercebida	2,0
c) Sensação de imersão	1,2
d) Cor	3,4
e) Som envolvente	1,0
f) Compreensão do que se está a passar	2,4
g) Percepção 3D	1,2
h) Resposta do sistema	2,4
<b>B. Como compara a utilização do interface Wii na CaveH com a utilização do rato no computador</b>	
a) Grau de liberdade de translação	1,2
b) Grau de liberdade de rotação	2,0
c) Utilização mais natural	2,0
c) Agarrar objectos 3D	1,6
c) Utilização da lanterna	1,4

Tabela 1. Comparação da experiência de Realidade Virtual imersiva na CaveH com Realidade Virtual não-imersiva no computador portátil. Legenda: A escala varia de 1 a 5, sendo 1 o valor de satisfação máximo para a experiência CaveH e 5 o valor de satisfação máximo para a experiência PC.

Como classifica a experiência de interacção e visualização com o conteúdo 3D em CaveH	1,4
Como classifica a experiência de interacção e visualização com o conteúdo 3D num computador	2,4

Tabela 2. Avaliação Qualitativa. Legenda: Excelente - 1 ; Boa - 2; Regular - 3; Mediocre - 4; Má - 5.

Deste questionário conclui-se que, em média, ao nível do campo de visão e da sensação de imersão e percepção 3D, o sistema CaveH é francamente melhor, sendo quanto ao som, incontestavelmente melhor. A qualidade da visualização na CaveH é ligeiramente melhor, mas quanto à resposta do sistema e percepção dos acontecimentos, os sistemas equiparam-se.

Quanto à cor, a experiência de visualização no ecrã de computador é ligeiramente melhor. De notar que os sujeitos utilizaram uma versão do sistema de visualização da CaveH muito preliminar, ainda sem preocupações de síntese de imagem fotorealista.

Falando da interface Wii, em nenhuma questão a sua utilização como dispositivo de interacção na CaveH foi incontestavelmente melhor que a utilização do rato na ambiente PC, mas é considerado francamente melhor na liberdade de translação, utilização da lanterna e na acção de agarrar objectos 3D. Foi ainda considerado ligeiramente melhor na liberdade de rotação, sendo também um meio de interacção ligeiramente mais natural. Note-se que o ambiente de visualização e interacção em PC não se conseguiu igualar ou ser considerado melhor em nenhum dos casos.

Foi ainda pedido aos utilizadores que classificassem qualitativamente a sua experiência numa escala de valores discretos de 1 a 5, correspondendo o valor 1 a uma experiência excelente e o 5 a uma experiência negativa, com o valor 3 a corresponder a uma experiência regular, nem satisfatória nem insatisfatória. Pela média dos valores obtidos (Tablea 2), concluiu-se que, em geral, a classificação da experiência imersiva na CaveH aproximou-se de excelente, ao passo que a experiência em ecrã de PC foi considerada regular, nem satisfatória, nem insatisfatória.

## 6. CONCLUSÕES

Neste artigo descrevemos com pormenor a infraestrutura de realidade virtual imersiva CaveH, instalado no Centro de Ciência Viva do Lousal, com ênfase nas suas componentes, na respectiva concretização e nos tipos de aplicação esperada para uma infraestrutura deste tipo. A CaveH do Lousal, endereça e responde comum grau de satisfação muito elevado, a todos os requisitos necessários a um sistema de Realidade Virtual imersiva, nomeadamente sincronismo e disponibilidade de imagens estereoscópicas de alta resolução (> 8 milhões de pixel) em tempo real (60Hz), produzidas a partir de cenas de elevada complexidade (com mais de 3 milhões de triângulos). O artigo descreve também o processo de desenvolvimento experimental de um conteúdo interactivo para a CaveH e apresenta os primeiros resultados de avaliação de usabilidade desse mesmo conteúdo, por comparação com uma experiência similar em realidade virtual não imersiva, no contexto de um trabalho académico. Ainda que muito preliminares, esses resultados mostram já uma tendência para a superioridade do ambiente imersivo, relativamente ao campo de visão, sensação de imersão, percepção 3D e síntese e distribuição de som, quando comparado com o ambiente PC em realidade virtual não imersiva. O sucesso desta primeira experiência de utilização académica, do ambiente de autoria para a CaveH do Lousal, durante o período de uma disciplina semestral no curso de Engenharia Informática do ISCTE, perspectiva a sua utilização em maior escala no contexto da investigação académica nacional em Realidade Virtual imersiva, atendendo ao facto que toda a plataforma de

