

Una metodología eficiente para la generación de entornos virtuales en simuladores de conducción ferroviaria



Carlota Tovar Pérez
Jose María Cabanellas Becerra
Ginés Jesús Jimena de Dios

Ingeniero Industrial
Dr. Ingeniero Industrial
Ingeniero Industrial

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
Dpto. de Ingeniería Mecánica y Fabricación. José Gutiérrez Abascal, 2 - 28006 Madrid.
Tfno: +34 91 3364267. ctovar@etsii.upm.es

Recibido: 05/11/2012 • Aceptado: 08/04/2013

DOI: <http://dx.doi.org/10.6036/5524>

AN EFFICIENT METHODOLOGY FOR GENERATING VIRTUAL ENVIRONMENTS IN RAILWAY DRIVING SIMULATORS

ABSTRACT

• Nowadays, the use of virtual simulators as a learning tool is a widely-known technique that has a whole range of possibilities depending on the available budget. The methodology chosen to build the virtual environments in these simulations plays a key role in the simulator's success, from a functional as well as a financial perspective.

Although it may appear to be a paradox, the excessive software development that has taken place in the different areas of technology involved in creating these virtual environments has resulted in highly inefficient building technologies, which, in spite of using cutting-edge technology in their developments, require a large amount of manual work. This is due to the use of tools that have not been tailored to the needs of these simulations and to the lack of a continuous information flow between the various subsystems involved in the simulation. Such a flow ensures that the information transmitted is corrected, which includes the type of information as well as its precision, data formats, etc.

This paper reflects all the research work aimed at developing a methodology whose aim is optimised automation in the generation of large virtual environments intended for railway driver simulations; that is, Modular Technology. This embraces the full cycle of a virtual environment generation by providing optimised solutions at every stage. All the theoretical approaches set out in this research have been validated as development tools in the creation of large virtual environments in railway driving simulators developed by CITEF, the Railway Technology Research Centre.

• **Keywords:** virtual environments, driving simulators, geographic information systems, GIS, geomorphometry, graphic optimisation, driver training, video game, railway simulation.

RESUMEN

El empleo de simuladores virtuales de conducción ferroviaria como herramienta de aprendizaje y entrenamiento es, a día de hoy, una técnica ampliamente difundida, existiendo toda una variedad de posibilidades en función del coste requerido. La metodología elegida para la construcción de los entornos virtuales presentes en este tipo tan particular de simulaciones juega un papel clave en el éxito del simulador, tanto desde el punto de vista funcional como económico.

Aunque resulte paradójico, el excesivo desarrollo de software que ha tenido lugar en las diversas áreas tecnológicas implicadas en la creación de entornos virtuales, ha dado lugar al desarrollo de metodologías constructivas que al ser aplicadas a este tipo específico de simulaciones resultan altamente ineficientes. Esto es debido a que la excesiva confianza depositada en estas herramientas, que no fueron diseñadas para optimizar los resultados de este tipo de representaciones virtuales, ha llevado a omitir un factor fundamental en la generación de dichos entornos: la finalidad de la simulación. Es necesario un análisis que establezca los requisitos y prioridades de la representación virtual, a partir del cual se definan no sólo las herramientas más adecuadas, sino su adaptación e integración de manera que se genere un flujo de

trabajo continuo entre los diversos subsistemas involucrados en la simulación, minimizando el número de tareas manuales y garantizando la corrección de la información generada y transmitida, tanto en lo referente al tipo, como precisión y formatos de los datos. Es decir, una metodología eficiente.

Este artículo refleja los trabajos de investigación que tienen como resultado el desarrollo de una metodología cuyo objetivo es la automatización optimizada en la generación de grandes entornos virtuales para simulaciones de conducción ferroviaria destinadas al entrenamiento de conductores, la Tecnología Modular. En ella se aborda el ciclo completo de generación de un entorno virtual, aportando soluciones optimizadas en cada una de las fases. Todos los planteamientos teóricos expuestos en esta investigación se han validado como herramientas de desarrollo en la creación de grandes entornos virtuales en los simuladores de conducción ferroviaria desarrollados por el CITEF, Centro de Investigación de Tecnologías Ferroviarias.

Palabras clave: entornos virtuales, simuladores de conducción, sistemas de información geográfica, SIG, geomorfometría, optimización gráfica, entrenamiento de conducción, videojuego, simulación ferroviaria.

1. INTRODUCCIÓN

El ahorro económico y de tiempo, así como la eliminación de todo peligro que supone una simulación de conducción frente a la práctica real han convertido a las simulaciones en un instrumento de aprendizaje y reciclaje indispensable en la conducción ferroviaria. El éxito de las mismas reside en su capacidad para reproducir situaciones en las que el conductor pueda encontrarse en el mundo real, lo cual se encuentra directamente vinculado a la metodología elegida para la construcción de los entornos virtuales presentes en dichas simulaciones.

Se entiende por metodología constructiva de un entorno virtual al conjunto de procedimientos que permiten interpretar, procesar, analizar, modelizar, optimizar, representar virtualmente y garantizar la perdurabilidad en el tiempo, de una determinada información de partida (Figura 1). Esto implica el empleo de toda una amalgama de ciencias: geografía, geometría computacional, informática gráfica y realidad virtual. Cada una de ellas ha sufrido en los últimos años un gran desarrollo tecnológico, ofreciendo multitud de herramientas para su gestión. El problema radica en que ninguna de ellas está optimizada para satisfacer los requisitos de una simulación de conducción ferroviaria destinada al entrenamiento de conductores. Esto implica elevados tiempos de formación del personal en su manejo y gran cantidad de trabajo manual complementario, lo que ralentiza el proceso, es fuente de numerosos errores y dificulta la incorporación de modificaciones en el entorno. Es necesario establecer una metodología eficiente que defina las etapas del proceso constructivo y que desarrolle un conjunto de herramientas que, apoyándose en las ya existentes, genere toda la información del entorno requerida por la simulación. La eficiencia es un punto clave, pues va a ser determinante a la hora de establecer los costes del proyecto y es decisiva en la autonomía del usuario para generar nuevos escenarios en una sesión de entrenamiento.

Sin embargo, a pesar de ser numerosos los estudios llevados a cabo para analizar desde un punto de vista psicológico los factores que influyen en la efectividad de dichas simulaciones [1] no existe ninguna bibliografía de referencia que sintetice dichos factores y los vincule a la elección de una metodología constructiva eficiente. El principal motivo de ineficiencia es la falta de adecuación a la finalidad de la simulación. En el caso de los simuladores de conducción ferroviaria, las finalidades pueden ser muy diversas: análisis del tráfico, entretenimiento, análisis de la respuesta humana ante diversos factores y entrenamiento. Cada tipo de simulador reúne una serie de características que lo distinguen del

PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN ENTORNO VIRTUAL FERROVIARIO

