

XIII ADM - XV INGEGRAF
Congreso International sobre



INGEGRAF

**HERRAMIENTAS Y METODOS EN
DISEÑO DE INGENIERÍA**



Cassino, 3 de Junio del 2003
Napoli, 4 y 6 de junio del 2003
Salerno, 5de junio del 2003

Aplicación docente de un programa de modelado 3D mediante bocetos axonométricos

P. Company¹; M. Contero²; A. Piquer¹; N. Aleixos¹; J. Conesa³; F. Naya²⁾

¹Departamento de Tecnología
Universidad Jaume I de Castellón
Campus del Riu Sec. E-12071
Castellón de la Plana. Spain
pcompany@tec.uji.es

²Depto. de Expresión Gráfica en la
Ingeniería
Univ. Politécnica de Valencia
Camino de Vera s/n. E-46022
Valencia. Spain
contero@degi.upv.es

³Depto. de Expresión Gráfica
Univ. Politécnica de Cartagena
Doctor Fleming s/n, E-30204,
Cartagena, Murcia. Spain+
julian.conesa@upct.es

SUMARIO

La adquisición de *visión espacial* y la destreza en el bocetado para sintetizar nuevos diseños son dos objetivos importantes en muchos currícula de Gráficos de Ingeniería. En este contexto, el trabajo presenta una aplicación informática orientada a la enseñanza, que dispone de un *papel virtual* sobre el que el usuario dibuja a mano alzada con un *lápiz virtual*. El boceto que introduce el usuario es una representación pictórica de una forma poliédrica. Es decir, una representación pseudo-axonométrica del modelo. La aplicación incluye un analizador que reconoce y reconstruye automáticamente el modelo tridimensional bocetado, y se lo muestra al usuario. El proceso es interactivo, por lo que el usuario puede modificar el boceto y ver los efectos de dicha modificación sobre el modelo.

La capacidad de visión espacial se potencia, puesto que el usuario puede ver y manipular el modelo tridimensional en todo momento. La utilidad del boceto también es patente, porque se convierte en la interfaz para que el usuario construya el modelo. Se han realizado las primeras pruebas en el aula, y se han obtenido resultados muy favorables.

Palabras clave: Metodología y experiencias docentes innovadoras. Software docente. Gráficos de ingeniería. Bocetos por ordenador.

ABSTRACT

The acquisition of *spatial vision* and the sketching skills required to synthesize new designs are two important objectives in many Engineering Graphics syllabi. In this context, this paper presents an education-oriented computer application that provides a *virtual pencil* the user employs to draw freehand on a sheet of *virtual paper*. The sketch that the user introduces is a pictorial representation of a polyhedral shape, i.e. a pseudo-

axonometric representation of the model. The application includes an analyser that automatically recognizes and reconstructs the three-dimensional sketched model and displays it to the user. The process is interactive since it allows users to modify the sketch and see the effects their modifications have on the model.

The capacity for spatial vision is increased due to the user's being able to see and manipulate the three-dimensional model at all times. It is also clear that the sketch is a valuable element since it becomes the interface that allows the user to build the model.

The first tests carried out in the classroom have offered very promising results.

Key words: Methodology and innovative teaching experiences. Educational software. Engineering graphics. Computer-aided sketching.

1. Introducción

Un objetivo importante de los cursos básicos de gráficos de ingeniería es la adquisición de *visión espacial*. Esta capacidad se puede describir como la habilidad de imaginar en la mente formas tridimensionales. Adquirir esta habilidad es importante para un futuro ingeniero [Ferg92]. El proceso de adquisición de la visión espacial es muy complejo cuando las formas tridimensionales se manipulan a través de dibujos bidimensionales, que, por añadidura, son estáticos. Manipular modelos es mucho mejor, aun cuando los modelos sean "virtuales", o informáticos, y se visualicen a través de representaciones bidimensionales. Porque dichas representaciones pueden llegar a un mayor grado de realismo (utilizando sombras, texturas, etc.) con un coste de ejecución reducido, y pueden variarse dinámicamente, es decir, que el objeto puede rotar "como si lo tuviéramos en la mano". Por ello el diseño mediante prototipos virtuales se está introduciendo en los cursos avanzados. Pero, en los cursos básicos se mantiene el diseño mediante dibujos (si bien introduciendo las nuevas herramientas de delineación asistida) [Cone98]. La consecuencia es que en estos cursos se intenta conjugar el aprendizaje de los fundamentos de los sistemas de representación con la adquisición y/o consolidación de la visión espacial, y no se utilizan aplicaciones CAD de modelado porque no tienen interfaces muy amigables para este propósito.

