

USING 4D MODELS TO VISUALIZE THE CONSTRUCTION SEQUENCE IN ENGINEERING PROJECTS

Vergara González, Eliseo P.; Remartínez Ochoa, Jorge; Vergara González, David

Área de Proyectos de Ingeniería. Universidad de La Rioja

Although the sequence of construction activities can be represented by a CPM network or a Gantt chart, the absence of visualization of such activities difficults the communication between different stakeholders. Most construction project managers, due to their field experience, can mentally visualize the construction process. However, communication with less experienced managers, or trying to reach an agreement among several technical about what is the optimal sequence of construction processes, are a complex task. As a result, potential problems in the task sequence are not easily discovered in the scheduling process, so this detection is moved to the construction phase. A 4D model is the result of joining a 3D model to a temporal dimension which represents the time schedule of the project. Combining in a single model 4D physical aspects -construction-, and temporal aspects -scheduling-, allows to visualize the construction sequence, providing an environment that makes easier the interaction and communication, as well as finding potential problems. This allows to extend the use of the 4D model to perform an analysis of the optimal time sequence, as well as productivity, safety or resource allocation analysis.

Keywords: *4D models; Scheduling; BIM; Construction*

USO DE MODELOS 4D PARA LA VISUALIZACIÓN DE LA SECUENCIA DE CONSTRUCCIÓN EN PROYECTOS DE INGENIERÍA

Aunque la secuencia de actividades de construcción puede ser representada mediante una red CPM o un diagrama de Gantt, la ausencia de visualización de tales actividades hace difícil la comunicación entre los diferentes agentes implicados. La mayor parte de gestores de proyectos de construcción, en base a su experiencia de campo pueden visualizar mentalmente el proceso. Sin embargo la comunicación a otra parte con menor experiencia, o el tratar de llegar a un consenso entre varios técnicos sobre cuál sería la secuencia óptima de construcción, son procesos complejos y sujetos a errores. Como consecuencia, los potenciales problemas no se descubren fácilmente durante la planificación, trasladándose esta detección a la ejecución. Un modelo 4D es el resultado de vincular un modelo 3D a una cuarta dimensión temporal que representa la planificación temporal del proyecto. El aunar en un único modelo 4D, los aspectos tanto de construcción, como de planificación, permite a los técnicos visualizar la secuencia de construcción, proporcionando un entorno que facilita la interacción y la comunicación, así como la detección de potenciales problemas, pudiendo extender el uso del modelo 4D para llevar a cabo análisis sobre la secuencia temporal óptima, pero también sobre productividad, seguridad o asignación de recursos.

Palabras clave: *Modelos 4D; Planificación; BIM; Construcción*

Correspondencia: Eliseo P. Vergara González. Universidad de la Rioja. Edificio Departamental - C/Luis de Ulloa, 20. C.P. 26004. Logroño, La Rioja. Teléfono:+34 941 299 275, Fax:+34 941 299 794, email: eliseo.vergara@unirioja.es

1. Introducción

Los dibujos CAD 2D, así como la planificación utilizando el Método del Camino Crítico, plasmado sobre el conocido diagrama de Gantt o una red CPM, son herramientas tradicionales y bien conocidas en la industria de la arquitectura y la ingeniería. Los autores del proyecto utilizan los dibujos 2D para describir sus ideas al resto de participantes, sin embargo, y a medida que crece la complejidad de la geometría de los proyectos, incluso profesionales experimentados pueden malinterpretar las intenciones de los proyectistas. Arquitectos e ingenieros producen sus propios “fragmentos” de documentación CAD 2D, y debido a que no existe una integración real de tal documentación, aparecen conflictos de información durante la ejecución de la obra (Hergunsel, 2011), dando lugar a retrasos en la ejecución, incremento de los costes, fricciones entre las diferentes partes intervinientes y, eventualmente, problemas legales.

Es cierto que el diseño CAD 2D, habitual en la industria de la construcción, tiene grandes ventajas y proporciona una mayor eficiencia con respecto al lápiz y papel pero, básicamente, es una simulación digital que imita el acto de dibujar a mano. Esta forma de representación es la que vienen utilizando los arquitectos y los ingenieros desde los tiempos de Vitruvio. Sin embargo, el hecho de que, por su propia naturaleza, sean necesarios múltiples documentos CAD 2D para definir una construcción, favorece la fragmentación de la documentación antes descrita, a lo que es posible añadir, que tal naturaleza 2D no promueve una aproximación colaborativa real (Hergunsel, 2011), ni la integración de los diseños con la gestión de los plazos ni con el coste.

A la vista de estos dibujos CAD 2D, los técnicos encargados de realizar la programación del proyecto, deben asociar a los diferentes elementos 2D su correspondiente actividad de construcción. Esta forma de trabajo fuerza a los técnicos a visualizar e interpretar en sus mentes la secuencia de construcción, dando lugar a tantas interpretaciones de la planificación como técnicos haya. Por otro lado, los métodos tradicionales no son capaces de representar las complejas restricciones temporales y todas las secuencias posibles que resultan de los requerimientos funcionales del proyecto, (Chua et al., 2013).

