

Simulador de realidad virtual para la formación de operadores de grúa Torre

M.A. Gamón-Giménez, M. Pla-Castells, I. García-Fernández, A. Reyes-Lacueva y R.J. Martínez-Durá

Instituto de Robótica, Universidad de Valencia (UVEG)

Abstract

La utilización de simuladores basados en realidad virtual proporciona una solución a los diferentes inconvenientes del entrenamiento de operadores de maquinaria pesada. Entre las ventajas aportadas al ámbito de formación, se encuentran la reducción de riesgos laborales y costes económicos, el incremento en la productividad, y la utilización como herramienta objetiva de evaluación.

Este artículo presenta un sistema instruccional basado en simulación para el entrenamiento de operadores de grúa Torre. Este simulador destaca por su enfoque formativo mediante la inclusión de material docente interactivo, el aprendizaje en la maniobrabilidad de una grúa Torre a través de un conjunto de ejercicios y circuitos de entrenamiento, y la utilización de técnicas de realidad virtual del estado del arte (como shaders de iluminación, técnicas de sombreado y avatares cooperativos) que incrementan la experiencia de realismo obtenida. Se describe la arquitectura que compone el simulador, el diseño del entorno virtual basado en OpenSceneGraph, el sistema de autoevaluación, y las características de realismo del modelo dinámico de la grúa, como son la influencia del viento y las colisiones de los cables con otros objetos del entorno virtual. El sistema se complementa con un puesto de instructor que facilita el control, la evaluación, y la monitorización de los puestos de entrenamiento de un aula multipuesto.

Categories and Subject Descriptors (according to ACM CCS): I.3.7 [Computer Graphics]: Three-Dimensional Graphics and Realism—Virtual reality I.6.3 [Simulation and Modelling]: Applications—

1. Introducción

El entrenamiento de operadores de maquinaria pesada conlleva diferentes problemas tanto desde el punto de vista de la prevención de riesgos laborales como desde una perspectiva económica. La utilización de estos equipos por un usuario inexperto implica un alto riesgo, además de un mayor sufrimiento para la maquinaria.

En contraposición, la utilización de simuladores para tareas de entrenamiento proporciona una solución a estos inconvenientes, además de reducir los costes asociados a la formación de los operarios. Los simuladores son capaces de proveer entornos virtuales convincentes los cuales permiten la simulación de tareas de la vida real [Kim05]. El entrenamiento mediante simuladores está basado en la idea de que el usuario aprenda y recuerde mejor el conocimiento adquirido en la práctica, además de que fuerzan a los usuarios a

poner en práctica lo que han aprendido y enfrentarse a las consecuencias de sus decisiones [Far99].

Por otra lado, los simuladores cuentan con numerosas ventajas en el ámbito de la formación: económicas, ya que no se utiliza una máquina de producción para tareas formativas; un aprendizaje de mayor nivel, a través de ejercicios con alto valor didáctico; incremento en la productividad, mediante la repetición de las actividades o la capacidad de reproducir entornos hostiles; reducción de riesgos, al evitar el uso de maquinaria real por usuarios inexpertos [Far99]. Además proporciona una herramienta para la evaluación objetiva y fiable de los nuevos operarios de maquinaria, pudiéndose utilizar para la realización de pruebas de aptitud.

Existen en la actualidad diversos trabajos desarrollados con tecnología de realidad virtual para el entrenamiento de operadores de grúa. Entre los más recientes, destacan los si-

muladores de grúas pórtico [SLM*99] [Rou05] [KRMP07], grúas puente [WMLX98], grúas móviles [Hua03] y grúas de barco [DA04]. Sin embargo, no existe ningún trabajo específico sobre sistemas instruccionales de grúa Torre basados en realidad virtual.

Este artículo presenta un simulador basado en tecnología de realidad virtual para el entrenamiento, formación y evaluación de operadores de grúa Torre, desarrollado por la Universitat de Valencia, que incorpora numerosas características modernas en el ámbito de la formación mediante la simulación. Entre ellas destacan la inclusión de material didáctico multimedia, la utilización de técnicas de visualización del estado del arte, un modelado dinámico realista de la grúa, un sistema de autoevaluación, y la posibilidad de trabajar de manera coordinada en un aula multipuesto.

El resto del artículo se estructura como sigue. La Sección 2 describe la arquitectura que compone el simulador. En la Sección 3 se explica el funcionamiento del módulo teórico a través de un visualizador multimedia 3D. La Sección 4 describe los diferentes componentes que forman la simulación virtual de una grúa Torre. A continuación, la Sección 5 se centra en la evaluación e informes de los ejercicios. La Sección 6 describe una aplicación que monitoriza y controla los puestos de entrenamiento un aula informática. Finalmente, se presentan las conclusiones del artículo y el trabajo futuro.