Los interfaces de las aplicaciones CAD de modelado, además de que no son amigables para quienes no han adquirido la visión espacial, tampoco sirven para la fase de diseño conceptual, en la que se manejan ideas incompletas y ambiguas [Comp96]. Tradicionalmente, los bocetos han permitido a los diseñadores gestionar este proceso de un modo eficiente. Por el contrario, las "encorsetadas" ordenes y esquemas de trabajo de los sistemas CAD de modelado actuales tienen la finalidad de permitir la creación de modelos completos y consistentes, e impedir la creación de modelos ambiguos. La situación deseable es bien distinta, y ha sido expuesta en trabajos muy notables [Ullm02]. Pero, en la actualidad, para manejar diseños ambiguos o inconsistentes se usan los croquis y los bocetos. Entendiendo que los croquis permiten expresar formas geométricas sin atarse a los criterios estrictos de la geometría (se trata de dibujos imperfectos o inconsistentes desde el punto de vista geométrico), y los bocetos permiten expresar ideas parciales o inacabados (dibujos incompletos). Por ello se suele decir que

los croquis y los bocetos constituyen el lenguaje “natural” que los ingenieros y diseñadores usan para sintetizar nuevos diseños. Esta deficiencia de los sistemas CAD hace que enseñar a bocetar con instrumentos “clásicos” (lápiz y papel) sea aun un objetivo importante en los cursos de gráficos de ingeniería. Una consecuencia indeseable es que la situación actual fuerza al proyectista a generar el diseño por medio de croquis y bocetos y, posteriormente, construir enteramente el modelo en un sistema CAD, una vez que el proceso de croquización ha finalizado. En definitiva, es preciso que el proyectista lea el croquis final y guíe al sistema CAD para construir el correspondiente modelo, lo que, obviamente, genera una sensación de “repetir el trabajo” que lleva a la confusión de pensar que el boceto no sirve para nada.

En este trabajo se presenta una aplicación informática orientada a romper con la situación descrita arriba. La aplicación dispone de un *papel virtual* sobre el que el usuario dibuja a mano alzada con un *lápiz virtual*. El boceto que introduce el usuario es una representación pictórica (pseudo-axonométrica) de una forma poliédrica. La aplicación incluye un analizador que reconoce y reconstruye automáticamente el modelo tridimensional bocetado por el usuario. Si el boceto contiene imperfecciones muy importantes, se activa un segundo módulo que “repara” el boceto antes de analizarlo para reconstruir el modelo. La Interfaz Gráfica con el Usuario (GUI) se consigue a través de una interfaz caligráfica que implementa un conjunto de gestos muy elemental (dibujar segmento y borrar segmento). La interfaz tiene tolerancia de localización de vértices (“snap”), tolerancia de localización de segmentos (de modo que los segmentos muy cortos son rechazados) y tolerancia de localización de paralelismo (que convierte en paralelas los segmentos que forman un ángulo menor que el umbral de tolerancia). La visualización tridimensional se ha implementado con OpenGL, y consiste en una ventana que muestra el modelo en representación de malla de alambre o con caras opacas y permite la rotación y el escalado.

Esta aplicación potencia la capacidad de visión espacial, puesto que el usuario puede ver y manipular el modelo tridimensional en todo momento. Por ello, los errores cometidos durante el bocetado de la representación axonométrica (tales como los errores comunes de “olvidar” ciertas aristas) se ponen rápidamente de manifiesto cuando el analizador indica al usuario que no puede generar ningún modelo 3D geoméricamente válido. O bien, cuando el analizador genera un modelo, perfectamente coherente con el boceto, pero discrepante con la imagen mental que el usuario tiene del objeto que ha pretendido bocetar.

La aplicación obliga a adquirir destreza en el bocetado (puesto que es la única forma de dibujar), y elimina la sensación de repetir el trabajo cuando tras bocetar en un papel hay que modelar con una herramienta de modelado convencional.

El sistema se ha probado en el aula, y se han obtenido resultados provisionales muy esperanzadores.

2. Antecedentes

Siguiendo modelos clásicos de geometría constructiva [Hohe56], la mayoría de los cursos de Gráficos de Ingeniería no ponen el énfasis en el aprendizaje de la geometría descriptiva como un cuerpo de doctrina fundamental (saber), sino que introducen directamente los aspectos más prácticos de la misma y los aplican a la resolución de problemas de diseño de productos (saber hacer) [Bert96] [Holl98]. En éste enfoque, ha sido tradicional conjugar el aprendizaje de los fundamentos de los sistemas de representación con la adquisición y/o consolidación de la visión espacial.

