Sistemas de CAD de rango medio[1]

Marc Vigo Anglada
Lluís Solano Albajes [2]

Secció d'Informàtica Gràfica
Dept. Llenguatges i Sistemes Informàtics
Universitat Politècnica de Catalunya

20 de marzo de 2000

Resumen

Actualmente, gracias a un aumento considerable de las prestaciones del hardware, existe una amplia gama de sistemas de CAD para ordenadores personales, desde pequeños sistemas 2D hasta sofisticados y completos sistemas 3D. En este documento se explica qué tipos de sistemas existen hoy en día sobre PC, qué prestaciones básicas ofrecen y cuáles son sus características fundamentales. Nos centramos en aplicaciones 3D de rango medio, especialmente en CAD para entornos de diseño mecánico. En primer lugar, se clasifican los actuales sistemas de CAD ateniéndose a distintos criterios y se caracterizan los sistemas de rango medio. Seguidamente, se presenta la metología de diseño que siguen estos sistemas, diferenciando entre el método clásico y el diseño paramétrico basado en características, y se analizan las prestaciones y la estructura de los sistemas de rango medio, describiendo brevemente cada uno de los módulos de que suelen estar compuestos. También se discute la problemática de los formatos de CAD estándares, y se analizan las prestaciones de la interfaz de usuario específica de los sistemas de CAD que estudiamos. Finalmente, se presentan las conclusiones. Además de las referencias bibliográficas, se también incluyen una lista de direcciones de de Internet relacionadas con el tema.

Abstract

At present, thanks to the increase of hardware performance, there is a wide range of CAD systems for personal computers, from small 2D applications to sophisticated and complete 3D systems. CAD systems for PC platforms are

[1]Este trabajo ha sido financiado en parte por el proyecto de investigacion CICYT TIC 98-0586.

[2]Los autores de este informe figuran en orden alfabético inverso.

studied in this report, analyzing its basic functionalities and fundamental characteristics. We focus on mid-range 3D applications, specifically in mechanical CAD environements. Actual CAD systems are classified according to different criteria, and mid-range systems are characterized. The design methodology is described, distinguishing between the classical approach and the parametric feature-based design. The structure of these systems is studied, briefly describing the typical modules they are made of. Problems with standard CAD file formats are discussed, and the specific interface widgets are presented. Finally, the conclusions are presented. Besides bibliographic references, a list of web sites concerning CAD systems is also included.

1 Introducción

Actualmente debido a un aumento considerable en cuanto a las prestaciones del hardware, sobre computadores del tipo PC, existe una amplia gama de sistemas de CAD, desde pequeños sistemas 2D hasta sofisticados y completos sistemas 3D. No hace falta recurrir a grandes sistemas sobre costosas estaciones de trabajo para alcanzar prestaciones y funcionalidades que hasta hace bien poco eran impensables en los sistemas 3D para PC.

En este documento se explica qué tipos de sistemas existen hoy en día sobre PC, qué prestaciones básicas ofrecen estos sistemas y cuáles son sus características fundamentales. Nos centraremos en aplicaciones 3D de rango medio, especialmente en CAD para entornos de diseño mecànico. Actualmente, en los sistema de CAD de rango medio es donde se está librando una dura batalla por dominar dicha porción del mercado. Se trata una gama de sistemas realmente atractiva dado que los productos que hay ofrecen potentes prestaciones que antes sólo era posible encontrar en los sistemas de gama alta. En este sentido, este documento no pretende ser una comparativa de los distintos productos del mercado, sinó una caracterización los sistemas de CAD de rango medio, así como un análisis de sus prestaciones, su estructura y su metodología de trabajo, sin hacer émfasis en ningún sistema en concreto.

En la siguiente sección, clasificamos los actuales sistemas de CAD ateniéndonos a distintos criterios y caracterizaremos los sistemas de rango medio. En la sección 3 explicamos la metología de diseño que siguen los sistemas de CAD, diferenciando entre el método clásico y el diseño paramétrico basado en características, y en la sección 4.1 analizamos las prestaciones y la estructura de los sistemas de rango medio, describiendo brevemente cada uno de los módulos de que suelen estar compuestos. La sección 4.2 se ocupa de la problemática de los formatos de CAD estándares, y la sección 4.3 presenta la interfaz de usuario específica de los sistemas de CAD que estudiamos. Finalmente, la sección 5 reúne las conclusiones. Para el lector interesado, además de las referencias bibliográficas incluimos también una lista de direcciones de Internet relacionados con los sistemas de CAD.

2 Clasificación de los sistemas de CAD

Podemos clasificar los sistemas de CAD según distintos criterios: dependiendo de si trabajan con diseños en dos o en tres dimensiones, en función del campo de aplicación para el que estén especializados o según la gama de prestaciones de que disponga. Como veremos, estas distintas formas de clasificar los sistemas no son independientes; por ejemplo, es de esperar que un sistema de gama alta permita crear objetos limitados por superficies no planas; en cambio, un sistema de dibujo de planos no tiene porque disponer de complicadas operaciones en 3D para el CAD mecánico.

2.1 Sistemas 2D y sistemas 3D

La primera clasificación que es posible hacer dentro del mundo de sistemas de CAD es según si el sistema trabaja únicamente con diseños en 2 dimensiones o si el sistema es capaz de manejar geometría en el espacio tridimensional. A los primeros los llamaremos sistemas 2D y a los segundos sistemas 3D.

Los sistemas 2D típicamente son utilizados para la generación de dibujos y planos. Además de herramientas de dibujo en 2D, estas aplicaciones disponen de herramientas para la gestión de textos, cotas y anotaciones en dibujos y planos. Hay que decir que los sistemas 3D, normalmente tienen incorporado un subsistema 2D para la generación de la documentación técnica y la gestión de planos. Los planos se generan a partir de proyecciones del modelo 3D. Usos típicos de un sistema 2D serían el dibujo de piezas mecánicas, dibujo arquitectónico de la planta de un edificio o, en electrónica, el diseño de circuitos impresos. De hecho, los sistemas de CAD 2D juegan el papel de del tablero de dibujo clásico.

Los sistemas 3D se utilizan para obtener un modelo sintético del producto que se está diseñando. Con un modelo sintético se puede interaccionar, tomar medidas, ver el aspecto, evaluar el diseño y extraer información, sin necesidad de construir físicamente (fabricar) el producto. El modelo sintético puede servir tanto para representar objetos sólidos, como objetos del tipo suferficie libre. En el mercado existen sistemas que sólo permiten trabajar con sólidos, otros que sólo disponen de superficies y sistemas que integran ambos tipos de objetos (véase la figura 3).

El objetivo del CAD mecánico es el diseño de piezas con la ayuda del ordenador, y por ello las aplicaciones dentro de este campo se ocupan del modelado tanto de sólidos como de superficies. Estos modelos de piezas se pueden convertir en piezas físicas siguiendo un proceso de fabricación , o utilizarse en procesos de simulación. Al proceso de fabricación asistida por computador se le llama CAM (*Computer Aided Manufacturing*). Si bien el enlace entre CAD y CAM parece que no tendría problema en ser automático, puesto que las dos tareas se realizan mediante el ordenador, a menudo en la práctica no es así, ya sea porque la información necesaria para la manufactura no esté totalmente incluida en los formatos de CAD o porque se considere que el modelo CAD sólo es una aproximación de la pieza final que hay que pulir y probar (muchas veces la empresa diseñadora y la manufacturadora no son la misma). Aunque en este documento no trataremos en profundidad el tema

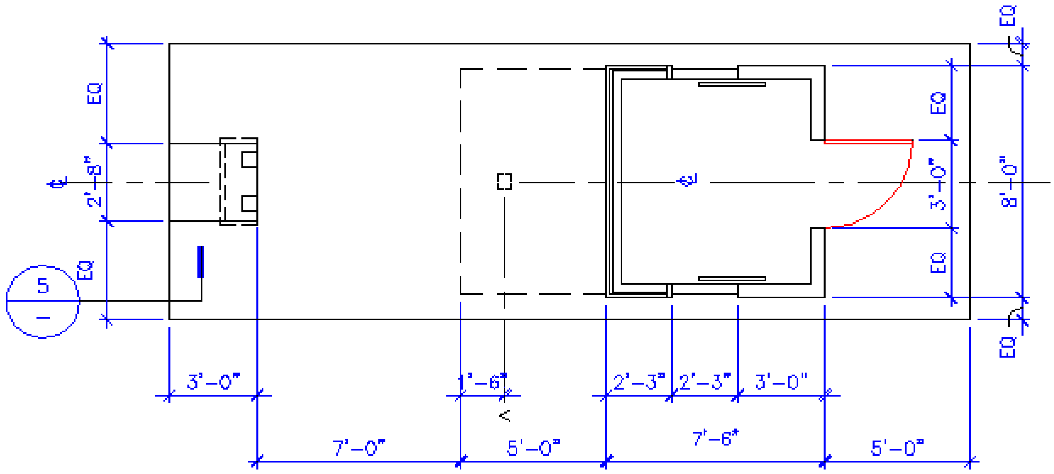

Figura 1: Ejemplo de plano técnico de la planta de un edificio realizado con AutoCAD LT.

de la integración entre las diferentes etapas del ciclo de vida de un producto, hemos de destacar que éste es un punto pendiente en el uso de los sistemas de CAD. Según D. Deitz, "lo que parece que falta en los sistemas modernos de CAE (*Computer Aided Engineering*) es la integración entre diseño, manufactura y herramientas de análisis", [Dei97]. En parte, esta falta de integración entre CAD y CAM se consigue gracias al uso de planos técnicos detallados, según el método de trabajo tradicional. Para construir físicamente una pieza es necesario disponer de planos, con acotaciones, distintas vistas, proyecciones, cortes, detalles ampliados, listas de materiales y componentes, etc. Por lo tanto, en un sistema de CAD, no hay que descuidar todo lo relacionado con la creación de planos y de documentación técnica (véase la figura 1). Por ello, en la indústria hay un núcleo de usuarios que utilizan exclusivamente sistemas de CAD 2D.