2. Estructura del simulador

El simulador de grúa Torre es un sistema de realidad virtual de bajo coste, basado en PC, que permite la simulación realista y funcional del manejo de una grúa Torre. La utilidad práctica de esta aplicación, es la utilización de la misma en múltiples puestos conectados entre sí en el aula informática de un centro de formación.

El simulador consta de dos módulos integrados en la misma aplicación principal (Figura 1):

- Un **módulo teórico**, consistente en una presentación multimedia de material didáctico para el seguimiento de un curso de formación. Esta presentación está basada en un conjunto de pantallas o transparencias que contienen elementos gráficos interactivos. Este módulo ha sido implementado utilizando un *visor de transparencias 3D*, que se detalla en el siguiente apartado. El contenido de estas transparencias constituye un material complementario al contenido teórico de un curso de operador, y destacan por un enfoque visual e interactivo de conceptos, ilustraciones, diagramas, normativas y recomendaciones. El contenido teórico de estas transparencias ha sido desarrollado utilizando los libros [MG06] y [FLC06], que coincide con el material docente de los cursos de formación de operadores.
- Un **módulo práctico**, que consiste en un entorno de construcción virtual, en el cual la grúa Torre se encuentra inte-

grada, y que permite la operación y maniobrabilidad típica de una grúa a través de un conjunto de ejercicios. El escenario virtual incorpora una zona de obra en la que se desarrollan diversas tareas de traslado de cargas, encofrado de pilares, colocación de redes y plataformas, etc. Los ejercicios están planificados de manera que se puede interactuar con avatares (encargados de obra, operarios, señalistas, auxiliares de enganche) que nos dan indicaciones del trabajo a realizar o nos ayudan en nuestro cometido. Durante la ejecución del ejercicio, un sistema de evaluación registra la actividad del usuario en base a un conjunto de parámetros tales como el tiempo de ejecución de las tareas, las colisiones de la carga con el entorno, maniobras peligrosas o las decisiones tomadas para el transporte de material, y al final del mismo genera un informe detallado de los resultados obtenidos.

Figura 1: Estructura del simulador. La aplicación está compuesta de los módulos teórico y práctico. Cada módulo está, a su vez, compuesto por varios componentes. Se muestra el contenido de los ficheros de definición de transparencias y ejercicios (FDT y FDE).

Por otra parte, para poder controlar y monitorizar la actividad de los diferentes puestos de simulación, se ha creado una aplicación denominada *Puesto de Instructor*, con la funcionalidad de lanzar unidades teóricas o ejercicios prácticos para cada puesto conectado. Además, la aplicación permite gestionar los usuarios del simulador, y consultar informes de los ejercicios realizados, todos ellos centralizados en una base de datos remota.

3. Visor de transparencias 3D

Para la representación del contenido del módulo teórico se ha implementado un visor de transparencias 3D, que constituye un mecanismo para mostrar pantallas con contenido multimedia. Este visor implementado con OpenSceneGraph [Osf04], es capaz de visualizar imágenes, vídeos, texto y modelos 3D, en forma de pantallas, siguiendo las pautas típicas de una presentación con ordenador (Figura 2).

Figura 2: Ejemplo de transparencia. El contenido está formado por imágenes, texto, botones y un modelo 3D de una grúa, que es posible rotar.

Cada transparencia está formada por uno o varios elementos gráficos de los siguientes tipos:

- Texto explicativo y enunciados correspondientes a la normativa vigente, recomendaciones, conceptos teóricos, etc.
- Imágenes renderizadas de partes de la grúa, de materiales de construcción, figuras explicativas, señalizaciones, situaciones de peligro, etc.

- Vídeos y animaciones renderizadas con ejemplos de maniobras peligrosas, accidentes típicos, etc.
- Modelos tridimensionales de grúas y estructuras, que pueden ser rotados o trasladados, y cuyas piezas pueden ser seleccionadas mostrando una breve explicación.
- Botones interactivos, que describen propiedades al accionarlos o resaltan cierto elemento.
- Botones de acción, para avanzar o retroceder en las transparencias, o salir de la presentación.

La definición de cada transparencia está especificada en un *Fichero de Definición de Transparencias (FDT)* con formato XML, que es fácilmente procesable por un *parser*. Los elementos gráficos que forman la transparencia se definen mediante un conjunto de etiquetas predefinidas, que describen el tipo, la posición, el modo de funcionamiento y los parámetros necesarios, así como las acciones a realizar por los eventos producidos por la interacción con el usuario.