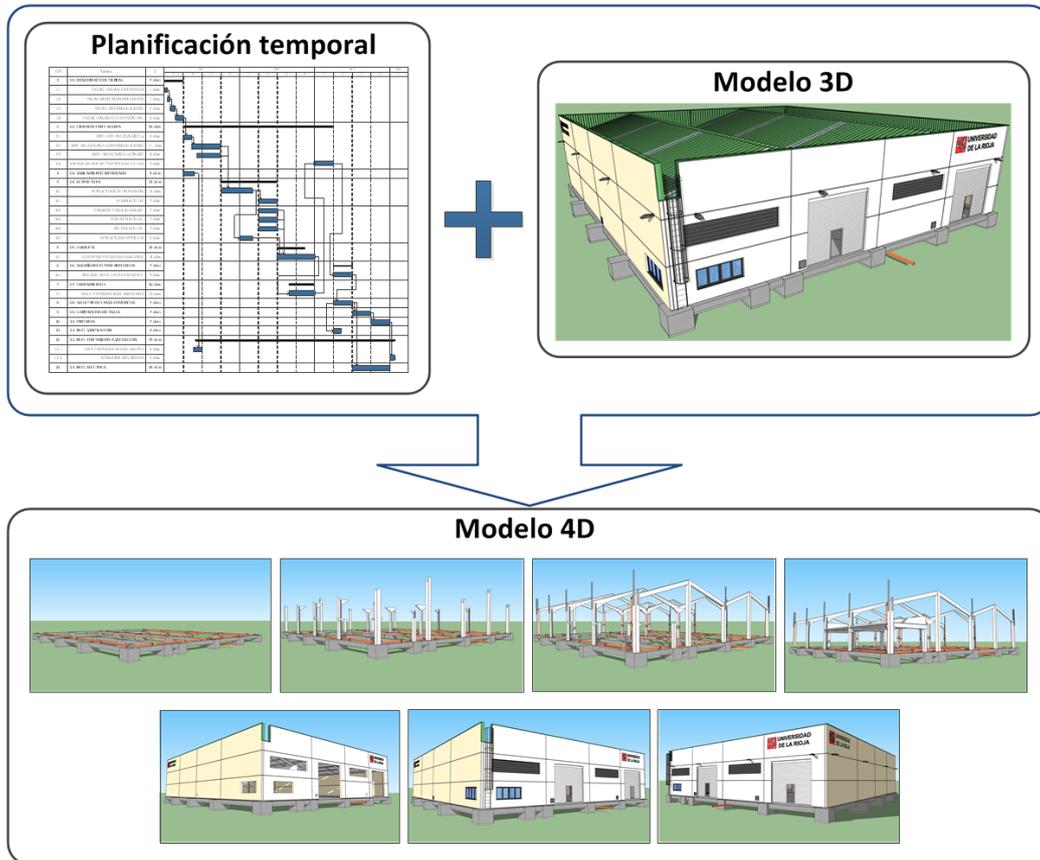
A finales de los años 70 se dieron los primeros pasos hacia el uso de tecnologías 3D en la industria de la construcción. En ese momento, la industria manufacturera ya estaba llevando a cabo el diseño, análisis y simulación 3D de sus productos. Sin embargo, en la industria de la construcción, las soluciones 3D se encontraban bloqueadas, primero por el coste de la potencia de cálculo y más tarde por la exitosa adopción generalizada de los sistemas CAD (Eastman et al., 2011).

A finales de los años 80 y en primeros años de la década de los 90 aparecieron los hoy llamados modelos n-dimensionales (modelos nD) para su aplicación a la construcción (Fischer y Kam, 2001), como una evolución natural de los modelos 3D. El interés por estos modelos nD no ha parado de crecer debido a que son una forma de describir en un único modelo el proceso completo de construcción, integrando en un modelo 3D, que contiene únicamente la información geométrica del proyecto, toda la una serie de variables que afectan, de una forma u otra, al proyecto de construcción, tales como los plazos (obteniendo así los denominados modelos 4D), los costes (modelos 5D), la sostenibilidad (modelos 6D), la gestión del mantenimiento (modelos 7D), la calidad, la seguridad, etc.

Así, un modelo 4D, un subconjunto del conjunto de modelos nD, es el resultado de enlazar un modelo tridimensional con la cuarta dimensión temporal (Koo y Fischer, 1998). A diferencia de los tradicionales diagramas de barras o de redes, donde no es posible representar adecuadamente las dimensiones espaciales y temporal, el modelo 4D simula virtualmente la propia ejecución del proyecto de construcción, y muestra como los diferentes elementos deben ser ejecutados y en qué secuencia (Adjei-Kumi y Retik, 1997), permitiendo

a los participantes en el proyecto visualizar dinámicamente el progreso de la construcción, controlar dicho progreso y optimizarlo si fuera el caso (Ding et al., 2012).

Figura 1. Los modelos 4D



2. Los modelos 4D

Al aunar en un único modelo las tres dimensiones espaciales y una cuarta dimensión temporal, estos modelos 4D, dan como resultado, en la práctica, una auténtica construcción virtual, habiéndose desarrollado el término VDC (*Virtual Design and Construction*), (Kunz y Fisher, 2012), que engloba a todas las técnicas avanzadas de visualización durante el proceso de diseño y ejecución de un proyecto de construcción.

Mientras que un modelo CAD 2D proporciona una base común para una comunicación entre todas las partes, añadiendo el tiempo a un modelo 3D se crea una simulación visual del proceso de construcción, por ello, los modelos 4D permiten una mayor facilidad para la detección de los errores en el proyecto, tanto en lo que se refiere a la planificación, como a la propia documentación para la ejecución de la obra, ya que, como se ha dicho, se trata de una ejecución virtual del proyecto, lo que permite detectar aquellos problemas que sólo serían identificados en la fase de ejecución, resolviéndolos en las etapas tempranas del proyecto, evitando que estos errores lleguen a la fase de ejecución, donde sería necesario realizar modificaciones en el proyecto que pudieran en peligro el cumplimiento de los objetivos de coste y plazo (Rischmoller et al. 2001).

Un modelo 4D es un reflejo fiel de la secuencia de construcción representada en la planificación original. Sin embargo, mientras que los tradicionales sistemas basados en el método del Camino Crítico, y visualizados mediante diagramas de Gantt o redes CPM, se

limitan a ser herramientas de gestión de tiempos, la utilidad del modelos 4D va más allá, convirtiéndose, no sólo una herramienta de visualización, sino también en una herramienta de análisis y en un medio de integración de la información diseminada en los múltiples documentos del proyecto.