autoria e de desenvolvimento para a CaveH, é disponibilizada já hoje a essa mesma comunidade ([www.CaveH.org](http://www.CaveH.org)). Antevê-se assim a promoção de mais estudos no âmbito da CaveH, por parte da comunidade académica Portuguesa da Computação Gráfica, quer com conteúdos de tipos diversos, quer com diferentes metodologias e tecnologias de interacção.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à equipa de engenharia da ADETTI-ISCTE do projecto CaveH do Lousal, nomeadamente, Luciano Pereira Soares, Rafael Bastos, Rui Varela, Nelson Carvalho, Pedro Martins e Carolina Abreu e, em especial, ao Francisco Pires, pelas suas valiosas e inestimáveis colaborações neste trabalho.

## 8. REFERÊNCIAS

- [AGEIA] Ageia Physx, September 2007.  
<<http://www.ageia.com/physx/>>
- [Barco] Barco, Junho 2008 <<http://www.barco.com/>>
- [CAL3D] CAL3D, Junho 2008. <http://cal3d.sourceforge.net/>
- [Costa 07] Costa, V., Pereira, J. M., Dias, M. S., “Tecnologias CAVEHOLLOWSPACE para a Mina do Lousal, 15º Encontro Português de Computação Gráfica, Microsoft, Porto Salvo, Out. 2007, pp. 69-78.
- [Cruz-Neira92] Cruz-Neira, Sandin, D.J., DeFanti, T., “Surround-screen projection-based virtual reality”, Laboratory (EVL) at the University of Illinois at Chicago, SIGGRAPH 92, 1992.
- [Dias03] Dias, J., M., S., Santos, P., Monteiro, L., Silvestre, R., Bastos, R., “Developing and Authoring Mixed Reality with MX Toolkit”, ART03, The Second IEEE International Augmented Reality Toolkit Workshop, Tokyo, Japan, 6 October 2003.
- [Dias07] Dias, M. S. et al., “CaveHollowspace do Lousal – Princípios Teóricos e Desenvolvimento”, Curso Curto, 15 Encontro Português de Computação Gráfica, Microsoft, Porto Salvo, Out 2007.
- [FMOD] FMod Sound System, Junho 2008. <<http://www.fmod.org/>>
- [Gamma94] Gamma, E., Helm, R., Johnson, R., Vlissides, J., “Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software”, 1994.
- [GTK] GtkRadiant, Maio 2008.  
< <http://www.qeradiant.com> >
- [INFITEC] Infiscape, “INFITEC Stereo Display Technology”, Junho 2008. <[http://www.infitec.net/infitec\\_e.html](http://www.infitec.net/infitec_e.html)>
- [Kessenich06] Kessenich, J., Baldwin, D., Rost, R., “The OpenGL® Shading Language”, September 7, 2006.
- [LUA] Lua, The Programming Language, Junho 2008  
<<http://www.lua.org/>>
- [MPI] MPI Forum, “MPI-2: Extensions to the Message Passing Interface”, University of Knoxville, Tennessee, USA, 1997.
- [MPICH] MPICH Junho 2008.  
<<http://www-unix.mcs.anl.gov/mpi/mpich/>>
- [OSG] OpenSceneGraph, Junho 2008.  
<http://www.openscenegraph.org/>
- [Pires07] Francisco Pires e Miguel Salles Dias, “Abstract Distributed Engine (ADE): A Library for Data Consistency in Distributed Virtual Environments”, 15º Encontro Português de Computação Gráfica, Microsoft, Porto Salvo, Out. 2007.
- [Soares 08] Soares, L., et al. “Designing multi-projector VR systems: from bits to bolts”, Tutorial Eurographics 08, Grécia, Abril 14-18 2008.
- [Wii] Nintendo Wii, Junho 2008.  
<http://www.nintendo.com/wii>
- [3DS] Autodesk - Autodesk 3ds Max, Junho 2008.  
<http://usa.autodesk.com/>