La estructura del lenguaje XML implementado en el FDT es la siguiente:

```
<slide background="" name="" size="">

  <!-- Boton -->
  <button file="" pos="" size="">
    <event_over>
      <on_button file="">
    </event_over>
    <event_click>
      <go_slide name="" />
    </event_click>
  </button>

  <!-- Imagen -->
  <img file="" pos="" size="" />

  <!-- Video -->
  <movie file="" loop="" pos="" size="" />

  <!-- Animacion -->
  <animation file="" num="" pos="" size="" />

  <!-- Modelo -->
  <model file="" pos="" size="">
    <node name="">
      <img file="" pos="" size="" />
    </node>
  </model>

</slide>
```

4. Módulo práctico

En esta sección se describen los componentes que forman el módulo práctico: la representación del entorno virtual, los avatares cooperativos, la ejecución de un ejercicio, el modelo dinámico de la grúa, el sistema de sonido 3D, y los mandos de grúa.

4.1. Representación del entorno virtual

El entorno virtual creado muestra una zona de obra, en el que aparecen diversas grúas Torre trabajando sobre un edificio en construcción. Se han modelado diferentes materiales de construcción, andamios, plataformas, estructuras de encofrado, etc., así como circuitos vallados de entrenamiento en forma circular, angular y zig-zag.

El escenario completo ha sido modelado utilizando la herramienta 3D Studio Max, con la que se han diseñado modelos gráficos 3D de alta calidad utilizando imágenes reales digitalizadas. Para aumentar la sensación de realismo, se han utilizado técnicas como *Bump Mapping*, aplicadas a las paredes del edificio o en ciertas estructuras y materiales de construcción, así como la técnica *Render-To-Texture*, la cual genera nuevas texturas de los objetos modelados con respecto a los ajustes de iluminación, sombreado y opacidad, obteniendo un entorno en el que se percibe la incidencia de la luz y la aparición de zonas sombrías (Figura 3). Por último, el escenario final se ha exportado mediante el plugin *osgExp* [Jen02], que permite generar un modelo que puede ser cargado por OpenSceneGraph [Osf04].

Figura 3: Iluminación y sombreado del entorno virtual. El escenario representado muestra el resultado de aplicar la técnica *Render-To-Texture* con el programa de modelado, donde se aprecian la iluminación solar y las zonas de sombra.

Para representar el cielo, se ha optado por implementar un *Skybox* que, a través de la combinación de un conjunto de texturas, permite mostrar el aspecto del cielo en diferentes momentos del día: el amanecer, la mañana, la tarde y la noche; y la presencia de nubulosidad: despejado o cubierto de nubes. El sol del escenario virtual, se muestra a través del efecto de un *Lens Flare* o destello, que se ilumina al intersectar el vector de orientación de la cámara con la posición del sol. Por último, también se ha representado la luna, los planetas y estrellas, mediante la biblioteca *osgEphermeris* [Bur06], la cual provee una vista a nivel de suelo de cuerpos celestiales, a partir de latitud y longitud, y la fecha y hora del día. Aunque con esta biblioteca es posible representar también el cielo y el sol, hemos preferido utilizar nuestro propio skybox y nuestro sol, ya que los primeros no proporcionan un aspecto visual tan realista.

Las condiciones atmosféricas también se han implementado en el entorno virtual. Mediante la extensión *osgParticle* de OSG, es posible generar una precipitación de partículas de lluvia y nieve, parameterizables en cuanto a velocidad, tamaño, color, y la influencia del viento en su caída. La niebla también está incluida en la representación mediante OSG, y su densidad es ajustable. Con todo ello, se ha conseguido recrear un ambiente de trabajo con diferentes condiciones atmosféricas.

El gancho de la grúa y la carga transportada incorporan un efecto de sombra en tiempo real (Figura 4), implementado mediante la extensión *osgShadow* de OSG, el cual hace uso de la técnica *ParallelSplitShadowMap* [ZSXL06]. Esta implementación mediante shaders, permite reproducir con gran fidelidad efectos de sombreado sobre la escena y mejora cuantitativamente la sensación de realismo.

Figura 4: Efecto de sombra en tiempo real. El gancho y la carga incorporan un efecto de sombra implementado con la técnica *ParallelSplitShadowMap* presente en la extensión *osgShadow* de OSG.

Adicionalmente, en la pantalla de visualización del escenario, se han integrado otros elementos gráficos superpuestos (o HUDs) que aportan información de estado de la grúa o de las tareas a realizar, y una barra de menús con opciones más avanzadas, como el ajuste de la hora del día y las condiciones atmosféricas. Para representar los HUDs, se ha utilizado el interfaz gráfico CEGUI [Tur05], que permite representar también cuadros de diálogo cuando se requiere alguna decisión o respuesta por parte del aprendiz.

