

Diseño, ingeniería, fabricación y ejecución asistidos por ordenador en la construcción: evolución y desafíos a futuro

Computer-aided design, engineering, manufacturing and construction: evolution and future challenges

Alfredo del Caño^(*), M^a Pilar de la Cruz^(*), Luis Solano^(**)

RESUMEN

El presente artículo expone un análisis realizado por los autores sobre la evolución histórica del diseño asistido por ordenador (DAO) en construcción, su estado actual, y posible futuro, todo ello desde el punto de vista del usuario. El análisis incluye los orígenes del DAO en los 60 y los 70, así como la introducción del modelado sólido, los sistemas paramétricos y otros avances en los 80 y en los 90. A continuación se analizan las características esenciales del software actual, incluyéndose también su relación con otros aspectos como la ingeniería y la fabricación asistidas por ordenador (IAO / FAO), o la realidad virtual (RV). Y se resumen las características específicas de las principales aplicaciones comerciales de ayuda en la definición del proceso (industrial o de otro tipo); de ayuda en la definición de la distribución en planta del edificio o planta industrial; de diseño arquitectónico conceptual; de apoyo en el proyecto básico y de detalle; y de simulación y visualización de los procesos de construcción. El artículo también refiere las peculiaridades de algunas aplicaciones de desarrollo interno en las mayores empresas mundiales de ingeniería. Finalmente, en función de las tendencias actuales y de las necesidades del sector todavía pendientes de satisfacer, se resumen los principales desafíos a futuro en este campo.

403-20

Palabras clave: diseño asistido por ordenador, ingeniería asistida por ordenador, fabricación asistida por ordenador, simulación de procesos de construcción, arquitectura, ingeniería, construcción.

SUMMARY

This paper sets out an analysis on the evolution, present and potential future of computer-aided design (CAD) in construction, from the point of view of the user. The analysis includes the CAD beginnings in the 1960's and 1970's, and also the introduction of solid modelling, parametric systems and other progress in the 1980's and 1990's. Then, the essential characteristics of current software are analysed, also including its connection with other issues as computer-aided engineering and manufacturing (CAE / CAM), or virtual reality (VR). The paper also includes a summary of the specific features of the main commercial software packages to help architects and engineers in conceiving and defining the process (industrial or other types of processes); establishing the plant or building layout; preparing the conceptual, basic and detailed design; and simulating the on-site construction processes. The main characteristics of some software packages developed internally by some of the world's most important engineering companies are also summed up. Finally, taking into account the current trends and the present needs of the construction sector, the main future challenges of CAD in this sector are summarised.

Keywords: computer assisted design, computer assisted engineering, computer assisted manufacturing, simulation of construction processes, architecture, engineering, construction.

^(*)Escuela Politécnica Superior. Universidad de La Coruña, España

^(**)Navantia

Persona de contacto/Corresponding author: alfredo@cdf.udc.es (Alfredo del Caño)

1. INTRODUCCIÓN

Con motivo del 150 aniversario de la ingeniería industrial, el Departamento de Ingeniería Industrial II de la Universidad de La Coruña desarrolló un proyecto preliminar para analizar la evolución y futuro de las construcciones industriales, fundamentalmente en el entorno de los países occidentales. Dicho trabajo, que constituía la primera fase de un proyecto de mayor alcance, se desarrolló desde finales del año 2000 hasta julio de 2001 y sus principales conclusiones fueron publicadas en 2001 (de la Cruz y del Caño, 2001) en esta misma revista. Este escrito amplía la parte de aquel análisis relativa al diseño asistido por ordenador, y resume también posteriores análisis realizados por los autores sobre el mismo tema.

2. DIBUJO, DISEÑO, INGENIERÍA Y FABRICACIÓN ASISTIDOS POR ORDENADOR: CONCEPTO Y EVOLUCIÓN

2.1. Antecedentes históricos: maquetas y dibujo a mano

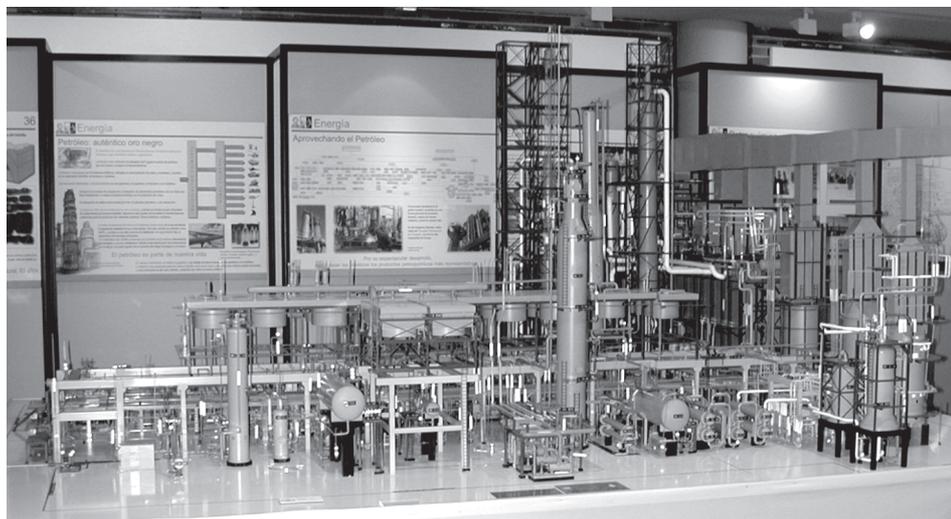
Las primeras herramientas de expresión gráfica en la construcción fueron, probablemente, las maquetas y el dibujo a mano en soportes más primitivos que el papel (papiro, soportes pétreos naturales o artificiales), y más tarde en el propio papel. Ello se remonta a los tiempos de las más antiguas civilizaciones. Podríamos decir que los primeros ingenieros modernos aparecen en tiempos de la revolución industrial; en ese momento no hay grandes cambios en los aspectos relacionados con la expresión gráfica, por cuanto dichos técnicos y su personal de apoyo dibujaban a mano en papel sobre tablero, aunque con cierta frecuencia pudie-

ran usar también maquetas. Este panorama se mantiene hasta mucho más tarde, en los 50 y en los 60 del siglo XX, si bien en estos momentos se generaliza el uso de maquetas detalladas a escala como complemento al dibujo a mano (Figura 1), para proyectos de gran complejidad, como son los de grandes plantas industriales. La maqueta, al margen de servir como herramienta de comunicación con el cliente, era entonces estrictamente necesaria en estos proyectos porque la complejidad de las plantas de proceso químicas y petroquímicas y de las centrales de producción de energía era tal que no había otra manera de poder analizar de antemano las intersecciones / interferencias indeseadas entre sistemas constructivos para evitar, por ejemplo, que tuberías o conductos pasasen por lugares por donde era imposible su paso al coincidir con vigas, pilares u otras tuberías o conductos. En los comienzos de los ordenadores, entre los 40 y los 60, éstos no tienen gran potencia y, por ello, su uso en el cálculo y dimensionamiento estructural y de instalaciones es anterior a su uso en la expresión gráfica. En los 70 y en los 80 las maquetas siguen siendo imprescindibles en proyectos complejos, ya que las aplicaciones de dibujo asistido por ordenador no permiten todavía el dibujo en tres dimensiones ni, por tanto, la detección de interferencias.

2.2. Los comienzos: dibujo asistido por ordenador

Con respecto al dibujo y diseño asistidos por ordenador (Bozdoc, 2005), al principio de los años 40 se desarrolló el primer ordenador digital y, simultáneamente, se desarrollaron algunos de los trabajos base sobre curvas (por Schoenberg, Apalategui y Liming, entre otros, fundamentalmente dentro del sector aeronáutico norteamericano)

Figura 1. Maqueta de una planta de desulfuración de naftas (fuente: exposición "150 Aniversario de la Ingeniería Industrial. Nuestra Industria y Nuestra Vida.", organizada por el Colegio Oficial de Ingenieros Industriales de Madrid y la Comunidad de Madrid, Recinto Ferial Juan Carlos I, IFEMA, Madrid, 16 de julio a 19 de agosto de 2001; maqueta de Técnicas Reunidas, SA).



que, más tarde, se usarían en el desarrollo de las modernas herramientas informáticas. En los años 50 aparecen los primeros ordenadores comerciales. Probablemente los trabajos más importantes sobre curvas polinómicas, superficies, y sistemas gráficos en ordenadores fueron desarrollados en los 60 y en los 70 por Bezier, de Casteljaou, Coons, Eastman, Fergusson, de Boor, Birkhoff, Garabedian, Gordon, Hanratty, Riesenfeld, Ross, y Sutherland, entre otros, en el seno de empresas del sector automovilista, como Renault, Citroën, Chrysler, Ford o General Motors; del sector aeronáutico, como Boeing o Lockheed; o de instituciones de investigación, como el MIT o la Universidad Carnegie-Mellon.

Las primeras aplicaciones comerciales aparecen entre 1964 y 1971. En ese momento sólo las grandes corporaciones (como General Motors o Renault, por ejemplo) pueden adquirir los ordenadores capaces de soportar el software de este tipo. Conforme los ordenadores se fueron haciendo más asequibles, las áreas de aplicación se fueron extendiendo gradualmente. En los 70 estos programas sólo trabajaban en dos dimensiones (2D), y típicamente se limitaban a la generación de planos de proyecto mediante un proceso similar a su realización a mano. En 1970 aparece ya la primera de las principales empresas de CAD del sector de la construcción, llamada entonces M&S Computing, y que más tarde pasará a llamarse Intergraph. A finales de los 70 un típico sistema de CAD implicaba el uso de un mini-ordenador de 16 bits con un máximo de 512 Kb de memoria y de 20 a 300 Mb de capacidad de almacenamiento en disco, con un precio del orden de los 125.000 dólares norteamericanos.

El dibujo asistido por ordenador (que podemos referir como DAO o como CAD, usando las siglas de su denominación en inglés: computer-aided drafting) surge como solución para aumentar la productividad a la hora de producir planos de proyecto; se trata, como su propio nombre indica, de una mera herramienta de dibujo.

