3310.03
Recibido: 26/6/06
Aceptado: 13/9/06

PROTOTIPADO RÁPIDO E INNOVACIÓN

QUICK PROTOTYPING AND INNOVATION

Daniel Roig Broiman
Ingeniero industrial
Director de I+D de Albatros Marine Technologies, S.L.

RESUMEN

Se describe la utilidad de los prototipos para la innovación y en el proceso de desarrollo de nuevos productos. Se presenta también una revisión actualizada de los sistemas de prototipado rápido, describiendo brevemente las principales características del proceso de fabricación, materiales utilizados y utilidad de los prototipos resultantes.

Palabras clave: Prototipado rápido, innovación, desarrollo de producto.

ABSTRACT

In this paper the utility of prototypes in innovation and product development is discussed. An updated review of rapid prototyping systems is also presented, describing briefly the main technical characteristics of the building process, materials and utility of the resulting prototypes.

Key words: *Rapid prototyping, innovation, product development.*

1. INNOVACIÓN Y PROTOTIPOS

Actualmente, en el ámbito de la gestión y dirección de empresas, está plenamente aceptada la necesidad de innovación continua como factor clave para la supervivencia de la empresa en la economía global. Es necesario innovar para ofrecer al cliente mayor valor añadido que la competencia, tanto sea ofreciendo un producto como un servicio. El incremento del valor final del producto/servicio percibido por el cliente puede ser debido a varios factores: mejor calidad que la competencia, mayor fiabilidad, menor plazo de entrega, diseño estético más atractivo, mayor funcionalidad, mejor ergonomía, servicio post-venta más eficiente, confianza en la marca, etc. Cualquier innovación en estos aspectos en sí mismos o en su forma de llevarlos a cabo (innovación de proceso) conllevará probablemente una mejora de la competitividad de la empresa.

Refiriéndonos en adelante a la innovación de producto, coincido plenamente con el gurú de la gestión **Tom Peters** [1] y con **Michael Schrage** [2], reconocido investigador de la innovación, en la increíble importancia de la rápida fabricación de prototipos: *"La innovación es la reacción al prototipo"*. Cuanto menos tardemos en disponer de un primer prototipo, antes nos daremos cuenta de los posibles fallos de diseño. Cuanto antes nos equivoquemos antes podremos rectificar. Estudiamos y analizamos el prototipo, un pequeño paso hacia atrás, un gran paso adelante, y volvemos a empezar. Igual que una imagen vale más que mil palabras, un prototipo vale más que mil imágenes.

Este prototipo puede tener una infinidad de aplicaciones, que se pueden agrupar en las siguientes categorías: evaluación del diseño estético o modelo conceptual, evaluación dimensional o funcional, pruebas experimentales y modelo para utillaje. Cada una de estas utilidades o aplicaciones necesita un prototipo de diferentes características en cuanto a precisión, acabado y propiedades físicas.

La **evaluación** del diseño estético o modelo conceptual precisa un prototipo de baja precisión y propiedades del material. El acabado puede ser de baja calidad si es para evaluación conceptual o de mayor calidad si es para sondeos o estudios de mercado o de ergonomía.

La **evaluación dimensional** o funcional requiere un modelo de precisión media, con buenas propiedades mecánicas, en el que el acabado no es importante. Este modelo servirá para verificación de dimensiones y grosores, volúmenes internos, tolerancias y solapes de ensamblaje. También puede servir para comprobar el funcionamiento del movimiento de la pieza ensamblada en un mecanismo completo y para analizar si se puede mejorar el diseño.

Para realizar **pruebas** experimentales necesitamos un modelo en el que el acabado no es importante, pero en el que el material debe ser muy similar al definitivo, ya que se pretende comprobar mediante ensayos características que condicionan la fiabilidad del componente, como la resistencia mecánica, química, resistencia al desgaste, etc.

Finalmente, para un **modelo** de utillaje se requiere un prototipo de una calidad dimensional y un acabado muy buenos siendo menos importante las propiedades del material.

Existen varias formas de obtener este prototipo, desde la fabricación manual/artesanal hasta las modernas técnicas de prototipado rápido (Rapid prototyping, como se conoce comúnmente), pasando por la fabricación convencional, teniendo cada una sus ventajas e inconvenientes.