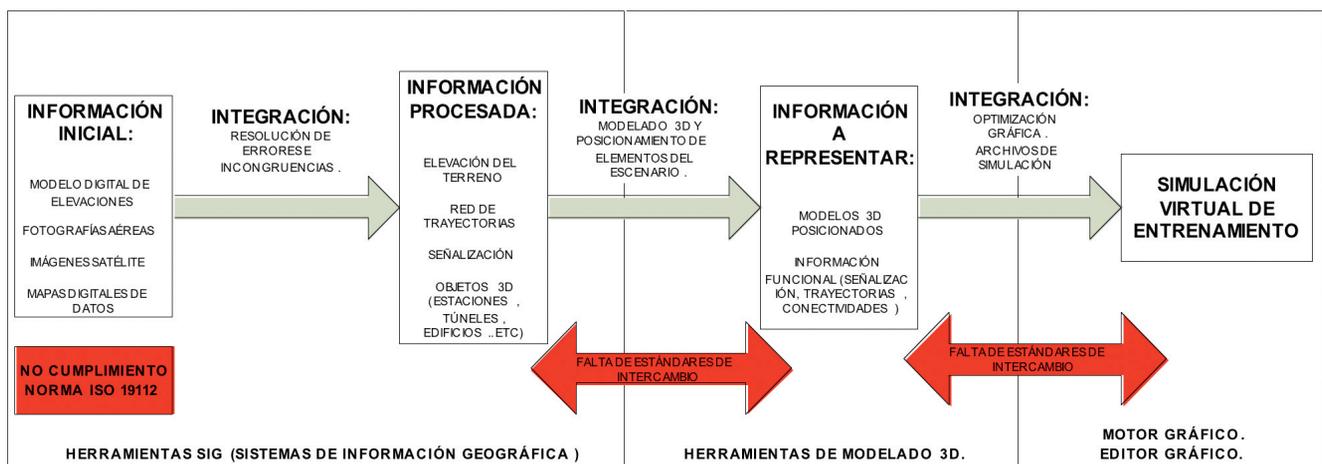


Fig. 1: Proceso constructivo de un entorno virtual ferroviario

resto y que van a definir la metodología constructiva más idónea a seguir. El grado de similitud con el mundo real, la importancia de la componente estética, la funcionalidad de los elementos del escenario, la velocidad de refresco requerida, la necesidad de autonomía del usuario para generar nuevos entornos, son algunos de los factores que no pueden pasarse por alto.

En el caso tratado en el presente artículo, simulaciones de conducción ferroviaria destinadas al aprendizaje y entrenamiento, la necesidad por parte del conductor de reconocer situaciones reales obliga a la generación de escenarios que representen fidedignamente el trazado ferroviario y los elementos funcionales relacionados con la conducción, siendo secundario el nivel de detalle del resto del entorno. Por otro lado, la posibilidad de reestructuraciones en la infraestructura ferroviaria es elevada, por lo que es necesario que estos escenarios puedan ser editados con facilidad. Estas necesidades se ven obstaculizadas por la falta de unos estándares que controlen la información a tratar. Mientras que los altos presupuestos manejados en la simulación militar, han permitido el establecimiento en este área de estándares como CDB (*Common Database Specification*) y SEDRIS (*Source for Environmental Data Representation and Interchange*), en el sector civil tal unificación aún no se ha producido. Un intento tuvo lugar con el proyecto TRAIN-ALL [3], en el cual diversas entidades dedicadas al mundo de la simulación de conducción se congregaron con el fin de plantear este problema y ofrecer soluciones al mismo. Como resultado se obtuvo únicamente una recomendación sobre el formato a elegir en el diseño de carreteras. A su vez, el trazado ferroviario se caracteriza por manejar entidades geográficas que no cumplen la Norma ISO 19112 (Información Geográfica – Sistema de Referencia basado en Identificadores Geográficos), siendo muy común el posicionamiento mediante puntos kilométricos y distancias relativas lo que dificulta el procesado de la información de partida mediante herramientas estándar no particularizadas a este ámbito. Esto da lugar a que cada empresa ferroviaria posea sus propios formatos internos y herramientas de conversión. Se espera que la Directiva Europea INSPIRE (Directiva 2007/2/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, de 14 de marzo de 2007), por la que se establece una infraestructura de información espacial en la Comunidad Europea, resuelva esta problemática en un futuro.

Ante esta falta de unificación de criterios a la hora de crear y gestionar los entornos de una simulación de conducción ferroviaria, las principales entidades dedicadas al mundo de la simulación han creado sus propias herramientas. En el caso de las empresas proveedoras de COTS, las últimas tendencias apuntan a la creación de plataformas multidisciplinares que abarcan todo el proceso de construcción del entorno. Tal es el caso de Presagis que ha desarrollado para la creación de sus entornos Stage Scenario y de OKTAL [2], que acaba de presentar su herramienta Scanner Studio en la conferencia sobre simulación de conducción, *Driving Simulation Conference 2012*.

Otras entidades dedicadas al mundo de la simulación

de conducción que han desarrollado herramientas propias son CORYS con su *Track Builder Tool*, el *National Advance Driving Simulator*, NADS, con su *Interactive Scenario Authoring Tool*, KRAUS-MAFFEI WEGMANN con su herramienta CARMEN, XPISIMULATION con su Trackgen y FAAC con su Scenario Tool Box. Todas estas herramientas facilitan en mayor o menor medida el proceso de creación del entorno virtual intentando disminuir las labores manuales, proceso en general tedioso y fuente de numerosos errores, ajustándose a las necesidades particulares de su módulo de simulación y motor gráfico.

En este artículo se presenta la Tecnología Modular, una metodología constructiva de entornos virtuales que ha sido empleada con gran éxito en los simuladores ferroviarios del CITEF destinados al entrenamiento de conductores. Esta metodología abarca todo el proceso de generación de un entorno virtual, aportando soluciones optimizadas en cada una de sus fases. Para ello ha desarrollado su propio Sistema de Información Geográfica y su Módulo de Generación Geométrica 3D particularizado a los requerimientos de sus simulaciones. Esta tecnología destaca por lo novedoso de sus desarrollos, ya que a diferencia de la clásica construcción del entorno mediante mallas ad hoc empleada por el resto de simuladores, la Tecnología Modular construye el entorno mediante el ensamblado y repetición (término conocido como instanciación) de una serie de patrones (Figura 2). El grado de instanciación se puede regular en función de las características de repetibilidad del entorno, de manera que su creación puede ir desde un entorno plenamente modular a uno generado por completo con mallas ad hoc. Gracias al empleo de este sistema de instanciación la Tecnología Modular logra reducir de manera drástica la memoria de almacenamiento requerida y los tiempos de carga de los escenarios, algo de vital importancia en este tipo de simulaciones.