2.2 Campos de aplicación

Los sistemas de CAD mecánico inicialmente ofrecen un conjunto de funcionalidades y herramientas para el diseño básico de piezas, que son tratadas como elementos independientes. Pero como normalmente un diseño está formado por conjuntos de piezas, los sistemas de CAD mecánico incorporan también operaciones para el diseño de conjuntos o mecanismos (*assemblies*, véase la figura 2) que permiten definir y gestionar diseños que están formados por distintas piezas que se han creado de forma independiente. Este campo exi-

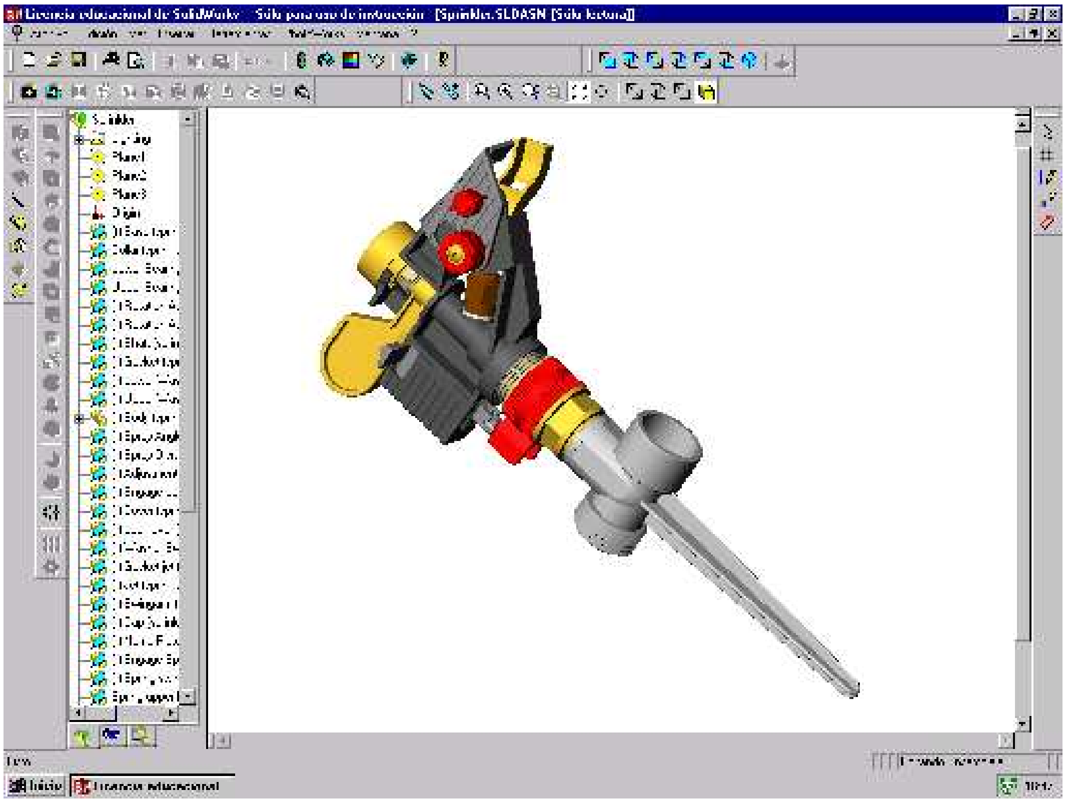

Figura 2: Aspersor diseñado como un mecanismo compuesto por distintas piezas.

ge requerimentos nuevos, en particular la ubicación relativa de las distintas piezas, la instanciación de una pieza concreta y el análisis de los grados de libertad restantes en un conjunto, que determinan los posibles movimientos del mecanismo. Las técnicas empleadas para la solucionar estos problemas son la ampliación de las herramientas de la interfaz de usuario y el uso del diseño paramétrico y del resolvedor de restricciones geométricas (véanse las secciónes 3.2 y 4.3).

Otro campo en el que se han especializado los sistemas de CAD mecánico es el diseño de piezas de chapa. Si bien se pueden modelizar como sólidos clásicos, las piezas de chapa requieren un tratamiento distinto, principalmente porque se crean mediante operaciones de corte, doblado, y prensado a partir de una plancha metálica inicialmente plana. Por lo tanto, el modelo más quizás adecuado sea otro, más cercano al de un trozo de superficie con un grosor determinado.

Finalmente, también podemos incluir dentro del CAD mecánico otro tipo de diseños especializados, como el trazado de tuberías y conductos (*piping*) o el mallado de superfices (*meshing*), para poder realizar simulaciones del comportamiento de las piezas que se estén diseñando. En el trazado de tuberías y conductos se dispone de herramientas para la definición del recorrido por donde pasa una tubería y operaciones para gestionar la posición de elementos que intervienen en una tubería, como puedan ser válvulas, bifurcaciones, reductores, instrumentos de medida, depósitos, etc.

Un aspecto importante a remarcar es que, por lo menos en muchos sistemas de CAD mecánico, el diseño de sólidos aún se concibe de forma separada del diseño de superficies de forma libre. La mayoría de sistemas 3D trabajan con uno u otro tipo de superficies no planas, y casi todos incluyen arcos y curvas libres (por ejemplo, definidas a partir de puntos de control o puntos de paso) como parte de los perfiles que más tarde se barrerán, formando protuberancias, agujeros, etc. o incluso realizar operaciones entre caras no planas. Además, algunas operaciones de alto nivel como el redondeo de aristas y vértices generalmente implican la creación de superficies cilíndricas, esféricas y toroidales. No obstante, hay que tener en cuenta dos observaciones: en primer lugar, el tipo de superficies siempre suele estar limitado por las operaciones que admite el núcleo geométrico; y en segundo lugar, el comportamiento de las entidades que incluyen superficies libres suele ser bastante más restringido que el de los objetos poliédricos. En concreto, esta falta de ortogonalidad se plasma en el caso de los modeladores paramétricos en el hecho de que las caras no planas no sean editables, no se puedan acotar o no se puedan definir relaciones geométricas (de tamaño, tangencia, ángulos, etc.) entre puntos de la superficie. Otra prueba evidente de esta separación entre diseño de sólidos y superficies es el hecho de que la mayoría de sistemas comerciales ofrezcan módulos separados especializados en el diseño de superficies (véase la sección 4.1), y también el que existan sistemas para el diseño exclusivo de superficies NURBS.

Los sistemas 3D orientados a la animación habitualmente no se basan en un modelo de sólidos cerrados como en el campo del CAD mecánico, sino en conjuntos de mallas abiertas, frecuentemente superficies (Béziers, NURBS u otros); algunos sistemas admiten otro tipo de modelos, como pueden ser el modelo de moléculas o los esqueletos articulados. Puesto que el objetivo básico es la visualización del modelo, no hace falta que se trate de piezas correctamente definidas desde un punto de vista topológico, ni tampoco es indispensable una gran precisión en el diseño. Sin embargo, la animación requiere el uso de otro tipo de recursos, principalmente una gran flexibilidad en la definición de los parámetros que determinan los colores y efectos resultantes, todo ello con el objetivo de conseguir imágenes realistas de calidad alta. Así, cualquier sistema de animación que se precie dispondrá de operaciones para definir texturas de imágen (*bit maps* y *color maps*), texturas de relieve (*bump mappings*), atributos de los materiales (colores base, emitido y especular, niveles de rugosidad y de transparencia, etc.) y un sinfín de otros que varían en función de la complejidad del sistema.

Habitualmente, los sistemas de animación disponen de un conjunto de operaciones para el modelado, no tan potentes como los sistemas de CAD, pero en cambio los métodos de visualización son más sofisticados e incluyen más opciones (normalmente se trata de *ray-tracing* o *radiosity*). Óbviamente, estos sistemas también disponen de mecanismos para definir el comportamiento de la escena a lo largo del tiempo, tanto de las piezas que la componen como de la cámara y las luces. Por ello, también ofrecen operaciones de cambios de los objetos, como por ejemplo cambios de su posición, tamaño, color o incluso complejas deformaciones de su superficie.

