

Desarrollo de un Simulador en Tiempo Real para la Evacuación en Medios e Infraestructuras de Transporte Ferroviario.

Reinaldo Togores^{1,2} (togoresr@unican.es); Jorge A. Capote² (capotej@unican.es);
Daniel Alvear² (alveard@unican.es); Orlando V. Abreu² (abreu@unican.es);
Arturo Cuesta² (cuestaar@unican.es), Mariano Lázaro² (lazarom@unican.es);

Resumen. El presente trabajo describe los pasos que se están dando en el Grupo Investigador GIDAI de la Universidad de Cantabria, especializado en la Investigación y Tecnología para la Seguridad contra Incendios, orientados a la creación de un Simulador en Tiempo Real (STR) destinado al entrenamiento del personal ferroviario para las actuaciones en caso de emergencias. Este proyecto se desarrolla a partir de los resultados de un extenso programa de Investigación, plasmado en diferentes estudios sobre la seguridad en el transporte ferroviario de pasajeros y la seguridad contra incendios en general, que se apoyan en el empleo de Modelos de Simulación Computacional.

El STR se desarrollará a partir de las técnicas de Realidad Virtual (RV) para suministrar una experiencia lo más cercana posible a la realidad. En particular, se centra el aporte en este aspecto a la modelización de los incendios en espacios confinados, pretendiendo reproducir de manera científicamente correcta el desarrollo de este fenómeno, aplicando los desarrollos más recientes de la fluidodinámica computacional. Para el desarrollo de la interfaz hemos evaluado tanto software de libre distribución como plataformas comerciales con versiones educativas a bajo coste. El desarrollo inicial considera el uso de computadores y pantallas normales, pero tiene en cuenta su posible extensión a sistemas estereoscópicos, pantallas envolventes, etc. El STR operará en sincronía con un Modelo de Simulación Computacional de la Evacuación (MSCE) que aporte información sobre el flujo de personas, posibles áreas de congestión, desplazamiento de los ocupantes en las distintas partes del escenario, rutas de evacuación, etc.

Palabras Claves. Modelado y Simulación Computacional, Gráfica Digital, Realidad Virtual, Modelos de Conducta.

I. INTRODUCCIÓN

El aprendizaje es a menudo el resultado de la prueba y el error, pero ¿qué pasa si el error no es una opción admisible? En un cierto momento el alumno debe pasar de la consideración de situaciones imaginarias en circunstancias hipotéticas al enfrentamiento de situaciones reales con incidentes verdaderos. Un error pudiera acarrear daños materiales, lesiones, e incluso la muerte.

Para evitar estos riesgos, en muchas profesiones se utilizan simuladores. Los simuladores proporcionan entrenamiento en un ambiente libre de riesgo, pero lo suficientemente creíble como para que el usuario se sienta inmerso en la situación que se presenta, brindando así la oportunidad de ganar experiencia en escenarios excepcionales que por su costo, por los riesgos que implican o por consideraciones éticas serían de difícil reproducción en la realidad [1].

Son precisamente estas razones las que han motivado el que hayan sido los militares quienes marcaron el camino en el desarrollo de aplicaciones orientadas a estos fines [2]. El proyecto SIMNET [3] de fines de los '80 representó el

¹ Dpto. de Ingeniería Geográfica y Técnicas de expresión Gráfica, Universidad de Cantabria.

² Grupo GIDAI. Dpto. de Transportes y Tecnología de Proyectos y Procesos. Universidad de Cantabria. Avda. Los Castros, s/n. 39005 Santander. (España). Tfno.: +34 942 201826. Fax: +34 942 202276.

surgimiento de una nueva generación de simuladores de combate desarrollados a partir de la tecnología inmersiva de gráficos 3D generados en tiempo real y accesible mediante computadores conectados en red.

Las situaciones en que un número considerable de personas se agrupan en espacios confinados, como en el caso de los Medios e Infraestructuras de Transporte Ferroviario, son especialmente riesgosas y requieren precauciones extremas para evitar la pérdida de vidas en situaciones de emergencia. De las posibles situaciones de emergencia son particularmente críticas aquellas relacionadas con el fuego y las explosiones. La conducta del personal que presta servicio en este entorno ante cualquier incidente es especialmente importante para asegurar la seguridad en dichas instalaciones. Su entrenamiento para asegurar la evacuación del público ante cualquier incidente es un requisito prioritario y a ello se orienta el proyecto de Simulador en Tiempo Real (STR) que ahora presentamos, en desarrollo por el Grupo GIDAI de la Universidad de Cantabria.

Una aplicación de este tipo permitirá la realización de “ejercicios virtuales” por el personal involucrado en el transporte de pasajeros, ofreciendo como ventajas: la posibilidad de repetirlos cuantas veces sea necesario; el no requerir el cierre de las instalaciones durante el ejercicio; el no producir daños materiales ni contaminación [4].

II. LA TECNOLOGÍA DE LA REALIDAD VIRTUAL.

Cuando hablamos de la tecnología de Realidad Virtual (RV) nos referimos a sistemas computarizados capaces de generar un entorno tridimensional (3D) *interactivo*, *inmersivo* y *multisensorial*. Como resultado de su naturaleza *interactiva*, una aplicación de RV será capaz de reaccionar de inmediato (en *tiempo real*) ante la actividad del usuario frente a una situación o evento que se le presenta. Esta reacción, percibida por el usuario origina una ilusión de *presencia real* en el seno del ambiente simulado [5].



Figura 1. Izq.: Head Mounted Display (HMD). Der.: Entorno CAVE utilizado con VIRTUAL FIRES [4].

El grado de *inmersión* dependerá principalmente en los recursos de equipamiento (hardware) de que se disponga. Numerosos sistemas se han desarrollado con el objetivo de procurar distintos grados de inmersión, desde las simulaciones en PCs de sobremesa (Figura 2), conocidas como *Fish Tank VR* (RV de Pecera) [6], los sistemas montados en cascos o *Head Mounted Displays* (HMD), hasta los carísimos sistemas CAVE (*Cave Automatic Virtual Environment*) en los que el

entorno generado por computador rodea totalmente al usuario (Figura 1).

La opción *Fish Tank* resulta sumamente efectiva en relación con su bajo costo, especialmente ahora que se dispone de pantallas LCD de dimensiones cada vez mayores y tarjetas gráficas 3D con aceleración por hardware a precios asequibles. Una variante consistiría en el uso de un proyector para mostrar la imagen virtual en una pantalla de mayor tamaño [9], lo que permitiría la participación de varios usuarios en una sala de reuniones (Figura 4, abajo).

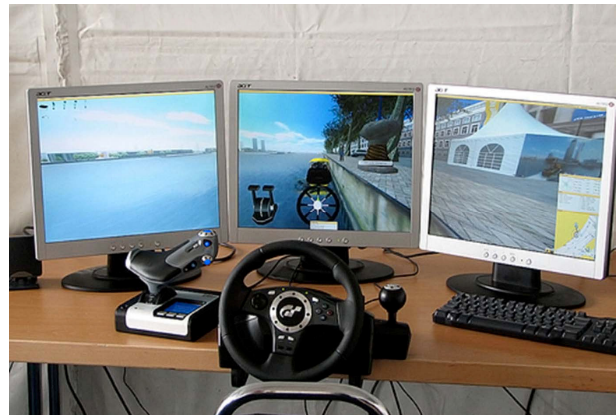


Figura 2. Simulador de conducción de naves utilizando tres pantallas LCD. Demostración de *Ship Simulator*. Wereld Haven Dagen (World Harbour Days) Rotterdam, Agosto 2006 [7].