2.1. Uso del modelo 4D como herramienta de visualización

Es, sin duda, el uso más habitual de los modelos 4D, y puede concretarse en los siguientes empleos (Koo y Fischer, 1998):

1. **Visualización e interpretación de la secuencia de construcción.** El modelo 4D es capaz de mostrar cómo los diferentes componentes en 3D se organizan, paso a paso, a medida que avanza el tiempo, para dar lugar a la construcción. A medida que el modelo 4D simula visualmente la construcción del proyecto, las partes involucradas pueden analizar la planificación generada, detectar aquellos problemas que pudieran surgir como consecuencia de la creación de una incorrecta planificación.

Por otro lado, al ver el modelo 4D, los técnicos son capaces de comprender mejor la lógica detrás de la secuencia de tareas. El modelo 4D permite detectar contradicciones en la lógica de la programación original que de otra manera se hubieran pasado por alto.

2. **Anticipación de los conflictos espaciales durante la construcción.** Los conflictos espaciales ocurren cuando equipos de diferentes especialidades concurren en un mismo lugar o zona de trabajo, interfiriéndose entre sí. Estos conflictos causan una reducción en la productividad de las actividades involucradas.

Los métodos de planificación tradicionales no pueden mostrar estos conflictos, ya que los datos que manejan son sólo temporales, no espaciales. Los modelos 4D pueden mostrar las limitaciones espaciales existentes tanto en la parcela donde la obra se está llevando a cabo, como en la propia construcción una vez comience a erigirse.

Autores como Zhang y Hu (2011), han analizado la detección de estos conflictos, y otros, como Jaafari et al., (2001), han aprovechado esta característica de los modelos 4D para proponer su uso como una herramienta de entrenamiento para personal sin experiencia en la generación de planificaciones

3. **Visualización del impacto de los cambios en la planificación.** Los cambios en la planificación son, por desgracia, una práctica habitual. Una vez que la modificación ha sido decidida, debe ser incorporada en la planificación. Debido a su naturaleza de "construcción virtual", los modelos 4D permiten visualizar, de una forma clara y evidente, el efecto que un cambio tiene sobre el resto de la planificación, al no poder construir virtualmente un elemento sin que haya finalizado el anterior, tal como ocurriría en la realidad.

2.2. Uso del modelo 4D como herramienta de análisis

Dado que un modelo 4D integra la información espacial y temporal de la construcción, los técnicos encargados de generar la planificación, tienen libertad para ejecutar análisis adicionales sin la necesidad de construir una imagen mental que asocie los diferentes elementos 2D a la planificación.

1. **Apoyo al análisis del coste y de la productividad.** La detección de posibles conflictos de tiempo-espacio desde las etapas tempranas del proyecto minimizará los cambios y, como consecuencia, los costes durante la construcción real. Por otro

lado, la identificación de los posibles conflictos de congestión en el espacio de trabajo compartido, redundará en tasas de productividad más altas para los equipos de trabajo

- 2. Anticipación de situaciones de riesgo para la seguridad.** A la vista del modelo 4D, los coordinadores en materia de seguridad y salud pueden detectar áreas donde se pueden producir accidentes y ejecutar medidas de prevención (como la colocación de señales de advertencia, restringiendo el acceso, o la prestación de redes de seguridad, etc). Pero lo más importante, mediante la visualización de los tiempos y la ubicación de los trabajadores a través del modelo 4D, los coordinadores en materia de seguridad y salud pueden percibir cuando existe peligro de que diferentes equipos de trabajo se interfieren entre sí, pudiendo crear, inadvertidamente, situaciones peligrosas.

Autores como Benjaoran y Bhokha (2010), han tratado extensamente este tema.

- 3. Asignación de recursos y equipos a las localizaciones espaciales.** La mayor parte de las localizaciones de obra, habitualmente delimitadas por vallas, están ocupadas por materiales de construcción y equipos de gran tamaño que pueden dificultar y entorpecer las maniobrabilidad de camiones, excavadoras, grúas, etc. Por ello, un uso adecuado del espacio de obra, establecido ya desde la fase de planificación, puede suponer una gran ventaja.

Los modelos 4D pueden utilizarse para gestionar adecuadamente los espacios de trabajo y programar la distribución de equipos y material, así como los tiempos de entrega de los diferentes materiales con el fin de no congestionar la zona de trabajo. El modelo 4D permite, mediante la generación de escenarios alternativos, y visualizar qué espacios estarán disponibles en cada momento.

Autores como Ma et al., (2005), que analizaron la optimización de diseños de localizaciones de obra, Mallasi (2006), que analizó la congestión de los espacios de obra, o Wang et al., (2004), que ha estudiado la planificación de la utilización de los recursos mediante modelos 4D, son algunos de los investigadores que han tratado este tema.

- 4. Ejecución de diferentes secuencias de construcción.** El verdadero valor del modelo 4D radica en la capacidad de integrar todos los factores que afectan a la secuencia de construcción en un único medio. Los planificadores pueden realizar su análisis mediante la generación y ejecución de múltiples escenarios que se pueden utilizar para determinar el mejor enfoque posible para solucionar los problemas detectados.

Koo y Fischer (1998), trabajaron sobre el proceso de descubrimiento de las inconsistencias en la programación de actividades. Por su parte, Golparvar-Fard et al., (2009), lo hicieron sobre el seguimiento de las discrepancias en el progreso del proyecto, mientras que Vaugn (1996), trabajó sobre la generación de escenarios alternativos para desarrollar la mejor solución de planificación.