Los sistemas de CAD orientados a la arquitectura constituyen otro tipo de aplicaciones porque también se trata de sistemas especializados en un campo distinto, con requerimientos distintos, modelos específicos y herramientas particulares. No obstante, podemos decir que el modelado arquitectónico es más cercano al mecánico que la animación puesto que por lo menos también requiere precisión en el diseño, es decir, un modelo sobre el que realizar cálculos exactos, y su última finalidad es llegar a producir un objeto físico (un edificio). Quizás haya una diferencia interesante, en el sentido de que el producto final de un sistema de CAD arquitectónico no es un modelo informático realizable directamente por un ordenador, sino un conjunto de planos más un modelo "virtual" en algunos casos sobre el que se puedan efectuar simulaciones (véase la figura 1). La principal diferencia, con todo, viene dada por el proceso de diseño: si en el CAD mecánico se suele partir de una pieza base 3D a la que se añaden distintas características (agujeros, protuberancias, redondeos, etc.), el diseño clásico de un edificio empieza con (y a menudo termina con) la definición de una o más plantas, que se barrerán perpendicularmente para formar las paredes, y sólo más tarde se le añadirán las puertas, ventanas y techo. Puesto que este es el método que siguen la mayoría de sistemas arquitectónicos, podemos clasificarlos, por lo referente al proceso de edición, en la categoría de 2D y medio.

2.3 Gama alta, rango medio, gama baja

Otra clasificación básica que se puede hacer en los sistemas de CAD es en función de la amplitud de prestaciones de que dispone. Visto que ninguna de las dos clasificaciones anteriors no tipifica totalmente un sistema concreto, la mejor forma de caracterizarlos según las prestaciones hemos optado porque sea su precio. Según el precio de un sistema en el mercado actual los sistemas de CAD se pueden clasificar en sistemas de gama alta, sistemas de rango medio y sistemas de gama baja.

Sistemas de gama alta

Se caracterizan por un elevado precio (más de dos millones de pesetas) y por ofrecer unas prestaciones y funcionalidades elevadas en todos o casi todos los aspectos del ciclo de vida de un producto, tanto a nivel de diseño como a nivell de simulaciones y fabricación. Estos sistemas admiten tanto el modelo de sólidos como de superficies complejas de forma libre y, permiten trabajar en grupo y desarrollar productos grandes y formados por un número elevado de componentes.

El uso típico de un sistema de la gama alta lo encontramos en la industria del automóvil y en la industria aeronáutica. Aunque hasta hace pocos años sólo era posible verlos funcionar en potentes workstations, ahora existen versiones totalmente operativas sobre plataforma PC en Windows. Algunos de estos sistemas estan disponibles por módulos. Así, un usuario puede adquirir sólamente el módulo base que es lo más parecido a un sistema de rango medio, para después ir realizando ampliaciones.

Los sistemas más representativos de gama alta son Pro-Engineer de Parametric Technologies, Catia de Dassault Systems, I-DEAS de SRDC, UNIGRAPHICS de Unigraphics Solutions y MAYA de Alias Wavefront.

Sistemas de rango medio

Esta gama de sistemas se caracteriza por tener un coste de alrededor un millón de pesetas. Básicamente estan orientados al diseño de sólidos y al diseño de conjuntos, aunque existen extensiones específicas para el diseño de superficies. Actualmente, este tipo de sistemas ofrecen prestaciones y funcionalidades que hasta hace poco sólo ofrecían los sistemas de la gama alta. No pueden tratar diseños excesivamente grandes y en las prestaciones iniciales no hay recursos para gestionar diseños distribuidos en grupos de trabajo.

Los sistemas de rango medio tienen como posible mercado a los diseñadores que utilizando un programa 2D quieren estrenarse en 3D. Normalmente están totalmente integrados en Windows y utilizan al máximo las prestaciones que ofrece este entorno. Se trata de sistemas especialmente aptos para el diseño de piezas de plástico, de chapa metálica y productos de no muchos componentes. Además, aunque en el núcleo básico de estos sistemas no incluyan herramientas muy específicas, suelen existir módulos adicionales especializados (para el diseño de tuberías, superficies avanzadas, visualización realista, mallado, etc.) que el distribuidor vende como ampliaciones al sistema.

Ejemplos representativos de sistemas de rango medio son SolidWorks de Solidworks Corp., SolidEdge de Unigraphics Solutions, IronCAD de Visionary Design Systems, Mechanical Desktop de Autodesk y HELIX de MICROCADAM.

Sistemas de gama baja

Los sistema de gama baja se caracterizan por tener un precio de menos de 600.000 pesetas. En general, y salvo algunas excepciones, estan orientados al diseño o dibujo en 2D. Algunos tienen prestaciones básicas en 3D, pero las mayores prestaciones las tienen en 2D, proporcionando operaciones para la generación de planos y documentación técnica.

En esta categoría tanto podemos encontrar editores de dibujos e ilustraciones, como programas de diseño de planos y documentación técnica de productos industriales. Ejemplos representativos de sistemas de esta gama son AUTOCAD de Autodesk, TurboCAD de IMSI y CADKey de Baystate Technology.

En la clasificación por precio/prestaciones, hay excepciones como por ejemplo, el sistema Rhinoceros de McNeel para el diseño de superficies de forma libre, que por el precio sería de gama baja, pero por las prestaciones que ofrece habría que clasificarlo en los de rango medio (figura 3). Este sistema tiene unas muy altas prestaciones en el diseño de superficies basado en NURBS, que sólo hasta hace bien poco era posible encontrar en sistemas de gama alta.

3 Metodología de diseño

En el diseño de una pieza utilizando un sistema de CAD existen dos métodos básicos a seguir. Por un lado está el método clásico, normalmente basado en el uso de operaciones booleanas, y por otro el método de diseño paramétrico y basado en características. A continuación revisaremos y caracterizaremos brevemente estos dos enfoques de diseño.

3.1 Diseño clásico

En este método de diseño, el modelado de una pieza se realiza partiendo de sólidos básicos, es decir, objetos primitivos o generados por operaciones de barrido. Generalmente, existe la opción de utilizar operaciones booleanas entre objetos básicos. Las operaciones que se consideran entre objetos son la

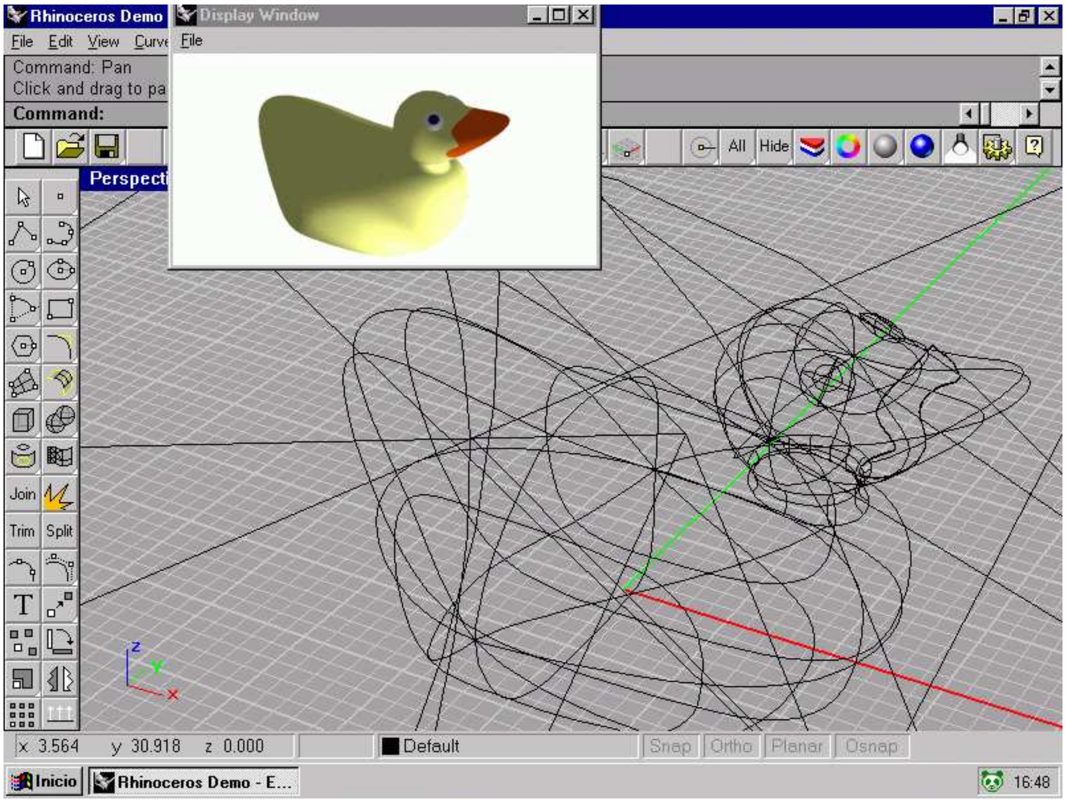

Figura 3: Objeto creado con un modelo de superficies con el sistema Rhinoceros.

unión, la intersección y la diferencia (véase la figura 4). En estas operaciones intervienen dos objetos que previamente se han tenido que posicionar correctamente en base a transformaciones geométricas (traslaciones y rotaciones). Por ejemplo, hacer un taladro en una cara de un objeto implica posicionar correctamente un cilindro y realizar la operación de diferencia entre el objeto a taladrar y el cilindro; o redondear una arista consiste en restar la porción del sólido que se rebaja mediante una diferencia booleana.