2.3. Modelado sólido, sistemas paramétricos y otros avances en los 80 y en los 90

En 1981 se crea la empresa Dassault Systèmes dentro del grupo empresarial Avions Marcel Dassault. Los 80 verán ya avances importantes en hardware y en programación y, en particular, en modelado sólido. Estos avances permitirán la creación, por ejemplo, en 1981, de paquetes de modelado sólido como Catia, del grupo francés Dassault. Autodesk se funda en 1982, lanzando al mercado una versión 2D del hoy tan co-

nocido AutoCAD, que permitía el dibujo asistido por ordenador a empresas con recursos económicos modestos. En 1985 Keith Bentley funda Bentley Systems, empresa que lanzará el software denominado MicroStation. En los 80 ya existe software con menores exigencias de soporte físico que en momentos anteriores; así, por ejemplo, en 1987 la versión 9 de AutoCAD funcionaba sobre procesadores Intel 8086 con co-procesador matemático 8087; de todos modos, las aplicaciones informáticas de más potencia seguían requiriendo mini-ordenadores de mucha mayor potencia y coste. Pro/Engineer (de la empresa PTC) aparece en 1988, SolidWorks (de Dassault) en 1995, y SolidEdge (de UGS) en 1996. En 1997 aparece Revit, de Revit Technology Corporation, que constituye el primer sistema de modelización paramétrica para el sector de la construcción. Con los sistemas paramétricos no es necesario realizar innumerables correcciones como consecuencia de cualquier cambio en el diseño; dichas correcciones las realiza automáticamente el sistema. Finalmente, a finales de los 90 y principios del nuevo milenio las grandes empresas se esfuerzan en lanzar versiones de su software que funcione sobre plataformas de tipo PC.

2.4. Diseño asistido por ordenador: principales características de los sistemas actuales

Con los avances referidos y con otros que no hay lugar aquí para reflejar, poco a poco se ha ido pasando al concepto de dibujo y diseño asistido por ordenador (del Caño y de la Cruz, 1993; Domínguez *et al.*, 1995). En otro sentido diferente, que se va a tratar aquí por tener estrecha relación con el diseño asistido por ordenador, se ha generado el concepto de ingeniería asistida por ordenador. Ambos son ya conceptos muy amplios y complejos y en los que todavía queda por avanzar. El concepto de dibujo y diseño asistido por ordenador (que aquí referiremos simplemente como DAO o como CAD, usando las siglas en español o en inglés del término diseño asistido por ordenador) es una evolución del dibujo asistido por ordenador para asistir al arquitecto o ingeniero en otras tareas de diseño diferentes del mero dibujo, de manera que hoy en día estos sistemas, entre otras cosas, además de ayudar al dibujo de los planos de proyecto (Autodesk, 2005; Bechtel, 2005; Bozdoc, 2005; del Caño y de la Cruz, 1993; Delmia, 2005; Fluor, 2005; Intergraph, 2005; Nemetschek, 2005; Sketchup, 2005; UGS / Tecnomatix, 2005; entre otros), tienen otras características, resumidas en la Tabla 1, que suponen ventajas muy importantes. Así, por ejemplo, el hecho de incorporar bases de datos de elementos del layout y soluciones

Tabla 1. Principales características de los sistemas CAD actuales

Generación de modelos virtuales (3D reales), que permiten realizar diversas simulaciones.
Ayuda desde la concepción inicial hasta el final, incluyendo, la generación del resto de documentos del proyecto.
Generación de diferentes alternativas de distribución en planta y en el espacio (layout). Análisis de su eficiencia. Optimización del layout.
Análisis de la eficiencia del movimiento de personas o vehículos y su optimización, evitando colisiones.
Análisis de intersecciones / interferencias indeseadas entre sistemas constructivos (por ejemplo, entre instalaciones y elementos estructurales).
Cálculo de ratios geométricos de la edificación (alturas, volumen construido, superficie construida, superficie útil) y estimación de costes de construcción y de operación.
Visualización 3D y 4D de imágenes externas e internas a las construcciones proyectadas.
Análisis del impacto visual de la nueva instalación.
Incorporación de bases de datos de elementos individuales del layout (por ejemplo, una máquina); generación automática de objetos.
Incorporación de soluciones completas de layout para determinados tipos de habitáculos o actividades (como, por ejemplo, soluciones específicas de células de fabricación).
Incorporación de bases de datos de elementos o sistemas constructivos para generarlos por medio de una sola orden (por ejemplo, para generar la cubierta de un edificio).
Sistemas paramétricos.
Incorporación de sistemas de captación, almacenamiento y gestión del conocimiento de la empresa para su uso en proyectos posteriores (por ejemplo, de criterios de diseño o diseños tipo).
Incorporación de sub-sistemas que facilitan la participación simultánea en el diseño de diferentes usuarios, aunque éstos se encuentren en ubicaciones diferentes.
Incorporación de módulos para interconexión con programas de otro tipo; por ejemplo, de análisis estructural.

completas de distribución para determinados tipos de habitáculos o actividades, aumenta la productividad a la hora de generar la distribución en planta; ahora ya no se dibujan líneas rectas o arcos para formar objetos, sino que éstos se generan automáticamente por medio de una sola orden. Otras características de la Tabla 1 tienen similares consecuencias sobre la productividad y, con ello, sobre el plazo y el coste de las tareas de diseño.

Por otro lado, el hecho de que muchas aplicaciones sean ya paramétricas permite controlar la forma geométrica y las dimensiones de un modelo por medio de variables que suponen restricciones geométricas y de acotaciones que permiten, modificándolas, realizar cambios en los modelos de forma flexible e interactiva. Los beneficios del diseño paramétrico son múltiples. En primer lugar, es posible comenzar el proceso de diseño partiendo de bocetos poco detallados, dibujados habitualmente a "mano alzada". La posterior incorporación de restricciones y dimensiones paramétricas permiten definir completamente el modelo y, luego, redefinirlo cambiando simplemente las referidas restricciones o dimensiones. Otra ventaja importante es la posibilidad de interrelacionar las dimensiones mediante ecuaciones. Ello permite un control muy preciso de la geometría del modelo, así como la creación de elementos o componentes estándar con formas y dimensiones dependientes de valores numéricos. Es una ventaja clara el hecho de que, en este tipo de aplicaciones

paramétricas, cualquier modificación en un elemento del diseño provoca automáticamente las necesarias modificaciones en el resto de elementos interrelacionados con el primero, y todas las modificaciones se reflejan en todos los documentos de proyecto.

El uso de software de diseño 3D ha experimentado un importante crecimiento en los últimos años. Esto es debido a la cada vez mayor potencia y facilidad de uso de los mismos, si bien los programas más potentes y que permiten realizar las geometrías más complejas siguen requiriendo mayor formación. Obviamente, las empresas pueden optar por software más o menos complejo en función de sus necesidades. Pero se sigue avanzando, poco a poco, hacia una mayor capacidad y facilidad de uso del software. Así, programas como Pro/Engineer (PTC) o Catia (Dassault) permiten crear piezas y conjuntos en 3D de gran complejidad, pudiéndose prescindir en ocasiones de los en otro caso necesarios planos para su fabricación, con el ahorro de tiempo que conlleva; piénsese, por ejemplo, que una empresa que realiza fundiciones sólo necesitará ya el modelo 3D para hacer el molde para fabricarlas. Y en el caso de que esos planos fuesen necesarios, dichos programas permiten una creación semi-automática de los mismos. Además, por ser paramétricos, una vez hecho un plano, si se modifica una o varias dimensiones de la pieza, el resto del plano será actualizado automáticamente. Esto no ocurre en programas comerciales estándar como AutoCAD o MicroStation.

Tabla 2. Aplicaciones de software más usuales en el campo de la ingeniería asistida por ordenador

Cálculo estructural matricial y mediante elementos finitos.
Predimensionado y dimensionamiento de cimentaciones y de estructuras de acero, hormigón y madera.
Aplicaciones genéricas de análisis térmico y de fluidos tradicional y de dinámica computacional de fluidos (CFD), para su uso en el diseño de redes de fluidos de diverso tipo.
Dimensionamiento de redes de fluidos: abastecimiento y evacuación de agua, redes de protección contra incendios, ventilación, calefacción, climatización.
Cálculo y dimensionamiento de instalaciones eléctricas.

Por esta razón este tipo de empresas están lanzado ya aplicaciones paramétricas y módulos para convertir en paramétricas sus aplicaciones no paramétricas (como es el caso de Autodesk con su Revit para AutoCAD).

2.5. Ingeniería asistida por ordenador

Más recientemente se ha acuñado el concepto de ingeniería asistida por ordenador (que aquí referiremos como IAO o como CAE, usando las siglas de su denominación en inglés: *computer-aided engineering*), que supone el uso del ordenador para realizar los diferentes cálculos y dimensionamientos necesarios para asegurar la funcionalidad de los diversos sistemas constructivos. Esto incluiría, en principio, el cálculo y dimensionamiento estructural y de instalaciones, así como otros cálculos necesarios para definir otros sistemas constructivos, como es el caso de los cerramientos y tabiquerías (por ejemplo, los cálculos térmicos y acústicos que ayudan a decidir la composición de las diferentes capas de dichos cerramientos y particiones). Las aplicaciones de software más usuales en este caso son las incluidas en la Tabla 2.

Como se puede ver, a pesar de que el ordenador se usó antes para el cálculo y dimensionamiento estructural y de instalaciones que para el CAD, el término "ingeniería asistida por ordenador" ha aparecido más tarde.

Como se verá más adelante, cada vez se está registrando una mayor integración entre la ingeniería y el diseño asistidos por ordenador, y entre éstos y otras actividades del proyecto, progresándose hacia lo que podría ser una construcción integrada por ordenador, real, que hoy no es más que una utopía sobre la que hablaremos más tarde. En particular, y por ejemplo, existe una tendencia clara a integrar el diseño 3D con el cálculo por elementos finitos. En este sentido, PTC fue uno de los precursores en el diseño mecánico, con la integración de Pro/Mechanica (cálculo) y Pro/Engineer (diseño). El paso de uno a otro es inmediato gracias a su carácter paramétrico, de tal forma que cualquier cambio en la geometría es aplicado inmediatamente al modelo de elementos fi-

nitos, pudiéndose regenerar la malla automáticamente. Además, las cargas y restricciones permanecerán inalteradas si no hay cambios en las zonas de aplicación, o se actualizarán si se realizan cambios en sus dimensiones paramétricas. ANSYS permite desde hace poco hacer esto mismo con Workbench. Por el contrario, usando programas tradicionales de cálculo por elementos finitos, si cambiamos la geometría en la aplicación CAD, es necesario recomenzar todo el proceso de cálculo: recargar la geometría, volver a aplicar las cargas y restricciones, crear una nueva malla (proceso este último que, dependiendo de las características del problema puede ser extremadamente largo y laborioso) y lanzar el cálculo nuevamente.

2.6. Fabricación asistida por ordenador

En construcción podemos hablar también del concepto de fabricación asistida por ordenador (que aquí referiremos como FAO o como CAM, usando las siglas de su denominación en inglés: *computer-aided manufacturing*), que se corresponde con el uso de hardware y software para la automatización total o parcial de la fabricación de elementos estructurales o de otros elementos o sistemas constructivos. Entre otros campos, por ejemplo, en el campo estructural, el incremento del coste de la mano de obra en los países avanzados ha provocado que la estructura metálica se diseñe con elementos completos (vigas, soportes) preparados o (pre-) fabricados (en el caso de los perfiles armados) en taller mediante procesos automáticos o semi-automáticos, para ser luego atornillados in situ. Y también ha provocado que la estructura prefabricada de hormigón gane mucho terreno a la ejecutada in situ. Y existen ya sistemas de CAD que son capaces de generar las instrucciones para el mecanizado automático de piezas, o bien de integrarse con programas específicos de CAM para enviarles toda la información necesaria para generar dichas instrucciones.