La fabricación manual/artesanal solamente es útil para la evaluación del modelo conceptual ya que la precisión dimensional es muy baja. Otro problema que conlleva es la necesidad de personas con mucha experiencia y saber hacer, cuyo conocimiento puede ser difícil de transmitir y documentar.

La fabricación convencional es útil para todas las aplicaciones. Sin embargo, salvo algunas excepciones (piezas sencillas fabricadas al torno o en fresadora), es un sistema muy caro y lento ya que requiere la fabricación previa de utillaje o moldes para fabricación (inyección, forja, ...) de la pieza. En caso de realizar alguna modificación, todo este utillaje y el tiempo invertido son totalmente inútiles.

Las técnicas de prototipado rápido son sistemas capaces de fabricar una pieza sin necesidad de herramientas ni utillaje previo. Dentro de estas tecnologías se suelen incluir el mecanizado CNC (Control Numérico) de alta velocidad en cinco ejes y los

Figura 1. Esquema del proceso

sistemas basados en técnicas de aporte de material. Ambos sistemas son mucho más económicos y rápidos (entorno a un orden de magnitud) que la fabricación mediante sistemas convencionales. Mediante el mecanizado CNC de alta velocidad en cinco ejes se puede obtener el modelo en material definitivo, pero requiere un gran conocimiento y experiencia en el manejo de complejas aplicaciones de mecanizado asistido por ordenador y la asistencia de personal de taller para manejo del centro de mecanizado. Los sistemas basados en técnicas de aporte de material (son los que usualmente se denominan de Prototipado rápido) son capaces de producir un prototipo útil para evaluación del modelo conceptual y dimensional-funcional de manera mucho más sencilla y rápida. Tras un proceso de acabado superficial también sirven como modelo de utillaje, y en función del material, también pueden servir para realizar pruebas experimentales.

2. PROTOTIPADO RÁPIDO

2.1 Introducción

El concepto básico del sistema de fabricación mediante Prototipado rápido es la creación de un modelo tridimensional mediante la adición de material en capas bidimensionales sucesivas, al contrario que los métodos convencionales que conforman la pieza/modelo por arranque de material o deformación. En inglés, aparte de *Rapid Prototyping* (RP), se suelen utilizar igualmente los términos *Layer Manufacturing* (LM, fabricación mediante capas) y *Solid Freeform Fabrication* (SFF, fabricación de sólidos de forma libre).

El proceso inicia con la creación del modelo 3D de la pieza a fabricar mediante un programa de diseño asistido por ordenador (CAD – *Computer Aided Design*). El modelo CAD tridimensional puede estar generado en forma de sólidos o de superficies. El segundo paso es la conversión de este modelo de sólidos/superficies a un formato estándar común a todas las máquinas de prototipado rápido denominado STL, ya que las primeras máquinas comerciales de prototipado rápido fueron las de estereolitografía. El archivo en formato STL se obtiene convirtiendo las superficies del modelo en pequeños triángulos. Cuanta mayor precisión se desee menor debe ser el tamaño de los triángulos y mayor será el tamaño del archivo y el tiempo de preproceso. Actualmente la mayoría de programas CAD ya disponen de este tipo de conversión automáticamente.

El siguiente paso suele estar incorporado en la aplicación informática de la máquina de prototipado rápido y suele ser de tipo propietario del fabricante del equipo. Este paso consiste en rebanar el modelo STL en diferentes capas bidimensionales. En un principio, las capas eran de igual altura pero actualmente algunos sistemas tienen sistemas adaptativos que deciden la altura de capa en función de la curvatura de la superficie, de forma que se acelera el proceso de fabricación, manteniendo la calidad del acabado superficial. Esta aplicación informática genera las trayectorias a seguir por el cabezal de la máquina en cada capa 2D, así como los soportes necesarios en caso de que la pieza a fabricar tenga voladizos, huecos internos o partes todavía no interconectadas. Actualmente hay sistemas capaces de crear capas de 12 micras de altura. La rugosidad dependerá del sistema utilizado y de las alturas de capa, pero en un sistema de prototipado de uso general se pueden obtener rugosidades Ra=1-6 µm / Rt=8-30 µm [3], mientras que la precisión dimensional es del orden de 0,15-0,25 mm.