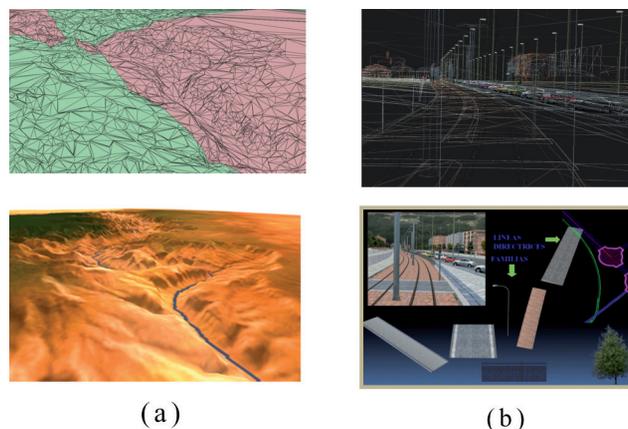


Fig. 2: (a) Ejemplo de entorno generado mediante una malla ad hoc.
(b) Ejemplo de entorno generado por la Tecnología Modular mediante módulos

El próximo apartado expondrá los planteamientos llevado a cabo por la Tecnología Modular para establecerse como una metodología constructiva eficiente, describiendo los puntos que ha considerado claves tratar y sus propuestas para

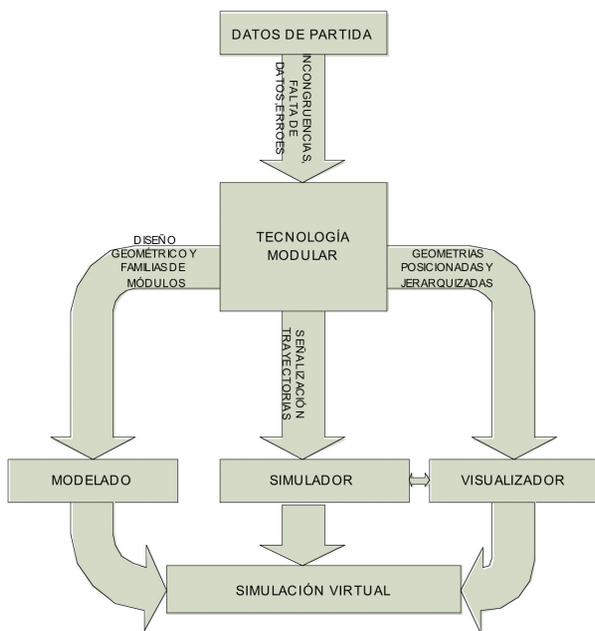


Fig.3: Subsistemas involucrados en la generación de un entorno virtual destinado a una simulación de conducción en la Tecnología Modular

tes son muy diversas, lo que origina conflictos de formato y compatibilidad. Por otro lado, son varios los subsistemas involucrados en la simulación que han de hacer uso de esta información: el sector destinado a la simulación en sí, el motor gráfico y el sector infografista (Figura 3). Cada uno de ellos con unas necesidades y objetivos muy distintos.

La compatibilización de todas estas exigencias garantizando en todo momento la coherencia de la información es una ardua tarea. Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) se ofrecen como herramienta de ayuda, sin embargo, la especificidad de requisitos que reúnen este tipo de simulaciones, hacen que estos SIG no sean suficientes por sí mismos, ya que el número de tareas manuales a realizar es muy elevado y como consecuencia la posible aparición de errores. Es necesario el desarrollo de algoritmos y herramientas específicas que ayuden a la automatización de dicha tarea [3]. Esta es la solución adoptada por la Tecnología Modular, que ha desarrollado su propio Sistema de Información Geográfica, que incluye un Módulo de Ajuste Geométrico, un Módulo de Generación Topológica y una serie de protocolos de comunicación entre los diversos subsistemas integrantes de la simulación que resuelve toda esta problemática

alcanzar el éxito en su resolución. El tercer apartado detallará los desarrollos llevados a cabo para dar la solución más óptima a cada uno de estos puntos y finalmente se expondrán sus resultados y conclusiones, que resaltarán las ventajas de esta metodología.

2. PLANTEAMIENTO

La Tecnología Modular establece que el éxito de una metodología constructiva para la generación de entornos virtuales destinados a simulaciones de conducción ferroviaria, dependerá de la correcta resolución de una serie de puntos claves.

2.1. EL PRIMER PUNTO CLAVE

Hace referencia al tratamiento de la información de partida y a la gestión de la información generada. A día de hoy, la información disponible para la generación de estas simulaciones ferroviarias se caracteriza por su abundancia y heterogeneidad: planos topográficos, modelos digitales del terreno, planos de señalización, etc. Las fuen-

2.2. EL SEGUNDO PUNTO CLAVE

Hace referencia a la necesidad de representar virtualmente escenarios enormes dotados de una gran funcionalidad garantizando siempre una conducción idónea. Es decir, una elevada velocidad de refresco y la inexistencia de elementos que puedan perjudicar la concentración del conductor, como puede ser la aparición brusca de objetos en el escenario (*pop-ping*). Para ello es necesaria una selección adecuada de las técnicas de optimización gráfica empleadas. En este sentido es necesario destacar las grandes capacidades de cálculo de las actuales GPUs (*Graphics Processing Unit*), que han permitido liberar de su carga a la CPU. Esto es algo de vital importancia en este tipo de representaciones virtuales, dónde el módulo de simulación consume gran cantidad de recursos.

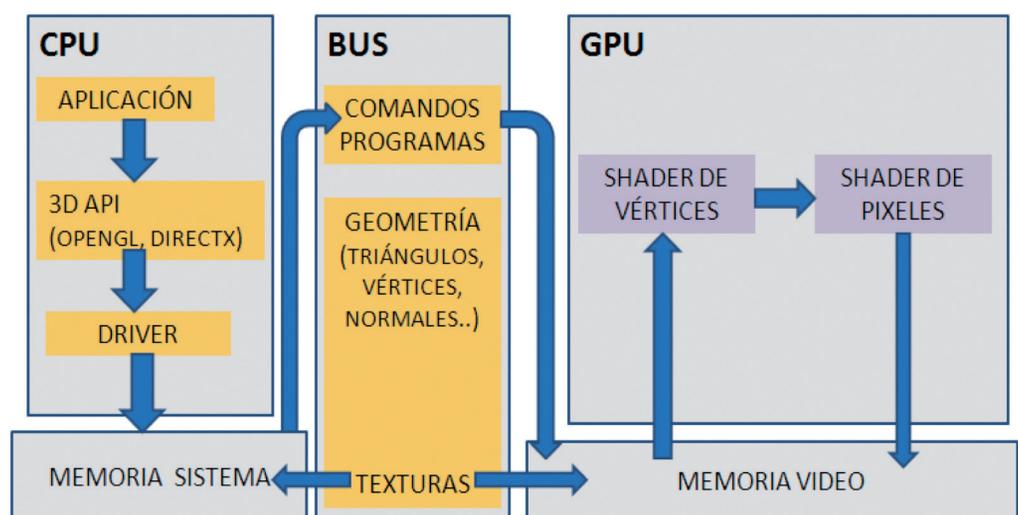


Fig.4: Arquitectura del software gráfico

A su vez la posibilidad de emplear programas ejecutables en la GPU, llamados shaders (Figura 4), ha abierto un sinfín de oportunidades para la optimización del entorno gráfico. Los shaders permiten la modificación en tiempo real tanto de vértices (*vertex shaders*) como de píxeles (*fragment shaders*) y la generación de nueva geometría (*geometry shaders*).

Con el fin de sacar el máximo partido posible a las capacidades de las actuales GPUs, los algoritmos de adecuación del nivel de detalle (*level of detail*, LOD), que se encargan de definir en cada instante la representación óptima de cada elemento, han cambiado sus objetivos. Si bien inicialmente, la representación óptima era aquella que minimizaba el número de triángulos que definían la geometría de los elementos a representar, hoy en día las elevadas prestaciones de estas GPUs y el elevado número de triángulos que son capaces de procesar han cambiado esta línea de actuación. Ahora el principal objetivo es minimizar la transacción de información entre CPU-GPU. Esto se ha conseguido agrupando los triángulos en bloques (*batch* o *tile*) [4-5], de manera que la optimización se lleva a cabo por bloque (Figura 5). Así se consigue disminuir el número de transacciones CPU-GPU (una por bloque en lugar de una por triángulo) a costa de una simplificación geométrica menos óptima, algo que para las actuales GPUs no supone ningún problema.