2.3. Uso del modelo 4D como herramienta de integración

Uno de los mayores impedimentos que dificultan la colaboración entre el diseño y la ejecución en la industria de la construcción es que esta industria se basa en la subcontratación de contratistas especializados, por lo que una exitosa comunicación entre los múltiples participantes involucrados es crítica para el éxito del proyecto. Para ello, es necesario reducir la separación existente entre el diseño y la construcción. La visualización se reconoce como una de las herramientas más importantes para lograr este objetivo.

La integración del diseño y de la construcción se puede lograr mediante la formalización y estandarización de la información, promoviendo la interacción entre los participantes del proyecto. El modelo 4D se puede utilizar como una herramienta de integración que puede ayudar en la mejora de ambos de estos factores.

1. Formalización de la información de diseño y construcción

Suele existir una falta de estandarización y de inconsistencia en la información utilizada por el diseñador y el constructor. Aunque una planificación eficaz de la secuencia de construcción es fundamental para el ahorro de costes, los diseñadores no siempre analizan cómo su diseño afectará a la secuencia de la construcción. Asimismo, no están tan familiarizados con los procesos de construcción y pueden tener dificultades para comprender la lógica de la secuencia de las tareas.

Los modelos 4D se pueden utilizar como una herramienta para escapar de las limitaciones del documento CAD 2D tan profundamente incrustado en la industria de la construcción, mediante la integración de la información de diseño y de la construcción en un solo medio. El diseñador y el constructor pueden trabajar con la misma información al visualizar el modelo 4D, que elimina la necesidad de trabajar con información fragmentada.

2. Promoción de la interacción entre los diferentes participantes en el proyecto

Otra importante aplicación de los modelos 4D, es la relativa al potencial que posee esta tecnología para presentar ideas a todos los participantes en el proyecto, como forma de promover el trabajo colaborativo. (Fischer, 2001; Kähkönen y Leinonen, 2001).

Debido a que muchos temas que no siempre se abordan durante el proceso de planificación deben abordarse al generar el modelo 4D, esto obliga, de una forma natural, a la interacción entre el proyectista y el constructor.

3. Sistema propuesto

3.1. Desarrollo del modelo 3D

El modelo 3D se ha desarrollado a partir de la documentación técnica CAD 2D en formato DWG utilizando el software *Trimble SketchUp*. *Trimble SketchUp* –anteriormente *Google SketchUp*– es una herramienta informática para realizar bocetos 3D muy utilizada en las áreas de arquitectura, diseño comercial, diseño de interiores, paisajismo y planificación urbana, aunque es igualmente utilizada en ingeniería civil, mecánica y estructural, en construcción y diseño industrial, además de en educación y entretenimiento.

Esta aplicación se caracteriza por poseer un interface de usuario muy intuitiva, con unas enormes posibilidades de manipulación y alineación de entidades directamente y sin necesitar acudir a la línea de comandos. Existen dos versiones, una de ellas gratuita aunque con algunas características limitadas, siendo las más importantes la no posibilidad de importar fichero DWG/DXF y la imposibilidad de crear componentes dinámicos. La otra, es una versión profesional (*SketchUp Pro*). Tanto la versión profesional como la gratuita soportan la programación de plug-ins en lenguaje Ruby. Existen numerosos scripts en dicho lenguaje que extienden las funcionalidades de *SketchUp*.

Algunos plug-in desarrollados para *SketchUp* pretenden implementar las tecnologías de visualización de proyectos de construcción, como pueden ser *4D Virtual Builder*, que permite enlazar los modelos de *SketchUp* con la planificación de MS Project, así como generar imágenes, transparencias para *MS PowerPoint* y vídeos; o *BuildEdge Plan*, un plug-in

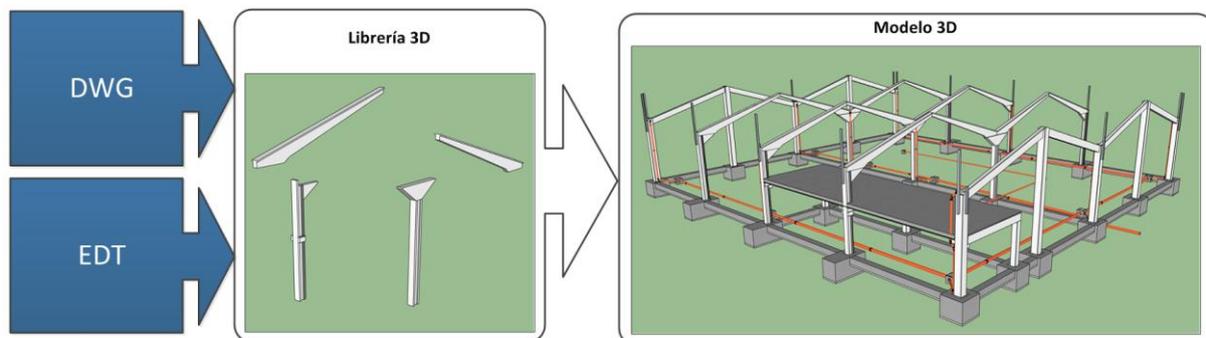
orientado a la construcción de muros y tejados, siendo escasa su aplicabilidad para otros elementos, como puede ser forjados, estructuras metálicas o instalaciones.

Sin embargo, la potencia del propio *SketchUp* permite no hacer uso de plug-ins ajenos a la propia aplicación base, reduciendo el coste, simplificando el *workflow*, y manteniendo lo más simple posible el flujo de trabajo, lo que facilita que todos los participantes en el proyecto puedan hacer uso del modelo 4D desarrollado.