El último paso es la fabricación de la pieza por el equipo de prototipado rápido, que se comentará en el siguiente apartado. Finalmente se procede a realizar las operaciones de acabado (limpieza, eliminación de estructuras de soporte, pulido, pintado…) de la pieza según sea necesario para la aplicación o uso final de la misma.

Las mayores **ventajas** de los equipos de prototipado rápido respecto a los sistemas de mecanizado convencional son las siguientes:

- Flexibilidad y rapidez del proceso.
- Menor coste total de la pieza.
- No necesidad de personal especializado para manejar el sistema, ni necesidad de conocimientos de programas informáticos de mecanizado CNC (CAM, *Computer Aided Manufacturing*).
- Equipos normalmente de tamaño reducido, limpios y poco ruidosos, aptos para un entorno de oficina.
- Mediante este sistema se pueden obtener piezas muy complejas imposibles de obtener por otros métodos (huecos interiores…).
- Funcionamiento desatendido de los equipos, pudiendo funcionar 24 horas diarias.

Entre las **desventajas** destacaremos:

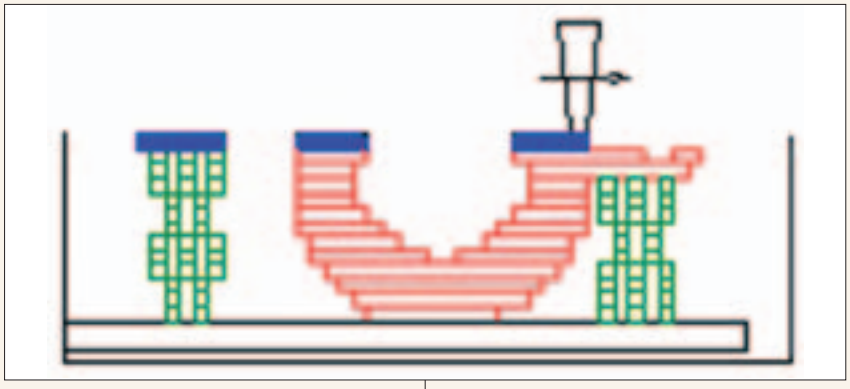

Figura 2. Esquema SLA

- Pequeño volumen máximo de las piezas (usualmente los equipos grandes tienen un volumen aproximado de 600x500x500 mm^3).
- Peor calidad del acabado superficial.
- Peor precisión dimensional.
- Los materiales todavía no tienen las mismas características que los termoplásticos para inyección

Actualmente existen numerosos métodos de fabricación de prototipos dentro de la tecnología del prototipado rápido [4-6], que se basan en los siguientes procesos de obtención del prototipo:

- Fotolitografía: Utiliza un emisor láser o de luz UV (ultravioleta) para solidificar la materia prima.
- Laminado: Basa la construcción del modelo en la unión de láminas sólidas (papel, plástico, cerámica, ...) cortadas mediante láser o cuchilla.
- Extrusión: El modelo es construido mediante la extrusión de un filamento termoplástico o de cera a través de un cabezal.
- Sinterizado: Fusión de polvo (plástico, metálico…) mediante láser.
- Impresión/Inyección: El modelo es construido mediante la inyección de un chorro de material termoplástico o cera a través de una o varias boquillas simultáneamente.

2.2 Sistemas de prototipado rápido

A continuación se comentan los principales sistemas de Prototipado rápido, describiendo brevemente el proceso, sus características más relevantes y los diferentes fabricantes de los equipos.

SLA, Estereolitografía

La estereolitografía puede considerarse como la primera técnica que fue desarrollada a nivel comercial y es el sistema más extendido.

Los equipos de SLA están formados por una cuba llena de resina hasta un nivel determinado, una plataforma móvil en el eje z y un sistema láser UV.

Esta resina es un material plástico líquido y fotosensible cuyos monómeros polimerizan y solidifican al ser expuestos a la luz ultravioleta.

La distancia de la plataforma móvil al nivel de resina está controlada automáticamente, regulando así la altura de cada capa bidimensional que conforma el prototipo. En los equipos SLA la altura de cada capa puede ser diferente.

El sistema láser ultravioleta suele ser del tipo CO_2/HeCd de baja potencia y el punto de aplicación del haz láser se controla mediante dos espejos galvanométricos, realizando el barrido en cada capa bidimensional.

Cada vez que una capa 2D ha solidificado mediante el láser UV, la plataforma se sumerge mecánicamente el espesor deseado de la siguiente capa, cubriendo así de resina líquida la capa sólida inferior.