2.7. Realidad virtual

Con anterioridad se ha hablado en este artículo sobre la existencia de herramientas de visualización dinámica 4D. Se pueden reali-

zar algunas visualizaciones sencillas con programas comerciales estándar como AutoCad o Microstation, si bien no son las herramientas más adecuadas para ello. Existen programas de visualización de propósito general, como Autodesk VIZ Render (antes 3D Studio), que sirven mejor a dicho propósito por su mayor potencia y capacidad de foto-realismo. Pero, al margen de que requieren gran potencia del hardware, son poco amigables en su uso; consumen mucho tiempo de computación para la generación de los archivos de visualización; suponen la generación de archivos de enorme tamaño (y tanto más cuanto mayor sea la resolución deseada); y las visualizaciones no incluyen el concepto de realidad virtual, ya que es el técnico el que define cuál va a ser la visualización, y el usuario no puede alterarla, ya que tiene que ver exclusivamente lo que el técnico ha querido visualizar en cada momento. Programas como Sketchup (2005) permiten hacer visualizaciones sencillas con mayor facilidad y con menor consumo de recursos informáticos que, si bien son inferiores en capacidad de foto-realismo, alcanzan niveles aceptables (Figura 2).

La realidad virtual (Díaz y González, 2001; Warwick *et al.*, 1993) ha sido, probablemente, el último concepto a incorporarse a los procesos de CAD. El lenguaje de programación VRML es la principal herramienta en este campo, y cuenta con herramientas gratuitas de visualización, como Cortona Graphics (Parallel Graphics, 2005), o CosmoPlayer (Silicon Graphics y Platinum Technologies, 2005). Actualmente se está en fase de actualización y ampliación de las capacidades de VRML, y el nuevo estándar para dicho lenguaje se llama X3D, aunque su implantación real todavía tardará un tiempo. VRML / X3D permiten la generación de

visualizaciones dinámicas de realidad virtual generando archivos de muy pequeño tamaño que, además, permiten la visualización a través de la Red (Internet e intranets) (Figura 3); con este tipo de software es el cliente o usuario el que, usando el ratón, decide por qué partes del edificio o planta va a pasar, y con qué características (velocidad y altura de visualización) va a realizar la visualización (visualización "flexible"; realidad virtual). De todos modos, y por lo pronto, el VRML tiene una de sus mayores debilidades en su baja capacidad de foto-realismo. Existe abundante software de ingeniería que permite exportar sus ficheros en formato VRML. Así, por citar un par de campos, la mayoría de los programas de cálculo por elementos finitos o de análisis computacional de fluidos pueden exportar sus resultados en este formato, con las ventajas que esto conlleva. La primera es la sencillez del intercambio de información, ya que cualquier persona con un navegador de Internet puede examinar dichos resultados sin estar en posesión de una licencia del programa de cálculo. Además, el volumen de información a intercambiar es mucho más reducido, ya que el VRML es mucho más ligero que los voluminosos ficheros de resultados de este tipo de programas. Por último, el VRML permite ver el problema desde todas las perspectivas posibles, gracias a su carácter tridimensional.

De todas formas, VRML no ha tenido por ahora el éxito que se esperaba, por algunos problemas aquí mencionados y por otros referidos por Lipman (2002), Martínez *et al.* (2002) y The Construction Industry Institute (2005). Además, debemos tener en cuenta que la realidad virtual no es sólo patrimonio del VRML / X3D, y que se podría hacer lo mismo con otros lenguajes o aplicaciones informáticas.



Figura 2. Visualización del diseño básico de una pequeña fábrica con la utilización de Sketchup (fuente: Universidad de La Coruña, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Industrial II; J. Castro y L. Coloma; dirección: A. del Caño).

3. HERRAMIENTAS INFORMÁTICAS CAD / CAE ACTUALES

3.1. Software de propósito genérico

Actualmente se dispone de software estándar de propósito genérico, como AutoCAD o Microstation (entre otros) muy potente y que permite la realización de dibujo asistido por ordenador en dos y tres dimensiones con cierta facilidad; ambos tienen gran capacidad y son de uso sencillo en 2D, pero no tanto en 3D (de todas formas, se echa de menos que sean de uso un poco más amigable). Este tipo de aplicaciones necesitan módulos adicionales para ser más productivos en los diferentes campos específicos de aplicación (construcción, diseño mecánico, etc.). Normalmente se trata de aplicaciones abiertas que incluyen un lenguaje de programación que permite que haya varias empresas diferentes ofertando diferentes módulos complementarios para un mismo campo de aplicación (arquitectura, obras lineales, etc.). No todos los fabricantes disponen de aplicaciones genéricas; este es el caso de Nemetschek, que sólo ofrece software orientado exclusivamente al sector de la construcción.

3.2. Software de ayuda en la definición del proceso y de su distribución en planta

El arquitecto o ingeniero, antes de hacer el proyecto básico, debe realizar (u obtener de su cliente) un diseño conceptual que incluye, entre otras cosas, una distribución en planta y en el espacio y el establecimiento de las formas arquitectónicas del edificio y su implantación en la parcela o solar. Con respecto a la definición en planta y en el espacio, esto es algo que en arquitectura residencial no supone excesivo problema, mientras que dicho problema se complica en la arquitectura de edificaciones singulares y, sobre todo, en la arquitectura industrial. Y, más concretamente, en el diseño de plantas industriales de proceso (químicas, petroquímicas, de producción de energía, por ejemplo), o de grandes fábricas (como puedan ser las de automóviles y las de grandes aeronaves).

Además, en el caso de fábricas y plantas industriales y otras construcciones de complejidad similar, antes de definir la implantación es necesario realizar los cálculos oportunos relativos a la capacidad y funcionamiento de la planta y, con ello, definir el proceso industrial. Existe, por ejemplo, software para la simulación de procesos (industriales o de otro tipo) asistida por ordenador, algunos específicos para determinados aspectos, como pueda ser la simulación de colas

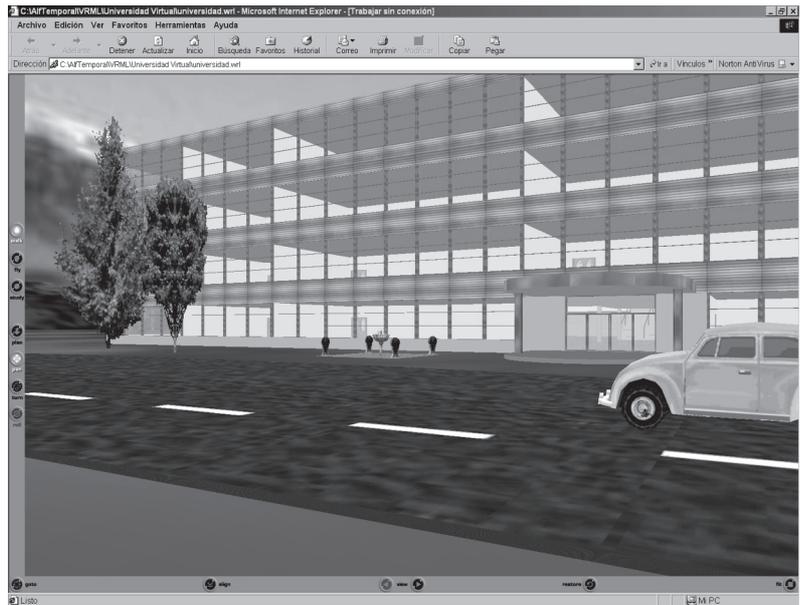


Figura 3. Simulación dinámica del diseño básico de un edificio docente realizada en VRML (fuente: Universidad de La Coruña, Escuela Politécnica Superior, Departamento de Ingeniería Industrial II, L. Solano; dirección: A. del Caño).

o, mejor todavía, de propósito más general, como Extend, de la empresa Imagine That (2005), que usa técnicas de teoría de colas y simulación tipo Monte Carlo, entre otras, para simular una amplia variedad de procesos.

Existen programas como AutoMod, de la empresa Brooks Automation (2005), la familia de aplicaciones Delmia (2005; Figura 4), del grupo Dassault Systèmes, o los diversos módulos Factory de UGS-Tecnomatix (2005), que permiten la simulación de procesos industriales de fabricación, incluso con visualización dinámica 4D, y la generación de layouts asistida por ordenador. Y los mayores fabricantes mundiales los han empezado a usar desde tiempos relativamente recientes para concebir sus procesos industriales (com General Motors, Ford, Daimler-Chrysler o Toyota, entre otros; Waurzyniak, 2003). Probablemente (Waurzyniak, 2003) las empresas más importantes del mundo en este tipo de software son UGS - Tecnomatix / EDS y Delmia (del Grupo francés Dassault). Este tipo de programas están destinados a los sectores de la industria del automóvil, de la aeronáutica y de la naval,



Figura 4. Ejemplo de utilización del software comercial de Delmia para la simulación de procesos industriales y de distribuciones en planta y en el espacio de procesos industriales (fuente: Delmia, 2005).

Tabla 3. Algunos procesos que se pueden simular con software de ayuda en la definición del proceso y de su distribución en planta

Procesos de fabricación mediante máquinas-herramienta de control numérico (montaje, soldadura, pintura), o ensamblaje a mano y mediante robots o células robotizadas de fabricación.
Procesos discretos y continuos de transporte (de materiales sueltos, materiales a granel, y de fluidos, incluyendo transporte por tubería con uso de depósitos), como los siguientes:
Sistemas de cintas y rodillos de transporte.
Sistemas automáticos de almacenaje y recuperación de materiales.
Carretillas elevadoras de control manual.
Vehículos guiados automáticamente para transporte de material.
Robots de transporte.
Personas moviéndose a lo largo de rutas predefinidas.
Grúas y puentes-grúa.

fundamentalmente. Y facilitan la generación, análisis y optimización de layouts, permitiendo simular diversos procesos que se resumen en la Tabla 3.