Para el desarrollo del modelo 3D se han modelado los diferentes elementos que constituyen la EDT del proyecto, de forma que la construcción del modelo sea lo más similar posible a la construcción real. Así, por ejemplo, el elemento de la EDT, definido como “*Placa alveolar de forjado (20+5), apta para una sobrecarga de uso de 400kg/m²*” se ha modelado tal como se muestra en la figura adjunta, y definido como un “componente”, de forma que si fuera necesario modificar el modelo 3D de tal elemento, modificando uno de ellos, todas las instancias que de este elemento se hubiera hecho uso, se verían modificadas. Algo que no ocurriría de ser definido como “grupo”. Otros elementos, generalmente aquellos cuya mediación no puede realizar por unidades, sino por mediciones, ya sean de superficie, volumen o peso, deberán definirse como una unidad única, como puede ser el caso del hormigón de limpieza, definido como “*HOR. LIMP. HM-20/B/40/ Ila*”.

En el esquema de la figura 4., puede verse como, en un primer paso, se modela cada uno de los elementos de la EDT, utilizando como base la documentación gráfica del proyecto, ya sea importante en el propio software *SketchUp* los ficheros DWG, o simplemente usándolos como referencia. La unión de los elementos de la EDT siguiendo la documentación del proyecto, dará lugar a un modelo 3D, cuyos elementos estarán dispuestos o asociados a capas relacionadas con el primer nivel de la EDT

Figura 2. Esquema de generación del modelo 3D

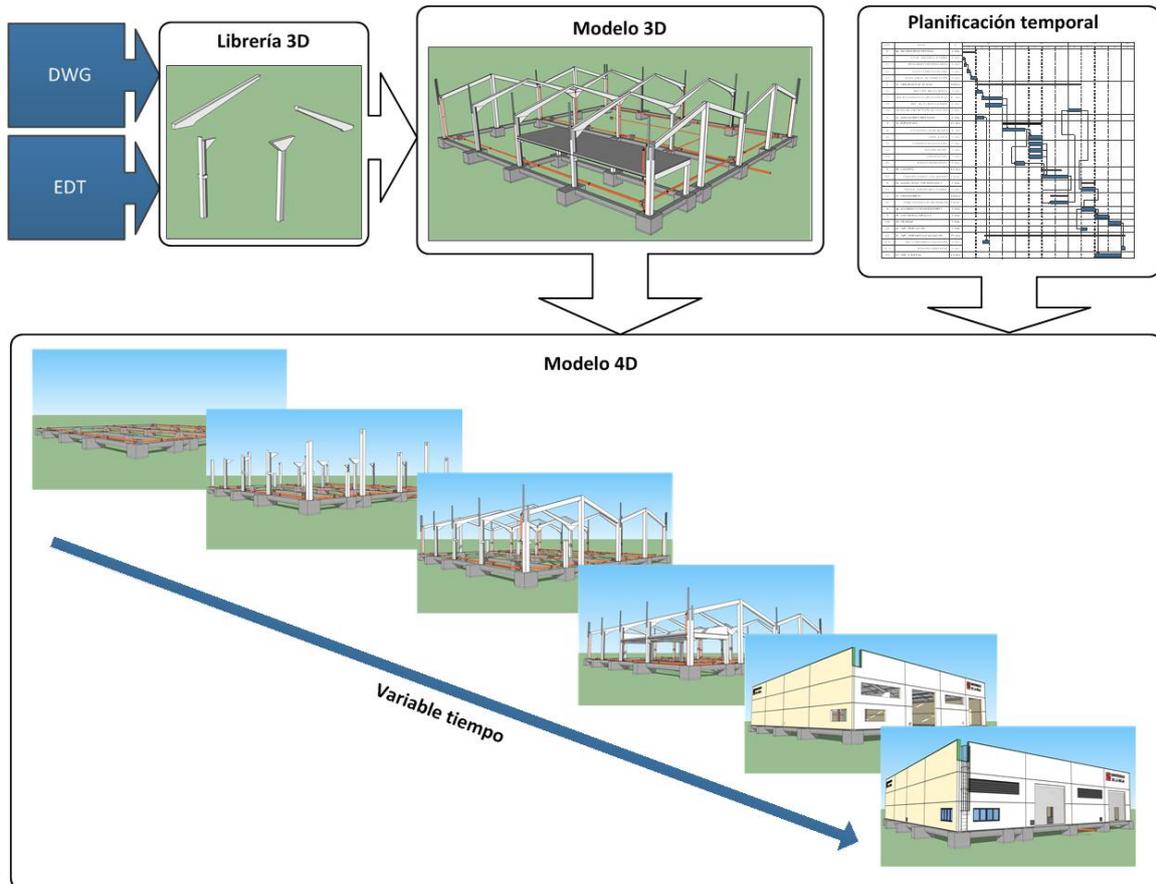


3.2. Desarrollo del modelo 4D

La asociación de la variable temporal con el modelo 3D se realiza mediante el uso de capas.

SketchUp, al igual que la inmensa mayoría de herramientas de diseño, permite el uso de capas (*layers*) para organizar los modelos. De forma predeterminada, un modelo de *SketchUp* tiene una sola capa, la *Capa 0*, que es la capa base. Si se pretende utilizar capas para organizar el modelo, es necesario convertir entidades concretas en grupos o componentes y asociar capas distintas a estos. Una vez asociados capas con grupos o componentes en un modelo, pueden ser utilizadas para controlar la visibilidad de dichos grupos. De esta forma, es posible activar o desactivar la visibilidad de las diferentes partes del modelo. La correcta asociación de entidades a capas será clave en los modelos desarrollados.