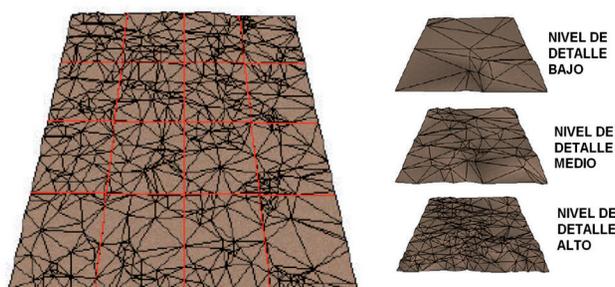


Fig. 5: Ejemplo de malla de terreno creada por bloques con distintos niveles de detalle

Los principales inconvenientes que pueden encontrarse al emplear estos algoritmos son:

- Elevado tiempo de procesamiento para generar los bloques.

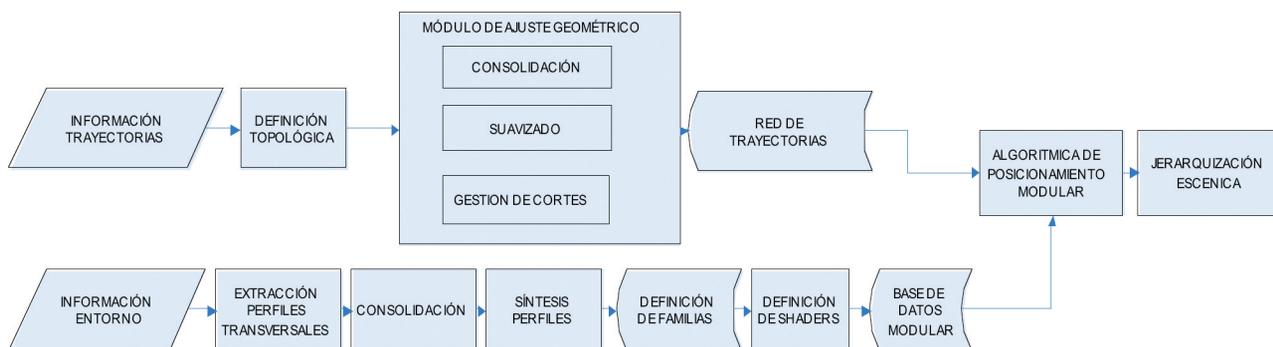


Fig. 6: Esquema de generación de un entorno virtual seguido por la Tecnología Modular

TAMAÑO	TIEMPO (H:M:S)	TAMAÑO DE SALIDA
1Km x 1Km	6:35	2 x 14 MB
4Km x 4Km	1:42:33	2 x 196 MB
8Km x 8Km	6:39:23	2 x 765 MB

Tabla 1: Requisitos de tiempo y memoria en el cálculo de bloques de triángulos en BDAM (PC con dos procesadores AMD Athlon MP 1600 MHz, 2GB de RAM, tarjeta gráfica NVIDIA GeForce 4 Ti4600).

- Escasa flexibilidad constructiva.
- Gran consumo de memoria, pues toda la geometría debe ser almacenada en tiempo de precarga. La Tabla 1 muestra los requisitos de tiempo y memoria en el cálculo de bloques de triángulos en uno de estos algoritmos, el algoritmo BDAM [6].

La Tecnología Modular aporta una solución innovadora que resuelve todos estos problemas apoyándose en una de las herramientas base de la optimización gráfica, la instanciación o empleo de instancias, y en una disciplina clásica de los Sistemas de Información Geográfica, la geomorfometría.

Una instancia es un puntero a un objeto previamente creado y una transformación afín. De esta manera, la instancia reproduce al objeto deformado por su transformación afín y lo sustituye en la escena, lo que supone un gran ahorro de memoria, ya que solo es necesario almacenar una vez el objeto y luego se puede reutilizar en el escenario todas las veces que se desee.

El empleo de técnicas geomorfométricas permite medir y caracterizar las formas del terreno. El empleo conjunto de ambas técnicas permitirá a la Tecnología Modular reproducir el entorno mediante la repetición y ensamblado de una serie de patrones o módulos de una manera hasta ahora no empleada.

2.3. EL TERCER PUNTO CLAVE

Hace referencia a la necesidad de facilitar al usuario las labores de entrenamiento: una sesión de entrenamiento implica el lanzamiento de diversos escenarios. Es requisito indispensable por tanto minimizar los tiempos de carga de los mismos y la memoria de almacenamiento requerida. Por otro lado el usuario necesita crear y modificar los escenarios para

adaptarlos a los objetivos de cada plan de entrenamiento, lo que exige la creación de herramientas que faciliten dichas tareas. La modularidad ofrecida por esta tecnología, tanto en lo referente al tratamiento y procesamiento de la información de partida, como a la construcción geométrica y jerarquización de la escena, han permitido el desarrollo de un conjunto de herramientas que cumplen todos estos objetivos.

La manera de resolver estos puntos clave será determinante en el éxito de la metodología constructiva de entornos elegida y como consecuencia, en el éxito de la simulación.

3. DESARROLLO

La *Tecnología Modular* establece para la construcción de sus entornos virtuales un flujo de actividades como el mostrado en la Figura 6.

Este flujo se estructura en tres fases:

- El análisis perceptivo visual.
- La generación geométrica y topológica del entorno.
- Posicionamiento 3d de la base de datos visual. Jerarquización y optimización escénica.

3.1. FASE 1: ANÁLISIS PERCEPTIVO VISUAL

La dificultad a la hora de generar la base de datos de modelos 3D de un entorno virtual, estriba en alcanzar el grado de optimización exigido por el motor gráfico respetando el grado de calidad visual exigido a la simulación. Un estudio en percepción visual resulta fundamental antes de decidir qué y cómo se va a modelizar y visualizar [7]. De este estudio la *Tecnología Modular* establece que los simuladores de conducción ferroviarios para el entrenamiento de conductores, presentan una serie de características que pueden favorecer en su optimización y a las que no suele sacarse todo el provecho que debiera:

- Las elevadas velocidades de circulación a través del entorno así como la prioridad del usuario por realizar una conducción correcta, dificultan la percepción de éste [8].
- La repetibilidad de numerosos elementos del entorno, unido a la baja percepción que el usuario tiene de ellos, permite explotar las ventajas de la instanciación.
- El conocimiento de las trayectorias de circulación permite establecer la distancia a la que serán observados los distintos elementos, definiendo así en tiempo de precarga los parámetros de los niveles de detalle óptimos: distancias de corte y carga poligonal de cada nivel de detalle.
- Según experimentos llevados a cabo por Cater et al [9] cuando el usuario de una determinada aplicación virtual centra su atención en una tarea específica, el resto del universo pasa para él desapercibido. Es la llamada “ceguera por falta de atención” (“*Inattention Blindness*”). De esta manera, el conocimiento a priori de

estos objetos protagonistas de la escena (*task objects*), puede contribuir a una gran simplificación en la representación del entorno, sin que el usuario llegue a percibirlo. En el caso de una simulación ferroviaria estos elementos están claramente identificados: trayectorias, intersecciones, señalización y mobiliario que afecte directamente a la conducción, como estaciones o paradas.