Cuando se realiza un diseño en base a operaciones booleanas, es necesario conocer de antemano las dimensiones y posiciones exactas de los objetos primitivos que intervienen. Si no se dispone de herramientas que faciliten el posicionado de objetos siempre es algo engorroso y poco flexible realizar operaciones booleanas en sentido clásico. No hay facilidades para realizar cambios o evaluar diseños alternativos, puesto que éstos son costosos. Por otro lado, no resulta fácil reutilizar diseños ya existentes. El diseño clásico no registra las relaciones que implícitamente se están definiendo entre los objetos que intervienen. Al no quedar registradas esta relaciones, las modificaciones

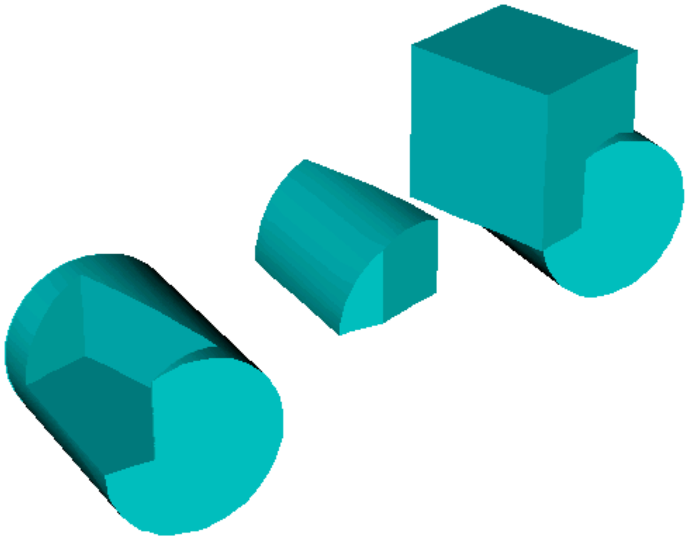

Figura 4: Ejemplo de operaciones booleanas: diferencia, intersección y unión entre un cubo y un cilindro.

pueden implicar tener que rediseñar la pieza entera.

El diseño clásico utiliza el modelo de fronteras (B-Rep) para representar las piezas. Este modelo permite pequeños cambios geométricos (alterar la posición de un vértice, por ejemplo), pero las modificaciones que implican cambios topológicos son más complicadas y garantizar la validez del modelo resulta muy costoso. Algunos sistemas (por ejemplo Euclid) utilizaban el modelo CSG como modelo adicional, permitiendo así reevaluar el modelo editando el árbol de operaciones booleanas. Este forma de diseño es casi equivalente a almacenar la secuencia histórica de operaciones realizadas y de hecho, constituye un precursor del modelo paramétrico basado en características.

3.2 Diseño paramétrico, diseño basado en características y diseño variacional

En el diseño paramétrico, los objetos se definen de forma genérica en base a relaciones de posición y dimensiones que se han de cumplir (restricciones). El conjunto de estas técnicas se suele denominar diseño dirigido por dimensiones (*dimension-driven design*). No se definen dimensiones exactas, sino que las dimensiones son controladas por los valores de unos parámetros. Dando valores a dichos parámetros se genera una instanciación del objeto, con di-

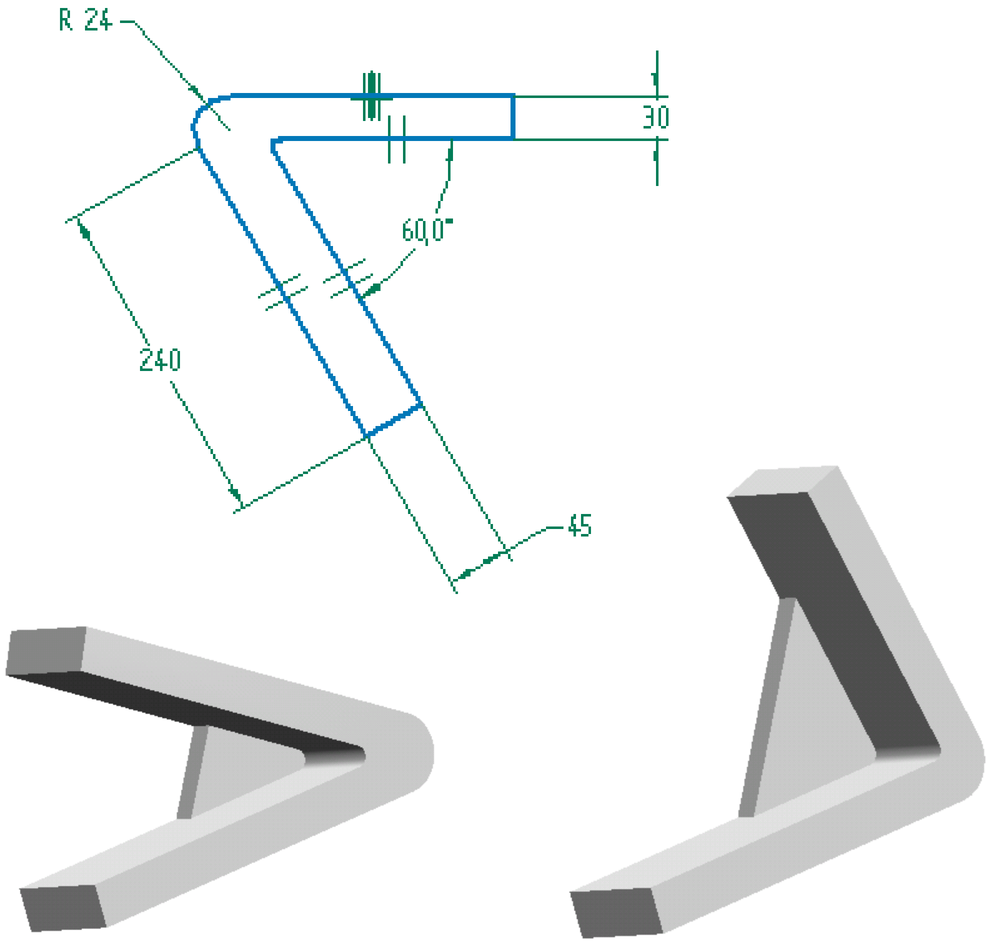

Figura 5: Ejemplo de diseño paramétrico utilizando Solid Edge. Diseño de un perfil parametrizado y dos instanciaciones de la pieza en 3D, cambiando el valor del ángulo.

mensiones concretas (véase la figura 5). Además, en el diseño paramétrico normalmente se registra la secuencia de operaciones que el usuario ha realizado en el desarrollo del diseño. Este registro de operaciones, que se puede entender como un modelo tecnológico de alto nivel, es lo que en CAD se denomina modelo basado en la historia (*history-based*). Las operaciones están parametrizadas con valores variables y por lo tanto pueden ser alterados de forma simple.

Por otro lado, además de facilitar variaciones, el diseño paramétrico es un elemento clave en el llamado diseño basado en características (*features*). Se entiende por características aquellas partes de una pieza que son relevantes en el diseño de la misma, como por ejemplo agujeros, protusiones, rebajes, recortes, estampados, refuerzos, etc. En diseño mecánico, normalmente se consideran como características geométricas a las operaciones de mecanizado.

En el diseño basado en características el modelado de una pieza se hace partiendo de un objeto generado por barrido (extrusión) que se considera como base. Sobre el objeto base se van añadiendo características. Las características son paramétricas, es decir, no tienen unas dimensiones ni una posición prefijada, sino que hay unos parámetros cuyo valor determina unívocamente la posición y dimensiones exactas. De hecho, el uso de características representa una abstacción para encapsular geometría como en el caso de los lenguajes de programación de alto nivel, que encapsulan las operaciones que se realizan a nivel de lenguaje máquina. De ahí que llamemos al modelo paramétrico basado en características "de alto nivel" y al modelo B-Rep "de bajo nivel".

Dado que los objetos que intervienen en el diseño clásico con operaciones booleanas se posicionan especificando sus coordenadas concretas, el diseño clásico mediante operaciones booleanas es estático, con la geometría de forma explícita. Con el uso del diseño paramétrico, la geometría de un objeto puede ser alterada simplemente cambiando los valores de los parámetros que determinan las dimensiones del objeto. En el diseño paramétrico el usuario primero suele definir un perfil 2D de dimensiones variables, es decir, de forma paramétrica. Para ello, el usuario puede definir las distancias y ángulos que serán los parámetros del perfil. Con una operación de barrido del perfil, se genera el sólido 3D que servirá de pieza base. Si se modifican las dimensiones del perfil, se modifica automáticamente el sólido.