Figura 3. Esquema de generación del modelo 4D a partir del modelo 3D



A la hora de desarrollar un modelo 4D, debe establecerse un esquema de capas basado, no ya en los elementos constructivos y en las diferentes partes del edificio como viene siendo habitual, sino en las diferentes fases de construcción, porque será la visibilidad o no de las diferentes capas lo que permitirá la visualización del avance de la construcción. Dicho de otro modo, las capas serán la representación de la cuarta variable –el tiempo– en el modelo 4D, de forma que a medida que avance el tiempo de ejecución, más capas deberán de estar visibles y, mostrando la obra ya ejecutada hasta ese momento.

Para ello, es necesario pasar de la estructura en capas según el primer nivel de la EDT que se desarrolló para el modelo 3D, a una estructura de capas basada en los tiempos. Cada capa representará un momento de la construcción. Aunque en la industria de la construcción, las mediciones del avance de la obra se realiza de forma mensual para la elaboración de las certificaciones, en este caso es recomendable fijar estos hitos de tiempo en intervalos semanales, con la idea de visualizar mejor el avance de la obra.

4. Caso de estudio

4.1. Pabellón del Campo de Experimentación Agraria de la Universidad de La Rioja

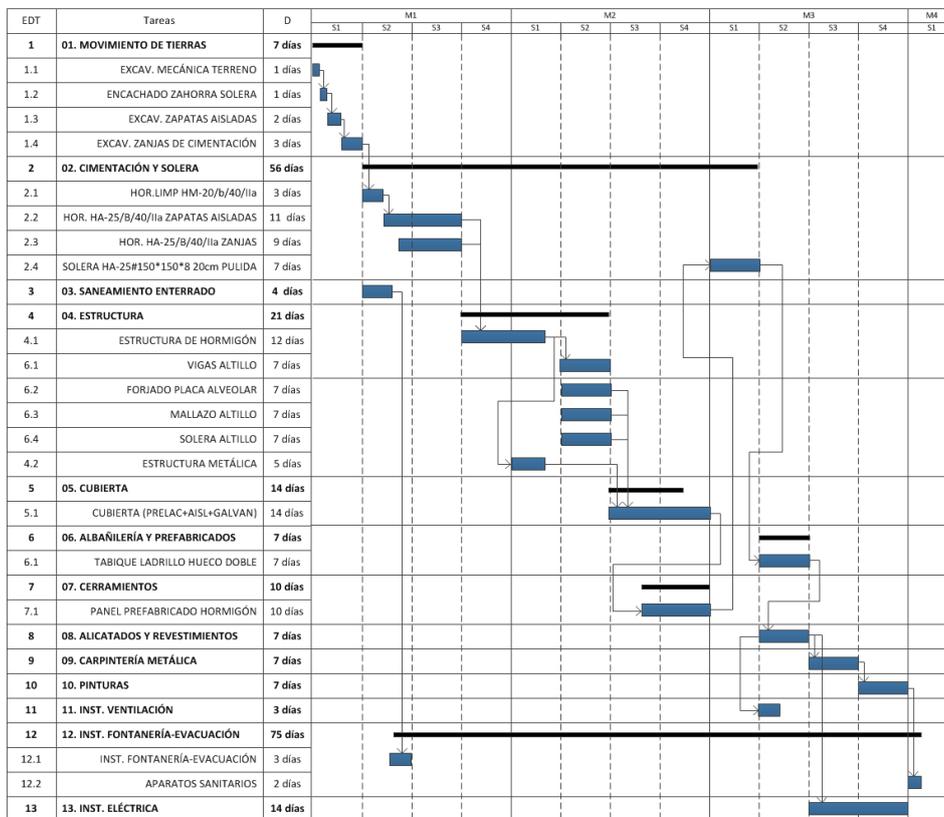
El Campo de Experimentación Agraria de la UR es una infraestructura científica recientemente construida por la Universidad de La Rioja. Se ubica en una parcela de forma cuadrangular de 16.077,91m² en la zona norte del campus de Logroño.

El Campo de Experimentación Agraria -orientado a la formación e investigación en Ingeniería Agrícola y Enología- cuenta con dos zonas de cultivo, dos invernaderos tipo túnel –a los que se sumarán otros climatizados- y un pabellón.

Este pabellón, con una superficie de 1.102,13m², cuenta con oficina, vestuarios, servicios con ducha, entreplanta, escaleras, tres portones de acceso, zona de almacenamiento de fitosanitarios, diversos puntos de conexión eléctrica, y espacio suficiente para permitir el cambio y evolución en maquinarias y otros sistemas. La zona de almacenamiento de fitosanitarios dispone de control de seguridad a la entrada y suelo diseñado para hacer de cubeta de recogida de posibles derrames.

La siguiente imagen se corresponde con una posible planificación para la construcción de este pabellón.

Figura 4. Diagrama de Gantt de la construcción del pabellón



Nota: Esta planificación no es la realmente utilizada. En este trabajo se plantea una planificación aislada para el pabellón, mientras que en el proyecto original, al estar el mencionado pabellón inmerso en un proyecto más grande como era el Campo de Experimentación Agraria, la planificación abarcaba tanto el pabellón como el resto de las infraestructuras del campo.

4.2. Desarrollo del modelo 3D

Para desarrollar el modelo 3D se partió de la documentación gráfica del proyecto. A partir de esta documentación CAD 2D se desarrolló una librería con los elementos necesario para proceder a la “construcción virtual” del pabellón, creándose cada uno de estos elementos como un “componente” o un “grupo” en función de las necesidades previstas de uso de cada elemento.

El siguiente pasó consistió en ejecutar la “construcción virtual” del proyecto. Para ello se crean una serie de capas, cada una de ellas relacionadas con la EDT. La denominación de

dichas capas es importante para poder identificar, posteriormente, la localización de cada elemento. Así, puede ser interesante denominar estas primeras capas en función de la EDT.