Puesto que el proceso se realiza con resinas líquidas, en caso de que haya voladizos o huecos, es necesario crear estructuras de soporte que se eliminan en el post-procesado de la pieza.

Los prototipos suelen ser frágiles y de pobres características mecánicas, pero con una buena precisión dimensional. Esto los hace muy apropiados como modelo *master* para hacer moldes.

Las principales empresas que fabrican este tipo de equipos son: **3D Systems** y **EOS Gmbh**.

SLS (*Selective Laser Sintering*), Sinterizado Selectivo por Láser

Este proceso es similar a la estereolitografía pero con material sólido en polvo en vez de resina líquida. En este caso, el láser es de tipo CO_2 de potencia media. El material se calienta previamente a una temperatura ligeramente inferior a la de fusión y, cuando es expuesto al haz láser, se calienta a una temperatura superior a la de sinterización y se funden los bordes de los granos de polvo, uniéndose entre sí. Al finalizar, el barrido del láser en una capa y la solidificación de la misma, la plataforma desciende y un rodillo aporta el nuevo material en forma capa uniforme de polvo.

Se pueden emplear materiales de muy buenas características (poliamidas, policarbonatos, PVC, metales...), permitiendo la fabricación de prototipos funcionales, aunque la precisión dimensional y el acabado no sean muy buenos.

La pieza resultante es porosa pero se puede infiltrar con otro material. Por ejemplo, actualmente se fabrican

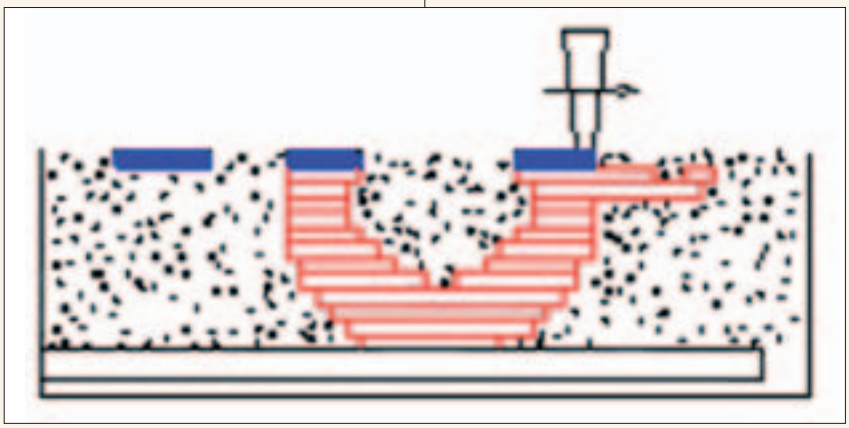

Figura 3. Esquema SLS

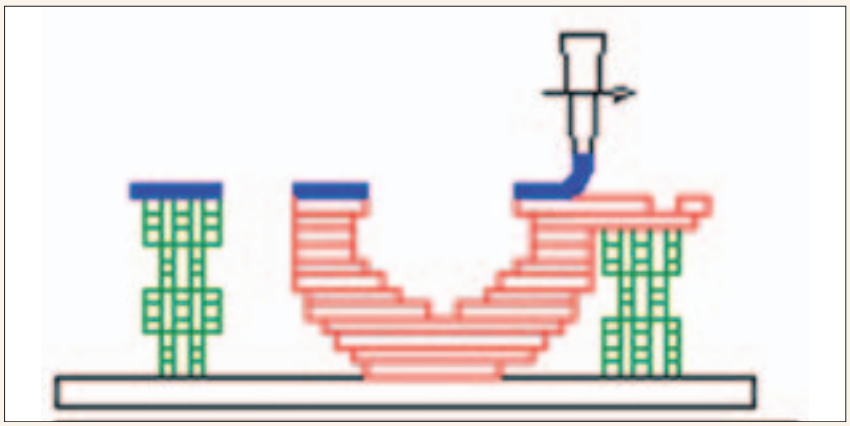

Figura 4. Esquema FDM

moldes sinterizados en acero y posteriormente infiltrados con cobre (*keltool® process*).

Al utilizar polvo en lugar de resinas líquidas, no es necesario crear estructuras de soporte.