Sobre un sólido base se pueden definir las características, que se ubican respecto al sólido dando valores apropiados a los parámetros que tenga asociados. Características típicas sobre un objeto son agujeros, protuberancias, chaflanes, redondeos y vaciados (véase la figura 7). Por ejemplo, un taladro simple tendrá un parámetro que es el valor del diámetro del agujero, y está asociado a una de las caras del objeto en una posición definida por el valor de otros dos parámetros. Si se produce un cambio de dimensiones de la cara donde está situado el taladro, se mantiene la posición del taladro sobre la cara donde está asociado. Así pues, utilizando el diseño paramétrico basado en características, el usuario tiene una mayor flexibilidad para realizar cambios y evaluar diseños alternativos. Las modificaciones de un diseño no sólo incluyen simples cambios de los valores de los parámetros, sino también editar los perfiles que definen las operaciones o incluso añadir características, eliminarlas o alterar su orden.

Otro término que aparece en la nomenclatura del diseño paramétrico es el diseño variacional o basado en restricciones. La diferencia entre diseño paramétrico y diseño basado en restricciones de hecho está en como internamente son manejadas las dimensiones variables. En el modelado paramétrico, se registra la secuencia de operaciones de construcción con las dimensiones como variables. Por lo tanto, existe un orden determinado durante el diseño de un objeto que el usuario se ve obligado a seguir. En el modelado basado en restricciones, las dimensiones se registran como ecuaciones que hay que resolver. No existe la obligación de seguir ningún orden en la definición de dimensiones variables. De todos modos, el uso de una u otra metodología es a nivel interno y no afecta a la funcionalidad del sistema desde el punto de vista del usuario.

Normalmente, los actuales sistemas de CAD paramétricos trabajan internamente tanto a nivel de registrar las operaciones realizadas (diseño paramétrico propiamente dicho), como a nivel de registrar las dimensiones como ecuaciones a resolver (diseño basado en restricciones). El diseño basado en restricciones se emplea básicamente en diseño 2D y aunque teóricamente se puede extender a 3D, dada la complejidad del problema, el modelado se hace de forma paramétrica en base a características, registrándose la secuencia de operaciones y el posicionado de elementos con un conjunto de parámetros que el usuario define.

4 Sistemas de CAD de rango medio

4.1 Estructura y prestaciones de los sistemas

Los sistemas de CAD de rango medio típicamente presentan una estructura modular, en el sentido de que el sistema está compuesto por una serie de módulos que forman el sistema base más una serie de módulos que constituyen extensiones del sistema. Normalmente las extensiones suelen distribuirse por separado.

En un sistema de rango medio típico existen los siguientes módulos básicos:

- Núcleo geométrico
- Gestor de diseño paramétrico
- Gestión de un diseño basado en características
- Visualización
- Generación de planos y documentación técnica
- Gestor de operaciones
- Diseño de conjuntos de piezas
- Operaciones para recuperar y guardar en ficheros
- Formatos de intercambio de ficheros

- Herramientas para programar extensiones propias

Núcleo geométrico

El núcleo geométrico es quien gestiona el modelo representación geométrica de un diseño. Este núcleo suministra un conjunto de funciones para realizar operaciones sobre entidades geométricas simples (de bajo nivel).

Actualmente los sistemas que hay en el mercado utilizan o bien un núcleo propio o un núcleo de los disponibles en el mercado. ACIS, desarrollado por Spatial Technology, o bien Parasolid, de Unigraphics Solutions, son los dos núcleos más utilizados en los sistemas de rango medio. Los dos tienen prestaciones similares, y uno u otro destaca en algún aspecto. En el mercado de sistemas de CAD hay más sistemas desarrollados sobre ACIS que sobre ParaSolid. Existe también algún sistema como IronCAD que utiliza los dos núcleos geométricos para aprovechar lo mejor de los dos sistemas.

Gestor de diseño paramétrico

Para poder trabajar bajo la metodología del diseño paramétrico y poder obtener variaciones en un diseño, es necesario utilizar un resolvedor de restricciones geométricas (*solver*). Como ya hemos mencionado, las restricciones se utilizan sobre todo en el ámbito del diseño en 2D. Para gestionar dicho método de trabajo, muchos de los sistemas de CAD actuales utilizan la biblioteca de programas desarrollada por D-Cubed. Hay también bastantes sistemas que utilizan sus propios resolvedores para gestionar las variaciones en un diseño.

Gestión de un diseño basado en características

Este módulo se encarga de la gestión de todo lo relacionado con el diseño basado en características, tanto a nivel de la geometría y topología implicadas como de los parámetros que controlan la posición y dimensiones. De hecho, este módulo es el encargado de gestionar el modelo de alto nivel, y traduce las modificaciones de este modelo en operaciones realizables en el modelo de bajo nivel (llamadas al núcleo geométrico y al resolvedor de restricciones).

Visualización

En el paquete básico de un sistema de CAD normalmente está hay un conjunto de opciones básicas para visualizar un diseño en pantalla. Las opciones incluidas como básicas normalmente son la visualización en alambres y visualización realista mediante un modelo simple de iluminación. Cada vez

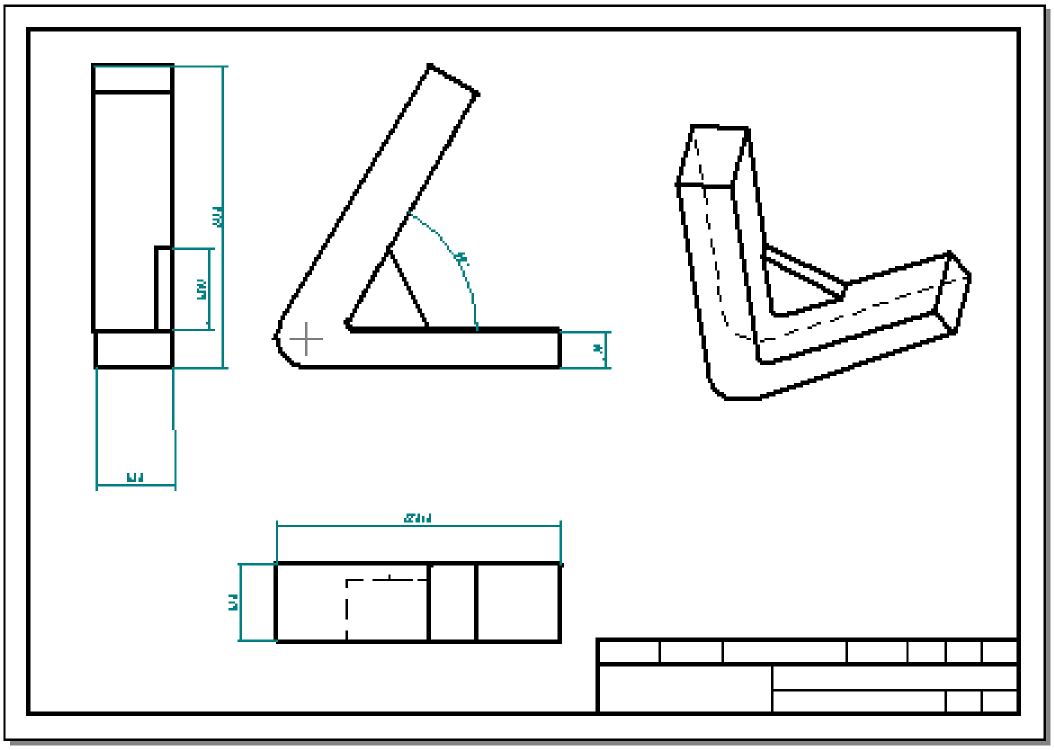

Figura 6: En los sistemas de CAD 3D la documentación técnica se genera como proyecciones de las piezas en el plano, lo que permite regenerarla automáticamente si el diseño es modificado.

más son los sistemas que también incluyen en el sistema la base visualización realista con diferentes modelos de iluminación, sombras y texturas. El módulo de visualización básica se basa normalmente en el uso de la librería gráfica OpenGL.

Generación de planos y documentación técnica

Esta es la parte del sistema de CAD que se encarga de generar planos 2D a partir de un diseño en 3D, así como de gestionar anotaciones, listas de componentes y toda aquella información escrita que sea relevante en el desarrollo de un diseño. Los planos 2D se generan de forma automática como vistas del modelo 3D, existiendo asociatividad entre las entidades de uno y otro entorno (véase la figura 6).