- El ojo humano solo es capaz de percibir con detalle los objetos que se encuentran en una pequeña franja del campo de visión (2 grados en la región foveal) por lo que resulta innecesario representar con gran precisión todo aquello que caiga fuera de este ángulo para el conductor.
- Investigaciones en el campo de la psicología han puesto de manifiesto que el sistema visual humano es altamente sensible ante determinadas características tales como, cambios bruscos de color, movimientos repentinos, los bordes de los objetos [10]. Será por tanto necesario tratarlas con especial interés de manera que no causen distracciones no planeadas al conductor.

El objetivo de la *Tecnología Modular* para esta fase ha sido sacar el máximo partido a estas características perceptivas tan particulares de este tipo de entornos, características que por otro lado, suelen pasarse por alto. Para ello explota una herramienta que hasta ahora tan solo había sido empleada con fines constructivos en el mundo de los videojuegos: la instanciación. Sin embargo, en el mundo de los videojuegos son muchas las restricciones impuestas por esta filosofía constructiva. En primer lugar, los patrones a repetir ofrecen escasa flexibilidad. Las formas clásicas que adoptan estos patrones son cuadrados, rombos o círculos, que se acoplan en el plano hasta formar una malla 2D.

La rigidez de este sistema viene determinada por un lado por el elevado número de elementos contenidos en cada patrón (Figura 7), lo que da lugar a la percepción de la repetibilidad de los mismos al crear el entorno y por otro lado, estos patrones suelen ser estáticos, no son sometidos a ningún tipo de deformación, lo que limita su flexibilidad constructiva.

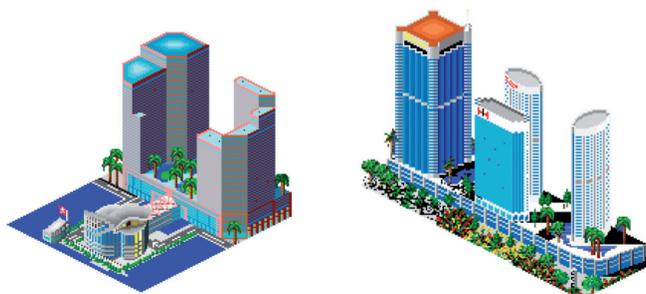


Fig.7: Ejemplos de “familia de ciudad”, caracterizados por su rigidez

A su vez, la no incorporación del concepto de trayectoria circulatoria en el posicionamiento de los patrones dificulta la optimización del nivel de detalle con el que se visualizará cada uno.

Para salvar estas limitaciones la Tecnología Modular incorpora una serie de particularidades a su sistema de instanciación:

- **La forma de definir el módulo:** el módulo es una porción recta de entorno, que será curvada una serie de grados lo que permitirá reproducir con toda la exactitud necesaria la geometría de la trayectoria y su entorno circundante. El módulo parte de un diseño básico constituido por una porción longitudinal recta de entorno. Este diseño básico se curva una serie de grados, constituyendo lo que se denomina un *conjunto base de elementos modulares o módulos* (Figura 8). De esta forma el *conjunto base* se caracteriza por la existencia de un número finito de módulos, de curvatura fija y de valores de curvatura discretos.

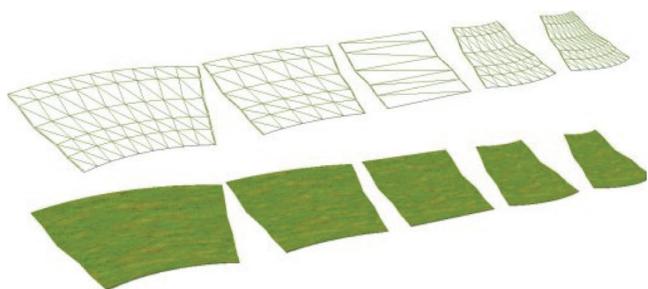


Fig. 8: Conjunto base de módulos

El módulo está formado por tres elementos básicos: un recorrido longitudinal y un conjunto de perfiles transversales con sus correspondientes texturas. La extrusión de los perfiles a lo largo del recorrido longitudinal genera la geometría tridimensional del módulo (Figura 9).

- **El concepto de familia de módulos:** la parametrización del terreno para facilitar la generación de paisajes es

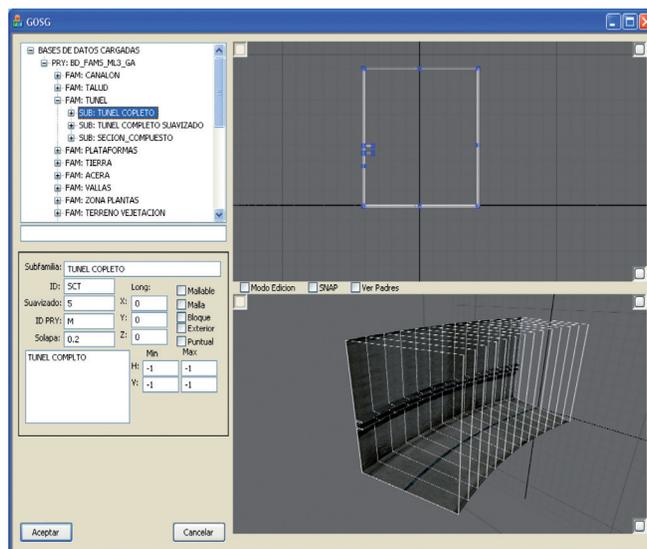


Fig. 9: Composición final del módulo generado con la herramienta GENFAM desarrollada por la Tecnología Modular

una técnica ampliamente difundida en los Sistemas de Información Geográfica [11] y que nunca había sido empleada con el objetivo de optimizar la representación de un entorno virtual. La Tecnología Modular, previa búsqueda de unos patrones repetitivos del entorno, tanto geométricos como funcionales, discretiza el escenario en un número finito de familias. La discretización geométrica se realizará en base a perfiles transversales, lo que permitirá una intuitiva parametrización del entorno. La discretización funcional permitirá optimizar el grafo de la escena (*scene graph*), ya que una misma funcionalidad suele ir acompañada de un mismo tipo de transformaciones geométricas por parte del motor gráfico. El hecho de poder tener agrupados en el grafo de la escena todos los elementos por familias, agilizará dichas transformaciones (Figura 10).