En este caso se ha utilizado un código de letras y números. Los elementos se encontraban distribuidos en varias capas cuyo nombre comenzaba por un código de tres letras que indica el primer nivel de la EDT. Para continuar con un código de seis letras que indica de qué elementos se trata en concreto, y un código de otras tres letras, que indica la situación física de tales elementos. Por último, un código MOD_400, indica el LOD (*Level of Development*) del modelo según la nomenclatura de la AIA (*American Institute of Architects*)

Por ejemplo, la capa EST_HORVIG_ALT_MOD_400 indica que se trata de elementos de la estructura (EST), que concretamente son vigas de hormigón (HORVIG), y que están situadas en el altillo en el interior del pabellón (ALT). El LOD del modelo es 400.

4.3. Desarrollo del modelo 4D

Una vez obtenido el modelo 3D, es el momento de incorporar la variable temporal para obtener el modelo 4D.

Para ello es necesaria una modificación en las capas del modelo: si hasta ahora el modelo esta ordenado en capas atendiendo a un tradicional orden constructivo, ahora es necesario reorganizar los elementos para que cada capa responda a un periodo de tiempo. En este caso, y dada la naturaleza del proyecto, las capas se organizaron atendiendo a que cada capa representase el trabajo de 1 semana, denominándose con el número de mes y el de la semana dentro del mes.

Al asociar los diferentes elementos a capas en función del momento en que debería ser ejecutado cada elemento, manteniendo visibles las capas relacionadas con los periodos ya transcurridos, y manteniendo ocultas las capas relacionadas con los periodos de tiempo que aún no han transcurrido, es posible visualizar únicamente lo que debería estar construido hasta ese momento, de forma que un hecho tan sencillo como activar y desactivar capas, puede dar una idea muy precisa del avance del proyecto.

5. Resultados y discusión

Las siguientes imágenes muestran el avance semana a semana de la construcción del pabellón a partir del modelo 4D. Para ello se han generado una serie de escenas en el modelo, utilizando el software *SketchUp*.

Una de las características de estos modelos es su capacidad de generar planificaciones que podrán denominarse “distribuidas”. Mientras que en un diagrama de Gantt una actividad está representada mediante una barra, dos a lo sumo, ya que un fraccionamiento superior sería inviable, el modelo 4D puede planificar una tarea de forma “distribuida” fraccionando la tarea en sus componentes físicos, y puede planificarse su ejecución a lo largo de todo el tiempo que se considere necesario, lográndose una planificación mucho más realista.

Por ejemplo, si el pabellón objeto de este trabajo dispone de una serie de zapatas para su cimentación, el diagrama de Gantt mostrará una única barra continua, denominada “*Cimentación zapatas aisladas*”. Por el contrario, el modelo 4D, visualizará directamente cada una de las zapatas del proyecto, y podrá distribuirse la ejecución de cada una de ellas en el tiempo de la forma más real posible, y no necesariamente de una forma continuada como daría a entender la única barra del diagrama de Gantt.

Es evidente que esta posibilidad permite una mayor variedad de escenarios de planificación que el técnico responsable puede analizar con ayuda del propio modelo 4D con el fin de seleccionar la opción óptima en cada caso.