Un grado de inmersión aún mayor pudiera obtenerse a partir de presentaciones *estereoscópicas*, en pantallas especiales o mediante el uso de gafas con lentes coloreados o polarizados (Figura 3) [8]. Pero estos sistemas sólo pueden utilizarse durante breves períodos de tiempo (media hora a lo sumo) debido a la tendencia a producir mareos [6][10].

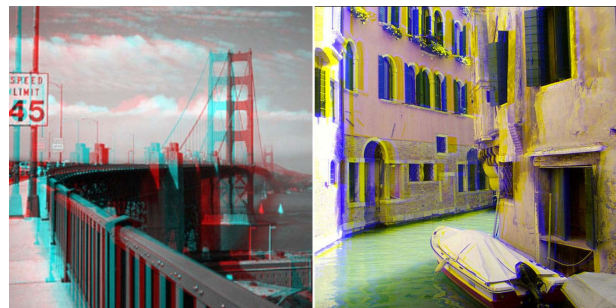


Figura 3. Imágenes estereoscópicas, izq.: anaglifo para ser visto con gafas verde-rojo, der.: Sistema ColorCode® para ser visto con gafas azul-ámbar [8]. Este último sistema permite la percepción de colores en la imagen estereoscópica resultante.

En un sistema *Fish Tank* es posible acoplar la vista que se presenta en pantalla a los movimientos de la cabeza del usuario, en lo que suele denominarse *tracking*. Debido a la interrelación de los aparatos sensoriales del ser humano, la información originada a partir de los distintos sentidos y en especial la *percepción kinestésica* relacionada con los movimientos del organismo, unida a los cambios percibidos en la imagen visual resulta crucial para la comprensión del espacio. Las experiencias realizadas por Ware, Arthur y Kellog [6] demuestran la posibilidad de sustituir la

estereoscopia por el *tracking* con resultados comparables e incluso superiores en lo que se refiere al desempeño exitoso de tareas en un espacio virtual.

Aunque es posible controlar un sistema de estas características con un dispositivo 2D como el ratón, también en este campo se vienen produciendo innovaciones a pasos agigantados, pudiendo señalarse como ejemplo los sistemas *Wii*, en los que el puntero 3D cuenta además con respuestas de carácter háptico. En este contexto debe hacerse referencia al trabajo de J. Chung Lee, ampliamente difundido a través de Internet [14].

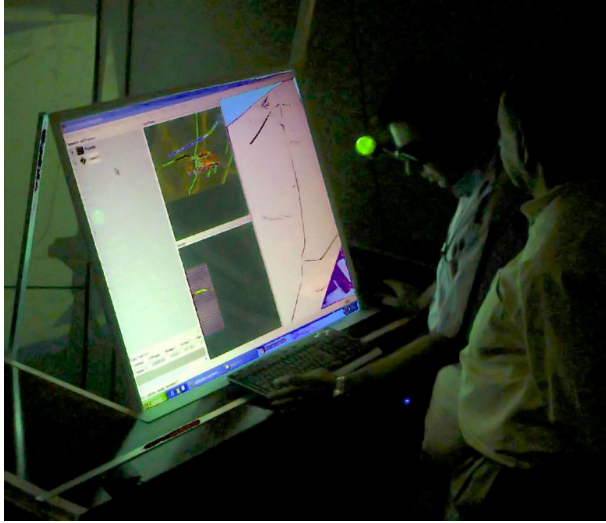


Figura 4. Sistema SOROLLA, arriba en modo escritorio, abajo en modo presentación. Fuente: Grupo Investigador EGICAD, Universidad de Cantabria.

El *Grupo Investigador de Expresión Gráfica en la Ingeniería* (EGICAD), pionero en estos temas dentro de la Universidad de Cantabria, cuenta actualmente con *SOROLLA* (Figura 4), un sistema prototipo que reúne todas las características mencionadas, diseñado y construido por el

grupo ARTEC del Departamento de Robótica de la Universidad de Valencia. Este equipo dispone de dos pantallas de gran formato, de uso alternativo, donde la inmersión se logra mediante el uso de un par de proyectores para estereoscopia pasiva basada en luz con polarización circular.

La primera pantalla, para trabajo en modo escritorio, tiene unas dimensiones de 90 x 70 cm. y está realizada en *filmscreen* no despolarizante con un recubrimiento de cristal laminado. La segunda, para uso en presentaciones, tiene un tamaño de 1,75 x 1,50 m. también en *filmscreen* no despolarizante. El sistema de *tracking* óptico está formado por dos cámaras conectadas a un procesador dual para el análisis de imagen en tiempo real. Cuenta con un sistema de interacción y gestión inalámbrico a partir de un dispositivo PDA de alta resolución.

Este sistema se ha empleado en el desarrollo de aplicaciones de ayuda a la toma de decisiones en el diseño de carreteras en entorno RV [11][12] y para la evaluación del impacto ambiental [13] de estas infraestructuras.

Recientemente, con el vertiginoso desarrollo de la Internet, han proliferado los entornos multiusuario en red conocidos como *Mundos Virtuales Distribuidos* (DVE) [15], que permiten la participación de un gran número de personas, representadas por *avatares*, en un mismo mundo virtual, (Figura 5).



Figura 5. Escenarios realistas y avatares en el entorno *Second Life*.



Figura 6. Captura de pantalla de *Play2Train* [16].

Como ejemplo podemos citar *Play2Train* [16] un entorno virtual desarrollado en la Universidad de Idaho para entrenamiento contra incidentes de bio-terrorismo sobre la plataforma *Second Life* (Figura 6). Este entorno virtual abarca dos islas, *Asterix* y *Obelix* (65.536 m² x 2 y de acceso restringido), una de ellas dedicada a simular una ciudad virtual y la otra un hospital virtual. El diseño de estos mundos virtuales corresponde al de los dioramas usados por los servicios de emergencia como apoyo para sus ejercicios. *Play2Train* se ha utilizado, entre otros, para la simulación de la respuesta a una pandemia de gripe aviar.

III. ARQUITECTURA DEL SISTEMA.

La arquitectura del STR de muestra en la Figura 7. El sistema contará con una Interfaz Gráfica de Usuario a través de la cual se podrá interactuar con el módulo de Gestión de la Información, cuya función es la de coordinar la operación de tres módulos de simulación: el *Simulador de Ambientes*, el de *Incendios* y el de *Evacuación*. Estos simuladores operan a partir de la información almacenada en tres Bases de Datos: La *Base de Datos Geométrica* (BD/G) que incluye los datos para recrear las Infraestructuras y Equipamiento utilizados para generar el mundo virtual, la *Base de Datos de Resultados de Fluidodinámica Computacional* (BD/CFD) para el Simulador de Incendios y la *Base de Datos de Resultados del Modelado y Simulación Computacional de la Evacuación* (BD/MSCE) para el Simulador de Evacuación.