Las principales empresas que fabrican este tipo de equipos son **DTM**, **EOS** y **D-MEC**.

FDM (*Fused Deposition Modeling*)

Este sistema se basa en la extrusión de un cordón de material mediante una boquilla móvil, que va conformando la geometría del objeto. El material está a una temperatura muy poco por encima de la de fusión y, al ser extruido contra la capa anterior, solidifica inmediatamente quedando adherido a ésta y conformando la capa con el espesor adecuado (que en este sistema también puede ser variable). Este sistema necesita estructuras de soporte en caso de huecos y voladizos.

Los materiales empleados son termoplásticos, elastómeros, poliamidas o ceras de fundición.

Los prototipos obtenidos son frágiles, poco consistentes y ligeramente porosos, siendo poco aptos para uso como prototipos funcionales.

La empresa que desarrolló el sistema es **Stratasys**.

LOM (*Laminated Objet Manufacturing*)

El proceso LOM fabrica piezas cortando y soldando entre sí láminas de papel o plástico. La lámina, usualmente autoadhesiva y en forma de rollo, avanza sobre la capa anterior y es adherida a la misma mediante un rodillo caliente. Posteriormente un haz láser muy focalizado (para no dañar la capa inferior) o una cuchilla recorta la sección bidimensional correspondiente a la capa actual. El material sobrante se corta en forma de cuadrícula para poder extraerlo de los huecos. Las láminas pueden ser de papel, plástico (polietileno) o cerámica.

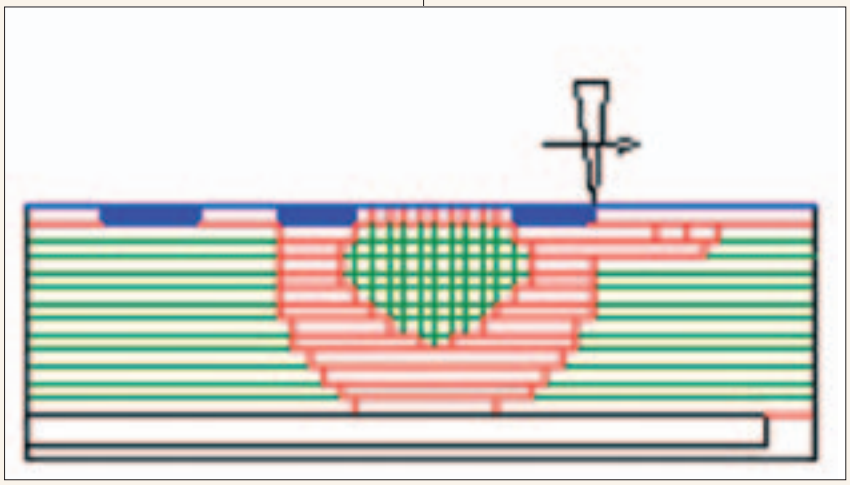

Figura 5. Esquema LOM

El sistema no necesita estructuras de soporte ni post-procesado de la pieza (salvo que se quiera evitar la porosidad en modelos de papel, donde se requerirá un sellado con resina).

El acabado es de baja calidad, pero la precisión buena, haciendo el prototipo apto para utillaje o master tras un acabado de la superficie.

Las principales empresas que fabrican este tipo de equipos son: **Helisys**, **Kira Corp.** y **Graphtec**.

SGC (*Solid Ground Curing*), Estereolitografía mediante máscara

El proceso se realiza en varias fases: En primer lugar, se crea una máscara de la parte no sólida de la capa bidimensional actual sobre una lámina de cristal con un toner al igual que en una fotocopiadora. En segundo lugar, un rodillo deposita una capa de resina líquida sobre el objeto en la cubeta. Posteriormente, el cristal se posiciona sobre el modelo y se expone el conjunto a un emisor de luz ultravioleta, solidificando las zonas no cubiertas por la máscara. Seguidamente, la resina líquida restante es aspirada y otro rodillo deposita cera fundida, que queda en los huecos no solidificados. La cera se enfría mediante una placa fría y el modelo es rectificado-fresado a la altura de capa deseada. Finalmente, la plataforma desciende el espesor de capa y se repite el proceso.

El prototipo debe ser post procesado para extraer la cera de soporte.

