AVANCES EN REPRAP: Impresión 3D de código abierto

Alfonso Guerrero de Mier y Maria del Mar Espinosa. Ingeniería del Diseño, ETSII – UNED

DOI: http://dx.doi.org/10.6036/5659

1. INTRODUCCIÓN

La comunidad *RepRap*, fundada por **Adrian Bowyer** de la *Universidad de Bath* en febrero de 2004, promueve el diseño de una impresora 3D de prototipado rápido auto-replicante, como un hardware con licencia GPL (*General Public License*).

En este trabajo vamos a analizar el estado actual de la iniciativa *RepRap*, estudiando las diferentes máquinas que ya están en funcionamiento en el mercado, así como las posibilidades técnicas que abre esta tecnología desde el punto de vista de la ingeniería.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1. INTRODUCCIÓN AL PROTOTIPADO RÁPIDO

El prototipado rápido, también denominado impresión 3D, es el término generalizado para denominar a todas las tecnologías de tipo aditivo mediante las que se pueden fabricar objetos. Es muy usada para la fabricación de prototipos de elementos industriales para su estudio, antes de proceder a la fabricación en serie. De este modo se pueden evaluar de forma correcta propiedades que son difíciles de apreciar en los planos del producto, tales como facilidad de manejo, tamaño, aspecto visual, etc.

Las tecnologías de prototipado rápido se basan en el principio de dispersión-acumulación. Los cuerpos a prototipar se modelizan en tres dimensiones mediante programas de diseño asistido, y posteriormente se descomponen en series de capas planas de pequeño espesor, que son apiladas juntas para formar el cuerpo original (Figura 1).

2.2. TECNOLOGÍAS DE PROTOTIPADO RÁPIDO

Las tecnologías de prototipado rápido pueden ser clasificadas según sea el estado del material usado para formar el prototipo: líquido, sólido o pulvuriento. Las principales tecnologías son las siguientes [2]:

- **Basadas en líquidos:** El material está inicialmente en estado líquido, y es transformado en sólido mediante un proceso de curado.
  - **Curados por láser:** basada en la fotopolimerización de monómeros líquidos inducida por la radiación ultravioleta de un láser. Es una técnica de alta precisión, y puede producir cuerpos muy pequeños con gran calidad superficial. Necesita de postprocesado y de un curado posterior para garantizar la integridad del prototipo. Dentro de esta categoría podemos encontrar, entre otros, los siguientes sistemas:
    - **Estereolitografía** (*Streolithography* o SL). Fue el primer sistema comercial de prototipado rápido, creado en 1988 por *3D Systems Inc*.
    - **Sistema de creación de sólidos** (*Solid Creation System* o SCS). Desarrollado por *Sony Corporation, JSR Corporation y D-MEC Corporation* en 1990.
    - **Impresión láser ultra violeta de sólidos** (*Solid Object Ultra-violet Laser Printer* o SOUP) Desarrollado por *CMET* Inc. en 1990.
  - **Curados por lámpara UV enmascarada:** la fotopolimerización es producida al mismo tiempo en toda la superficie del líquido por una lámpara ultravioleta a través de una máscara que se modifica para cada capa. Tras el curado, el líquido es sustituido por cera que permite un apoyo sólido para la próxima capa, que debe ser pulida antes de la siguiente deposición. Es un método muy rápido y no necesita elementos auxiliares de soporte, pero es caro, la cera debe ser retirada posteriormente y genera residuos. Fue desarrollado por *Cubital Ltd*. en 1991 con la denominación de *Solid Ground Curing* o SGC.
  - **Impresión por inyección:** los elementos son formados mediante la inyección gota a gota de un fotopolímero que es curado con luz ultravioleta. Desarrollado por *Object Geometries Ltd*. en 2000, bajo la denominación de *Inkjet Rapid Prototyping* o Polyjet.