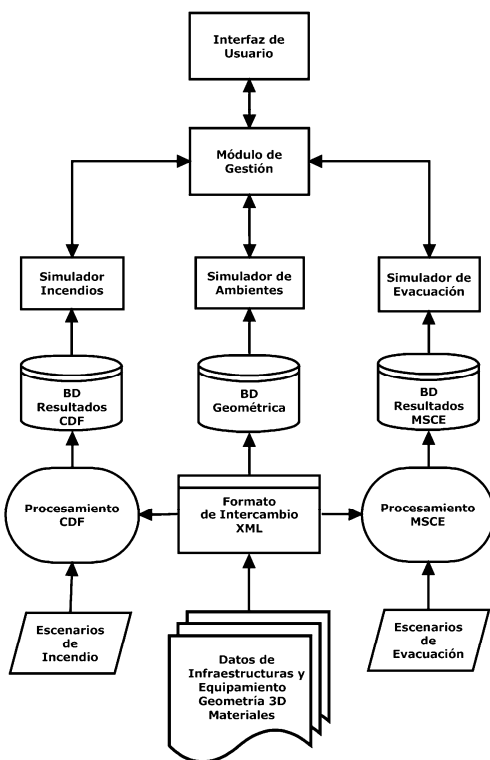


Figura 7. Arquitectura del Sistema.

Los datos de infraestructuras y equipamiento se obtendrán a partir de la documentación de los proyectos ejecutivos, incluyendo tanto la gráfica (CAD) como la alfanumérica (listados de materiales con sus características, etc.) necesaria. Nos proponemos diseñar un formato de intercambio que sirva como entrada única tanto para la BD/G como para los programas de CFD y los de MSCE. La estructura de este formato de intercambio estará basada en el concepto del *Building Information Modeling* (BIM) [17][18] y se materializará siguiendo las especificaciones del *Extensible Markup Language* (XML), tomando como modelo la implementación del *accXML* [19].

A. *Simulador de Incendios.*

Los incendios que se presentarán en el STR ocurrirán siempre dentro de espacios confinados. El comportamiento de estos incendios se caracteriza por una extrema complejidad ya que dependen de una gran cantidad de factores entre los que podemos enumerar: el volumen del recinto y la altura del techo; el tamaño, número y distribución de los huecos de ventilación; las propiedades térmicas de los cerramientos; el tamaño, composición y localización de las fuentes de combustible donde se origina el fuego; la disponibilidad y ubicación de fuentes de combustible adicionales.

Un incendio de este tipo sobre el que no se ejecuten maniobras de extinción puede describirse en función de una serie de fases que se suceden en su desarrollo: la de *ignición*, la del *crecimiento*, la del *flashover* (o del *backdraft*, en función de la disponibilidad de oxígeno), la del *incendio totalmente desarrollado* y por último su *decrecimiento* y *extinción* al agotarse el combustible disponible [20].

El incendio puede seguir diversas trayectorias, extendiéndose a lo largo de elementos combustibles conectados y/o propagarse a elementos no conectados. Su comportamiento se diferenciará del incendio en espacios abiertos especialmente cuando el volumen activo se convierta en una porción significativa del volumen del recinto. Cuando esto sucede, suele producirse la ignición súbita de todos los elementos combustibles hasta entonces no afectados. Esta etapa, que suele coincidir con un aumento en la actividad del incendio original, precedido por llamaradas a lo largo del techo del recinto, se conoce como *flashover*. La ocurrencia del *flashover* marca el inicio de una fase en la cual el incendio ataca la integridad de las barreras que lo confinan y expone todas las estructuras y objetos combustibles cercanos a la radiación térmica.

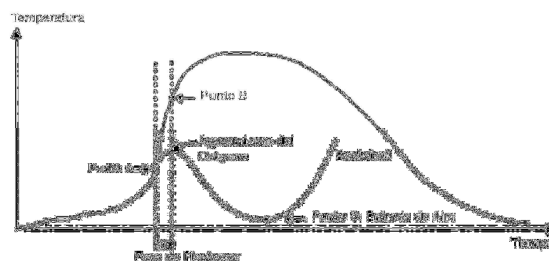


Figura 8. Esquema de los posibles desarrollos, en términos de temperatura, de un incendio en un espacio confinado [20].

En el caso de que no haya aberturas que proporcionen el oxígeno necesario tendrá lugar una acumulación de gases quemados sólo parcialmente. Si por algún motivo se produjera en esas condiciones la apertura de una puerta o la rotura de una ventana, permitiendo con ello la entrada de oxígeno, al mezclarse éste con los productos no quemados se producirá la explosión violenta de dichos gases a través de la abertura, en un fenómeno conocido como *backdraft*. El *flashover* y el *backdraft* son los momentos en que más pérdidas de vidas humanas se producen, especialmente entre el personal de extinción de incendios.

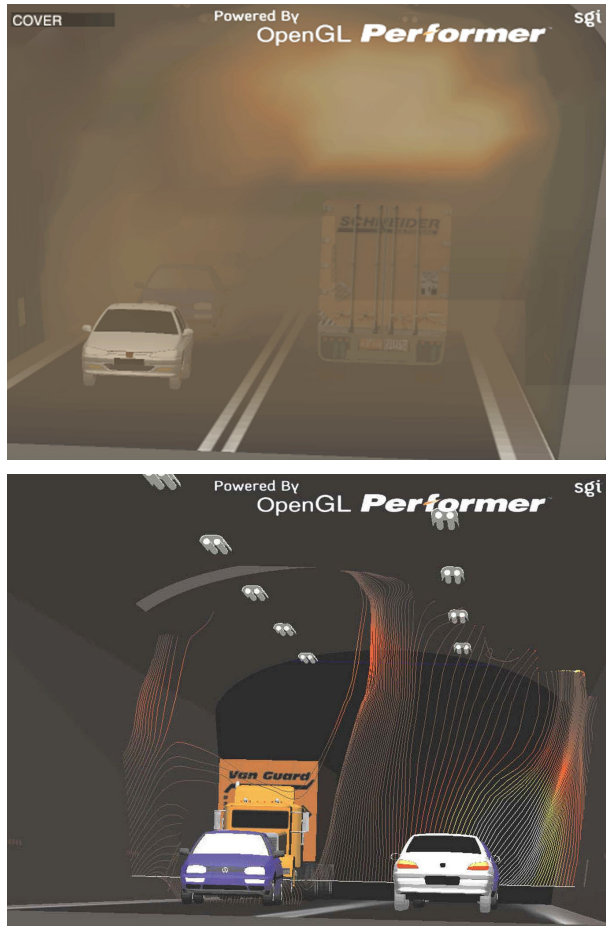


Figura 9. Capturas de pantalla de VIRTUAL FIRES. Arriba la representación realista del fuego y humo, abajo la representación de las temperaturas como isolíneas [4].

Actualmente están sumamente desarrollados los programas destinados a la presentación, con un alto grado de realismo, de incendios y explosiones. De hecho, son la base de una lucrativa industria vinculada a los “efectos especiales” en el cine y los videojuegos. Estos efectos se logran mediante el procedimiento de animar *sistemas de partículas* que se desplazan, para cada unidad de tiempo transcurrida, *de acuerdo a una serie de parámetros prefijados por el artista de efectos especiales*.