Este sistema de gran capacidad produce modelos de alta precisión dimensional pero, como en todos los modelos de resina fotosensible, el material no tiene muy buenas características mecánicas. Se produce un alto porcentaje de desperdicios y el equipo requiere la presencia de un operario.

La empresa que desarrolló este tipo de equipos es **Cubital**.

Envisiontec ha desarrollado un sistema similar más sencillo pero sin aporte de cera y construyendo el modelo hacia arriba, evitando igualmente estructuras de soporte (*Perfactory* Proyección de máscara).

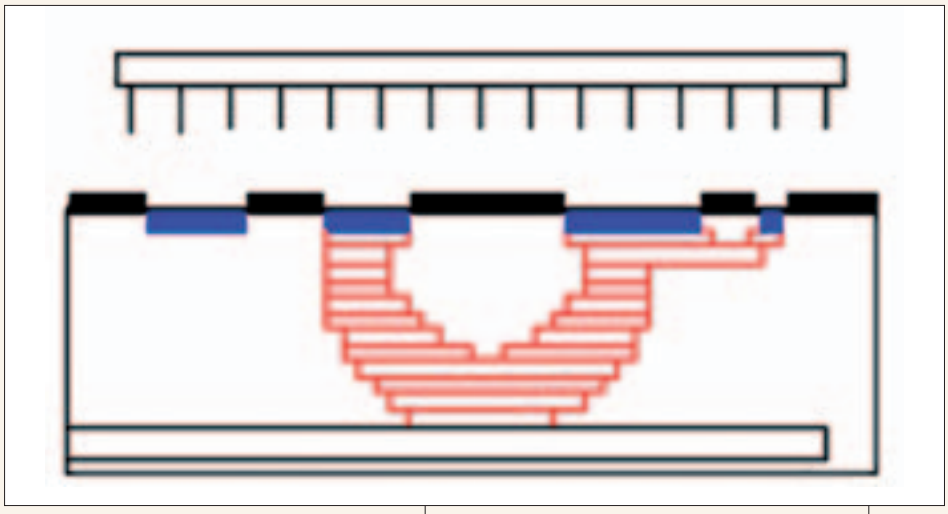

Figura 6. Esquema SGC

InkJet Printing, Sanders Model-Maker™

El funcionamiento de este sistema es similar al de una impresora de chorro de tinta con dos cabezales, sustituyendo la tinta por un termoplástico de características parecidas a la cera de fundición en un cabezal y otro material más blando o cera para la estructura de soporte en el segundo cabezal. El material termoplástico en estado líquido solidifica al salir de la boquilla del cabezal e impactar sobre la superficie de la capa inmediatamente inferior.

Cada vez que los cabezales acaban la impresión de la parte sólida de una capa 2D, la superficie superior es rectificada mediante fresado y posteriormente la plataforma de construcción desciende hasta la siguiente posición.

Con esta tecnología se consiguen prototipos de gran precisión y bajas características mecánicas (como en prácticamente todos los sistemas basados en inyección). Es particularmente adecuada para la generación de pequeños patrones y piezas de gran detalle (joyería, ...).

El sistema se ha desarrollado por **Sanders Prototype** Inc.

InkJet Printing, Z-corp

El sistema desarrollado por **Z–corp**. es una evolución de los sistemas de impresión/inyección. El equipo es similar al SLS, con una cuba de construcción del prototipo y otra con el material en forma de polvo. La diferencia es que el material no es fotosensible y no se funde mediante el haz láser sino que la parte sólida de cada capa 2D se obtiene por inyección de adhesivo sobre la capa superior de polvo mediante un cabezal.

Es un sistema muy rápido que permite obtener modelos en infinidad de colores y no requiere estructuras de soporte. Los prototipos no tienen gran precisión dimensional.