Hoy en día, la sustitución de la enseñanza del “diseño mediante dibujos” (basado en la geometría bidimensional) por la del “diseño mediante prototipos virtuales” (basado en

la geometría tridimensional) es técnicamente viable, dado que existen aplicaciones CAD 3D de modelado con precios académicos asequibles y un funcionamiento amigable que favorece el proceso de aprendizaje (ProEngineer, Catia, Unigraphics, etc.). Existen también numerosos estudios sobre las ventajas e inconvenientes de los diferentes tipos de aplicaciones [Ale02] [Piqu02]. No obstante, aunque hay ya bastantes propuestas para completar la transición (véase, por ejemplo [Buca01]), parece que la mayoría de la comunidad académica entiende que la transición debe ser lenta, dado que en ciertos sectores industriales poco punteros, y en pequeñas y medianas industrias, el diseño mediante dibujos sobrevivirá durante bastante tiempo (basta hacer una búsqueda en internet de cursos sobre “Engineering Design Graphics” para comprobar que los objetivos de la mayoría de los cursos incluyen muchos contenidos de diseño mediante dibujos [McMa02], [Penn02], [Aust02], [UTex02], [Vila99], ...). Lo cual justifica la necesidad de formar a los futuros ingenieros para que puedan trabajar en entornos de diseño mediante dibujo. De ahí que el diseño mediante prototipos virtuales se suele introducir en los cursos avanzados y específicos, mientras que los programas docentes básicos (genéricos e insertados en los primeros cursos) han optado por mantener el diseño mediante dibujos, aunque introduciendo las nuevas herramientas de delineación asistida.

Con la introducción de los programas de delineación en sustitución de las herramientas clásicas, la adquisición de la visión espacial ha quedado postergada hasta que los alumnos adquieren un nivel básico/medio de destreza en el manejo de las aplicaciones informáticas de delineación. En alguna medida, esto significa un empobrecimiento de la capacidad del futuro ingeniero a la hora de concebir ideas nuevas a partir de “imágenes mentales”, lo que en terminología anglosajona se conoce como “mind’s eye” [Ferg92]. En otras palabras, el énfasis puesto en los proyectos docentes hacia las herramientas de delineación asistida por ordenador supone un empobrecimiento de la capacidad para expresar ideas incompletas y/o mal organizadas, tan habituales en la fase de diseño conceptual, y que los ingenieros han plasmado desde siempre por medio de bocetos. Por añadidura, la capacidad para bocetar también suele disminuir por los inevitables recortes en los programas docentes.

La solución más habitual a este dilema es obligar al alumno a plantear la solución del problema por medio de un boceto, y exigirle a continuación que reproduzca ese mismo trabajo perfectamente delineado. Si bien esta estrategia consigue que los alumnos adquieran destreza para expresarse tanto por medio de bocetos como por medio de dibujos delineados, produce también una cierta sensación de pérdida de tiempo, dado que el alumno es consciente de que está realizando la misma tarea dos veces.

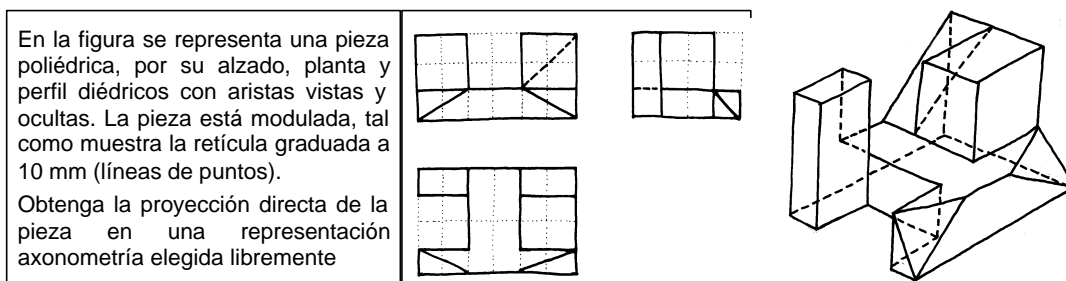


Figura 1. Ejemplo de ejercicio “para bocetar”

De nuevo, la solución “clásica” consiste en diseñar una parte de los problemas (figura 1) de tal modo que su solución puede obtenerse por medio de bocetos (haciendo ver al

alumno que una delineación precisa del problema supone una pérdida de tiempo, y justificando de ese modo que los bocetos son herramientas eficientes y potentes), mientras otros ejercicios se diseñan de tal modo que la solución no pueda obtenerse (al menos no con el nivel de precisión requerida) si no se utilizan las aplicaciones de delineación asistida por ordenador (figura 2).