Y todo ello con simulaciones 4D en las que se puede, entre otras cosas, calcular tiempos de producción, rutas más cortas de transporte, o verificar el layout mediante la detección y análisis de colisiones, interferencias u otros problemas del layout generado, a la hora de que maquinaria y equipos realicen sus funciones. Se trata, al fin y al cabo, de sistemas de CAD con potencialidades de dibujo y diseño muy importantes. Es el caso, por ejemplo, de FactoryCAD (Figura 5), de UGS/Tecnomatix, que en vez de dibujar líneas rectas o arcos, trabaja con objetos que representan en un espacio virtual los diferentes recursos humanos y materiales de producción y transporte (cintas de transporte, grúas, contenedores de almacenamiento, maquinaria de proceso, personal, ...). Una vez generado el layout

con Factory CAD, este programa dispone de aplicaciones complementarias para simular en 4D los procesos de producción, "navegar" por dichos modelos, simulando el movimiento del producto en fabricación, de las herramientas de fabricación y de los elementos de transporte. En dichas simulaciones, entre otros aspectos, se detectan potenciales colisiones, para solucionar este tipo de problemas.

Estos programas suelen tener características adicionales de interés, como la capacidad para el trabajo simultáneo de diferentes usuarios a la vez, incluso aunque estén ubicados en localizaciones diferentes, en un concepto de ingeniería simultánea; las herramientas del tipo "Qué pasaría si" ("What if"), para analizar las consecuencias sobre el proceso de fabricación de realizar cambios en el mismo; el grabado automático de datos mediante técnicas de encriptado para preservar el conocimiento de la empresa; o la capacidad de importar datos de hojas elec-

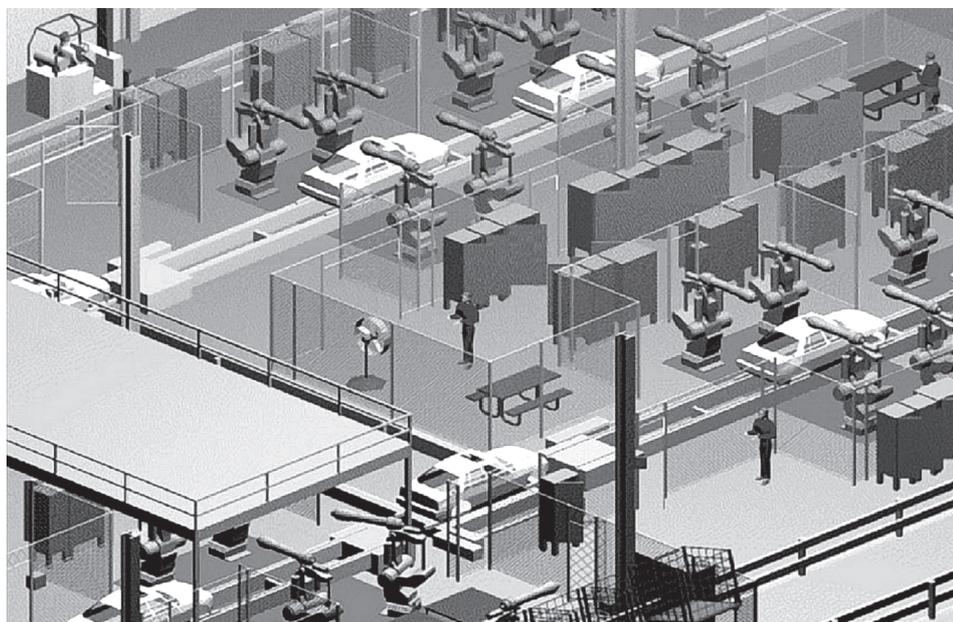


Figura 5. Ejemplo de uso del programa FactoryCAD, de UGS-Tecnomatix, para el diseño de distribuciones en planta y en el espacio de procesos industriales (fuente: UGS-Tecnomatix, 2005).

trónicas y de software de planificación y programación de la producción (ERP, MRP, MES).

En otro campo diferente al de la fabricación, como es el caso de las plantas industriales de proceso (químicas, petroquímicas), también existen aplicaciones interesantes. En este campo, las empresas más importantes del sector realizan, en fase de ingeniería básica, visualizaciones 3D y 4D de la futura planta; este es el caso, entre otras, de empresas multinacionales de ingeniería como Fluor o Bechtel (las dos mayores del mundo). Tanto en dicha fase como en las posteriores (Fluor, 2005), Fluor usa una aplicación informática denominada OptimEyes para ayudar a encontrar el layout óptimo de la planta a diseñar, con objeto de acortar las horas hombre a dedicar a este aspecto, y de mejorar la precisión en la estimación de costes. Este software toma decisiones lógicas y precisas con respecto a la configuración de la planta, basadas en años de experiencia de Fluor, liberando a los técnicos de tareas tediosas de diseño; se ha creado capturando reglas de ingeniería y reglas de buena práctica del personal de Fluor para ser utilizadas por el ordenador de manera automatizada (ésta es una de las vertientes de la gestión del conocimiento). Se trata de una herramienta, como se ha dicho, que trata de optimizar el layout (aspecto muy complejo en grandes plantas químicas y petroquímicas de proceso), y que proporciona visualizaciones del mismo, todo ello de manera integrada con el resto de procesos de trabajo de Fluor. Dicha herramienta ayuda al equipo de proyecto a revisar rápidamente múltiples escenarios de disposición en planta, a identificar los layouts más eficientes en costes, y a analizar la operabilidad y mantenibilidad de cada layout. También sirve para producir mediciones de proyecto muy precisas y para crear modelos 3D de la planta para comprender mejor el diseño realizado y para comunicarlo a las partes interesadas. Este software se comunica con las aplicaciones típicas de CAD para generar automáticamente modelos en 3D y planos de proyecto en 2D.

Hasta aquí hemos hablado de software de ayuda a la generación de la distribución en planta de procesos industriales. Existe software también para apoyo en la generación del layout de instalaciones eléctricas, de redes de tuberías y de climatización, como es el caso de las aplicaciones de Intergraph (2005) denominadas SmartPlant y PDS (Plant Design System), que incluyen dichas capacidades, entre otras. Al ser en realidad dichos layouts parte de la elaboración del proyecto constructivo y, por otro lado, al servir dichas aplicaciones también para el diseño

del resto de la planta industrial, este escrito incluye más adelante detalles adicionales sobre ellas.

3.3. Software para el diseño arquitectónico conceptual

Con respecto a la tarea inicial de diseño conceptual, hoy en día se dispone de programas como Sketchup (Figura 2) que ayudan a realizar esa tarea de concepción arquitectónica en 3D con una facilidad de uso pasmosa, además de ayudar también en la elaboración del proyecto básico. Esta labor de concepción arquitectónica hasta hace muy poco se hacía siempre en tablero o mesa con lápiz y papel, y muchos profesionales siguen haciéndolo así. Las principales características de Sketchup (2005) incluyen, por un lado, la modificación de volúmenes edificatorios o tamaños de sistemas constructivos mediante arrastre del cursor, cambiando el tamaño del resto de objetos de manera coherente. Por otro lado, el movimiento del punto de vista y movimiento del edificio en el espacio para observar la impresión que causa. En tercer lugar, sencillos estudios de iluminación natural en función del movimiento del sol. Y, por último, la conversión de los archivos generados en formatos comerciales de otros fabricantes, para poder continuar el diseño con otras aplicaciones (proyecto de detalle, cálculos).

Los principales fabricantes de software de dibujo asistido por ordenador también han desarrollado herramientas similares, bien independientes (pero integrables con el resto de sus aplicaciones), o bien como parte de sus aplicaciones estrella. Tanto Nemetschek (que comercializa la aplicación de CAD denominada AllPlan) como Autodesk (AutoCad) han desarrollado herramientas de este tipo. En el caso de Nemetschek (2005), este producto se llama D-Board. Este sistema, que incluye el software y una pantalla especial (que se puede usar como pantalla normal), sustituye al monitor y al ratón del ordenador. Se puede dibujar sobre el D-Board como si se utilizase un lápiz sobre papel, directamente sobre la pantalla, incluyendo la sensibilidad a la presión. Las ideas del diseñador se convierten en un croquis digital. El otro extremo del lápiz superior funciona como una goma de borrar. Con el D-Board se puede leer y usar una gran variedad de formatos de archivo (Allplan, DWG, DXF, DGN, HPGL2...).

3.4. Software para apoyo en el proyecto básico y de detalle

Existen diferentes marcas que ofrecen este tipo de productos. Es imposible resumir aquí el panorama del mercado resumiendo to-

Tabla 4. Principales características del software para apoyo en el proyecto arquitectónico

Automatización parcial de la producción de planos, mediante:	
Generación de objetos tridimensionales que son directamente elementos constructivos; por ejemplo, trazando una línea estamos dibujando un tabique o una fachada, con todas sus capas.	
Generación automática, a partir del modelo 3D, de secciones, plantas, alzados y otros planos.	
Realización de cambios automáticos en cadena. Por ejemplo, si se cambia la composición de un muro de fachada, todas las puertas y ventanas cambiarán automáticamente, adaptándose al nuevo muro.	
Herramientas especializadas, por ejemplo, para crear y modificar muros cortina. O para la generación de vigas y columnas.	
Conversión automática de objetos de un tipo a otro (por ejemplo, una ventana en una puerta).	
Acotado asociativo, que se actualiza al cambiar el dibujo, eliminando las actualizaciones manuales.	
Conectividad de datos: conexión de cada objeto en pantalla con diferentes bases de datos; por ejemplo, con sus especificaciones técnicas / pliego de condiciones.	
Exportación de datos a sistemas gestores de bases de datos (p. ej. Microsoft Access), para su ordenación, consulta o exportación a otras aplicaciones para tareas específicas, como la estimación de costes.	
Sistemas para evitar dispersión de archivos, a través de herramientas de gestión del tipo "navegador de proyectos", que integran los diversos archivos del proyecto en un único entorno de trabajo.	
Herramientas de ayuda en la comunicación y en la ingeniería simultánea.	
Herramientas de intercambio de información entre el técnico que desarrolla el concepto y los que desarrollan las estructuras e instalaciones.	
Herramientas de visualización fotorrealista 3D y 4D, o conectividad o integración con aplicaciones que realizan presentaciones dinámicas 4D.	
Herramientas para incorporar al proyecto información histórica, de otros proyectos, a partir de planos en papel y fotografías, obtenidos mediante escáner, y su edición con información vectorial CAD.	

dos los productos que existen, y por ello vamos a introducir algunas de las aplicaciones de mayor uso.

En el campo del diseño arquitectónico dos de los más usados son Autodesk Architectural Desktop 2006 (Autodesk, 2005) y Nemetschek Allplan (Nemetschek, 2005). Architectural Desktop es similar a AutoCAD, incorporando adicionalmente una serie de herramientas específicas para diseño arquitectónico. Estas y otras aplicaciones similares suponen una automatización parcial de la producción de planos, y otras características que quedan resumidas en la Tabla 4. Con respecto a dichas características, el lector nota enseguida las principales ventajas. Por ejemplo, la generación de objetos tridimensionales supone que, en lugar de usar elementos geométricos ordinarios como líneas, círculos o arcos, se diseña directamente con objetos que son muros, escaleras o cubiertas. Además, se pueden llegar a incorporar capacidades de diseño con restricciones lógicas; por ejemplo, para que una puerta parta automáticamente a nivel del suelo, o una ventana sólo pueda ser creada en un objeto muro.