Por último, el simulador permite representar las imágenes en 3D, ya sea mediante técnicas de estéreo anaglífico, estéreo activo o pasivo.

4.2. Señalistas y operarios de obra

En esta aplicación, se ha realizado la importancia de utilizar avatares para representar a operarios de la obra realizando las tareas típicas de un entorno de construcción. De esta manera, tenemos a operarios colocando ladrillos de una pared, montando una hormigonera, utilizando una máquina de cortar o transportando material.

Todos estos avatares han sido representados en el entorno virtual mediante *osgCal* [LIF03], que permite adaptar personajes animados con la biblioteca *Cal3D* [Des01]. Esta última, permite introducir avatares en una aplicación de realidad virtual, que han sido creados con un programa de modelado (como 3D Studio Max).

Los avatares utilizados pueden ser estáticos, realizando una labor o animación en una misma posición de la escena (como p.e. el operario que utiliza la hormigonera), o pueden ser móviles, desplazándose de un lugar a otro de la escena (como p.e. el avatar que transporta el material), incorporando en este último caso una trayectoria en forma de puntos de control y animaciones a realizar en cada punto.

El rol de encargado de obra también está presente en el simulador mediante un avatar, que en todo momento asiste al usuario acompañándole al lugar de trabajo o indicándole las tareas a realizar. Otro de los roles mostrados es el de auxiliar de enganche, cuya misión es la de colocar una eslinga en el gancho que sujete la carga a transportar.

Existe un caso especial de avatar, denominado *señalista*, que se encarga de dar órdenes al usuario del simulador en ejercicios donde se requiere la presencia de un guía para realizar una maniobra sin la visibilidad adecuada (Figura 5). Este tipo de avatar incorpora un conjunto de reglas de inteligencia artificial, que describen el tipo de señal a indicar (la animación representada) al usuario, en función de la posición de la carga y el estado de la maniobra. El avatar señalista es capaz de guiarnos a la posición de destino de la carga, mediante la consulta de un mapa de la escena, y es lo suficientemente preciso como para que se puedan realizar maniobras con obstáculos o con escaso margen de error.

Figura 5: Avatares cooperativos. Un avatar maniobra con el cubilote, de manera coordinada con los movimientos de la grúa, para realizar el encofrado. El avatar señalista indica las acciones a realizar por el operador de grúa.

En los avatares de la escena, existe un control de colisiones de los mismos con el gancho de la grúa o la carga, que provoca una animación de desfallecimiento de la figura humana representada, y la posterior consecuencia en el uso del simulador (normalmente la penalización del ejercicio).

4.3. Ejecución del ejercicio

El módulo práctico del simulador está compuesto de un conjunto de ejercicios, que describen diversas situaciones típicas de trabajo o maniobras con diferentes tipos de cargas y emplazamientos. traslado de porta-cargas y cubilotes, montaje de redes y plataformas, encofrado de pilares, consulta del diagrama de cargas, maniobras con señalista,... Estos ejercicios han sido elaborados conjuntamente con técnicos y formadores de la Fundación Laboral de la Construcción y el Centre de Formació Gaudí, y están basados en prácticas reales de los cursos de operador de grúa Torre.

Los ejercicios están descritos mediante *Ficheros de Definición de Ejercicios* (FDE) con formato XML, que de manera secuencial, indican el conjunto de pasos que debe realizar el usuario. Entre otras cosas, el FDE especifica: la configuración del escenario, la situación de los objetos, las acciones de los avatares, los mensajes a mostrar, y el conjunto de tareas a realizar.

Al iniciar un ejercicio, el usuario toma el control de un avatar (en forma de operario) en tercera persona (Figura 7). Para ello, el usuario del simulador dispone un dispositivo (joystick o gamepad) para desplazarse por el entorno, cambiar su punto de vista, o interactuar con algunos elementos de la obra. Mediante la comprobación de intersecciones con un *politopo* que envuelve la figura del avatar, evitamos que se puedan atravesar paredes o pasar por encima de otros objetos del escenario, sin chocar antes con ellos.

Antes de poder tomar el control de la grúa, debemos realizar una serie de acciones habituales que se dan al iniciar una

jornada de trabajo: calzarse los Elementos de Protección Colectiva (o EPIs), activar la toma de corriente de la grúa y revisar las indicaciones de seguridad del Libro de Obligaciones del Gruísta. Estas acciones, indicadas por un avatar "cargado de la obra", se realizan mediante la selección de objetos de la escena y verificando la información mostrada en cuadros de diálogo, presentada con el interfaz CEGUI.