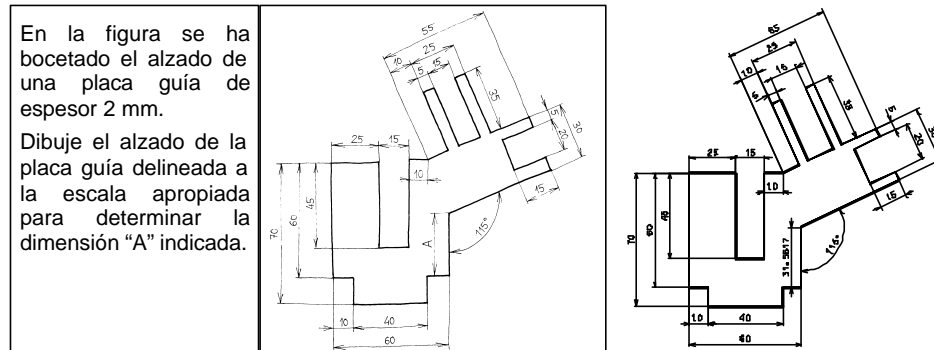


Figura 2. Ejemplo de ejercicio “para delinear”

3. Bocetador/modelador.

En este trabajo se presenta una aplicación informática que pretende contribuir a resolver parte del dilema descrito arriba. Se trata de una aplicación que dispone de un “papel virtual” sobre el que el usuario dibuja a mano alzada con un “lápiz virtual”. En los entornos estándar de ordenador personal es el ratón el periférico físico que emula al lápiz. En los entornos más modernos de tabletas digitalizadoras, o tablet PC's (figura 3) (véase <http://www.microsoft.com/windowsxp/tabletpc/>), son los punteros los que actúan como lápices virtuales.

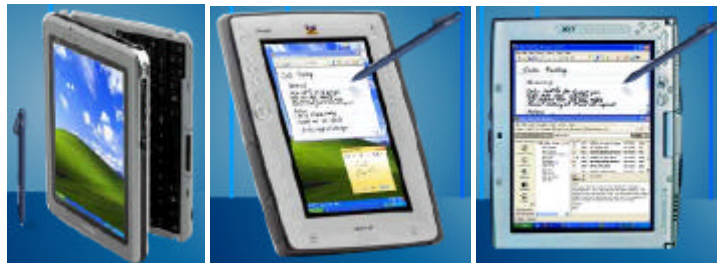


Figura 3. Tablet PC con su correspondiente puntero

En la primera versión de nuestra aplicación, Refer (figura 4), el boceto que introduce el usuario es una representación pictórica de una forma poliédrica. Es decir, una representación pseudo-axonométrica. Se ha optado por empezar por una representación de tipo pictórico porque se pretende favorecer el aprendizaje de la capacidad de visión espacial del alumno, y es comúnmente aceptado que las representaciones ortográficas (tales como las vistas diédricas) son más apropiadas para *medir* que para *ver*. La aplicación tiene una segunda restricción, que consiste en que los modelos poliédricos deben ser rectangulares. Es decir, modelos tales que todas las aristas que convergen en cada vértice forman 90° entre sí, al igual que ocurre con todas las caras que comparten una arista. A tales modelos los denominamos “normalones”. En realidad, la restricción es menor, porque el sistema es capaz de reconstruir modelos “cuasi-normalones”, como, por ejemplo, aquellos en los que al eliminar todas las aristas que no son ortogonales no se pierde ningún vértice del modelo original (véanse las aristas marcadas en la figura 4).

Con todo, lo que entendemos que es el elemento diferencial de la aplicación propuesta, es que dispone de una segunda ventana en la que se visualiza el modelo tridimensional del objeto bocetado (figura 4).