Pero esta recreación artística no se corresponde necesariamente con el desarrollo más probable del incendio en un escenario de riesgo particular. Durante los últimos años, los esfuerzos dedicados a la investigación de la ciencia y tecnología del fuego, junto con la continua evolución en las capacidades de los ordenadores, han dado lugar a la aparición de *modelos matemáticos deterministas de simulación de incendios* de gran complejidad [23][24]. Estos *Modelos de Simulación Computacional de Incendios* (MSCI) son programas diseñados para predecir los valores de determinadas variables y parámetros, tales como temperatura, composición de humos, etc., durante la evolución y el desarrollo de las diferentes etapas del incendio. Estos valores se obtienen a partir de la resolución de las ecuaciones

diferenciales y algebraicas que gobiernan los procesos y fenómenos asociados [22]. Un aspecto importante es el de la propagación del humo, sobre todo teniendo en cuenta que en la mayor de parte de los casos el personal a evacuar no se enfrenta directamente a la llama. Otros aspectos no son de carácter visual como la distribución de la temperatura y la toxicidad de la atmósfera, vitales para determinar la posible supervivencia.

Es muy difícil obtener una simulación numérica inmediata del incendio al mismo tiempo que los usuarios navegan en el ambiente virtual, ya que esta simulación suele consumir enormes recursos en términos de memoria y procesamiento. *VIRTUAL FIRES*, prototipo de simulador basado en un MSCI, (Figura 9), ha sido desarrollado por G. Beer [4], pero su utilización exige recursos sólo disponibles en un supercomputador paralelo masivo con software optimizado para esa configuración específica. Este prototipo sólo ha sido probado utilizando el supercomputador LUCIDOR del *Parallel Dator Centrum* en el Kungl Tekniska Högskolan de Estocolmo, Suecia.

Una alternativa más realista sería la de analizar los posibles escenarios de incendio, realizando previamente los cálculos y almacenando los resultados en una base de datos a la que el módulo de simulación pueda recurrir para determinar los parámetros del siniestro en cada momento de su desarrollo. Esta base de datos registraría la distribución espacial de las llamas, de la temperatura, la densidad del hollín, la altura de la capa de humo, la tasa de liberación de calor, etc. Este es el principio utilizado en el desarrollo de un prototipo de simulador de evacuación (Figura 10) propuesto por A. Ren y colaboradores [21] en la Tsinghua University de Pekín.

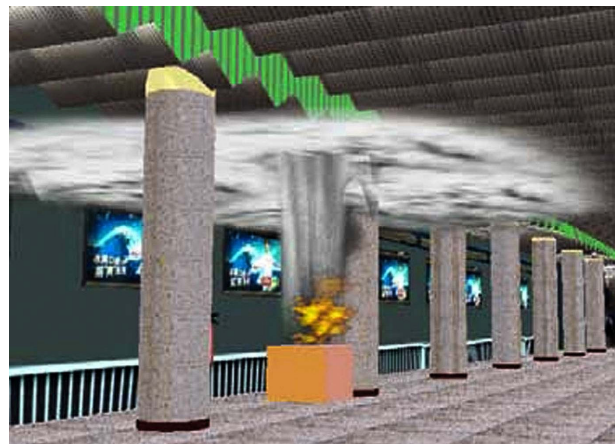


Figura 10. Captura de pantalla del simulador de evacuación desarrollado por A. Ren y colaboradores en la Tsinghua University [21].

1) Software MSCI.

De los MSCI disponibles en el mercado se ha elegido como herramienta idónea el *Fire Dynamics Simulator* (FDS), un modelo de fluidodinámica computacional (CFD) de dominio público desarrollado por el *National Institute of Standards and Technology* (NIST) de los Estados Unidos. Este software resuelve numéricamente una variante de las ecuaciones de Navier-Stokes adecuadas al flujo de poca velocidad, de origen térmico, haciendo énfasis en el transporte del humo y el calor

[22]. El mismo ha sido utilizado por los investigadores de GIDAI en diferentes trabajos, con resultados que se reflejan en múltiples contribuciones [26][27][28][29][32] a congresos y publicaciones especializadas.

B. Simulador de Evacuación.

Junto al mundo virtual poblado de infraestructuras y equipos y al incendio simulado, será necesario presentar a los grupos de personas que utilizan los medios de transporte, mostrando sus reacciones y desplazamientos frente a las situaciones que se presenten durante el ejercicio. Al igual que existen programas para la previsión del desarrollo de los incendios, también los hay para el estudio de los procesos de evacuación de sitios donde se aglomera el público [30][31], los llamados *Modelos de Simulación Computacional de la Evacuación* (MSCE). El estudio de estos procesos es otra de las ramas en que se centra la actividad de GIDAI, que cuenta con especialistas cualificados en esta rama de la ingeniería. No siempre resulta práctico ejecutar los cálculos correspondientes a los MSCE en tiempo real. En lugar de eso, y en función del software a utilizar, optaremos por definir previamente los diversos escenarios de riesgo a emplear en las simulaciones realizando un cálculo anticipado, cuyos resultados se almacenarán en la *Base de Datos de Resultados de la Evacuación*. Estos resultados se utilizarán para dirigir el movimiento de los agentes empleados para representar las aglomeraciones de público en cada situación.

1) Software MSCE.

Se ha iniciado una fase de pruebas con un nuevo software de dominio público para el modelado y Simulación de la Evacuación, aún en etapa de desarrollo, el *FDS+Evac* [34]. *FDS+Evac* es una ampliación del *Fire Dynamics Simulator* (FDS) para la simulación de la evacuación. Este programa computa la posición, la velocidad, y la dosis de gases tóxicos para cada agente dentro del dominio computacional en cada paso discreto de tiempo. Sus características principales son: simulación de seres humanos a base de *agentes*; algoritmo de movimiento basado en el *Modelo de Pánico*; definición simplificada de escenarios a partir de datos alfanuméricos; post-proceso mediante el software *Smokeview*; efectos del fuego calculados de acuerdo al concepto *Fractional Effective Dose* (FED).

C. Simulador de Ambientes.

Para los ambientes que se utilizarán en el simulador deberán escogerse los más representativos de entre las infraestructuras ferroviarias del país. Como base para esta elección se cuenta con la Investigación de Campo Internacional (Figura 11) realizada como parte del *Convenio de Colaboración entre la Dirección Gral. de Ferrocarriles (Ministerio de Fomento) y el Grupo GIDAI (Universidad de Cantabria) sobre las condiciones de Seguridad contra Incendios en las Estaciones Ferroviarias* [31]. Tras analizar más de 360 estaciones, se han seleccionado, según distintos criterios (interoperabilidad, volumen de pasajeros, actividad comercial-empresarial, etc.) 30 estaciones nacionales y 30 internacionales. La muestra procede de: Alemania, Francia, Reino Unido, Italia, Suiza, Estados Unidos, Canadá, Japón, Corea del Sur, Taiwán y España.