El usuario del simulador dispone de un mando réplica del mando original de una grúa Torre, con el que ponerla en funcionamiento y maniobrar. Una vez que la grúa ha sido rearmada, el operador ya puede iniciar la tareas encomendadas.

Para la ayuda en las tareas de enganche, se utiliza una figura cilíndrica semitransparente colocada sobre el objeto de carga, denominada *zona de enganche*, que sirve como indicador de que el enganche con la carga es factible (Figura 6). Dicha figura, inicialmente de color rojo, se torna de color verde cuando el gancho de la grúa se encuentra en el interior del cilindro, indicando que el gancho se encuentra en la zona apropiada para realizar el enganche. Una vez situado el gancho, el usuario acciona la bocina del mando de la grúa, y un avatar asistente colocará la eslinga para sujetar la carga.

Figura 6: *Zona de enganche de la carga. Un cilindro de color rojo representa la zona segura del gancho para poder realizar el enganche. Cuando el gancho se encuentra en la zona de enganche, el cilindro cambia a color verde.*

Para facilitar la visión del entorno de obra, se han creado diferentes vistas que son accesibles desde el dispositivo de control, o desde el teclado. Así pues, podemos observar con la vista desde la cabina, la vista aérea de la zona de trabajo, la vista en tercera persona (con el avatar delante de nosotros), y la vista en primera persona (observando desde los ojos del avatar) (Figura 7). Otra de las vistas implementadas es la del seguimiento del gancho/carga, que actualiza automáticamente el punto de vista para seguir cómodamente el transporte de una carga.

Figura 7: *Punto de vista del usuario. El operador dispone de varios puntos de vista, como la vista en primera persona, en tercera persona, o una vista aérea. También es posible trabajar con la vista desde la cabina.*

4.4. Modelo dinámico de la grúa Torre

El modelo dinámico utilizado para simular la grúa Torre está diseñado siguiendo la dinámica del sólido rígido y está implementado con la biblioteca de programación ODE [Smi01]. Este modelo describe los movimientos de traslación del carro, rotación de la pluma y elevación del gancho de una grúa real. Los valores de tiempos de respuesta de los

motores, curvas de aceleración, velocidad máxima y velocidad de frenado, se han tomado a partir de las especificaciones de una grúa real.

Además, se ha implementado la influencia del viento sobre la estructura de la grúa, el cual afecta especialmente al movimiento del gancho y la carga, contribuyendo a simular condiciones atmosféricas adversas. El modelo de viento empleado permite modificar parámetros tales como la velocidad y dirección del viento o la existencia de rachas de distinta intensidad y frecuencia. De esta manera es posible realizar simulaciones en una amplia variedad de situaciones.

Figura 8: *Simulación de los cables de elevación. El modelo dinámico empleado permite reproducir la oscilación transversal del cable y la formación de catenaria en los tramos horizontales.*

Con el fin de conseguir un mayor grado de realismo en la simulación de la grúa se ha incorporado un modelo dinámico del polipasto de elevación, compuesto por el cable y un conjunto de poleas, que reproduce la oscilación transversal de los cables. El modelo dinámico empleado [GPM08] considera la detección de colisiones de los cables con los objetos del escenario y permite una simulación realista de los cables evitando los problemas de inestabilidad numérica que se derivan de la elevada tensión mecánica a la que están sometidos los cables. La Figura 8 muestra una imagen del simulador en el que se puede apreciar la formación de catenaria en los tramos horizontales de cable que van de los motores, situados en la torre de la grúa, hasta el carro de distribución.

La representación gráfica de los cables se ha llevado a cabo por medio de cilindros, empleando desplazamiento de textura para representar el desplazamiento longitudinal del cable a través de las poleas del polipasto. Con el fin de evitar problemas de aliasing y de discontinuidades de los cables en la representación, se ha empleado la técnica híbrida propuesta en [GPM08]. Esta técnica permite obtener la sensación de volumen en el cable cuando éste está cerca del punto de vista, así como la utilización de texturas y materiales para representarlo. Pero además, cuando la distancia del cable al observador aumenta, haciendo que el grosor aparente del cable sea menor que uno o dos píxeles se evita la aparición de aliasing sin necesidad de utilizar técnicas de anti-aliasing por hardware.

4.5. Mandos de la grúa y dispositivos de guiado

Para contribuir con una reproducción del entorno de trabajo real, se emplean mandos reales de grúa Torre, que permiten que el alumno pueda familiarizarse con un dispositivo que posteriormente utilizará en la grúa real.