En el caso de los cambios automáticos en cadena, el aumento de productividad es obvio. Los objetos se recalculan automáticamente al ser insertados o modificados y cualquier cambio se refleja automáticamente en todas las demás fases y componentes afectados del proyecto (planos, mediciones...). Allplan, por ejemplo, incluye las he-

rramientas llamadas planos de referencia, que definen la referencia superior e inferior de un objeto. Se pueden crear elementos arquitectónicos limitados automáticamente por dichos planos. Cualquier modificación de orientación o posición de los planos de referencia será reconocida y ajustada automáticamente por los objetos constructivos (muros, huecos...). Se puede, por ejemplo, definir que un muro llega hasta la cubierta o que un hueco permanece siempre a una determinada distancia del forjado superior. Si se cambia la pendiente de un faldón de la cubierta o se modifica la posición del plano del forjado, los muros y el hueco de ajustarán de nuevo automáticamente a la nueva geometría (y la medición, ...).

Por último, en el caso de las herramientas para incorporar al proyecto información histórica, la utilidad es obvia en proyectos de rehabilitación, restitución, reforma y urbanismo, y para incluir en el proyecto planos de situación o detalles en papel, entre otros aspectos.

Hemos visto cómo Allplan o Architectural Desktop, entre otros, permiten una cierta automatización de la producción de documentos de proyecto. La automatización de los procesos de ingeniería, es un aspecto que está tomando gran importancia. También en el ámbito del diseño arquitectónico, Fisher (2003) introduce el software denominado Viva-Destini, que es un programa de diseño y dibujo para proyectos de edificación convencional que parametriza,

Tabla 5. Principales características del software para apoyo en el proyecto de obra civil

Características comunes con otras aplicaciones:	
Trabajo en tres dimensiones reales.	
Generación de objetos tridimensionales que son elementos constructivos.	
Sistema paramétrico.	
Conversión automática de objetos de un tipo a otro.	
Acotado asociativo.	
Conectividad de datos del diseño con diferentes bases de datos.	
Sistemas para integrar los diferentes archivos de cada proyecto.	
Publicación de los diseños realizados. Capacidades para la ingeniería simultánea.	
Herramientas de visualización fotorrealista.	
Herramientas para incorporar al proyecto información histórica.	
Características específicas:	
Incorporación de sistemas de gestión de la información geográfica (GIS).	
Análisis de curvas de nivel, pendientes y cuencas de captación.	
Actualización automática de curvas de nivel, volúmenes y análisis de superficies.	
Funciones dinámicas para diseñar y asignar tamaño a parcelas.	
Permiten el diseño respetando determinados criterios de diseño (peraltes, pendientes, ...).	
Permiten el equilibrado dinámico de volúmenes de desmontes y terraplenes.	

automatiza y acelera la producción de proyectos completos en 3D, basándose en unos pocos parámetros. Probablemente vamos a ver cada vez más este tipo de software, que realmente ya supone un diseño asistido por ordenador más avanzado y potente, de uso más fácil, y que también se puede aplicar a los proyectos de fábricas y plantas industriales, que entrañan bastante más dificultad que los de edificación convencional.

Autodesk Civil 3D 2006 (Autodesk, 2005) está orientada, a diferencia de las anteriores, a las obras lineales y al urbanismo. Esta aplicación, y otras similares, tienen características resumidas en la Tabla 5. Como se puede ver, las ventajas son también importantes. Por ejemplo, al tratarse de sistema paramétricos, como en el caso de Autodesk Civil 3D, si se mueve el eje de una carretera, instantáneamente se actualizan los perfiles y secciones del movimiento de tierras, entre otros aspectos, ahorrando tiempo y costes de ingeniería.

En lo relativo a los proyectos de construcción de plantas industriales, Intergraph (2005) ofrece soluciones de CAD/CAE de gran interés, específicas para diseño de plantas de proceso (químicas, petroquímicas, ...), de producción de energía y similares, como las plataformas off-shore. Intergraph ha desarrollado tradicionalmente aplicaciones de diseño más ambiciosas y de mayor alcance que los estándares del sector. Por ello, en el pasado, estas aplicaciones han necesitado plataformas de hardware más potentes (estaciones de trabajo con varios procesadores trabajando en paralelo). Hoy en día sus aplicaciones siguen siendo de gran potencia, pero para su uso es suficiente con disponer de ordenadores normales del tipo PC.

Intergraph SmartPlant es el software más avanzado de los que ofrece Intergraph para diseño de plantas industriales. Esta nueva generación de software está concebida para su uso tanto en fases de diseño y construcción como de operación / mantenimiento.

A la fecha de escribir estas líneas no están desarrollados todos sus módulos, pero SmartPlant se integra con Intergraph Plant Design System (PDS; ver más adelante), que es el programa tradicional de Intergraph para este tipo de trabajo, aumentando la capacidad individual de ambos programas. En el futuro se entiende que SmartPlant sustituirá a PDS, y la migración de datos está ya asegurada. Los módulos de diseño con los que cuenta en este momento se limitan, por ahora, al diseño y gestión de la información técnica, desde la concepción hasta la operación y mantenimiento de la planta, de los sistemas eléctricos, de instrumentación y control, y de los diagramas de diseño de tuberías e instrumentación (P&IDs). Se incluyen también módulos adicionales para visualización 3D de la planta diseñada, para su revisión y análisis; para compresión y descompresión de archivos, y su distribución automática a través de intranets e Internet; y para consulta, visualización y generación de informes a través de la Web.

Por su parte, Intergraph Plant Design System (PDS) (Figura 6) sirve también de ayuda en el diseño, construcción y operación de plantas industriales. Su clientela, por tanto, al igual que en el caso de SmartPlant, incluye no sólo al diseñador y ejecutor, sino también al explotador. Intergraph lo concibe como herramienta útil tanto para los pequeños proyectos de reforma como para los de gran



Figuras 6-1 y 6-2. Ejemplos de visualización de proyectos de construcciones industriales mediante el uso de Intergraph PDS (fuente: Intergraph, 2005).

Tabla 6. Principales características del software para apoyo en el proyecto de plantas industriales y centrales de producción de energía

Generación y gestión de los diagramas de flujo del proceso productivo.
Diseño de los sistemas de control de la operación de la planta.
Generación y edición de diagramas de diseño de tuberías e instrumentación (P&IDs).
Gestión de especificaciones técnicas / pliegos de condiciones.
Diseño detallado de redes de tuberías.
Modelización de equipos de proceso (recipientes, depósitos, torres, intercambiadores de calor, columnas y bombas, o elementos auxiliares como plataformas y escaleras, entre otros).
Modelización estructural para apoyo al análisis y generación de planos de proyecto de estructuras, que automatiza ciertas funciones de diseño.
Diseño automático de nudos de vigas, soportes, arriostramientos y otros elementos estructurales.
Diseño y dimensionado y colocación de soportes y anclajes de tuberías, para su modelización 3D, y su posterior integración con el resto del diseño de la planta, y para generar planos de fabricación.
Modelización de sistemas de ventilación, calefacción y aire acondicionado, incluyendo herramientas 3D interactivas para definir el layout y crear modelos de conductos y otros componentes.
Producción automática de isométricas con listas de materiales a partir del esquema de una red de tuberías, tanto en fase de diseño como de elaboración de los planos según construido.
Modelización 3D interactiva para definir el layout de las instalaciones eléctricas. Generación de esquemas eléctricos y diagramas de cableado.
Chequeo de interferencias: coincidencia física de dos elementos en un mismo punto, e interferencias "blandas" (por ejemplo, distancias de seguridad o escasez de espacio para mantenimiento y reparación).
Visualización 3D de conjunto de la planta industrial, y de partes de ella (como las redes de tuberías).
Acceso a bases de datos.
Posibilidad de adaptación del sistema a la normativa y estándares del sector.
Acceso a datos a través de la Web.
Ingeniería simultánea global. Los especialistas en las diferentes disciplinas técnicas pueden trabajar a la vez en el mismo proyecto.
Gestión del conocimiento. Entornos que permiten archivar los datos de buena práctica de la empresa para su uso en futuros proyectos.
Interconexión con otros paquetes de análisis estructural y de instalaciones.

tamaño, de miles de millones de Euros, pero normalmente sólo es usado por empresas relacionadas con grandes proyectos. Se trata de una herramienta que corre sobre MicroStation J (de la marca Bentley) y que para la creación de planos de redes de tuberías necesita el uso conjunto de la aplicación de Intergraph denominada SmartSketch. Los aspectos más reseñables

que incluye la aplicación incluyen la mayoría de las funciones reflejadas en la Tabla 6.

Como se puede observar en dicha tabla, el software para apoyo en el proyecto de plantas industriales y centrales de producción de energía permite cierta automatización de los procesos de ingeniería, con la corres-

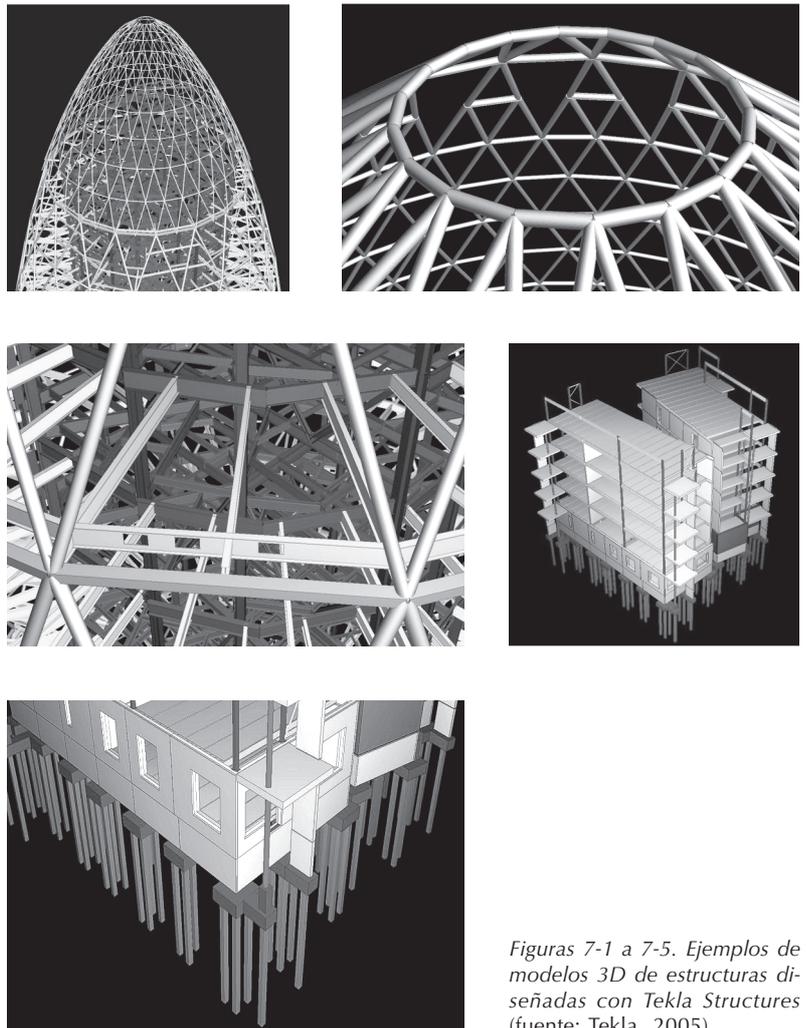
pondiente mejora de la productividad. Por su lado, la modelización 3D permite crear mejores diseños, al incluirse en ellos todos los sistemas y subsistemas necesarios, y poder contemplarlos tal como quedarán en la realidad. Las simulaciones dinámicas 4D permiten a diseñadores y personal de operación y mantenimiento visualizar la planta antes de construida (Figuras 6-1 y 6-2), y que éste último personal, por ejemplo, y entre otras cosas, detecte problemas que el personal de diseño podría no detectar, al no estar familiarizado con la realidad de la explotación de la planta.