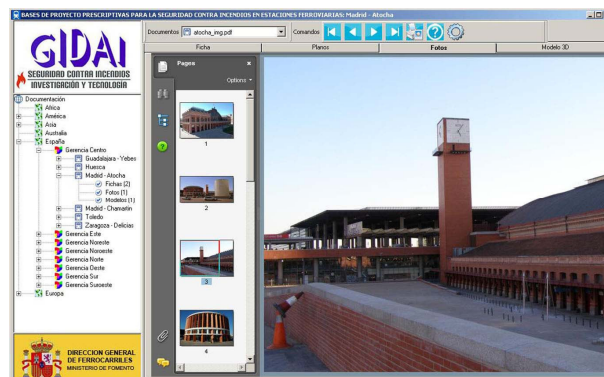


Figura 11. Interfaz de Usuario para la Base de Datos de la Investigación de Campo Internacional [31].

Además de la información de contacto y localización de cada estación, la encuesta realizada en el marco de esta investigación recoge información referente a su superficie construida, servicios de transporte presentes (intermodalidad), número de pasajeros anuales, tipología constructiva, implantación, actividad comercial-empresarial, control de humos, sistemas de detección, alarma, extinción y evacuación en caso de incendio. De las encuestadas, todas se encuentran en zonas urbanas, y gran parte de ellas en emplazamientos céntricos, convirtiéndose en recintos con grandes posibilidades como punto de intercambio humano y comercial, al tratarse de espacios de gran superficie. El 25 % de ellas supera los 40.000 m², y dentro de éstas, el 60 % superan los 100.000 m² de superficie construida. A partir de los resultados de este estudio se caracterizarán los escenarios típicos a emplear en el simulador.

1) Software de Modelado 3D.

Una vez elegidos los prototipos más representativos a partir de los resultados de la encuesta se recopilará la información necesaria como planos CAD, documentación alfanumérica, etc., para su procesamiento con el objetivo de incorporarlos a la Base de Datos Geométrica. Es evidente que este es necesariamente el primer paso en la implantación del STR. Aunque nuestra experiencia en el procesamiento de los modelos 3D (Figura 12) se basa actualmente en licencias educacionales de productos *Autodesk* (y en menor medida *Microstation*), incluidos en el currículum de todas las ingenierías que se imparten en la Universidad, se están experimentando alternativas de libre distribución para incorporar alguna de ellas al paquete de distribución del STR. La más interesante hasta ahora parece ser *Blender* [33], producto de la organización no lucrativa *Blender Foundation*, distribuido bajo los términos de la *Licencia Pública General de GNU (GPL)*.

Blender es un paquete de creación totalmente integrado, ofreciendo un amplio rango de herramientas esenciales para la creación de contenido 3D, incluyendo modelado, mapeado uv, texturizado, *rigging*, *weighting*, animación, simulación de partículas y otros, scripting, *renderizado*, composición, post-producción y creación de juegos. Multiplataforma, con una interfaz unificada basada en *OpenGL*, puede ser usado en

todas las versiones de Windows, Linux, OSX, FreeBSD, Irix y Sun, etc.



Figura 12. Modelado de un ensayo de fuego real en vagones de ferrocarril. Software de modelado: Autodesk VIZ 2008.

IV. HERRAMIENTAS PARA EL DESARROLLO DE SIMULADORES PARA ENTRENAMIENTO.

La industria de los juegos de computador o *videojuegos* ha comenzado a contribuir con valiosos productos y tecnologías a un buen número de industrias “serias”. Su tecnología se está introduciendo en campos como la defensa, la medicina, la arquitectura, la educación, el planeamiento de ciudades, etc. La industria del juego se ve ahora como fuente de innovación, tecnología, y productos especialmente para el desarrollo de simuladores para entrenamiento, tanto para uso militar como civil.

A. Características de los Motores de Juego.

El *Motor de Juego* (Game Engine) es el componente de software fundamental en la operación del videojuego. El motor de juegos combina los diversos elementos multimedia y los hace trabajar en conjunto. Gestiona la representación gráfica y otras tecnologías necesarias, pero puede también gestionar tareas adicionales tales como la inteligencia artificial que defina el comportamiento de los personajes o la detección de colisiones entre objetos del entorno virtual. El elemento más usual suministrado por un motor de juegos es la capacidad de dibujo en pantalla o *render*. Además resultan importantes otros subsistemas como son: (a) *Detección de Colisiones*, que calcula los efectos del choque entre objetos; (b) *Física*, que simula la gravedad y otras propiedades relacionadas con la física (c) *Inteligencia Artificial (AI)*, que controla el comportamiento de los personajes y objetos animados creados por el computador. (d) *Gestión de Red*, para aplicaciones que se ejecutan en modo multiusuario; (e) *Interfaz Gráfica de Usuario (GUI)*, que gestiona las ventanas, menús, la información superpuesta (HUDs), etc.

Para las características del STR resulta de particular importancia la *capacidad de representación de flujos mediante sistemas de partículas*. Por ello se ha valorado la disponibilidad de una arquitectura orientada a objetos que

incluya mecanismos predefinidos para la representación de incendios, explosiones y humos. Otro factor a considerar son las prestaciones en lo que se refiere a *Inteligencia Artificial (AI)* que aseguren la posibilidad de modelar la conducta de agentes para representar personas aisladas o multitudes. Los subsistemas de *modelado de propiedades físicas* y de *detección de colisiones* deben asegurar un comportamiento creíble durante el desplazamiento de personas y objetos.

Un último aspecto, relacionado con el personal disponible para acometer el desarrollo de la aplicación radica en las opciones que ofrece el motor de juegos en lo que se refiere a lenguajes de programación. Estas oscilan entre la exclusiva posibilidad de programación C++ a medio y bajo nivel y la programación visual que se desarrolla conectando componentes funcionales (cajas negras) en una estructura de árbol, que es característica de *Quest3D* [35]. Aunque en el entorno universitario es posible encontrar personal especializado en programación a medio y bajo nivel, se considera ventajoso el disponer de otras alternativas más simples.

B. Criterios para la elección de un Motor de Juegos.

Los entornos de desarrollo de gama alta para videojuegos y software de simulación de carácter comercial suelen ser, por una parte excesivamente costosos y por la otra suelen conllevar grandes limitaciones en cuanto a las licencias para la distribución del producto terminado. La primera dificultad suele mitigarse en el caso de Departamentos y Grupos de Investigación vinculados a la Universidad por la concesión de licencias educacionales y para investigación a precios reducidos e incluso gratuitas. Pero en caso de que el producto de la investigación amerite su distribución comercial nos encontraríamos con grandes dificultades debido a los términos en que estas licencias educacionales se conceden. Esto nos ha llevado a investigar el software disponible en el mercado. La *3D Engines Database* [36] del sitio Web *DevMaster.net* incluye un total de 289 entradas. De éstas hemos excluido las que se encuentran en etapas de desarrollo (versiones alfa o beta), quedándonos con 127.

Esta selección incluye tanto motores comerciales como de libre distribución. Considerando que el disponer del código fuente puede ser una garantía frente a una posible desaparición del proveedor, que dejara sin soporte y sin posibilidades de desarrollo ulterior a las aplicaciones desarrolladas sobre esa plataforma, hemos seleccionado las 71 que en que el código fuente está a disposición del usuario. Pero de esos 71 motores gráficos 3D, en la mayor parte de los casos se trata de software comercial en que el código fuente sólo se suministra para las licencias más costosas, cuyo precio puede superar los \$100,000 y con grandes restricciones para su utilización.