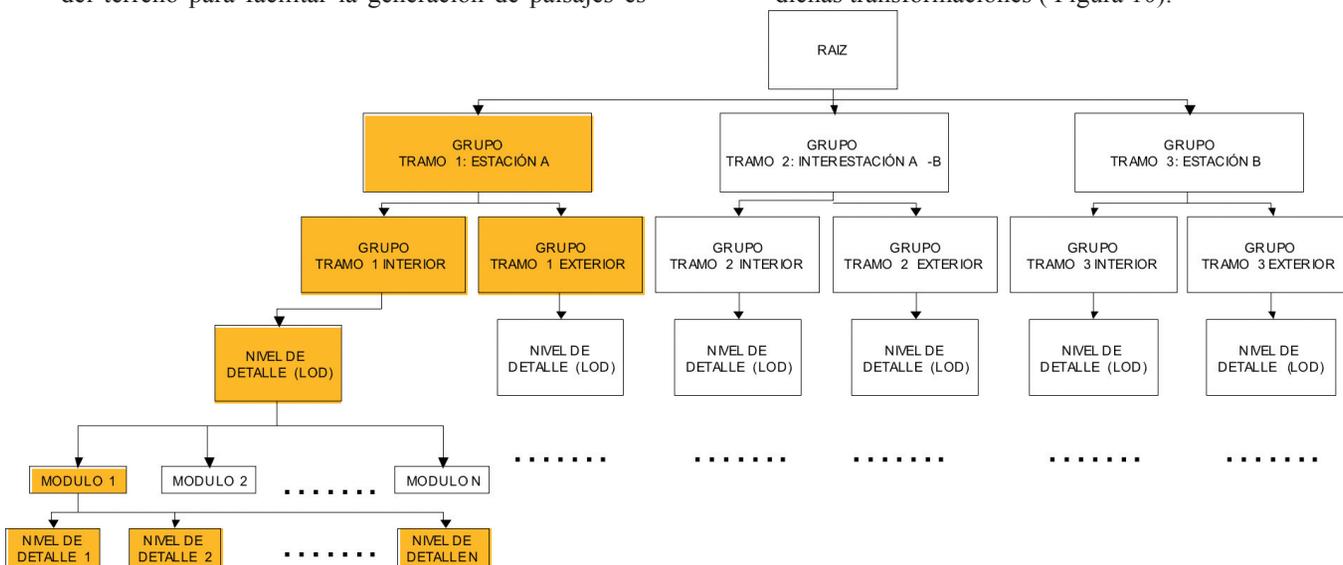


Fig. 10: Ejemplo de grafo de la escena de un entorno ferroviario

- **El sistema de posicionamiento de módulos:** las trayectorias son en esta tecnología el pilar constructivo, lo que permite por un lado dotarlas de la precisión y continuidad tangencial requeridas y por otro lado aprovechar el conocimiento a priori de estos caminos para generar niveles de detalle discretos (generados en tiempo de precarga del escenario, no en tiempo real) variantes con el punto de vista. Esto último se consigue con una discretización del entorno transversalmente a la trayectoria (Figura 11).

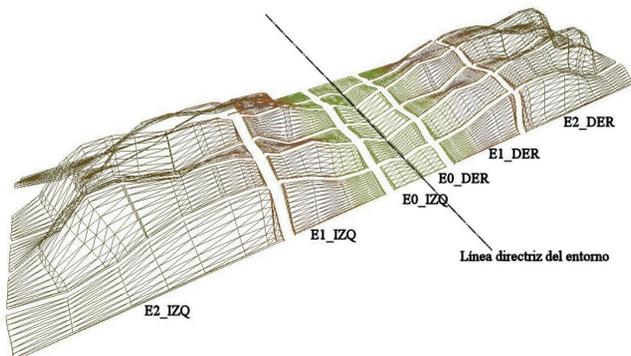


Fig. 11: Posicionamiento de la familia Terreno según entornos de proximidad y lateralidad: E0 es el nivel más próximo y por tanto de más detalle

- **La aplicación de shaders a dichos módulos:** La Tecnología Modular deforma los módulos en tiempo real mediante *shaders*, incrementándose así la flexibilidad constructiva y potenciando aún más las ventajas de la instanciación: se disminuyen más drásticamente las labores de modelado, la memoria requerida para el almacenamiento de geometrías y los tiempos de carga de la escena. Para ello la Tecnología Modular ha desarrollado los shaders de transformación compuesta, gracias a los cuales el conjunto base de módulos queda reducido a un único elemento recto de longitud básica LB. El shader de transformación compuesta curva y escala el módulo recto entorno a los tres ejes garantizando el correcto acoplamiento entre los mismos y la reproducción de la geometría del escenario con todo el realismo que éste requiere.

3.2. FASE 2: GENERACIÓN GEOMÉTRICA Y TOPOLÓGICA DEL ENTORNO

Para dar solución a esta fase la Tecnología Modular clasifica la información necesaria para la construcción del entorno virtual en tres categorías:

- **Información geométrica:** incluye la descripción del terreno, con su elevación y texturado, la definición geométrica de elementos lineales (carreteras, ríos, caminos, etc.) y de elementos anejos (árboles, edificios, etc.). Para procesar dicha información la Tecnología Modular ha desarrollado un Módulo de Ajuste Geométrico.

Dicho módulo procesa la información de partida mediante algoritmos de consolidación, gestión de cortes y suavizado, obteniendo así la definición del entorno en base a una serie de estructuras geométricas base (biarcos, NURBS, nubes de puntos) que respetan las diversas restricciones a las que se ven sometidos este tipo de entornos: restricciones de la normativa circulatoria, de los diversos subsistemas involucrados (simulación y motor gráfico) y del proyecto específico que se esté desarrollando.

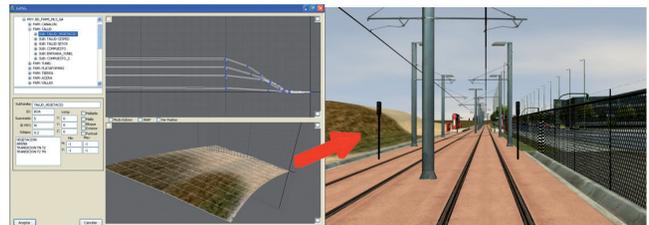


Fig. 12: Definición de perfiles transversales de terreno y su empleo en el simulador de Metro de Madrid.

La extracción del conjunto de perfiles transversales que definen un determinado entorno dependerá de la información de partida suministrada. En cualquier caso, su síntesis en un conjunto de familias modulares (Figura 12) se llevará cabo aplicando técnicas geomorfométricas que someterán a dichos perfiles a una serie de filtros que tendrán en cuenta su pendiente, sus máximos y mínimos locales y globales y su sinuosidad.

- **Información topológica:** se encarga de la descripción de las relaciones de interdependencia entre los diferentes elementos existentes en el entorno, siendo principalmente importante la correcta definición de las conectividades entre trayectorias, responsables del correcto movimiento a través del mismo. Para resolver esta fase, la Tecnología Modular crea un Módulo de definición Topológica del entorno que por un lado cumple todas



Fig. 13: Ejemplo de un Nodo Cruce

las restricciones funcionales y geométricas exigidas por el subsistema de simulación y por otro lado su versatilidad permite generar una gran variedad de entornos circulatorios y su modularidad facilita que en el caso de aparecer nuevas funcionalidades, éstas puedan añadirse cómodamente. Para ello ha definido como elemento base el *nodo* (Figura 13). La diversidad de nodos da lugar a diversos tipos de conexiones, lo que implica definiciones geométricas y funcionalidades específicas.

Cada intersección incorpora todas las posibles trayectorias que un vehículo puede seguir en su interior, las cuáles serán enviadas al módulo de simulación (Figura 14).