El chequeo de interferencias es una función de máxima importancia en grandes plantas de proceso, para evitar o reducir los cambios y repeticiones de trabajo en obra. Con él se identifican conflictos "duros" por coincidencia física de dos elementos en un mismo punto del espacio, e interferencias "blandas", como puedan ser las causadas por la no existencia de suficiente espacio entre dos elementos del diseño, sea por operabilidad, seguridad o por necesidades de mantenimiento y reparación. Este tipo de chequeos se puede realizar para cualquiera de las disciplinas técnicas del proyecto (tuberías, electricidad, ...), y para todas a la vez (conflictos entre unas y otras en el proyecto completo). Y se suelen realizar sobre los modelos 3D existentes en cualquier fase del diseño. De esta manera se puede reducir el tiempo dedicado a la ingeniería y evitar sorpresas y cambios o repeticiones de trabajo con sobrecostes en fase de obra. Intergraph estima que esta utilidad, incluida en PDS, reduce entre el 50 y el 75% de los cambios y repeticiones de trabajo en obra, en comparación con proyectos complejos en que no se use. Al haber crecido tanto la potencia de los ordenadores de tipo PC, los requerimientos informáticos de PDS ya no son tan importantes como hace poco más de una década, en que se necesitaban estaciones de trabajo con dos o más microprocesadores trabajando en paralelo. Por ejemplo, las versiones actuales de PDS sólo necesitan un mínimo de PC con procesador Pentium, sistema operativo Windows 2000 Professional, o Windows XP Professional, 256 Mb de RAM, 540 Mb de espacio en disco, y monitor SVGA de 17" con tarjeta 2 MB VRAM. A pesar de que el uso de PDS implica el uso conjunto de otras aplicaciones informáticas (algunas ya comentadas, y otras como el uso de una base de datos relacional tipo RIS, más un RIS data server) que suponen requerimientos adicionales, los requerimientos reales no son realmente importantes.

Hasta aquí hemos hablado de programas de amplio alcance, que sirven de ayuda en el diseño de todos o casi todos los sistemas

constructivos y que, o bien se integran con otros programas de ingeniería asistida para realizar los cálculos y dimensionamientos estructurales y de instalaciones; o, incluso, incluyen dentro de su propio paquete dichos programas de cálculo.

Con respecto a los programas de ingeniería asistida por ordenador, existen tanto programas especializados en un solo campo, como programas que abarcan casi todos o todos los sistemas constructivos. Tekla Structures (Figuras 7-1 a 7-5), antes llamado XSteel, es un ejemplo de programa específico de cálculo y dimensionamiento estructural, desarrollado por la empresa finlandesa Tekla (2005). Se trata de un sistema paramétrico de modelización 3D de la información de estructuras de edificación de cualquier material (acero, hormigón, madera; la anterior versión, denominada XSteel, estaba sólo enfocada al acero y, realmente, la mayoría de referencias de Tekla Structures son en estructura metálica) que cubre el proceso completo de diseño, desde el diseño conceptual hasta la construcción, pasando por los detalles constructivos y la prefabricación,



Figuras 7-1 a 7-5. Ejemplos de modelos 3D de estructuras diseñadas con Tekla Structures (fuente: Tekla, 2005).

Tabla 7. Características deseables para los sistemas de diseño estructural, en las diferentes fases del proyecto

Ventas: concepción de diferentes soluciones alternativas; estimación de costes y plazos; preparación y emisión de documentos para ofertas.
Diseño conceptual: establecimiento preliminar de geometría, de secciones estructurales y del material de cada elemento; realización de planos preliminares.
Análisis: cálculo y dimensionamiento; diseño de uniones.
Proyecto constructivo: detección automática de intersecciones / interferencias indeseadas; generación de planos de proyecto y de taller / obra; mediciones y presupuesto.
Prefabricación: conexión con los sistemas de planificación de la producción y de automatización de la fabricación; transmisión de datos necesarios para la fabricación; emisión de datos para facturación.
Obra: planificación general y por lotes, y su programación; seguimiento y control de avance y de órdenes de cambio; control de la configuración; emisión de datos para certificaciones.
Desactivación: emisión de documentos para el mantenimiento a lo largo del resto del ciclo de vida de la estructura.
Comunes a todas las fases: generación y gestión de modelos paramétricos; visualización estructural 3D y 4D; ingeniería simultánea; publicación de informes a través de la Web.

en su caso. La Tabla 7 recoge las principales características deseables para este tipo de sistemas, en las diferentes fases del proyecto. Tekla Structures incluye la mayoría de ellas.

El modelo creado con Tekla Structures contiene toda la información geométrica y estructural de la totalidad del proyecto en curso, y la estructura puede ser visualizada en 3D, con la posibilidad de moverse por ella, realizando "paseos" en 4D. Tekla Structures permite el diseño en colaboración entre diferentes usuarios del sistema (ingeniería simultánea).

Se trata, por tanto, en este caso, de un programa de CAD / CAE que permite concebir y predimensionar estructuras de muy diverso tipo, calcularlas y dimensionarlas y, finalmente, dibujar la estructura resultante con un grado de detalle muy elevado, a efectos de su ejecución. Existen también empresas españolas que ofrecen programas del mismo tipo, como es el caso de CYPE Ingenieros (2005) y de Arktec (2005). Este tipo de programas son bien conocidos en el entorno español, y por eso no vamos a entrar en más detalles sobre ellos.

Como decíamos antes, hay programas de CAE que abarcan casi todos o todos los sistemas constructivos. Este sería el caso, por ejemplo, y aprovechando para volver a dar un ejemplo de empresas españolas, del software de CYPE Ingenieros (2005) para cálculo y dimensionamiento estructural y de instalaciones edificatorias y urbanas, conocido de sobra por los arquitectos e ingenieros españoles.

3.5. Aplicaciones específicas para la modelización del entorno existente

Más arriba se ha visto cómo las aplicaciones de CAD y de realidad virtual permiten reali-

zar visualizaciones 3D y 4D (normales e interactivas, por medio de la realidad virtual, en este último caso). Y con ello cómo, entre otras cosas, se puede estimar el impacto visual de las nuevas construcciones sobre entorno existente. Tradicionalmente, el problema de este tipo de simulaciones ha sido representar dicho entorno con tanto foto-realismo como el usado para el modelo de la nueva instalación a construir. Para un mayor realismo de la simulación, con objeto de analizar el referido impacto visual, existen programas que son capaces de representar en imágenes estáticas las distintas vistas de la nueva construcción sobre fotos reales del entorno del sitio de la obra. Y también software como PhotoModeler, de la empresa canadiense Eos Systems (2005), que permite crear modelos tridimensionales de los edificios colindantes a partir de sus fotografías (dos o más fotos que tengan zonas comunes, en formatos electrónicos de casi cualquier tipo), para luego generar animaciones de movimiento, entre otros aspectos. El proceso es bastante sencillo. Tras fotografiar y tomar medidas de cada uno de dichos edificios, se construyen modelos tridimensionales de los mismos, y en ellos se "pegan" las imágenes fotográficas de los diferentes edificios. Una vez generado el modelo 3D, éste puede exportarse a aplicaciones de CAD o de visualización 4D (exporta formatos DXF, 3D Studio y VRML, entre otros). Y con ello se crea un entorno virtual que incluya la nueva construcción junto con los edificios y otras infraestructuras existentes que van a rodearla, y se realizan simulaciones en 3D y 4D para analizar la estética real del conjunto y el impacto visual.

3.6. Software para simulación y visualización de los procesos de construcción

Un aspecto que está tomando cada vez mayor importancia es la simulación y vi-

Tabla 8. Características deseables del software para simulación y visualización de los procesos de construcción

Comunicación e intercambio de datos con plataformas CAD.
Comunicación e intercambio de datos con programas de control de plazo y coste (Project, Primavera), o con sistemas de gestión de materiales, entre otros.
Estudios de ayuda en el análisis de la constructibilidad; por ejemplo, incluyendo detección de colisiones / intersecciones / interferencias indeseadas durante la ejecución.
Sincronización del modelo virtual de la obra con el programa del proyecto, trabajando por áreas de proyecto / de obra.
Organización de materiales y componentes por especialidades / oficios, o por tipo de materiales y, a su vez, por áreas de proyecto / de obra.
Establecimiento de modelos de secuencias de trabajo de diferentes especialidades para cada área de proyecto / de obra.
Generación de listas de prioridad de trabajos a realizar, por áreas de proyecto / de obra.
Seguimiento y control de la contratación, compras y fabricación de materiales y equipos a incorporar a la obra; visualización de su llegada diaria a obra y su interrelación con el personal disponible para montaje.
Creación de paquetes de trabajo, asignación a los mismos de horas de trabajo estimadas y personal y equipos, en función de su disponibilidad, seguimiento semanal de los trabajos de cada paquete.
Optimización de la secuenciación de la ejecución de los diferentes paquetes de trabajo.
Detección de interdependencias entre actividades, para facilitar la coordinación en obra.
Preparación y análisis de escenarios del tipo "Qué pasaría si" sobre el modelo virtual, para facilitar la toma de decisiones a efectos de programación de las obras.
Programas detallados de ejecución, semanales y diarios, generales y por áreas de proyecto / de obra.
Análisis de las consecuencias de solicitudes y órdenes de cambio sobre el plazo y el coste; actualización automática del modelo y del programa con las consecuencias de una orden de cambio aprobada.
Generación de informes visuales y escritos de avance de obra con códigos de colores en función del grado de avance (planificado a la fecha, completado a la fecha, pendiente de completar, ...); informes visuales 3D (informes a la fecha) y 4D (informes históricos globales o parciales de avance).
Trabajo por sistemas, a efectos de la preparación y realización de pruebas y puesta en marcha.

sualización del proceso de construcción. Esto es muy importante en proyectos complejos en los que puede haber interferencias importantes (por ejemplo, por escasez de espacio de trabajo) entre el proceso de ejecución y los sistemas constructivos ya ejecutados previamente y, más todavía, en los proyectos de ampliación o reforma en los que la ejecución es simultánea a la explotación de la parte de la instalación (hospital, planta industrial) que ya existía previamente. El software estándar de CAD, como AutoCad o Microstation permite, con cierta imaginación, su uso para realizar visualizaciones muy sencillas de la ejecución; esto puede hacerse incluso, a un nivel todavía más sencillo, con algunas herramientas convencionales de ofimática; pero en ambos casos la visualización apenas ayuda a solucionar eficazmente los problemas de ejecución. Empiezan a verse ya programas como Common Point ConstructSim (Fisher, 2003; Common Point, 2005), de simulación dinámica de la ejecución de obras, que se están empezando a usar para evitar los referidos problemas de ejecución y de conflictos con los usuarios en proyectos de ampliación o reforma.