Como software de libre distribución y código abierto encontramos sólo 20. De ellas, no todas pueden considerarse incluidas en la categoría de *motores de juego*, al no cumplimentar requisitos como la posibilidad de programar comportamientos, la animación de caracteres, la Inteligencia Artificial (AI), la gestión de propiedades físicas, la detección de colisiones, etc., quedando como meros *motores gráficos 3D* que, como *OpenSceneGraph*, se limitarían a funcionar como

subsistemas especializados de los verdaderos motores de juego.

TABLA 1. SOFTWARE OPEN SOURCE ANALIZADO.

Motor	Licencia	Scripting	Editores	Física	Sist. de Partículas	Soporte de Red	Inteligencia Artificial
APOCALYX	GPL	●	●	●	●	●	●
Aviatrrix3D	LGPL				●		
Axiom Engine	LGPL			●	●		
Blender	GPL	●	●	●	●	●	●
Crystal Space	LGPL			●	●		
Cube 2	zlib/libpng	●	●	●	●	●	●
Delta3D	LGPL	●	●	●	●	●	●
Elemental Engine	Otro	●	●	●	●	●	●
GLScene	Mozilla			●	●		
HAWK	GPL			●	●		
Irrlicht Engine	zlib/libpng	●	●	●	●		
Lilith3D	GPL	●			●		●
Nevrax Library	GPL			●	●	●	
OGRE	LGPL			●	●		
OpenSceneGraph	LGPL	●	●	●	●		
Panda3D	Otro	●	●	●	●		●
QDTE	Otro			●	●		
Quesa	BSD				●		
Reality Factory	MIT	●	●	●	●	●	●
Nebula Device 2	MIT	●		●	●	●	●

Por este motivo establecimos como requisito el cumplimiento de los tres requisitos básicos enunciados en el epígrafe anterior: la implementación de *sistemas de partículas*, *física e inteligencia artificial* así como el suministrar posibilidad de *scripting* para el control de la aplicación, el disponer al menos de editores de escenas y el tener previsto el soporte para redes. Estos requisitos sólo son cumplidos por cinco de los paquetes de software analizados (Tabla 1): El *plug-in* de desarrollo para *Blender*, *Cube 2*, *Delta3D*, *Elemental Engine*, y *Reality Factory*. Un análisis detallado de sus características nos ha llevado a proponer la utilización del paquete *Delta3D*.

C. Delta3D.

Delta3D fue desarrollado en el *Modeling, Virtual Environments and Simulation Institute* (MOVES) dependiente de las Fuerzas Armadas de Estados Unidos y ubicado en Monterey, California. Ha sido creado precisamente para el desarrollo de simuladores de entrenamiento [38]. Se trata de un API coherente que integra, a manera de módulos, muchas bibliotecas preexistentes (Figura 13).

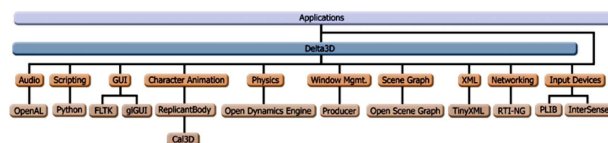


Figura 13. Estructura modular del Motor de Juegos Delta3D.

Cada uno de estos módulos consiste, ya sea en una de esas bibliotecas de código abierto, o en código fuente desarrollado al efecto por los creadores del sistema. En ambos casos, se ha procurado mantener los diversos módulos tan separados como ha sido posible. Por ello, si uno de los módulos que componen Delta3D es superado por otro proyecto *Open Source*, resultando no ser ya “el mejor de su clase”, es posible sustituirlo sin demasiadas dificultades.

Delta3D utiliza *OpenSceneGraph* (OSG) como módulo de renderizado. OSG es una biblioteca gráfica 3D *Open Source*

de alto rendimiento, usada por los desarrolladores de aplicaciones en campos tales como la simulación visual, los juegos, la realidad virtual, la visualización científica, y el modelado.

La simulación de propiedades físicas en Delta3D se logra a partir de la biblioteca *Open Dynamics Engine* (ODE). ODE es una biblioteca de alto rendimiento para simular la dinámica de cuerpos rígidos.

Para la animación de personajes se utiliza la *Character Animation Library 3D* (Cal3D). Cal3D es una biblioteca de animación de personajes 3D tridimensional basada en esqueletos escrita en C++. Una útil característica de Cal3D es la de los exportadores, *plug-ins* para los más populares programas de modelado (tanto de libre distribución como propietarios). Así, los artistas pueden utilizar sus herramientas de modelar preferidas para crear personajes, animaciones, y texturas, y después exportarlas en un formato que Cal3D puede utilizar para controlar los personajes en la aplicación. Además de Cal3D, también se utiliza *ReplicantBody*, otra biblioteca *Open Source* para animación de personajes construida sobre Cal3D y *OpenSceneGraph*, con la que se logra que en el movimiento de un personaje sus pies se mantengan sobre el terreno haciendo que el movimiento de un *avatar* parezca mucho más real.

La *Inteligencia Artificial* (AI) se gestiona en Delta3D a partir de las estructuras desarrolladas por J. Orkin [37] para el juego *F.E.A.R.* El sistema de planeamiento permite que los programadores definan “planes” para que el computador determine cómo llevarlos a efecto. Permite al programador crear comportamientos de AI complejos sin tener que generar un enorme número de estados, como sucedería en el caso de las *máquinas de estado finito* tradicionales.

Entre los módulos desarrollados específicamente para Delta3D se encuentran: un *Editor Gráfico de Niveles*; un renderizador avanzado para la simulación del terreno y la vegetación; un módulo de características ambientales avanzadas; un Editor para Sistemas de Partículas; la capacidad de registro y reproducción del desarrollo de la simulación; y un Visor de Modelos 3D.

El *Editor de Niveles* (Figura 14) permite a los desarrolladores la construcción de escenarios avanzados sobre una interfaz gráfica. Puede importar todos los formatos de modelos soportados por OSG, de manera que el desarrollador pueda colocarlos en el mundo virtual, definir sus movimientos, insertar disparadores, e incorporar la lógica del juego.

Merece una especial mención en el contexto de nuestro trabajo el *Editor de Sistemas de Partículas* (Figura 15). Este Editor permite utilizar herramientas gráficas para modificar las características de un sistema de partículas comprobando el resultado de manera inmediata y en tiempo real. Esto acelera el proceso de desarrollo, eliminando la necesidad de ejecutar la aplicación para ver el efecto de cambiar los parámetros de un sistema de partículas.

Por último hemos considerado la disponibilidad de un lenguaje para el desarrollo de *scripts* como uno de los factores críticos para el desarrollo de comportamientos avanzados al simulador sin necesidad de recurrir a la programación C++.

Para ello Delta3D emplea *Python*, un lenguaje interpretado de uso muy extendido.