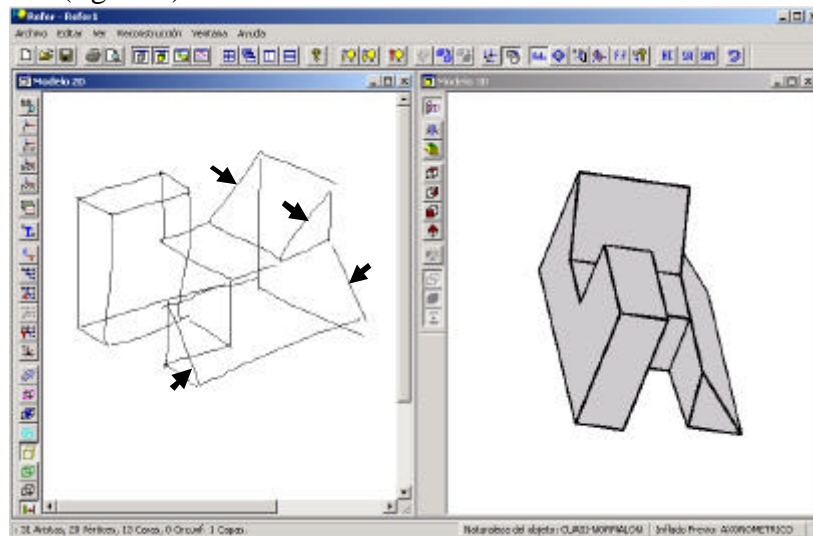


Figura 4. Sesión de bocetado en REFER de un modelo cuasi-normalón

Es decir, que el usuario/diseñador puede ver el modelo tridimensional mientras él está bocetando una representación axonométrica del mismo. El modelo aparece representado con caras opacas, o en representación alámbrica (a voluntad del usuario), y puede ser rotado y escalado libremente. El boceto también puede ser modificado, y la modificación interactiva del boceto repercute automáticamente en el modelo (figura 5)

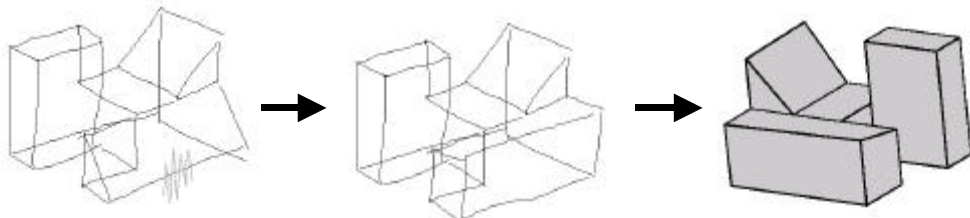


Figura 5. Modificación interactiva del boceto, y actualización automática del modelo

Finalmente, el usuario puede elegir vistas preprogramadas de dicho modelo: las tres vistas ortográficas principales (alzado, planta y perfil) y las dos representaciones axonométricas estandarizadas (isométrica y dimétrica). Las aristas ocultas también pueden ser obtenidas a voluntad del usuario.

4. Resultados.

En principio, hay que destacar que es más amigable generar representaciones axonométricas con el bocetador que con los programas actuales de delineación asistida por ordenador.

En este sentido, utilizar un bocetador axonométrico en lugar de utilizar los instrumentos virtuales de soporte a la delineación de axonometrías presentes en las aplicaciones comerciales de delineación por ordenador potencia la creatividad; dado que dichas herramientas ponen el énfasis en conseguir delinear representaciones axonométricas geoméricamente rigurosas (es decir, representaciones cuyas medidas longitudinales y

angulares cumplen las leyes de la geometría proyectiva correspondientes a las proyecciones axonométricas). La rejilla isométrica de AutoCAD y el bloqueo isométrico de Microstation (figura 6), son ejemplos típicos de estos instrumentos. En efecto, AutoCAD tiene una herramienta para facilitar la delineación de un tipo particular de axonometrías: el FORZCURSOR isométrico. La herramienta se combina con un conmutador que activa uno de los tres planos principales de trabajo (superior, izquierdo y derecho). Este “paralex isométrico” facilita la construcción de isometrías, pero tiene el grave inconveniente de que no permite variar los ángulos para obtener otras axonometrías. Otro inconveniente grave es que no se modifica el comportamiento de algunas transformaciones que podrían ayudar a construir las figuras isométricas. Es el caso del paralelismo, que construye rectas paralelas a la original, pero mide la separación en dirección ortogonal a la recta original, en lugar de medir en dirección isométrica (ver figura 6). Algo similar ocurre con el bloqueo de rejilla isométrica de Microstation y sus tres planos isométricos.