Common Point ConstructSim se basa en el uso de un modelo virtual de la nueva instalación a construir, y permite planificar, programar, ejecutar y realizar el seguimiento de las obras. Integra CAD en 3D, programación

del proyecto, bases de datos de control del proyecto, sistemas de gestión de materiales y otros tipos de información digital, en un entorno avanzado de simulación y optimización de la construcción.

Este software está dirigido a una amplia variedad de usuarios (contratistas tradicionales, contratistas llave en mano, propietarios de instalaciones, direcciones profesionales de la construcción / "construction managers", subcontratistas, fabricantes / talleres, ingenierías), en proyectos de cierta complejidad, como puedan ser los de plantas de proceso químicas y petroquímicas, de extracción y transporte de petróleo y gas, de plataformas off-shore, de centrales de producción de energía, o de fábricas de los sectores farmacéutico, de fabricación de vehículos automóviles y similares, e industria pesada. ConstructSim permite la mayoría de las funciones que se resumen en la Tabla 8.

Son escasas las aplicaciones comerciales de este tipo pero, sin embargo, algunas grandes empresas disponen de aplicaciones de este tipo realizadas a medida o desarrolladas internamente. Éste es el caso de Fluor (2005) y Bechtel (2005), que son las dos empresas de ingeniería más grandes del mundo. Fluor dispone de los sistemas denominados InSequence y CompleteItSM, para planificación de la construcción en 4D. Y de una suite informática denominada

MaterialManager, con conexión a través de Internet, que integra las funciones de compras y de gestión de los materiales, elementos o equipos adquiridos, ligando todo ello con los sistemas de gestión del proyecto. Por su parte, Bechtel ha desarrollado también software de gran interés para apoyo en la fase de construcción.

3.7. La gestión del conocimiento y de apoyo a la ingeniería simultánea

Recordemos que la gestión del conocimiento supone, por medio de herramientas informáticas, capturar el conocimiento corporativo, almacenarlo y aprovecharlo. En este sentido, ya se ha visto cómo la aplicación OptimEyes de generación de layouts que usa la empresa Fluor (2005) tiene esta capacidad, y cómo también la tiene PDS, el software de CAD / CAE de Integraph (2005), para diseño de plantas industriales.

También hemos visto cómo casi todas las aplicaciones de CAD / CAE de las que se ha hablado tienen capacidades para el diseño en simultáneo de un mismo proyecto por parte de diferentes técnicos dispersos geográficamente. La empresa de ingeniería Fluor (2005), por ejemplo, dispone de una herramienta colaborativa y de gestión de la documentación del proyecto denominada Projects OnLine. Esta herramienta sirve para conectar a todo el equipo de proyecto (oficina central, oficina de obra, clientes, suministradores, fabricantes) de manera que puedan colaborar en su trabajo independientemente de su localización geográfica.

Otro ejemplo es Architectural Desktop, que permite publicar los diseños realizados en 2D y 3D, incluidos materiales y propiedades de objeto, y compartirlos con seguridad a través de Autodesk DWF (Design Web Format). Y, por otro lado, Autodesk ofrece también la aplicación llamada Buzzsaw, que es una herramienta de colaboración en línea, incluyendo herramientas para gestionar toda la información del proyecto.

4. CONCLUSIONES Y AVANCES DESEABLES A FUTURO

A lo largo del presente texto se ha realizado un análisis de la evolución y estado actual de las herramientas de CAD / CAE de uso en el sector de la construcción, reflejando las principales características del software actual y las tendencias actuales más avanzadas. La evolución reciente es, desde el punto de vista de los autores, más que espectacular, y hay muchos técnicos y empresas pequeñas y medianas (pertenecientes a subsectores de menor complejidad que el de la

construcción industrial) que no conocen todas las posibilidades que brindan este tipo de herramientas. Y muchos de ellos no aprovechan la mayoría de las posibilidades que el mercado les ofrece, limitándose a la utilización de paquetes estándar de los que no obtienen la productividad que podrían alcanzar con otras aplicaciones más especializadas, algunas de las cuales han sido aquí referidas. Sin embargo, no todo el panorama actual es merecedor de parabienes. Por un lado, el coste (licencias y costes internos) que supone para las PYMES el uso de las herramientas más avanzadas es difícil o imposible de soportar. Por otro lado, el "sarampión" que supone para la organización la implantación de estos sistemas (que incluye la formación del personal), no tiene porqué ser corto ni leve. Si definimos "madurez" de la empresa como el conjunto de conocimientos y experiencia formales que ésta posee en el uso de las tecnologías de la información y en el campo del diseño e ingeniería de la construcción, esta madurez está relacionada con la facilidad para asimilar herramientas avanzadas. Dicha madurez se ve influida por diversos aspectos, como son la más o menos dilatada trayectoria profesional de la empresa, o la capacidad para documentar los conocimientos y experiencia, o para contratar y retener a su personal clave (el que acumula mayor conocimiento). Cuanta menor madurez tenga la empresa, más difícil y larga va a ser la implantación de herramientas novedosas, y mayor va a ser la probabilidad de fracaso en dicha implantación, y viceversa. Este tipo de herramientas a veces suponen el uso de metodologías de trabajo a las que la empresa puede no estar acostumbrada, y que normalmente son más eficientes que las que dicha empresa pudiera tener.

Por ello, por un lado, es imprescindible que las aplicaciones tengan un uso lo más sencillo y amigable posible. Y, por otro, la Universidad debe formar a sus técnicos a un alto nivel no sólo en los aspectos de cálculo y dimensionamiento de sistemas constructivos, sino también en las metodologías más eficientes para la ingeniería y la gestión del proyecto. Por lo demás, existen hoy en día otras carencias que pueden verse superadas en el futuro, y que se van a referir a continuación al hablar de lo que cabe esperar en este campo.

La posible evolución a futuro parece que será importante y rápida, ya que ha sido relativamente reciente el momento en el cual los ordenadores personales han empezado a tener suficiente potencia como para realizar, entre otras cosas, simulaciones 4D sin problemas graves. A futuro, entre otros aspectos, cabe esperar:

- Que la posibilidad de diseño en paralelo de diferentes alternativas sea algo normal en el software de CAD / CAE, así como de herramientas del tipo “Qué pasaría si” para el análisis de alternativas de diseño.
- La incorporación a este tipo de software de herramientas que hoy en día no son comunes o no existen, como por ejemplo, las que permitan calcular parámetros de sostenibilidad de los diferentes sistemas constructivos. O los sistemas expertos que permitan seleccionar tipologías de cerramientos y diseñar los mismos, teniendo en cuenta pérdidas de energía, aspectos acústicos del entorno del edificio y de su interior, o criterios de sostenibilidad, entre otros criterios cualitativos y cuantitativos. Ello permitirá al usuario diseñar construcciones de mayor funcionalidad y respeto al medio ambiente.
- La existencia de posibilidades reales y asequibles de conexión con aparatos de realidad virtual para contrastar las soluciones conceptuales y para hacer demostraciones al futuro usuario de la edificación.
- Que los subsistemas de gestión del conocimiento adquirirán más y más importancia y serán un componente esencial de los sistemas de CAD / CAE. Ello permitiría la existencia de aplicaciones de gran utilidad que, por ejemplo, sean capaces de establecer soluciones automáticas por defecto sobre sistemas constructivos, salvo indicación en contra del usuario; o que hagan recomendaciones al usuario durante el proceso de diseño.
- Que mejorarán las capacidades del software para ingeniería simultánea.
- Relacionado con lo anterior, X3D va a incluir la posibilidad de formato binario y, con ello, encriptación (y, por tanto, seguridad) y compresión (y, por tanto, más velocidad). Esta posibilidad, actualmente en fase desarrollo (Web3D Consortium, 2005), puede ser un importante punto de apoyo de la ingeniería simultánea.
- Un probable uso creciente de técnicas de visualización a través de la Red. Y en esto probablemente tenga un papel clave el VRML / X3D. En general, X3D (Web3D Consortium, 2005) tiene todos los elementos necesarios para triunfar pero cabe la posibilidad de que, al tener unos objetivos tan altos (formato universal para todos los gráficos en 3D y realidad virtual), si no se trabaja lo suficiente, X3D fracase por exceso de ambición.
- La aparición de herramientas para apoyo en el análisis de valor y de constructibilidad, con objeto de definir soluciones alternativas, de análoga funcionalidad y:
 - mayor rapidez de construcción
 - mayor sencillez de construcción
 - mayor seguridad en la construcción o en la explotación
 - menor coste de construcción o de operación y mantenimiento.
- Un más que deseable y lógico aumento de la facilidad de uso de las herramientas de CAD / CAE, y en particular en determinados aspectos, como es la visualización; ello llevará a un mayor uso de este tipo de herramientas. Es ya una realidad cómo, en otros campos, cada vez son más las empresas de cierto tamaño que apuestan por el cambio hacia software de CAD paramétrico en 3D (como Pro/Engineer o Catia) en detrimento de los hasta ahora más usados y, también, más limitados, como AutoCad o Microstation, a pesar del importante desembolso económico que conlleva el cambio, tanto en las licencias como en la formación del personal. El aumento en la productividad puede compensar ampliamente las inversiones realizadas. Parece lógico que dicha tendencia se generalice (sobre todo con el aumento de la capacidad del soporte físico), y se extienda al sector de la construcción.
- Quizá a más largo plazo, la incorporación de herramientas que establezcan relaciones entre todo tipo de factores y circunstancias de los usuarios de la edificación con las características de la misma, haciendo recomendaciones de diseño. En la arquitectura residencial, por ejemplo, cuestiones tales como la originalidad deseada por el usuario y sus gustos (modernos o clásicos), su edad y sexo, o determinados aspectos de su carácter, influyen o pueden influir sobre el estilo de la edificación (clásico, vanguardista), el número de plantas, la posible existencia de diversos niveles en cada planta, el grado de acristalamiento, el tipo de solados, el tipo de acabados en paramentos verticales y techos, o los colores de los acabados en el interior y en el exterior, entre otros aspectos.