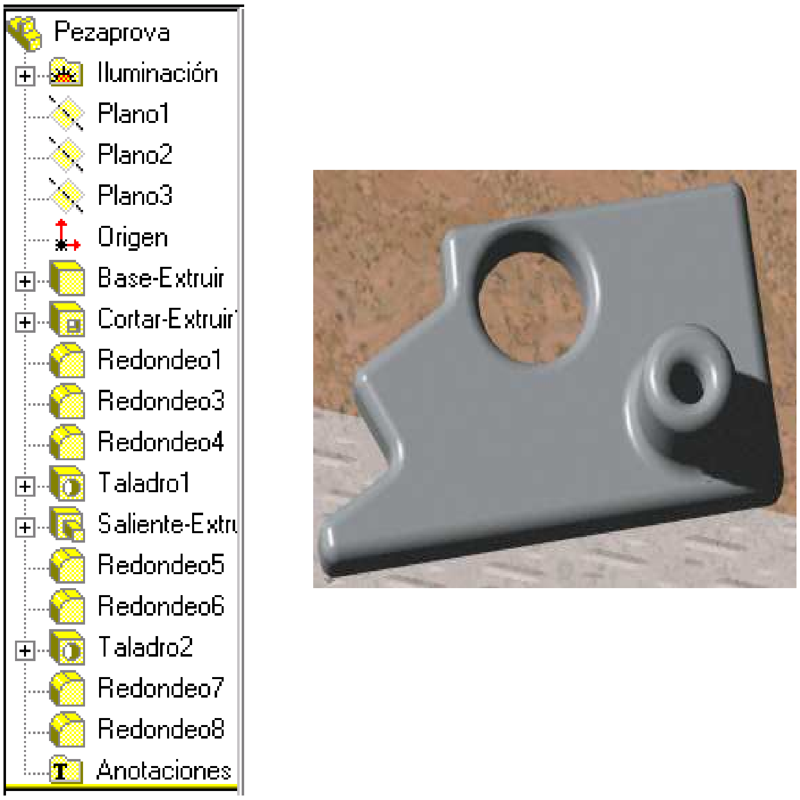

Figura 7: Modelo histórico de una pieza. El diagrama de la derecha es el que presenta el gestor de operaciones.

Gestor de operaciones

El gestor de operaciones es una herramienta específica que está muy relacionado con la interfaz de usuario. Se suele implementar como una ventana de interacción similar al explorador de windows, donde lo que se explora no es el conjunto de discos y directorios de un computador, sino que se explora el conjunto de elementos y operaciones que configuran un diseño. De hecho el gestor de operaciones no es más que una representación gráfica de la historia de un diseño, es decir, la secuencia de operaciones que se han realizado y los parámetros asociados. La figura 7 muestra un ejemplo de una pieza y la ventana de interacción que maneja el gestor de operaciones.

Diseño de conjuntos de piezas

Si el sistema de CAD admite el diseño de conjuntos de piezas, éste se gestiona mediante un módulo específico para la creación, incorporación de piezas ya existentes y sobre todo para la gestión de las relaciones de posición que existen entre las diferentes piezas. Algunos sistemas, utilizando el diseño basado en restricciones, permiten analizar los grados de libertad de un mecanismo y visualizan los movimientos realizables de las piezas.

Operaciones para recuperar y guardar en ficheros

Todo sistema de CAD tiene unas funciones básicas para guardar y recuperar ficheros de diseños. El formato que utilizan las operaciones básicas es el formato propio del sistema de CAD. Si se trata de un formato de intercambio de ficheros entre sistemas de CAD, existe otro módulo o extensión que se encarga de gestionar la información de dichos ficheros.

Formatos de intercambio de ficheros

Este módulo gestiona todo lo relativo al guardar y salvar ficheros en formatos de intercambio de ficheros o en un formato estándar (véase la sección 4.2).

Herramientas para programar extensiones propias

Actualmente los sistemas de CAD existentes en el mercado disponen de opciones para que los usuarios expertos puedan programarse sus propias extensiones. Esta funcionalidad hace que los sistemas tengan una arquitectura abierta a través de una API que interacciona con el núcleo geométrico del sistema.

4.1.1 Extensiones

Las operaciones y funcionalidades que ofrecen los sistemas de CAD mecánico de rango medio, se pueden ampliar en base a extensiones específicas desarrolladas por otras empresas. Por ejemplo, se pueden añadir operaciones específicas para el diseño de superfícies, para gestionar mecanismos con animaciones, análisis y simulación del comportamiento de materiales, diseño específico de moldes, módulo de diseño de piezas de chapa metálica, funciones para el diseño de tuberías o conexión con la fabricación (CAM). En resumen, alrededor de un sistema de CAD, existe un conjunto de otras aplicaciones independientes que extienden y amplian las prestaciones iniciales. La tendencia por ahora es que las herramientas más básicas de estas extensiones estén disponibles en el módulo inicial y que si el usuario precisa de toda la funcionalidad pueda adquirir, por separado, la extensión en su totalidad.

4.2 Formatos estándares

El objetivo de los formatos estándares es la transferencia de datos entre distintos sistemas. Cada sistema de CAD suele disponer de un formato propio, diseñado para que pueda almacenar las piezas y conjuntos de acuerdo con el modelo utilizado y las operaciones de que dispone. Sin embargo, el conjunto de operaciones de modelado de distintos sistemas rara vez coincide. Además, no es infrecuente el que una misma operación sea interpretada semánticamente de forma ligeramente distinta en uno y otro sistema, aunque se trate de una operación sencilla y ámpliamente utilizada como puedan ser un barrido rotacional o el redondeo de una arista. Hay que tener en cuenta que es habitual que una empresa utilice más de un sistema para diseñar diferentes tipos de piezas o para las distintas fases del diseño. El problema es más evidente en el caso de que la empresa diseñadora quiera transferir su modelo de la pieza a la empresa manufactora. Por todo ello, la transferencia de datos de forma precisa entre distintos sistemas resulta una cuestión muy importante.

Existen dos formas de enfocar este problema: la primera solución consiste implementar traductores desde cada uno de los formatos de los sistemas de CAD a los demás formatos; la segunda pasa por definir un formato estándar, lo suficientemente general como para que la traducción a y desde este estándar a los formatos propios de cada sistema de CAD resulte sencilla. Hay que decir que aunque la segunda opción parezca mucho más inteligente que la primera, la realidad es que muchos sistemas de CAD ofrecen las dos opciones. Quizás se pueda pensar que la razón estriba en que los formatos estándares no son lo suficientemente generales, pero a nuestro parecer la principal causa es otra. Los grandes sistemas de CAD, o mejor dicho, aquellos que están más ampliamente difundidos, son los que acaban copando el mercado, y en la práctica su formato de uso propio deviene casi un estándar. Por si fuera poco, muchos traductores interpretan el formato estándar de forma parcial, siendo sólo capaces de leer un subconjunto de las entidades disponibles en el estándar. Incluso la simple prueba de almacenar una pieza en un formato estándar y volver a leerla con el mismo sistema puede que falle o que se pierda parte de la geometría. Por todo lo dicho, no resulta pues raro que algunos sistemas sean capaces de traducir a un "formato estándar versión sistema X", ni que los sistemas de CAD más difundidos no se ocupen más que de poder recuperar diseños en el formato propio o en uno o dos formatos adicionales (si bien, por ser la operación de exportación más sencilla de implementar, suelen ser capaces de escribir en bastantes más formatos).

Los principales formatos estándares de CAD existentes son IGES, SET, VDA-FS y STEP. Los cuatro están soportados por los principales sistemas de CAD de rango alto y son de carácter internacional. El formato estándar IGES de ANSI [Nat88] fue el primer estándar que se definió y actualmente es el más utilizado. Inicialmente diseñado para el intercambio de dibujos 2D, las sucesivas versiones fueron incorporando nuevos tipos de entidades, desde curvas y superficies paramétricas hasta elementos finitos, modelos CSG y datos eléctricos. Quizás el problema mayor de este formato sea precisamente la amplia gama de tipos de elementos de que dispone, lo que proporciona una gran facilidad para almacenar casi cualquier diseño pero como contrapartida obliga a que realizar un traductor de este formato sea una tarea inherentemente complicada y laboriosa. El formato SET [AFN89] es un estándar nacional francés algo más moderno que IGES que también soporta gran cantidad de tipos de entidades pero de forma más compacta, pudiendo en algún caso representar una misma entidad de distintas formas. Las entidades describibles en este formate incluyen curvas y superficies paramétricas, así como los modelos de sólidos CSG y de fronteras (B-Rep). VDA-FS [DIN84], un estándar DIN, fue un formato desarrollado con un propósito muy específico, la compartición de datos entre la industria del automóvil alemana, que requería entidades no soportables (por aquel entonces) por IGES. Concretamente, VDA-FS soporta además de puntos, rectas y arcos, superficies paramétricas recortadas, aunque sólo sean de tipo polinómico no racionales. Por último, el estándard de ISO STEP [Sle88] fue definido hacia 1985 porque se vio que ninguno de los formatos estándares existentes era lo suficientemente robusto e inambiguo. Por ello, este formato intenta definir las entidades de forma unívoca, haciendo especial émfasis en la descripción semántica del lenguaje. Se trata del formato estándar que soporta la mayor variedad curvas y superficies paramétricas.