El simulador es capaz de trabajar con dos tipos diferentes de mandos de grúa, que emplean palancas y botones para el

manejo de la misma (Figura 9). Los mandos han sido sensorizadas utilizando placas de E/S con salida USB y compatibles HID, por lo que son reconocidas como dispositivos de juego por el sistema operativo.

Figura 9: Mando de grúa Torre utilizado en el simulador. El mando está sensorizado con una placa de E/S con salida USB y compatible HID.

Además de los mandos de grúa, el sistema funciona con otros dispositivos de guiado, tales como joysticks y gamepads, que actúan como controles del avatar que utiliza el usuario para desplazarse por el escenario virtual y permiten cambiar el punto de vista de la cámara, además de accionar características adicionales del simulador.

Por otra parte, en el simulador se incorpora la posibilidad de utilizar un sistema de captura de movimientos o *tracker*, el cual dirige el punto de vista de la cámara en función de un sensor acoplado en la cabeza del usuario (normalmente en una gorra), evitando el uso del joystick o gamepad para cambiarlo. En cualquier momento de la simulación, podemos activar la asistencia del tracker para fijar nuestro punto de vista sobre la carga o el lugar de emplazamiento, con sólo hacer un movimiento con la cabeza.

Para controlar todos los dispositivos presentes en el simulador, se ha diseñado un biblioteca de sensorización que permite configurar las funciones de cada aparato de manera sencilla. Mediante un panel de configuración, implementado con CEGUI [Tur05], se puede asignar cualquier funcionalidad disponible a cualquier botón, palanca o interruptor de cualquiera de los dispositivos.

4.6. Sonido 3D

El sistema de simulación integra sonido espacial 3D que reproduce el sonido ambiental, el ruido de los motores de la grúa en el arranque, el funcionamiento normal y la parada, la voz del avatar encargado de la obra, los diferentes sonidos de colisión y las alarmas.

Los sonidos han sido implementados mediante *osgAL* [Bac04], que a su vez utiliza el API *OpenAL* [Tec03] para renderizar audio posicional y multicanal en tres dimensiones. Esta biblioteca es capaz de integrar el sonido en nodos especiales (*SoundNode*) de OSG, de manera que al recorrer el grafo de escena se calcula la posición y orientación del sonido. Esta característica permite reproducir sonido 3D en un entorno virtual, en función de la posición de los nodos *SoundState* (emisores de sonido o *emitters*), y la vista de la cámara (*listener*) en la escena.

5. Evaluación y Generación de informes

Para que el simulador pueda ser utilizado como una herramienta de evaluación de los nuevos operadores, se ha diseña-

do un sistema de valoración basado en la actividad desarrollada por los usuarios en los ejercicios prácticos, que además proporciona un documento detallado con los resultados obtenidos.

En el simulador de grúa Torre, el cómputo de la evaluación está basado en los siguientes factores:

- Ejecución completa de los objetivos del ejercicio, ponderado con el tiempo empleado para ello.
- Realización de determinadas maniobras en el orden correcto, elección el lugar de trabajo más seguro o utilización de piezas de carga adecuadas.
- Recuento de colisiones de la carga o el gancho con edificaciones, andamios, estructuras o el propio suelo.
- Anotación de situaciones o maniobras peligrosas como trasladar carga por encima de operarios, u oscilaciones de la carga demasiado pronunciadas, incluidos los accidentes al golpear con un avatar, o la rotura de la máquina.

Todos estos factores se ponderan para obtener un valor numérico que mide la evaluación del ejercicio realizado.

Al terminar un ejercicio, los resultados de la evaluación se presentan mediante una pantalla, implementada con CEGUI [Tur05], que muestra el resultado final de la evaluación, y también mediante un documento generado en línea, con formato XML y una hoja de estilo (CSS), que resume la actividad del ejercicio y que denominamos *Informe del ejercicio*. El formato del informe permite que pueda ser mostrado por cualquier navegador web, siendo fácilmente salvable e imprimible.

El informe del ejercicio refleja de manera detallada los resultados en los factores anteriormente mencionados, así como la valoración parcial en cada uno de ellos, y el resultado final. Además, este documento incorpora gráficos y estadísticas de la oscilación del gancho o de las colisiones producidas, así como la progresión del alumno en los últimos ejercicios realizados (Figura 10).

Figura 10: Informe de evaluación. Presenta los datos académicos del usuario, la realización de las partes en las que se divide el ejercicio, las colisiones producidas, gráficas de oscilación del gancho y de las colisiones, y la valoración final.