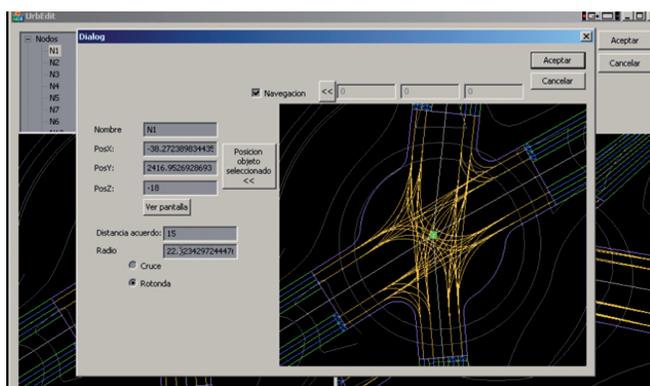


Fig.14: Nodo Rotonda con sus trayectorias circulatorias

- **Información funcional:** descripción de las características funcionales de las diversas trayectorias (tipos de carriles, de vías...), elementos de señalización (marcas viales, semáforos, etc.), conexiones (rotondas, cruces, etc.).

La Tecnología Modular sintetiza el entorno en un conjunto de familias, cada una de ellas con una funcionalidad específica definida teniendo en cuenta las normativas circulatorias. Esta información se procesa para satisfacer las necesidades del resto de subsistemas involucrados en la simulación: se definen los módulos que componen la familia para su correcto modelado; se estructura en un grafo de la escena (scene graph) que permitirá al motor gráfico simular su comportamiento; se posicionará en el entorno de modo que el subsistema de simulación pueda regular correctamente el tráfico.

Finalmente, se han definido protocolos que gobiernen la transacción de información entre todos los subsistemas que intervienen en la simulación (motor gráfico, módulo de simulación y sector de modelado) garantizando su integridad ante posibles cambios.

3.3. FASE 3: POSICIONAMIENTO 3D DE LA BASE DE DATOS VISUAL. JERARQUIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN ESCÉNICA

Las trayectorias circulatorias, elemento clave en toda simulación virtual de conducción terrestre, juegan en la Tecnología Modular un doble papel. Por un lado, como en toda

simulación de este tipo, guían el tráfico y por otro lado sirven de líneas directrices para el posicionamiento modular.

Puesto que estas líneas directrices pueden presentar cualquier definición geométrica, la Tecnología Modular ha desarrollado una Algorítmica de Posicionamiento que mediante el ensamblado y repetición de un número finito de módulos pueda reproducir el entorno garantizando siempre la continuidad espacial del mismo. El algoritmo de Posicionamiento Modular determina el tipo de módulo a colocar en cada punto del escenario, su escalado y coordenadas de posicionamiento. Es fundamental el cálculo correcto del tipo de módulo a insertar en cada punto del escenario, ya que si la curvatura del módulo no es la correcta se producen discontinuidades espaciales y de tangencia como muestra la siguiente figura.

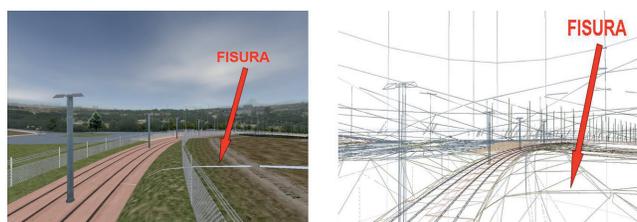


Fig.15: Fisura generada por un error de posicionamiento

El lugar geométrico de posicionamiento de módulos se denomina poligonal y consiste en una serie de puntos obtenidos mediante interpolación sobre la línea directriz. Los módulos se posicionan en el punto medio de su extremo izquierdo y orientan su cuerda según el segmento de la poligonal sobre el que asientan, abarcando el ángulo de arco comprendido entre ambos extremos de su cuerda. Así los módulos circunscriben la línea directriz, según se muestra en la siguiente figura.

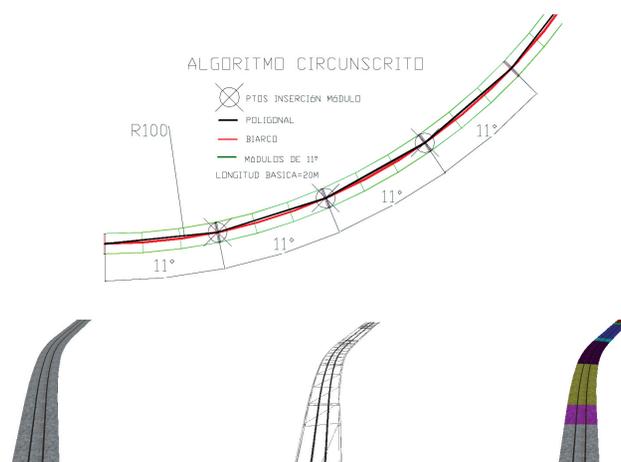


Fig. 16: Algoritmo de Posicionamiento Modular. Se han resaltado en diversos colores los módulos ya que la perfección del acoplamiento impide distinguir unos de otros.

Por último, esta tecnología organiza el entorno en un grafo de la escena (scene graph) que gracias a la modularidad

ELEMENTO	TIEMPO DE CARGA PROMEDIO (SEG) (POR MÓDULO O POR KM, EN MALLAS AD HOC)	MEMORIA PROMEDIO (POR MÓDULO O POR KM, EN MALLAS AD HOC)
MÓDULOS SIN SHADERS		
AGUJAS	0.058632577	32KB
ESPADINES	0.022517522	31KB
VIA	0.047132996	44KB
TUNELES(5FAMILIAS)	0.059065169	32KB
MÓDULOS CON SHADERS		
AGUJAS	0.1496721	32KB
ESPADINES	0.125493375	32KB
VIA	0.290442	42KB
TUNELES	0.066277633	32KB
MALLAS ADHOC		
CAJAS DE TÚNEL	0.013978124	0.025MB
ESTACIONES	0.010244279	0.012MB
TUNEL_RESOLUCION_3M	0.000922779	0.005MB

Tabla 2: Tiempos de carga y memoria de almacenamiento promedio estimados para una línea ferroviaria. Longitud de módulo Lb=20m(*).

ELEMENTO	100KM	30KM
METODOLOGÍA 1: INSTANCIACIÓN SIN SHADERS		
AGUJAS	704KB	704KB
ESPADINES	1.4MB	1.4MB
VIA	2MB	2MB
TUNELES(5FAMILIAS)	12MB	1.31MB
	TOTAL : 16.08 MB	TOTAL: 5.39MB
METODOLOGÍA 2: INSTANCIACIÓN CON SHADERS		
AGUJAS	96KB	96KB
ESPADINES	256KB	256KB
VIA	128KB	128KB
TUNELES	1.125MB	384KB
	TOTAL: 1.59375 MB	TOTAL: 0.84375 MB
METODOLOGÍA 3: GENERACIÓN CLÁSICA MEDIANTE MALLAS ADHOC		
CAJAS DE TÚNEL	202MB	55MB
ESTACIONES	146MB	44MB
TUNEL_RESOLUCION_3M	439MB	133MB
	TOTAL: 787MB	TOTAL: 232MB

Tabla 3: Memoria de almacenamiento estimada para una línea ferroviaria de 100km y de la Línea 7 de Metro de Madrid (30km). (*). Las simulaciones se han realizado en un Intel (R) Xeon (TM) Doble Procesador 3.06 GHz, 2GB RAM, tarjeta gráfica NVIDIA 7800 GS.

con la que es construido el entorno, facilita el recorrido del mismo con el fin de garantizar las velocidades de refresco

requeridas y las labores de edición de los escenarios.