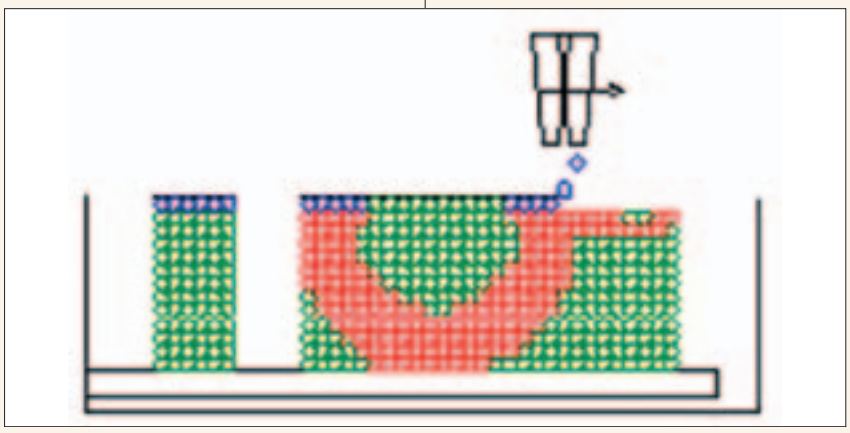

Figura 7. Esquema InkJet

InkJet Printing, MJM, Multijet Modeling

Esta tecnología, desarrollada por **3D Systems**, consiste en un realizar el prototipo de manera similar al de **Sanders Prototype** (pero sin el rectificado de superficie) mediante inyección de plástico y cera (estructura de soporte) con un cabezal multi-inyector de 96 toberas, mejorando notablemente la rapidez del proceso

InkJet Printing, DSPC (Direct Shell Production Casting)

El sistema desarrollado por **Soligen** y el **MIT** (Massachussets Institute of Technology) es prácticamente idéntico al sistema de Z-corp, pero el material sólido usado es polvo para hacer moldes de colada para metales.

BPM *(Ballistic Particle Manufacturing)*

El prototipo se fabrica mediante a la proyección de millones de partículas microscópicas de un polímero ca-

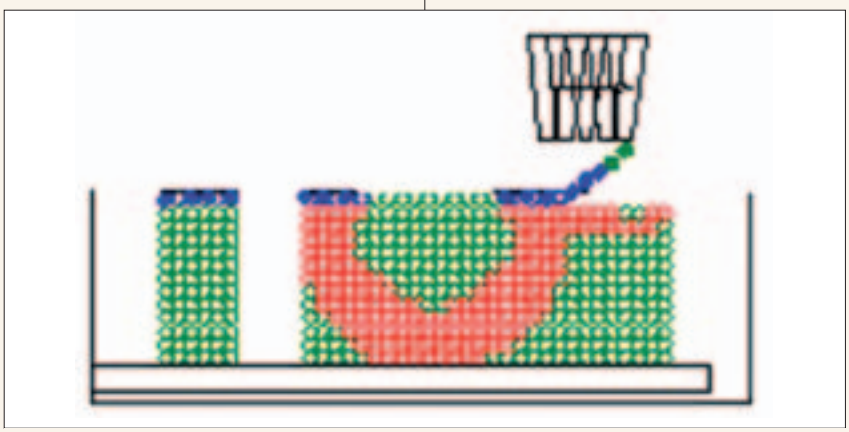

Figura 8. Esquema Z-corp

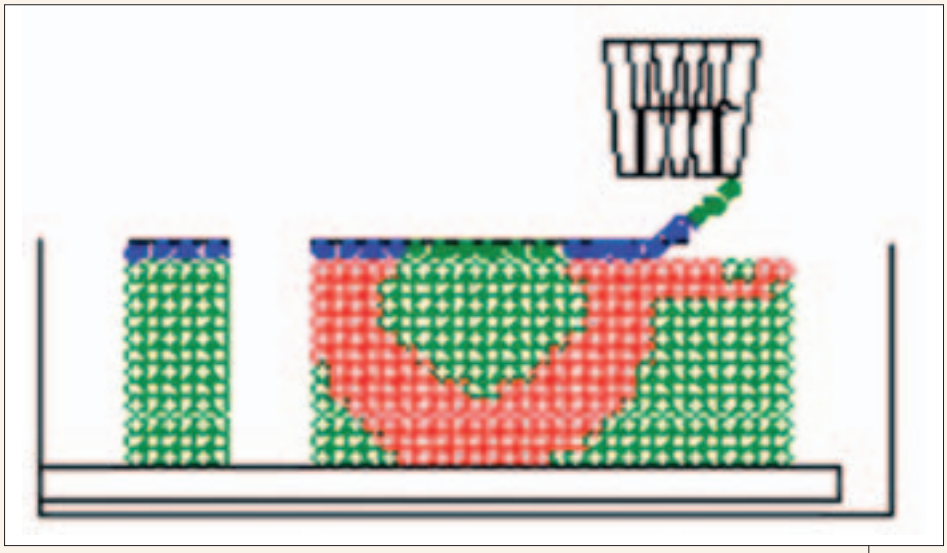

Figura 9. Esquema MJM

liente, que solidifican al impactar. El cabezal de proyección dispone de tres grados de libertad de traslación y uno de rotación.