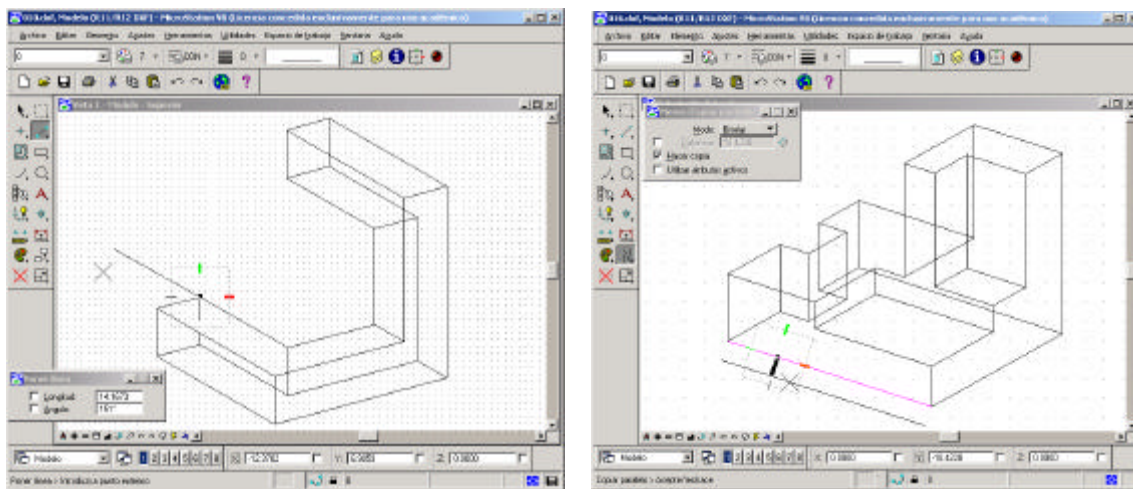


Figura 6. Bloqueo isométrico de Microstation (izquierda) y funcionamiento “antinatural” del paralelismo (derecha)

Al contrario que los programas CAD comerciales, el bocetador pone el énfasis en controlar la topología del objeto diseñado, y se desentiende de sus dimensiones finales. En segundo lugar, y quizá es la ventaja más importante, al utilizar esta aplicación desaparece la sensación de que bocetar es una pérdida de tiempo, puesto que el alumno comprueba que tras bocetar el objeto que ha concebido, obtiene automáticamente tanto un modelo tridimensional como distintas representaciones bidimensionales normalizadas del mismo. En otras palabras, tras concebir, mediante un boceto, el modelo tridimensional se genera automáticamente y no hay que construirlo “ex novo”. Obviamente, la capacidad de visión espacial también se potencia, puesto que el alumno puede ver y manipular el modelo tridimensional. Además, los errores cometidos al bocetar (tales como los errores comunes de “olvidar” ciertas aristas) se ponen rápidamente de manifiesto cuando el analizador indica al usuario que no puede generar ningún modelo 3D geoméricamente válido. O bien, cuando el analizador genera un modelo, perfectamente coherente con el boceto, pero discrepante con la imagen mental que el usuario tiene del objeto que ha pretendido bocetar. El bocetador es muy simple e intuitivo cuando se representan objetos poliédricos de complejidad media o baja. Sin embargo, requiere mucha habilidad en delineación y una gran capacidad de visión espacial cuando se pretende generar formas complejas.

Ejemplos como el de las figuras 7 y 8 muestran que sólo un experto puede llegar a representaciones tan sofisticadas, o, lo que es lo mismo, que la herramienta no tiene utilidad práctica para un diseñador experto que concibe formas sofisticadas. En la figura 8 se han representado sólo las caras y aristas totalmente vistas. El resto del modelo poliédrico no se ha representado. Por ello, el modelo tiene éxito, pero lo que reconstruye es del tipo “chapa doblada” u “origami”.

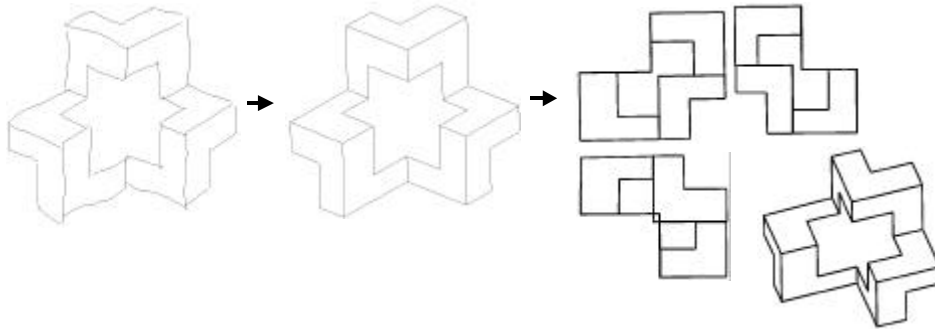


Figura 7. Boceto “sin aristas ocultas” y modelo resultante.