5.1. Base de datos de usuarios y ejercicios

La concepción del simulador como puesto de entrenamiento en un aula de formación, implica la centralización de la información generada en cada sesión de prácticas realizada. Básicamente, los datos relevantes que son propicios a ser guardados son los usuarios y los ejercicios que éstos han realizado. Estos datos se almacenan en una base de datos remota.

La aplicación del simulador permite dos tipos de usuarios: administradores, que pueden realizar tareas de gestión de usuarios y acceder a los informes de ejercicios realizados por otros usuarios; y aprendices, que únicamente pueden realizar los ejercicios del módulo práctico y consultar los resultados obtenidos en la evaluación.

La gestión de los usuarios puede realizarse mediante una opción del propio simulador (solo presente para usuarios administradores), o bien mediante la aplicación de Puesto de Instructor. A su vez, también es posible acceder a los ejercicios realizados y obtener informes de los ejercicios.

Al iniciar una sesión, el alumno se identifica en el simulador introduciendo su nombre de usuario y contraseña, de manera que los ejercicios que éste realice son almacenados automáticamente en la base de datos.

La información almacenada sobre los usuarios es un perfil de sus datos académicos, que será la que aparezca en la cabecera de los informes de ejercicios, mientras que cada ejercicio guardado se relaciona directamente con el usuario que lo realizó, registrando la fecha de realización, el tiempo transcurrido, y todos los parámetros contemplados en la evaluación.

6. Puesto de instructor

El módulo de *Puesto de Instructor* es una aplicación independiente, desarrollada con la biblioteca de interfaces gráficas *wxWidgets* [Roe04], que permite monitorizar y controlar el estado de ejecución de las diferentes puestos de entrenamiento conectados a una red de área local de un aula de formación.

Este programa mantiene conexiones bidireccionales con una lista de puestos configurables desde la aplicación, a través del protocolo UDP, de manera que se reporta la actividad de los puestos de entrenamiento y se envían órdenes de ejecución de un determinado ejercicio o unidad teórica.

Al iniciar una sesión en uno de los puestos de simulación, se envía un paquete de datos informando de la puesta en marcha y del nombre del usuario que ha iniciado la sesión, que la aplicación del instructor recoge y procesa para actualizar en la interfaz gráfica los puestos de entrenamiento activos (Figura 11). Cada vez que un usuario empieza una unidad teórica o realiza un ejercicio del módulo práctico, también se informa al Puesto de Instructor.

Figura 11: *Puesto de Instructor. Los puestos de entrenamiento activos aparecen habilitados en el interfaz. Se indica el estado de ejecución del puesto activo, y el nombre del usuario que ha iniciado la sesión en el puesto.*

La aplicación permite que el instructor realice las siguientes acciones, sobre cada puesto activo:

- Iniciar una unidad teórica o un ejercicio en uno o varios puestos a la vez, o bien parar la unidad o ejercicio actual.
- Asignar un usuario a un puesto determinado, en el caso de no haya iniciado la sesión todavía.
- Crear, modificar o borrar usuarios de la base de datos.
- Revisar la progresión de los usuarios en cuanto a la nota media de la evaluación en cada uno de los ejercicios.
- Consultar los informes de los ejercicios realizados por cada usuario.

De esta manera, el instructor dispone de una herramienta que le informa de lo que están realizando cada uno de los alumnos, permite revisar la evaluación de los ejercicios, y es capaz de lanzar actividades en los puestos de manera global o individual.

7. Conclusiones

En el presente artículo se ha mostrado un simulador basado en realidad virtual para el entrenamiento de operadores de grúa Torre, desarrollado por la Universidad de Valencia. Con esta aplicación se pretende dar una solución a los diferentes problemas encontrados en la formación de operadores de maquinaria pesada, tanto en el aspecto económico como en el de riesgos laborales, además de constituir una herramienta capaz de incrementar la productividad de los operadores, y de evaluar las habilidades y capacidad de maniobra de los mismos.

El enfoque formativo de la aplicación favorece la utilización de la misma en cursos de formación de operadores, puesto que incorpora material docente en formato multimedia interactivo, y permite la operación y maniobrabilidad de una grúa Torre en un escenario de obra virtual, a través de un conjunto de ejercicios y circuitos de entrenamiento. Además, se ha diseñado un aplicación que sirve al instructor de un aula de formación como herramienta de control, evaluación y monitorización de los puestos de trabajo.

En la representación virtual del escenario de obra se han utilizado técnicas vanguardistas de modelado que incrementan el realismo conseguido, y se incorpora la presencia de avatares inteligentes que cooperan en las tareas de los ejercicios. El modelo dinámico de la grúa incluye la influencia del viento sobre la estructura de la grúa, además de la detección de colisiones de los cables de la grúa con los objetos de la escena.