Este sistema no se ha llegado a comercializar por su lentitud comparada con equipos similares.

EBM *(Electron Beam Meeting)*

Arcam ha desarrollado un sistema que fabrica los prototipos por capas sucesivas de material sólido en forma de polvo, fundiéndolo mediante un haz de electrones. Al fundir el material en vez de sinterizarlo, se obtienen modelos no porosos. Hasta el momento los materiales empleados son aceros y titanio.

2.3 El futuro del prototipado rápido

Las principales líneas de investigación se centran actualmente en los dos aspectos más débiles de los prototipos obtenidos mediante estas tecnologías: la precisión y las características mecánicas de los materiales.

En 15 años, se ha pasado de una precisión en el eje z del orden de décimas de milímetro al orden de centésimas de milímetro. En los próximos años se prevé una mejora en la precisión, pero siempre será a costa de un mayor tiempo de proceso al tener que trabajar con más capas.

En lo referente a los materiales, las empresas suministradoras compiten día a día por mejorar sus productos. En la revista *The tct magazine* (http://www.time-compression.com) aparecen cada mes nuevos materiales con nuevas o mejores características.

El mercado de equipos de prototipado rápido se mantiene creciendo año tras año, según el informe anual del consultor de desarrollo de producto y prototipado rápido **Terry Wohlers** (http://www.wohlersassociates.com), al igual que el número de patentes de sistemas de prototipado rápido (http://home.att.net/~castleisland).

Otra línea de aplicaciones de los equipos de prototipado rápido es la fabricación rápida (RM, *Rapid Manufacturing* o DM, *Direct Manufacturing*), que consiste en utilizar este tipo de equipos para series cortas, series de pruebas, productos individualizados, o productos con bajo volumen anual de ventas, que hagan excesivamente costosa o inviable la fabricación de los mismos mediante métodos convencionales. Hay empresas innovadoras que ya utilizan actualmente la fabricación rápida en sus líneas de producción, como empresas fabricantes de audífonos individualizados, implantes óseos adaptados, etc.

3. CONCLUSIONES

Se han presentado de manera breve los sistemas actuales de prototipado rápido y sus principales características.

Las aplicaciones son infinitas, sólo limitadas por la imaginación del diseñador, al permitir crear prototipos de cualquier forma. Por otro lado, el proyectista o diseñador debe también tener en cuenta que, aunque el sistema permita cualquier forma, al diseñar un producto comercial éste debe poderse fabricar en serie mediante métodos convencionales (hasta que estén más avanzadas y extendidas las tecnologías de fabricación rápida).

Las posibilidades de estas tecnologías como apoyo al proceso de innovación de las empresas son indudables, tanto en la reducción del tiempo de desarrollo y lanzamiento del producto *'time to market'* como en la reducción del coste de desarrollo al anticipar posibles problemas de diseño funcional o estético.

En Alemania, EEUU o Japón, el porcentaje de empresas industriales con producto propio que utilizan tecnologías de prototipado rápido es del orden del 75-80%, mientras que en España es muy inferior a pesar de que hay empresas que ofrecen asesoría y servicios de prototipado rápido. En España queda todavía mucho trabajo de concienciación de la importancia de la innovación para el mantenimiento de la competitividad de las empresas.

4. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

[1] PETERS, Tom. *Triunfar! sin que tu jefe te estorbe.* Ediciones Nowtilus, 2003.

[2] SCHRAGE, Michael. *Serious play: how the world's best companies simulate to innovate.*

[3] GRIMM, Todd. *Rapid Prototyping Benchmark: 3D Printers.* T. A. Grimm & Associates, 2003.

[4] JTEC/WTEC *Panel Report on Rapid Prototyping in Europe and Japan.* Japaneese and World Technology Evaluation Centers, 1997.

[5] ASCAMM. *El diseño industrial y el "rapid prototyping".* 1996 ASCAMM-D.DI.

[6] KREITH, F. *Mechanical Engineering Handbook* (Cap.13 Modern Manufacturing, 13.5 Rapid Prototyping). 1999 CRC Press ■