La principal deficiencia en cuanto a formatos estándares es que actualmente no existe ninguno que soporte la complejidad actual del diseño paramétrico basado en características. La version más moderna de STEP incluye algunas entidades para definir características, pero no resultan lo bastante generales. Esto es debido principalmente a que el diseño paramétrico basado en características es una de las tecnologías más recientemente desarrolladas en CAD. Aunque todos los sistemas de rango medio utilizan estas técnicas de modelado, cada uno dispone de un conjunto de características y de una forma de edición algo distintos. En general, las operaciones disponibles son bastante parecidas en los distintos sistemas, sobretodo si utilizan el mismo núcleo geométrico, pero el modelo de alto nivel con el que trabajan es distinto debido a que se trata de un modelo basado en la historia. Recordemos que un modelo basado en la historia de un objeto no es más que la secuencia de operaciones que se han realizado con el sistema para llegar a construir la pieza. Algunos sistemas almacenan como modelo de las piezas este conjunto de operaciones realizados. Puesto que cada modelador dispone de sus propias operaciones y opciones, es difícil que puedan llegar a compartir un modelo basado en la historia.

4.3 La interfaz de usuario

Puesto que el diseño en CAD se basa principalmente en la interacción gráfica, la interfaz de usuario es una pieza fundamental de estos sistemas. Un sistema de CAD se puede valorar no sólo por el tipo de piezas que es capaz de realizar y las operaciones que puedan realizarse sobre él, sino también por la facilidad de uso, factor clave para conseguir una elevada productividad. Los sistemas de CAD son aplicaciones complejas, que habitualmente requieren un tiempo de aprendizaje bastante largo para llegar a ser un usuario experto. Por ello, las comparativas entre sistemas suelen tener en cuenta cuestiones como la secuencia de pasos y el número de clics necesarios para realizar las operaciones o para diseñar una pieza concreta. En definitiva, una interfaz de usuario amigable y completo distingue a un buen sistema de CAD porque le proporciona potencia adicional y mayor eficiencia en el diseño.

La forma más immediata de conseguir que la interfaz sea sencillo consiste en integrar al máximo el sistema en el entorno gráfico de ventanas. Si los sistemas de CAD más antiguos disponían de un número reducido de elementos de interacción gráficos y los que proporcionaban tenían que ser diseñados con herramientas de programación de creación propia, actualmente todos los sistemas para PC, tanto los de rango medio como los de gama baja, están plenamente integrados en el entorno Windows. Esto se traduce en un uso intensivo de los recursos (iconos, menús desplegables, ventanas flotantes, etc.) y de los métodos de interacción típicos de este entorno como cortar y pegar (*cut & paste*) o arrastrar y dejar (*drag & drop*). Tipicamente, el entorno gráfico (tamaño de las ventanas, situacion de los iconos, etc.) suele ser configurable por el usuario. Este aprovechamiento de los recursos gráficos revierte en un tiempo de aprendizaje menor para los usuarios, puesto que la mayoría de operaciones funcionan de forma igual (o por lo menos similar) que en cualquier otra apliación a la que estén acostumbrados: la estructura de menús está organizada de forma parecida, los elementos se mueven arrastrando con el ratón, apretando el tercer botón sobre lo que esté seleccionado se editan sus atributos, etc.

En esta misma línea, la mayor integración de los sistemas de CAD en el entorno gráfico ha llevado a que los sistemas modernos ya no estén orientados a mandatos. Los primeros sistemas no tenían más remedio que utilizar mandatos en forma de texto entrados por el teclado. Sin embargo, este método de interacción fue cambiando a medida que las herramientas gráficas fueron evolucionando y que las prestaciones gráficas fueron creciendo, y en la actualidad la mayoría de operaciones se pueden realizar casi íntegramente mediante la interacción con el ratón u otros dispositivos como tabletas gráficas o *trackballs*, dedicando el teclado únicamente para la entrada de valores numéricos y nombres. Así y todo, la entrada de mandatos textuales suele coexistir con la interación gráfica en algunos sistemas, ya sea por coherencia con versiones anteriores o porque de hecho, para un usuario experto, resultan la forma menos ambigua y más rápida de modelar.

Existen también herramientas y técnicas de interacción gráficas especializadas para el CAD, que los distintos productores de software desarrollaron e incorporaron en sus sistemas. La más básica sea quizás el poder cambiar los parámetros de visualización mediante una interación sencilla del ratón. Se trata de una técnica relativamente sencilla, y sin embargo muy útil, y por ello ámpliamente difundida en las aplicaciones gráficas de cualquier tipo (no sólo las de CAD). En los sistemas de CAD, esta técnica permite definir tanto la posición del observador como el centro de pan de forma interactiva. Habitualmente, los sistemas permiten modificar los ángulos de observación o el centro de pan moviendo el cursor vertical u horizontalmente, así como realizar un zoom en 3D, es decir, modificar la distancia al centro de pan de forma parecida.

Una técnica de interacción más avanzada específica de los sistemas de CAD es la que hemos llamado *selección contextual*. Esta técnica, bastante difundida en los sistemas de rango medio, consiste en la detección de unos u otro tipo de elementos en función del estado de la aplicación y de los elementos sobre los que se encuentre el cursor (por ello, algunos sistemas lo denominan "cursor inteligente", véase la figura 8). Por ejemplo, hay sistemas que detectan el tipo de elemento sobre el que está situado el cursor de forma immediata, cambiando el bitmap del cursor o resaltando un vértice, cara, arista, etc. según se mueve el cursor sobre los elementos de la escena. En los sistemas paramétricos, la selección contextual permite mostrar, siguiendo el mismo principio, las relaciones geométricas que el sistema infiere de forma automática (paralelismos, perpendicularidad, posición relativa, etc.)

Podemos considerar al gestor de operaciones (véase la sección 4.1) como otra técnica de interacción especializada de los sistemas de CAD. Se trata de una herramienta ligada al modelo de basado en la historia, puesto que, efectivamente, muestra la secuencia de operaciones que se han realizado como un árbol similar a la forma como se suele representar la jerarquía de directorios de un disco. Ejemplos de las operaciones que suelen permitir mediante simples interacciones son la selección de una característica o parte mediante un clic simple, editarla mediante un doble clic, eliminarla pulsando la tecla de borrado o cambiar el orden de las operaciones arrastrando la parte

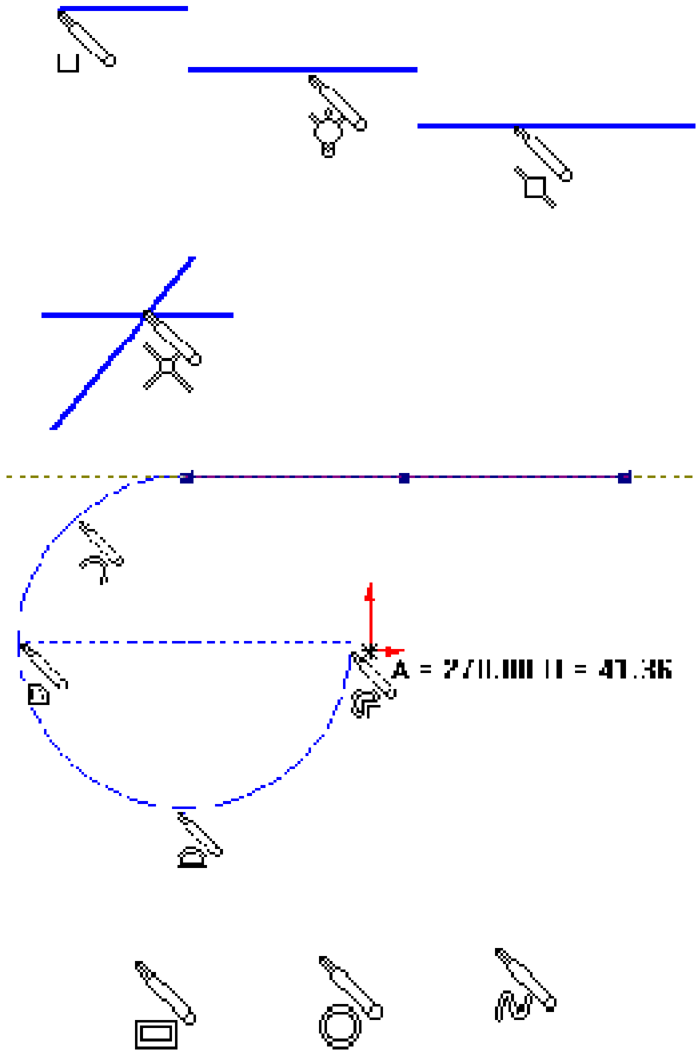

Figura 8: Distintos tipos de cursor que el sistema SolidWorks muestra dependiendo de la entidad sobre la que esté situado.

seleccionada.