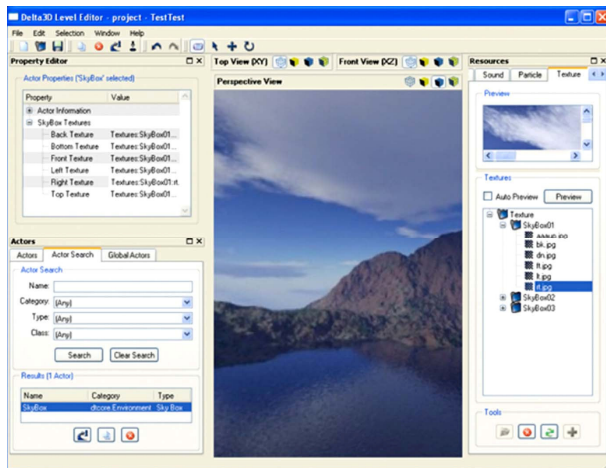


Figura 14. Delta3D: Interfaz del Editor de Niveles.

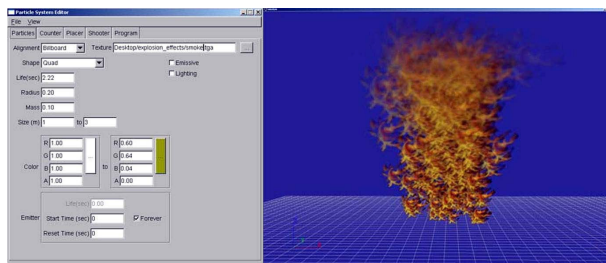


Figura 15. Delta3D: Interfaz del Editor de Sistemas de Partículas.

Un ejemplo de simulador construido sobre Delta3D que resulta interesante como precedente al desarrollo que proponemos, es el *DCOS FireFighter* (Figura 16) diseñado para la formación en la lucha contra incendios a bordo de navíos. Este simulador se desarrolló en el MOVES Institute como demostración de las posibilidades de Delta3D.

V. CONSIDERACIONES SOBRE LA INTERFAZ DE USUARIO.

Para concluir nuestra exposición debemos hacer referencia a algunos aspectos a tener en cuenta en el diseño de la Interfaz de Usuario. En primer lugar, será necesario desarrollar dos versiones, una para el director del entrenamiento, donde aparezcan los controles que permitan definir el comportamiento del escenario y controlar las situaciones a que se expondrán los sujetos del entrenamiento, y otra versión, sin estos controles que será la que utilicen los sujetos del entrenamiento.

Otro aspecto en el que se diferenciará la interfaz del director y la de los sujetos del entrenamiento se refiere al punto de vista. Para el que controla el ejercicio se utilizará una vista general desde arriba, en proyección isométrica, que abarque todo el territorio donde se está desarrollando la acción, mientras que la de los sujetos individuales será una vista en primera persona, es decir una proyección en perspectiva desde el ojo del observador. El punto de vista en este caso estará controlado por el *tracking* de la cabeza del sujeto.

Debe tenerse en cuenta las limitaciones en cuanto a la reproducción de los siniestros en nuestro mundo virtual, considerando que dependemos sólo de la percepción visual y la auditiva. Por este motivo será necesaria la implementación de HUDs (Head-Up Displays), viñetas gráficas o de texto encargadas de transmitir la información (Figura 16) que no puede comunicarse sólo mediante la escena simulada y que resulta necesaria al participante en el ejercicio. Como ejemplo de este tipo de información tenemos la temperatura del aire y la concentración y toxicidad de los productos de la combustión.



Figura 16. Captura de pantalla del simulador DCOS FireFighter, desarrollado sobre Delta3D [38]. Vista en primera persona, con HUDs informativos, por ejemplo, la temperatura ambiente, el tiempo transcurrido, etc..

VI. CONCLUSIONES.

El proyecto descrito en el presente artículo es una consecuencia lógica de la experiencia acumulada durante largos años de trabajo en el campo de la Seguridad contra Incendios. Hasta ahora los resultados del mismo se han materializado, por una parte en recomendaciones y planes elaborados para empresas e instituciones destinados a la prevención de siniestros y evitar la pérdida de vidas humanas en caso de producirse alguno de estos incidentes; por la otra parte en investigaciones de carácter fundamental sobre el comportamiento del incendio y la evacuación, cuyos resultados forman parte del contenido de libros, artículos y ponencias presentadas en congresos.

Pero ahora el desarrollo de las tecnologías de la información y en particular de la gráfica digital hacen posible hacerlo llegar a una audiencia mucho más amplia, logrando con ello, es nuestra esperanza, el preservar la vida de las personas. En ello reside nuestra misión.

VII. RECONOCIMIENTOS.

Los autores agradecen el apoyo y la colaboración del Ministerio de Fomento y de la Red Nacional de Ferrocarriles de España (RENFE) por la financiación de diversos proyectos de investigación que sirven de fundamento a este trabajo [26][27][31].