4. RESULTADOS

Tras un exhaustivo estudio de la problemática asociada a la generación de grandes entornos virtuales para simulaciones ferroviarias destinadas al entrenamiento de conductores, se ha desarrollado la Tecnología Modular, una metodología constructiva de entornos virtuales que permite:

- automatizar en la mayor medida posible todas las tareas que han de llevarse a cabo;
- centralizar el flujo de información entre los diversos subsistemas que integran la simulación;
- garantizar en todo momento la coherencia de dicha información y su perdurabilidad en el tiempo;
- priorizar los objetivos del entrenamiento de conducción:
 - minimizar los tiempos de carga y la memoria de almacenamiento requerida;
 - proporcionar herramientas que garanticen de una manera rápida e intuitiva la generación de nuevos escenarios, permitiendo la reutilización de otros escenarios ya creados;
 - ofrecer elevadas velocidades de refresco;
- versatilidad a la hora de satisfacer las necesidades del cliente, esto implica:
 - la posibilidad de ofrecer una generación progresiva en la que el grado de detalle final se establecerá en función de la inversión económica que desea realizar el cliente;
 - la posibilidad de readaptación de los escenarios generados a los últimos avances del hardware, con el fin de ofrecer siempre la solución tecnológica más avanzada con un mínimo esfuerzo.

Todo esto ha sido puesto en práctica en los simuladores ferroviarios del CITEF, para el cuál se han desarrollado escenarios como los de las líneas de Metro de Madrid.

Junto a estos entornos se han aportado un conjunto de herramientas que facilitan la generación de los mismos, como la aplicación URBEDIT para la construcción de entornos urbanos, la aplicación GENENT para la creación de entornos ferroviarios o la aplicación GENFAM para la construcción 3d de los módulos.

Las ventajas aportadas por esta tecnología respecto de la metodología clásica de construcción del entorno mediante mallas ad hoc, se hacen cada vez más patentes a medida que aumenta el tamaño de los escenarios. A partir de los múltiples entornos que ha generado para diferentes proyectos ferroviarios, se han estimado los siguientes tiempos y memorias de almacenamiento promedios para tres variantes constructivas de la Tecnología Modular (Tabla 2):

- Con instanciación: sin shaders y con shaders.
- Construcción clásica sin instanciación: mallas ad hoc.

Como se puede observar en la Tabla 3, el aumento de la memoria de almacenamiento requerida y de los tiempos de generación del escenario que supone un aumento del tamaño del entorno afecta de manera muy distinta a la metodología con instanciación y a la metodología clásica mediante mallas ad hoc. Esto es debido a que en el primer caso, el aumento de tamaño estará directamente vinculado al aumento en el número de familias. Si la ampliación del escenario no requiere ninguna familia de módulos adicional el tamaño del entorno no variará. Por el contrario, en la construcción clásica mediante mallas ad hoc, al no existir ningún tipo de parametrización que simplifique la representación, los tiempos de carga y memoria aumentan de manera proporcional a este incremento de tamaño.

5. CONCLUSIÓN

La Tecnología Modular ha desarrollado su propia metodología y herramientas para la generación de los entornos virtuales presentes en simulaciones de conducción ferroviaria y ha sido aplicada con gran éxito a los simuladores ferroviarios del CITEF. Dicha metodología a diferencia del resto de metodologías existentes en este ámbito, se caracteriza por emplear una construcción modular en todas sus fases, lo que le ha dotado de la flexibilidad, escalabilidad y versatilidad constructiva tan necesarios en estos entornos, minimizando a su vez los tiempos de carga y memoria de almacenamiento imprescindibles en una sesión de entrenamiento.

La construcción modular de entornos tan sólo había sido aplicada en la construcción de videojuegos, caracterizándose generalmente por su rigidez y escasa variabilidad. En el caso de la Tecnología Modular, la aplicación de técnicas geomorfométricas en la definición de sus patrones elimina dicha limitación, dando lugar a una metodología que permite la creación de grandes entornos virtuales con todo el realismo y las velocidades de refresco que una simulación para el entrenamiento de conductores requiere. Por otro lado, dicha modularidad ha favorecido el desarrollo de una serie de herramientas que permiten generar de una forma cómoda e intuitiva los escenarios que se emplean en una sesión de entrenamiento.

En un futuro, con el fin de disminuir aún más el espacio de almacenamiento de estos entornos, se pretende desarrollar un sistema de instanciación junto a la aplicación de shaders geométricos, que generen por completo la geometría de los módulos en tiempo de ejecución.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Fisher DL, Rizzo M, Caird JK et al. *Handbook of Driving Simulation for Engineering, Medicine and Psychology*. U.S. CRC Press 2011. ISBN: 978-1-4200-6100-0. DOI: <http://dx.doi.org/10.1201/b10836-1>.
- [2] Nguen T, Casas J. "An integrated framework combining a traffic simulator and a driving simulator". *Procedia - Social and Behavioral Sciences*. 2011. Vol. 20, p. 648-655. ISSN 1877-0428. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.sbspro.2011.08.072>.
- [3] Haurert JH, Brenner C, Neidhart H. "Using a geographic information system for the generation of driving Simulator Scenes". *Advances in Transportation studies - An International Journal*. December 2005. N° Special Issue p. 33-44.
- [4] Livny Y, Kogan Z, El-Sana J. "Seamless patches for GPU-based terrain rendering". *The Visual Computer: International Journal of Computer Graphics*. February 2009. Vol. 25 p. 197-208. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00371-008-0214-3>.
- [5] Vanek J, Jezek B. "Practical Algorithm for Unlimited Scale Terrain Rendering". En: *Proceedings of the 2nd international conference on Circuits, Systems, Communications & Computers*. Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain 10-12 December 2011. WSEAS Press. p. 247-252. ISBN: 978-1-61804-056-5.
- [6] Cignoni P, Ganovelli F, Gobbetti E et al. "BDAM - batched dynamic adaptive meshes for high performance terrain visualization". *Computer Graphics Forum*. September 2003. Vol. 22 p. 505-514. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/1467-8659.00698>.
- [7] Bartz D, Cunningham DW, Fischer J et al. "The Role of Perception for Computer Graphics". En: *Proceedings of the 29th Annual Conference Eurographics 2008*. p. 65-86.
- [8] Hasic J, Chalmers A, Sikudova E. "Perceptually guided high-fidelity rendering exploiting movement bias in visual attention". *ACM Transactions on Applied Perception*. October 2010. Vol. 8 p. 1-19. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/1857893.1857899>.
- [9] Cater K, Chalmers A, Ledda P. "Selective quality rendering by exploiting human inattentional blindness: Looking but not seeing". In *Proceedings of the ACM symposium on Virtual reality software and technology (VRST '02)*. ACM, New York, NY, USA 2002. p. 17-24. ISBN: 1-58113-530-0. DOI: <http://dx.doi.org/10.1145/585740.585744>.
- [10] Itti L, Koch C. "A saliency-based search mechanism for overt and covert shifts of visual attention". En: *Vision Research* 2000. Vol. 40 p. 1489-1506.
- [11] Stepinski T, Jasiewicz J. "Geomorphons - a new approach to classification of landforms". En: *Proceedings of Geomorphometry 2011*. Redlands, CA, USA, 7-11 September 2011. p. 109-112.