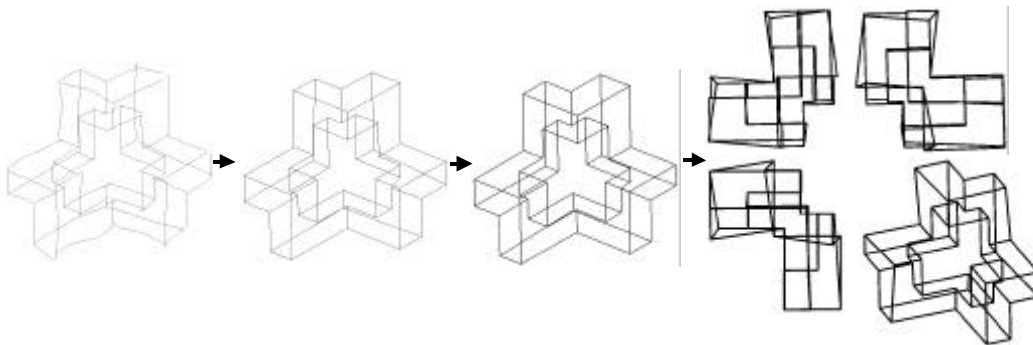


Figura 8 Boceto complejo, con aristas ocultas, y modelo resultante.

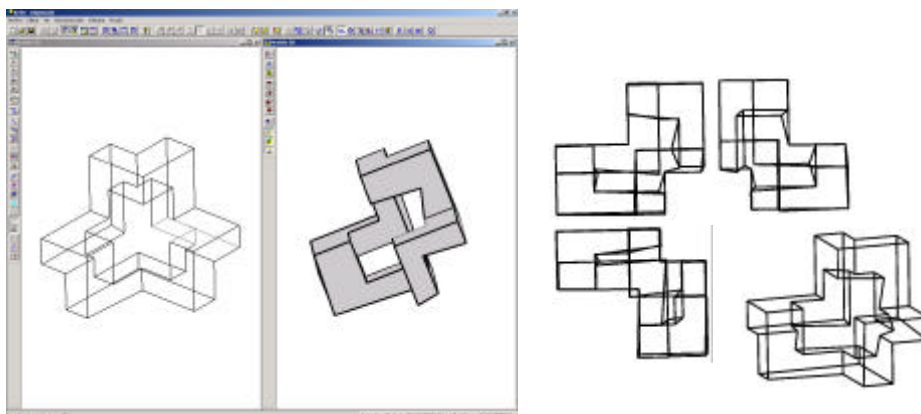


Figura 9 Boceto “arreglado” y modelo obtenido.

La versión “de investigación” del programa, es capaz de arreglar automáticamente el boceto, llegando a obtener un modelo final válido (figura 9); pero aun no es amigable, porque requiere tiempo de espera e interacción con el usuario.

Pese a que el sistema aun no es fácil de usar cuando se trata de bocetar formas complejas como la descrita arriba, el planteamiento de partida de este trabajo se ha cumplido con creces. Puesto que al introducir esta aplicación en un aula con alumnos que están iniciando su proceso de formación en representaciones axonométricas, y que

se pretende que adquieran también un cierto dominio de la visión espacial, los resultados experimentales muestran que el porcentaje de éxito es muy alto. Los alumnos se acostumbran rápidamente a utilizar el bocetador. Además, cuando aprenden a exportar vistas axonométricas en formato DXF o STEP, prefieren hacer el boceto en REFER y exportar la vista axonométrica, antes que dibujar directamente con las herramientas isométricas de los programas CAD 2D comerciales.

4. Conclusiones

El bocetador es una herramienta sencilla y fácil de incorporar a un currículo de diseño mediante dibujos. Su principal utilidad es potenciar la capacidad de visión espacial al inicio del curso. Es especialmente atractiva porque en ese momento el alumno aun no tiene la suficiente habilidad en el manejo de los programas de CAD 2D comerciales, y porque las herramientas para delinear axonometrías que incluyen dichos programas son muy limitadas y obligan a un estilo de trabajo poco natural y nada amigable.

En segundo lugar, el bocetador hace más atractivo para el alumno el aprendizaje necesario para bocetar, dado que al generar automáticamente el modelo final, desaparece la sensación de que bocetar es “hacer el trabajo para nada”.

El programa será más potente y amigable si se introducen algunas operaciones habituales, además de la de dibujar aristas y borrar arista. Operaciones tales como la extrusión, la revolución y la simetría ayudarán a generar dibujos complejos (como el de las figuras 7, 8 y 9) con menos esfuerzo y más precisión, ampliando así el conjunto de formas directamente construibles a partir de boceto. También es de esperar que la introducción en el aula de “lápices virtuales” más naturales (tales como los punteros de los tablet PC) incremente aun más la amigabilidad de este entorno de trabajo.