REFERENCIAS

- [1] McKee, A. "Using Simulators to Train for High-Risk Situations" *San Francisco State University, E-Learning Design and Development*, http://itec.sfsu.edu/wp/865wp/S05_865_mckee_simulation.pdf
- [2] R. Smith, "Technology Disruption in the Simulation Industry" en *Journal of Defense Modeling and Simulation*, vol. 3, n° 1. Enero 2006, B. P. Zeigler, ed.
- [3] D.C. Miller, y J.A. Thorpe, "SIMNET: The Advent of Simulator Networking". *Proceedings of the IEEE*. 83(8), (Agosto 1995) pp. 1114-1123.
- [4] G. Beer, VIRTUALFIRES - A Virtual Reality Simulator for Tunnel Fires. *Jornada Técnica Internacional "LA SEGURIDAD CONTRA INCENDIOS EN EL TRANSPORTE TERRESTRE DE PASAJEROS"*, GIDAI, Santander, 1955, pp. 263-274.
- [5] PM Stothard, JM Galvin, JCW Fowler, "Development, Demonstration and Implementation of a Virtual Reality Simulation Capability for Coal Mining Operations". *Proceedings ICCR Conference*, 2004
- [6] C. Ware, K. Arthur y K.S. Booth, "Fish Tank Virtual Reality". *INTERCHI '93*, pp. 24-29 abril, 1993.
- [7] "Quest3DLog » Blog Archive » Ship Simulator @ Wereld Haven Dagen", disponible en: <http://www.rgb255.nl/questlog/2006/09/13/ship-simulator-wereld-haven-dagen/>
- [8] J. A. González, C. Valero, J.C. de Francisco, J. Marco. "LA IMAGEN ESTEREOSCÓPICA EN FORMATO DIGITAL. UN NUEVO MEDIO DE EXPRESIÓN." *XIV Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Santander, junio 2002,
- [9] M.N. Louka y C. Balducelli, "Virtual Reality Tools for Emergency Operation Support and Training", *TIEMS 2001 International Conference on Emergency Management*, 2001
- [10] E.M. Kolasinski, "Simulator Sickness in Virtual Environments". *U.S. Army Research Institute for the Behavioral and Social Sciences*. Alexandria, Virginia, 1995.
- [11] C. Bosch, F. Ballester, C. Otero, M. Fernández, I. Coma, R. Togores et al. "VALLE®: A HIGHWAY DESIGN SYSTEM IN A VIRTUAL REALITY ENVIRONMENT". *Joint International Conference on Computing and Decision Making in Civil and Building Engineering*, Junio 14-16, 2006 - Montréal, Canada.
- [12] C. Bosch, F. Ballester, C. Otero, M. Fernández, I. Coma, R. Togores et al. "Integración de las Técnicas de Realidad Virtual en el Proceso de Diseño y Revisión de Proyectos de Infraestructuras Viarias: VALLE". *3er Congreso Internacional Ciudad y Territorio Virtual*, Bilbao, octubre 25 al 27 de 2006.
- [13] C. Otero, A. Cendrero, V. Bruschi, R. Togores, C. Manchado, R. Arias, "MOYSES V 3.0 MODELADOR Y SIMULADOR DE IMPACTO VISUAL." *XVIII Congreso Internacional de Ingeniería Gráfica*, Barcelona, 31 Mayo, 1 y 2 de Junio de 2006
- [14] J.C. Lee, "Johnny Chung Lee - Projects - Wii". Documento disponible en: <http://www.cs.cmu.edu/~johnny/projects/wii/>.
- [15] P. Morillo, J.M. Orduña, M. Fernández and J. Duato, "On the Characterization of Distributed Virtual Environment Systems", en *European Conference on Parallel Processing (Euro-Par' 2003)*, volume 2790 of Springer LNCS, pp. 1190-1198, Klagenfurt, Austria. August 2003. Springer Verlag.
- [16] R. Ramloll, J. Beedasy, B. Hudnall, N. Piland, B. Cunningham et al., "Distance Learning and Simulation Technologies to Support Bioterrorism Preparedness Education", *Proceedings of the ISCA 21st International Conference* (2006), ISBN: 1-880843-58-7, pp 235-241.
- [17] Bazjanac, V., "Virtual Building Environments (VBE) -applying information modeling to buildings." en *Ework and Ebusiness in Architecture, Engineering and Construction: Proceedings of the 5th European Conference on Product and Process Modelling in the Building and Construction Industry : ECPPM 2004*, 8-10 September 2004, Istanbul, Turkey. Eds. D. Dikbas, R. Scherer, A. Dikbas, S. Raimar. pp. 41-48
- [18] D.A. Campbell, "Building information modeling: the Web3D application for AEC" en *Proceedings of the twelfth international conference on 3D web technology*, pp: 173 - 176 Perugia, Italy, 2007. SIGGRAPH: ACM Special Interest Group on Computer Graphics and Interactive Techniques
- [19] J. Cheng and K. H. Law. "Using Process Specification Language for Project Information Exchange," *Proceedings of 3rd International Conference on Concurrent Engineering in Construction*, pp. 63-74, Berkeley, CA, July 1-2, 2002.
- [20] B. Karlsson, J.G. Quintiere, "Enclosure Fire Dynamics" CRC Press, 1999, pp. 14-17.
- [21] A. Ren, C. Chen, J. Shi y L. Zou, "Application of Virtual Reality Technology to Evacuation Simulation in Fire Disaster" en *Proceedings of the 2006 International Conference on Computer Graphics & Virtual Reality, CGVR 2006*, Las Vegas, Nevada, USA, June 26-29, 2006, pp. 15-21
- [22] *FDS-SMV Official Website* disponible en: <http://www.fire.nist.gov/fds/>
- [23] J.A. Capote, D. Alvear, M. Lázaro, P. Espina, "Estudio de la capacidad predictiva de la dinámica del incendio mediante modelado y simulación computacional: CFAST, OZONE, FDS". en *Montajes e instalaciones: Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones*, Año n° 36, N° 401, 2006 , pp. 79-83.
- [24] J.A. Capote, D. Alvear, "El Modelado y Simulación Computacional de Incendios: limitaciones y certidumbres" en: *Montajes e instalaciones: Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones*, Año n° 35, N° 392, 2005 , pp. 106-109
- [25] J.A. Capote, D. Alvear, M. Lázaro y P. Espina, "Analysis of the Ventilation Systems Influence during a Fire in Tunnel Tenability Conditions", *International Congress SMOKE CONTROL IN BUILDINGS AND TUNNELS*, Santander, 16 octubre 2008.
- [26] J.A. Capote, D. Alvear, M. Lázaro, P. Espina, J.L. Torero, S. Welch, I. Fletcher, "Simulación y análisis del desarrollo del incendio del edificio Windsor de Madrid" en *Dyna*, Vol. 82, N° 6, 2007 , pags. 283-290
- [27] J.A. Capote, D. Alvear, B. Quintana "Pasajeros a salvo del fuego: proyecto de norma EN 45545 de seguridad contra incendios en vehículos ferroviarios" en *Mapfre seguridad*, ISSN 0212-1050, Año n° 26, N° 105, 2007 , pags. 6-16
- [28] Capote, J. A., Alvear, D., Lázaro, M. and Espina, P. "Heat release rate and computer fire modeling vs. real-scale fire tests in passenger trains"; *Fire and Materials*, n° 32, pag.:213-229; 2008; DOI: 10.1002/fam.962.
- [29] Lazaro, M., Bohmer, H., Alvear, D., Capote, J.A. and Trouve, A., "Numerical Simulation of Fire Growth, Transition to Flashover, and Post-Flashover Dynamics in the Dalmarock Fire Test.", *Fire Safety Science - Proceedings of the Ninth International Symposium*, Karlsruhe, Germany, 2008.
- [30] J.A. Capote, D. Alvear, O.V. Abreu, A. Cuesta "Análisis de los parámetros de entrada en el Modelado de Simulación Computacional de Evacuación (MSCE)" en *Montajes e instalaciones: Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones*, ISSN 0210-184X, Año n° 38, N° 424, 2008 , pags. 96-102
- [31] P. Espina, J.A. Capote, D. Alvear, M. Lázaro "La Seguridad contra Incendios en las Grandes Estaciones Ferroviarias de Pasajeros". *VIII Congreso de Ingeniería del Transporte*, La Coruña, 2-4 julio 2008.
- [32] J.A. Capote, D. Alvear, O.V. Abreu, M. Lázaro y P. Espina, "La Influencia de la Temperatura Exterior sobre los Sistemas de Ventilación Natural en Grandes Atrios", *Informes de la Construcción*, Vol. 60, 511,49-57, julio-septiembre 2008
- [33] T. Roosendaal, S. Selleri, "The Official Blender 2.3 Guide: Free 3D Creation Suite for Modeling, Animation, and Rendering", *No Starch Press* (2007).
- [34] S. Hostikka, T. Korhonen, T. Paloposki, T. Rinne, K. Matikainen and S. Heliövaara, "Development and validation of FDS+Evac for evacuation simulation". *VTT Research Notes 2421*, 2008.
- [35] Ming-Hsin T., Chun-Hsiung H., Jing-Yi Z., "Game programming courses for non programmers" *Proceedings of the 2006 international conference on Game research and development*, Australia, pp. 219 - 223.
- [36] F. Skilton, *DevMaster.net - 3D Game and Graphics Engines Database*. Disponible en <http://www.devmaster.net/engines/>
- [37] J. Orkin, "Three States and a Plan: The AI of FEAR", *Game Developers Conference*. San Jose. California. 2006.
- [38] P. McDowell, R. Darken, J. Sullivan, E. Johnson, "Delta3D: A Complete Open Source Game and Simulation Engine for Building Military Training Systems" *JDMS*, Volume 3, Issue 3, July 2006, pp. 143-154