Para terminar, y como habíamos anticipado, hay que reseñar que del concepto de dibujo asistido por ordenador se ha pasado, en relativamente poco tiempo, al de dibujo, diseño e ingeniería asistidos por ordenador, y que se tiende a la integración de las diferentes aplicaciones informáticas de CAD / CAE. Está claro que continuará la tendencia arriba detectada hacia la integración entre el CAD y las aplicaciones de cálculo y dimensionamiento estructural y de instalaciones, lo que permitirá una más rápida evaluación del diseño de dichos sistemas constructivos. Pero es probable que, a un plazo un poco más largo, asistamos, de manera progresiva, a la integración total para todas las fases del proyecto, en un concepto que podría denominarse Construcción Integrada por Ordenador (CIO) (Figura 8). Se trata de la integración entre las diferentes fases del proyecto (planificación, diseño, contratación y compras, construcción, ...) junto con la integración entre las diferentes disciplinas técnicas del mismo, todo ello incluyendo automatización y la robotización de la construcción,

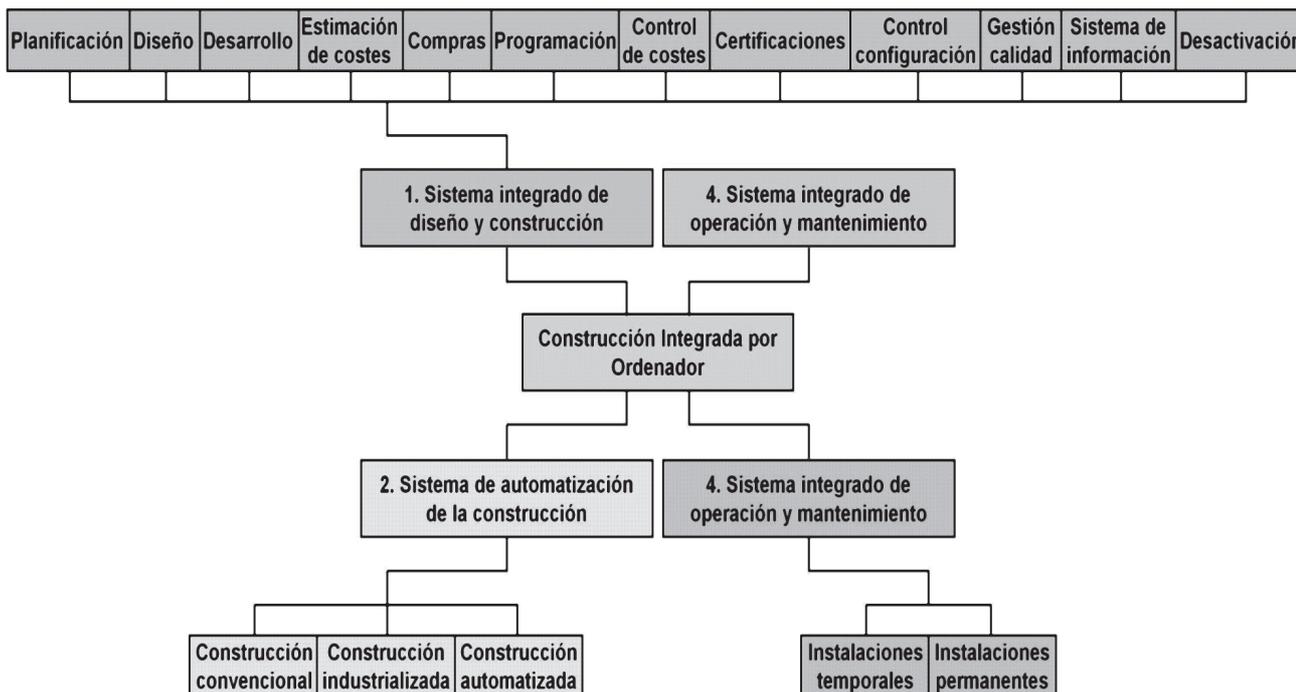


Figura 8. Esquema general del concepto de Construcción Integrada por Ordenador (fuente: del Caño y de la Cruz, 1993).

e incluyendo también herramientas que faciliten la colaboración, durante el diseño, de suministradores y contratistas en el concepto de ingeniería simultánea. Se trata de un concepto del que se ha empezado a hablar desde hace años (del Caño y de la Cruz, 1993; Wagter, 1992) y que el tiempo está demostrando, tal como se aprecia en este

artículo, que es una posible tendencia clara a futuro.

AGRADECIMIENTOS

Al Departamento de Ingeniería Industrial II de la Universidad de La Coruña, por su apoyo en este proyecto.

REFERENCIAS

- Arktec (2005), página web de la empresa Arktec, consultada en octubre de 2005 www.arktec.com.
- Autodesk (2005), página web de la empresa Autodesk, consultada en julio de 2005 en www.autodesk.com y www.autodesk.es.
- Bechtel (2005), página Web de la empresa Bechtel Corporation, consultada en <http://www.bechtel.com>, en mayo de 2005.
- Bozdoc, Marian (2005), The History of CAD, consultado en octubre de 2005 en <http://mbinfo.mbdesign.net/CAD-History.htm> (Auckland, NZ).
- Brooks Automation (2005), página web de la empresa Brooks Automation, consultada en julio de 2005 en http://www.brooks.com/pages/237_automod_simulation_software.cfm.
- Common Point (2005), página web de la empresa Common Point, consultada en julio de 2005 en <http://www.commonpointinc.com/>
- CYPE Ingenieros (2005), página web de la empresa CYPE Ingenieros, consultada en octubre de 2005 en www.cype.es
- de la Cruz, M.P., del Caño, A. (2001), "Construcción y arquitectura industrial para el siglo XXI: un análisis preliminar", *Informes de la construcción* (Instituto Eduardo Torroja, Madrid, España), Vol. 53, nº 473, Mayo-Junio de 2001, pp. 39-53.
- del Caño, A., de la Cruz, M.P. (1993), "Del dibujo asistido por ordenador a la construcción integrada por ordenador: una propuesta conceptual", diciembre de 1993, pp. 30-33.
- Delmia (2005), página web de la empresa Delmia, consultada en julio de 2005 en www.delmia.com.
- Díaz, A.M., González, M.J. (2001), "Informática gráfica y su aplicación a modelos geométricos 3D: realidad virtual", *documentación interna Departamento de Ingeniería Industrial II*, Universidad de La Coruña.
- Domínguez, M., Conde, J. Borrego, J.L., Espinosa, M.M., Fadón, F., Pose, J., Ochoa, J.M., Sanz, J.M., de la Cruz, M.P., del Caño. A., Arenas, J.M. (1995), "Diseño y dibujo asistido por computador", UNED, Madrid, España (ISBN 84-362-3282-8).
- Eos Systems (2005), página web de la empresa Eos Systems Inc, consultada en julio de 2005 en www.photomodeler.com.

- Fisher, M. (2003), "The Benefits of Virtual Building Tools", *Civil Engineering*, Vol. 73, Nº 8, pp. 60-67.
- Fluor (2005), página Web de la empresa Fluor Corporation, consultada en <http://www.fluor.com>, en mayo de 2005.
- Imagine That (2005), página Web de la empresa Imagine That Inc., consultada en <http://www.imaginethatinc.com>, en octubre de 2005.
- Intergraph (2005), página web de la empresa Intergraph, consultada en julio de 2005 en <http://ppm.intergraph.com>.
- Lipman, R. (2002), "Mobile 3D Visualization for Construction", *Proceedings of the 19th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, 23-25 September 2002, Gaithersburg, MD, USA, pp. 53-58.
- Martínez, P., Finch E., Ursua, C., Zazu, T., Arlegui, J. (2002), "Virtual Reality Modelling Language en proyectos de construcción", *AEIPRO VI International Congress on Project Engineering*, organizado por la Asociación Española de Ingeniería de Proyectos, Barcelona, 23 al 25 de octubre de 2002, pp. t10-35-1 a t10-35-9.
- Nemetschek (2005), página web de la empresa Nemetschek, consultada en julio de 2005 en <http://www.nemetschek.es/>.
- Parallel Graphics (2005), "Cortona VRML Client 4.2", plug-in para el sistema operativo Windows descargado por los autores en ésta y en anteriores versiones, desde la página Web www.parallelgraphics.com/products/cortona (consultado por última vez en junio de 2005).
- Silicon Graphics y Platinum Technology (2005), Cosmo Player 2.1.5 for IRIX, disponible para su descarga en la página Web www.sgi.com/products/software/cosmo/ (consultado en junio de 2005).
- Sketchup (2005), página web de la empresa Sketchup, consultada en octubre de 2005 en www.sketchup.com
- Tekla (2005), página web de la empresa Tekla, consultada en julio de 2005 en <http://www.tekla.com>.
- The Construction Industry Institute (2005), "Emerging Construction Technologies. VRML Applications in Construction." *The Construction Industry Institute (CII)*, consultado en <http://www.new-technologies.org/ECT/Internet/vrml.htm>, en julio de 2005.
- UGS / Tecnomatix (2005), página web de la empresa UGS / Tecnomatix Technologies, consultada en octubre de 2005 en www.ugs.com.
- Wagter, H. (1992), "Computer integrated construction", *Elsevier*, Amsterdam, The Netherlands.
- Warwick, K., Gray, J., Roberts, D. (editors) (1993), "Virtual Reality in Engineering", The Institution of Electrical Engineers, UK.
- Waurzyniak, P. (2003), "Digital manufacturing taking hold. Collaborative 3-D visualization tools help manufacturers sharpen focus.", *Manufacturing Engineering*, January 2003, Vol. 130, No. 1, consultado en Julio de 2005 en la Web de la USA Society of Manufacturing Engineers, en <http://www.sme.org/gmn/mag/2003/03jam002/03jam002.html>.
- Web3D Consortium (2005), Web del Consorcio Web3D (Web3D Consortium, 225 Bush Street, 16th Floor, San Francisco, CA 94104, USA), consultada en <http://www.web3d.org/> en junio de 2005.

* * *