Figura 5. Secuencia de construcción del pabellón mediante un modelo 4D

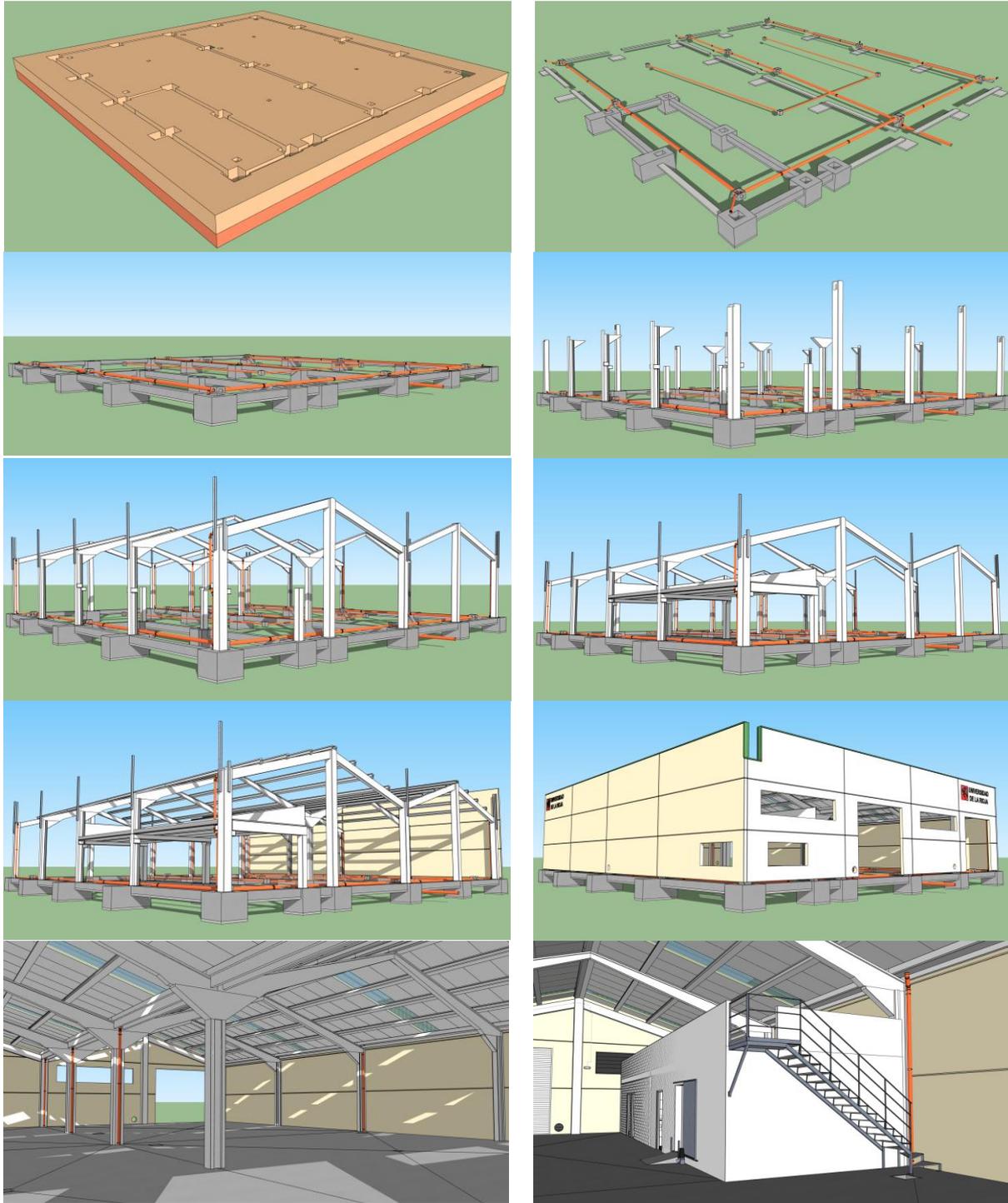




Figura 6. Comparativa entre la visualización del modelo 4D y la construcción real



6. Conclusiones

Este trabajo muestra una forma de lograr, por un lado, una planificación más realista y que permita un mejor seguimiento del avance de la obra, y por otro, una integración entre la fase de diseño y la de construcción, utilizando modelos 4D como forma de realizar una construcción virtual del proyecto previa a su ejecución real.

El software *SketchUp*, considerado un software menor en la industria de la ingeniería y la arquitectura, quizás por su bajo coste, se ha mostrado suficientemente capaz para gestionar el modelo 4D desarrollado, destacando su facilidad de uso y la excelente calidad de sus

visualizaciones, lo que ayuda a una mejor comprensión de la secuencia de las actividades de construcción.

7. Bibliografía y referencias

- Adjei-Kumi, T., Retik, A., (1997), A library-based 4D visualization of construction processes, Proc., Information Visualization Conf., Institute of Electrical and Electronics Engineers, Piscataway, N.J., 315–321.
- Benjaoran, V., Bhokha, S., (2010). An integrated safety management with construction management, *Automation in Construction* 48, 395–403.
- Chua, D.K.H., Nguyen, T.Q., Yeoh, K.W., (2013). Automated construction sequencing and scheduling from functional requirements, *Automation in Construction* 35, 79–88
- Ding, L.Y., Zhou, Y., Luo, H.B., Wu, X.G., (2012). Using nD technology to develop an integrated construction management system for city rail transit construction. *Automation in Construction* 21, 64-73
- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K., (2011). BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors, 2nd ed., NY: John Wiley and Sons.
- Fischer, M., (2001). The frontier of virtual building, Workshop on Virtual Construction, organized by ENCORD, 26–27 November, Essen, Germany.
- Fischer, M., Kam, C., (2001). 4D Modelling: technologies and research, presentation given to Workshop on 4D Modelling: Experiences in UK and Overseas, organized by The Network on Information Standardization, Exchanges and Management in Construction.
- Golparvar-Fard, M., Peña-Mora, F., Arboleda, C.A., Lee, S., (2009). Visualization of construction progress monitoring with 4D simulation model overlaid on time-lapsed photographs, *J. Comput. Civ. Eng.* 23 (6), 391–404.
- Hergunsel, M.F., (2011). Benefits of building information modeling for construction managers and BIM based scheduling. Thesis Worcester Polytechnic Institute.
- Jaafari, A., Manivong, K.K., Chaaya, M., (2001). VIRCON: interactive system for teaching construction management. *ASCE, Journal of Construction Engineering and Management*, 127(1), 66–75.
- Kähkönen, K., Leinonen, J., (2001). Advanced communication technology as an enabler for improved construction practice, presentation given to Workshop on 4D Modelling: Experiences in UK and Overseas, organized by The Network on Information Standardization, Exchanges and Management in Construction.
- Koo, B., Fischer, M. (1998). Feasibility Study of 4D CAD in Commercial Construction. CIFE Technical Report #118 August, Stanford University.
- Kunz, J., Fischer, M., (2012). Virtual Design and Construction: Themes, Case Studies and Implementation Suggestions. CIFE Working Paper #097. Stanford University.
- Ma, Z., Shen, Q., Zhang, J., (2005). Application of 4D for dynamic site layout and management of construction projects, *Automation in Construction* 14 (3), 369–381.
- Mallasi, Z., (2006). Dynamic quantification and analysis of the construction workspace congestion utilising 4D visualization, *Automation in Construction* 15, 640–655.
- Rischmoller, L., Fischer, M., Fox, R., Alarcon, L., (2001). 4D Planning and Scheduling (4D-PS): Grounding Construction IT Research in Industry Practice. Conference Proceedings- IT in Construction in Africa, CIB W78 International Conference, Mpumalanga, South Africa.
- Vaughn, F., (1996). 3D and 4D CAD modelling on commercial design-build projects, in Vanegas, J and Chinowsky, P. (eds) Computing in Civil Engineering Congress 3, Anaheim, California. June, pp. 390–6.

- Wang, H.J., Zhang, J.P., Chau, K.W., Anson, M., (2004). 4D dynamic management for construction planning and resource utilization, *Automation in Construction* 13 (5), 575–589.
- Zhang, J.P., Hu, Z.Z., (2011). BIM- and 4D-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 1. Principles and methodologies, *Automation in Construction* 20,155–166.