El conjunto de todas estas técnica tendrá como efecto el que, una vez habituado a éllas, el usuario verá considerablemente simplificada su labor y trabajará de forma más eficiente. Sin embargo, aún queda bastante por hacer en este aspecto, puesto que cuando se trata de realizar operaciones complicadas, inerentes al diseño en CAD, la interfaz todavía no resulta lo suficiente amigable y en muchos casos requieren un usuario experto.

5 Conclusiones

El objetivo de este documento ha sido analizar y caracterizar las funcionalidades de los actuales sistemas de CAD comerciales para computadores personales. Para ello, hemos empezado por clasificarlos ateniéndonos a distintos criterios, lo que nos ha llevado a centrarnos en los de rango medio en función de sus prestaciones y precio. El sector del mercado de los sistemas de CAD de rango medio es el que tiene un mayor atractivo debido al aumento progresivo de las prestaciones del hardware y al constante flujo de usuarios de sistemas de CAD que trabajan en 2D que empiezan a trabajar en 3D.

Después de comparar las dos principales metodologias de diseño que siguen los sistemas de CAD, hemos visto que los actuales sistemas de rango medio presentan prestaciones muy similares: Se trata de sistemas 3D, que siguen el diseño paramétrico basado en características y generalmente están orientados al diseño de piezas mecánicas. Suelen tener las mismas funcionalidades que los sistemas de alto nivel, pero con sus prestaciones limitadas. En este sentido, la barrera entre los sistemas de rango medio y los de alto nivel cada vez está más difuminada. Los diversos sistemas de rango medio también son parecidos por lo que hace a su estructura, puesto que están compuestos por módulos similares y sus operaciones de modelado de bajo nivel se basan en un núcleo geométrico y un resolvedor de restricciones. Uno de los aspectos que más diferencias marca es la interfaz de usuario, más que en el tipo de piezas que son capaces de realizar y las prestaciones que ofrecen.

Hemos podido comprobar que una de las asignaturas pendientes de los sistemas de CAD es la mejora en los formatos de intercambio estándares, que redundaria en la integración entre los diferentes sistemas y las sucesivas etapas del ciclo de vida de un producto. Otro tema claramente mejorable es el relacionado con el diseño de conjuntos. En este contexto, hemos constatado que todos los sistemas de CAD utilizan la misma estrategia para la definición de mecanismos, que se basa en una estructura de árbol que registra las relaciones de posición (restricciones), por lo que no se admiten ciclos entre las restricciones. El ámbito de los sistemas de CAD de rango medio no está por lo tanto cerrado, sino que aún está en constante evolución.

6 Direcciones web de interés

En esta sección incluimos una lista de direcciones de Internet relacionadas con los sitemas de CAD, que el lector puede hallar de interés para ampliar la información.

Publicaciones

TechniCom MCAD web site
    http://www.technicom.com/
CAD-Portal.com
    http://www.cad-portal.com/
CADALYST OnLine
    http://www.cadonline.com/
The Online Supplement to Computer-Aided ENGINEERING
    http://www.penton.com/cae/
CADCAM Magazine Online
    http://www.cadcam-magazine.co.uk/main.html
CAD/CAM Publishing, Inc.
    http://www.cadcamnet.com/
Autocad Magazine
    http://www.edimicros.es/autocad
CAD Systems
    http://www.cadsystems.com/

Sistemas, empresas, centros, gráficos

ADRA Web Site
    http://www.adra.com/
Applicon
    http://www.applicon.com/
ArchiCAD Home Page
    http://dawww.epfl.ch/ArchiCAD.html
HOME PAGE ASCAMM
    http://www.ascamm.com/
Autodesk
    http://www.autodesk.com/
Autodesk España
    http://www.autodesk.es/
auto*des*sys, Inc.
    http://www.formz.com/
Baystate Technologies Web
    http://www.cadkey.com/

Bentley Engineering, Design, and CAD Software, MicroStation
    http://www.bentley.com/
CAD/CAM World
    http://www.cam.org/~flamy/cadcam.html
CAD CAM Software for ship design and shipbuilding. DEFCAR. Shipyards, naval architects. Boat and yatch construction
    http://www.defcar.es/
CATIA Engineering Solutions Home Page
    http://www.catia.ibm.com/catmain.html
Computer Graphics
    http://ls7-www.informatik.uni-dortmund.de/html/englisch/servers.html
Computer Graphics Program - Links
    http://rabbit.prakinf.tu-ilmenau.de/link2.html
Corel Corporation Homepage
    http://www.corel.com/
Corel en España
    http://www.corel.com/International/spain/
Delcam CADCAM systems
    http://www.delcam.com/
DesignCAD Graphic Design, CAD
    http://www.viagrafix.com/software/designcad/
MicroCADAM: Helix Design System
    http://www.microcadam.com/
Intergraph International Online
    http://www.intergraph.com/
Intergraph España Online
    http://www.ingr.com/spain/
Manufacturing Marketplace
    http://www.manufacturing.net/
WWW.MICROGRAFX.COM
    http://www.micrografx.com/
WWW.MICROGRAFX.COM - IBÉRICA
    http://www.micrografx.com/iberica/
MultiSurf 3.0 Demo
    http://www.aerohydro.com/msdemo/msdemo.htm
Parametric Technology Corporation
    http://www.ptc.com/index.htm
Parametric Technology Espana: Oficinas
    http://www.ptc.com/spain/oficinas/
Pro/E: The Magazine Home Page
    http://www.proe.com/
Rhinoceros - NURBS modeling for Windows
    http://www.rhino3d.com/

SENER. Corporate Information
    http://www.foransystem.com/
Solid Edge Home Page
    http://www.solid-edge.com/
SolidWorks'98
    http://www.solidworks.com/
SDRC
    http://www.sdrc.com/ehome.html
Stanford Technology CAD Home Page
    http://www-tcad.stanford.edu/tcad.html
Surfware Home Page
    http://www.surfwareeast.com/
Unigraphics Solutions Inc.
    http://www.ug.eds.com/
VariCAD - 2D/3D mechanical CAD
    http://www.varicad.com/
Visionary Design Systems (IronCAD)
    http://www.vds.com/homereg.html
Visual Frontiers:3d Modeling
    http://www.vfrontiers.com/~vfrntrs/VFPages/Modeling.html

Núcleos geométricos

DESIGNBASE
    http://www.ricoh.co.jp/swd/designbase/index_e.html
Parasolid
    http://www.ug.eds.com/parasolid/
Spatial Technology - The Home of ACIS
    http://www.spatial.com/
D-Cubed
    http://www.d-cubed.co.uk/

Otros

AutoCAD Shareware Clearinghouse
    http://www.cadalog.com/
CAD conversion, viewing and EDMS software from Trix Systems
    http://trixsystems.com/
NavisWorks: Software for Visualization and Collaborative
Communication of Large 3D Models
    http://www.Navisworks.com/
QCad Homepage (free cad)
    http://qcad.sourceforge.net/
Paraform:points to polygons, etc

`http://www.paraform.com/ndex.html`

PDM Information Center û PDM articles

`http://www.pdmic.com/articles/index.html`

Referencias

[AFN89] AFNOR. *Z68-300-1, Specifications du Standard d'Echange et de Transfert (SET)*, 1989.

[Dei97] D. Deitz. The convergence of design and analysis. *Mechanical Engineering*, 119(2):93–100, 1997.

[DIN84] DIN. *Verbund der Automobilindustrie-Flächen Schnittstelle (VDA-FS)*, 1984.

[Gou94] R.J Goult. *The mathematics of surfaces IV*, chapter Standards for Curves and Surface Data Exchange, pages 1–15. Claredon Press Oxford, 1994.

[Hol97] W. Bratley Holtz. *The CAD rating guide*. PennWell Pub. Co., 5th edition, 1997.

[Kur94] Raymond H. Kurland. Understanding variable-driven modeling. *CAE Magazine*, Jan 1994.

[Kur97] Raymond H. Kurland. Mid-range mechanical CAD: a comparison. *Computer Graphics World*, pages 29–35, Jan 1997.

[Kur98] Raymond H. Kurland. Putting leading solid modelers to the test. *CADENCE Magazine*, Dec. 1998.

[Mac93] John Macrell. Making sense of a revolution. *Computer Graphics World*, pages 26–38, November 1993.

[Nat88] National Institute of Standards and Technology. *IGES, Initial Graphics Exchange Specification, Version 4.0*, 1988.

[Pot98] Caren Potter. Industry update: battling for the midrange. *Computer Graphics World*, June 1998.

[Sha91] J.J. Shah. Assessment of features technology. *Computer Aided Design*, 23(5):331–343, June 1991.

[Sle88] Slechental, E.G. (Ed.). *Specification of a CAD*I Neutral File for CAD Geometry, Version 3.3*, 1988.

[SV97] L. Solano and M. Vigo. 2D para todos los gustos. *BYTE España*, 29:104–117, Junio 1997.

[SV98] L. Solano and M. Vigo. La generación paramétrica. *BYTE España*, 44:112–117, Octubre 1998.