Actualmente, el simulador de grúa Torre se encuentra en proceso de implantación en diversos centros de formación nacionales, como la Fundación Laboral de la Construcción o el Centre de Formació Gaudí, y está sujeto a continuas revisiones por parte de los instructores que lo utilizan.

Las principales mejoras que se esperan desarrollar se centran en ampliar los escenarios de obra reproducidos, incorporar nuevos ejercicios y tareas a realizar, y diseñar pruebas de homologación similares a las que realizan los cursos de operador para validar a los aprendices.

References

- [Bac04] BACKMAN A.: OpenSceneGraph Audio Library (osgAL), 2004. <http://www.vrlab.umu.se/research/osgAL>.
- [Bur06] BURNS D.: OpenSceneGraph Ephemeris Model (osgEphemeris), 2006. <http://andesengineering.com/Projects/OsgEphemeris>.
- [DA04] DAQAQ M., A.H.NAYFEH: A virtual environment for ship-mounted cranes. *International Journal of Modelling and Simulation* 24, 4 (2004), 272–279.
- [Des01] DESMECHT L.: Cal3D, 2001. <http://home.gna.org/cal3d>.
- [Far99] FARMER E. (Ed.): *Handbook of Simulator-Based Training*. Ashgate Publishing Limited, 1999.
- [FLC06] FLC: *Curso de operador de grúa torre. Fundación Laboral de la Construcción (FLC)*. Tornapunta Ediciones, 2006.
- [GPM08] GARCÍA-FERNÁNDEZ I., PLA-CASTELLS M., MARTÍNEZ-DURÁ R. J.: Elevation cable modelling for interactive simulation of cranes. In *ACM SIGGRAPH Symposium on Computer Animation* (July 2008), pp. 173–182.
- [Hua03] HUANG J.-Y.: Modelling and designing a low-cost high-fidelity mobile crane simulator. *International Journal of Human-Computer Studies* 58, 2 (February 2003), 151–176.
- [Jen02] JENSEN R. S.: OpenSceneGraph Max Exporter (OsExp), 2002. <http://osgmaxexp.wiki.sourceforge.net>.
- [Kim05] KIM G.: *Designing Virtual Reality Systems: The Structured Approach*. Springer, 2005.
- [KRMP07] KORKEALAAKSO P. M., ROUVINEN A. J., MOISIO S. M., PEUSAARI J. K.: Development of a real-time simulation environment. *Multibody System Dynamics* 17 (2007), 177–194.
- [LIF03] LOPEZ R., IGLESIAS J. A., FARRE A.: Cal3D adapter for OpenSceneGraph (osgCal), 2003. <http://osgcal.sourceforge.net>.
- [MG06] MENÉNDEZ GONZÁLEZ M. A.: *Manual para la formación de operadores de grúa torre*. Editorial Lex Nova, 2006.
- [Osf04] OSFIELD R.: OpenSceneGraph, 2004. <http://www.openscenegraph.org>.
- [Roe04] ROEBLING R.: wxWidgets, 2004. <http://www.wxwidgets.org>.
- [Rou05] ROUVINEN A.: Container gantry crane simulator for operator training. In *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics* (2005), Professional Engineering Publishing, (Ed.), vol. 219, pp. 325–336.
- [SLM*99] SERÓN F., LOZANO M., MARTÍNEZ R., PÉREZ M., VEGARA P., CASILLAS J., MARTÍN G., FERNÁNDEZ M., PELECHANO J., BRAZÁLEZ A., BUSTURIA J.: Simulador de gruas portuarias. In *Congreso Español de Informática Gráfica (CEIG'99)* (Jaén, 16-18 Junio 1999), Universidad de Jaén (Servicio de Publicaciones e Intercambio Científico), (Ed.).
- [Smi01] SMITH R.: Open Dynamics Engine (ODE), 2001. <http://www.ode.org>.
- [Tec03] TECHNOLOGY C.: Open Audio Library (OpenAL), 2003. <http://www.openal.org>.
- [Tur05] TURNER P.: Crazy Eddie's GUI (CEGUI), 2005. <http://www.cegui.org.uk>.
- [WMLX98] WILSON B., MOURANT R., LI M., XU W.: A virtual environment for training overhead crane operators : real-time implementation. *IIE Transactions* 30 (1998), 589–595.
- [ZSXL06] ZHANG F., SUN H., XU L., LUN L. K.: Parallel-split shadow maps for large-scale virtual environments. In *ACM Conference on Virtual Reality Continuum And Its Applications* (Hong Kong, 14-17 June 2006), pp. 311–318.