- **Basadas en sólidos:** el material base se encuentra inicialmente en estado sólido, y es recortado/pegado o bien fundido/solidificado para formar el prototipo.
  - **Fabricación laminada:** mediante láser u otro medio se cortan las láminas que forman los elementos, que son apiladas y encoladas con resinas. Tiene elevada precisión, pero el postprocesado es lento y genera residuos. *Cubic Technologies Inc*. desarrolló el sistema en 2000, y patentó el término *Laminated Object Manufacturing* (LOM).
  - **Modelado por fusión y solidificación con boquilla:** los cuerpos se forman mediante la extrusión de

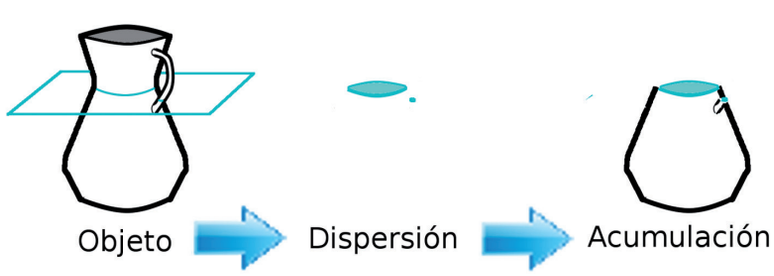

Fig. 1: Principio de Dispersión – Acumulación

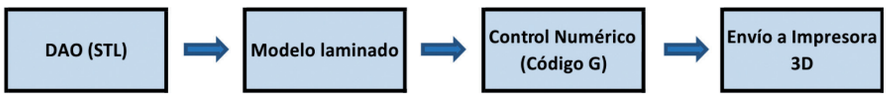

Fig. 2: Flujo del proceso de prototipado rápido

un material viscoso fundido, que se deposita por una pequeña boquilla sobre las capas anteriores, aglutinándose por enfriamiento al aire. Se usan materiales termoplásticos como ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) o PLA (ácido poliláctico). El material es calentado y fundido en la boquilla, y posteriormente extruido para formar el elemento. *Stratasys Inc*. desarrolló la tecnología en 1988, y patentó el término *Fused Deposition Modeling*. Es un sistema muy económico, es menos preciso que la estereolitografía o el sinterizado por láser y puede tener problemas de deformaciones al enfriarse. Es la tecnología utilizada actualmente por las máquinas *RepRap*.

- **Modelado por fusión y solidificación con cabeza de impresión:** esta técnica se diferencia de la anterior en que usa una o varias cabezas de impresión con numerosos pequeños inyectores en lugar de una boquilla. Se han desarrollado varios sistemas en esta categoría, entre otros:
  - **MultiJet Modeling System** (MJM), desarrollado por 3D Systems Inc. en 1999, con múltiples cabezas en paralelo que se mueven en un eje.
  - **ModelMaker** y **Pattern Master** de Solidscape, con una sola cabeza de impresión que se mueve en dos ejes.

- **Basadas en materiales pulvurientos:** el material base se encuentra inicialmente en forma de polvo, que es sinterizado mediante el calentamiento selectivo o por la adición de un aglomerante.
  - **Sinterizado por láser:** el elemento se forma en base a un polvo fino que se sinteriza al ser calentado por un rayo láser. Esta técnica no requiere de estructuras auxiliares de soporte ni de curados posteriores, pero consume mucha energía y el acabado de las superficies es ligeramente rugoso, aunque muy preciso. Fue desarrollado por 3D Systems bajo la denominación de *Selective Laser Sintering* (SLS)
  - **Impresión tridimensional:** los elementos son formados mediante la inyección gota a gota de un aglomerante sobre un polvo. Además, el inyector puede aportar tinta de color con lo que el polvo base puede colorearse de forma selectiva. No necesita estructuras auxiliares de soporte, y se pueden usar diversos materiales con diferentes aglomerantes