Por último, la introducción de los tablet PC's con conexiones infrarrojas a los cañones de video, supondrá que herramientas como las descritas en este trabajo se convertirán en elementos fundamentales del “teachware” vinculado a la enseñanza de los gráficos de ingeniería.

5. Agradecimientos

Este trabajo ha estado parcialmente financiado por la *Fundació Caixa Castelló-Bancaixa*, a través del programa de Proposición de la Investigación de la *Universitat Jaume I* (Proyecto P1-1B2002-08, titulado “Del boceto al modelo: nuevas interfaces de usuario para sistemas CAD”, “From sketch to model: new user interfaces for CAD systems”).

Bibliografía

- [Ferg92] Ferguson E.S. *Engineering and the Mind's Eye*. Ed. MIT Press, 1992.
- [Cone98] Conesa, J., Company, P. y Gomis, J.M., "La estructura del aprendizaje en el contexto de los sistemas CAD". *Actas del X Congreso internacional de Ingeniería Gráfica. Volumen III*, (ISBN 84-89791-08-2), 1998, pp. 41-55.
- [Comp96] Company, P., "Integrating Creative Steps in CAD Process". *International Seminar on Principles and Methods of Engineering Design. Proceedings, Vol. 1 (ISBN 88-900081-2-1)*, 1997, pp. 295-322.
- [Ullm02] Ullman D.G. "Toward the ideal mechanical engineering design support system". *Research in Engineering Design*. No 13. pp 55-64. 2002.

- [Hohe56] Hohenberg F. *Konstruktive Geometrie für Techniker*. Wien, Springer. 1956. (*Geometría constructiva aplicada a la técnica*. Ed. Labor, Barcelona, 1965. ISBN 0-12-355571-X)
- [Bert96] G.R. Bertoline, E.N. Wiebe, C.L. Miller y L.O. Nasman. *Fundamentals of Graphics Communication*. Irwin Graphics Series, 1996. (*Dibujo en Ingeniería y Comunicación Gráfica*. Ed. Mc Graw Hill, 1999)
- [Holl98] K. Holliday-Darr. *Applied Descriptive Geometry*. Delmar Publishers ,2nd edition, 1998. (*Geometría descriptiva aplicada*. International Thomson Editores, 2000) (<http://enr.bd.psu.edu/holidar/>).
- [Comp90] Company, P. “Una propuesta de lógical como soporte a la Docencia de la Expresión Gráfica” *Actas del II Congreso de Expresión Gráfica en la Ingeniería*, pags. 1-15, (1990).
- [Ale02] Aleixos, N., Piquer, A., Galmes, V. y Company, P. "Estudio comparativo de aplicaciones CAD de modelado". *Actas del XIV Congreso internacional de Ingeniería Gráfica*, 2002 (ISBN 84-699-8559-0), páginas 91-100.
- [Piqu02] Piquer, A., Aleixos, N., Galmes, V. y Company, P. "Estudio comparativo de aplicaciones de delineación por ordenador". *Actas del XIV Congreso internacional de Ingeniería Gráfica.*, 2002 (ISBN 84-699-8559-0), 10 páginas, formato CD (presentación póster y resumen en página 858).
- [Buca01] R. O. Bucal. “Incorporating Solid Modeling and Team-Based Design into Freshman Engineering Graphics”. *Engineering Design Graphics Journal*. Volume 65 Number 1, Winter 2001 (<http://www.east.asu.edu/edg/edgj/>)
- [McMa02] S. McMains. “E28 - Basic Engineering Design Graphics”. <http://www.me.berkeley.edu/e28/>. Fall 2002.
- [Penn02] Penn State. College of Engineering. “Engineering Design and Graphics 100”. <http://www.cede.psu.edu/edg100/>. 2002.
- [Aust02] Austin Community College. “Engineering Design Graphics”. <http://www2.austincc.edu/edg/index.html>. 2002. <http://www.me.utexas.edu/~rbarr/index.html>
- [UTex02] University of Texas @ Austin. “ME210 Engineering Design Graphics”. <http://www.me.utexas.edu/~rbarr/index.html>. 2002.
- [Vila99] Villanova University Department of Mechanical Engineering. “EGR 1610 - Engineering Design Graphics”. <http://www99.homepage.villanova.edu/howard.fulmer/1610.html>. 1999.