Especificación	Valor
Precio de todos los materiales	aprox. 400,00 €
Coste anual (aceite ocasional)	aprox. 5,00 €
	Puede imprimir sus propias piezas de remplazo al coste del material
Tamaño	500 mm (largo)
	400 mm (ancho)
	360 mm (alto)
Peso	7,0 kg
Tamaño máximo construible	200 mm (largo)
	200 mm (ancho)
	140 mm (alto)
Materiales	PLA, HDPE, ABS ...
	Usa filamento de 3 mm de diámetro
Coste del material	PLA: 22,00 €/kg
	HDPE: 11,00 €/kg
	ABS: 17,00 €/kg
Velocidad de extrusión	15,0 cm^3/h
Velocidad de los ejes X e Y	725 mm/s
Precisión	
Diámetro de la boquilla	0,5 mm
Espesor mínimo	2,0 mm
Precisión en posicionamiento	0,1 mm
Espesor de capas horizontales	0,3 mm
Volumen de piezas impresas aptas para replicar	1.110 cm^3

Cuadro 1: Especificaciones de la RepRap Mendel [6]

(cerámicos, metales y polímeros), que además pueden ser de diferentes colores. El acabado es ligeramente rugoso. Aunque actualmente se denomina impresora 3D a cualquier máquina de prototipado rápido de tamaño pequeño, el término *3D Printer* fue usado por primera vez por *Z Corporation* en 1994 para denominar a este sistema de prototipado.

2.3. CARACTERÍSTICAS DEL PROTOTIPADO RÁPIDO

El prototipado rápido tiene las siguientes características, compartidas en prácticamente todos los tipos de tecnologías:

- Se realiza mediante modelos digitales desarrollados en programas de diseño asistido por ordenador.
- Es muy flexible. Se pueden construir elementos complejos tridimensionales de diferentes formas sin necesidad de adaptar la maquinaria, y en la mayoría de los casos se puede cambiar el material de forma sencilla.
- Comparada con otras tecnologías, el prototipado rápido tiene mucha menos duración desde el diseño a la ejecución, y el coste es independiente del número de piezas construidas (no hay economía de escala), exceptuando la amortización de la maquinaria.
- Las fases en las que se ejecutan los prototipos son las siguientes (ver Figura 2):
  1. El modelo tridimensional es creado con algún programa de diseño asistido y transformado a algún formato estandarizado (normalmente STL, que fue creado por *3D Systems* en 1988 para una máquina de estereolitografía [1]).
  2. El elemento es discretizado en capas de pequeño espesor.
  3. Las capas son enviadas a la máquina de prototipado de forma consecutiva, normalmente mediante Código G (el código estándar usado por máquinas de mecanizado, desarrollado por el MIT en los años 50).
  4. Generalmente las piezas requieren de postprocesado (eliminación de estructuras de soporte auxiliares, pulido, retoques, pintado,…), y algunos materiales precisan de un tiempo adicional de curado.

2.4. PROBLEMAS TRADICIONALES DEL PROTOTIPADO RÁPIDO

Hay una serie de problemas comunes a las tecnologías de prototipado rápido, que son:

- **Tensión residual:** los cambios de estado del material base conllevan altas variaciones de temperatura en la mayoría de los casos, que producen tensiones residuales que se traducen en curvaturas no deseadas en zonas planas [8] [5] (ver Figura 3). La deformación puede reducirse o eliminarse procurando que el enfriamiento sea gradual.
- **Número limitado de materiales disponibles:** los materiales que pueden usarse en prototipado rápido son limitados, debido a los requisitos que deben cumplir según la tecnología que sea utilizada.
- **Precisión limitada:** la precisión está limitada por la tecnología y los materiales utilizados. La mejora de precisión requiere normalmente un postprocesado, lo que limita la flexibilidad y rapidez.
- **Dicotomía entre precisión y velocidad:** el tiempo de construcción de una pieza es inversamente proporcional al cubo de la precisión, por lo que pequeñas mejoras en precisión producen grandes incrementos de tiempos de fabricación.
- **Estructuras de soporte:** algunas tecnologías precisan de estructuras provisionales de soporte para poder construir voladizos, que pueden hacerse de material soluble que se elimina en el posprocesado, o con poca resistencia y eliminarse manualmente.

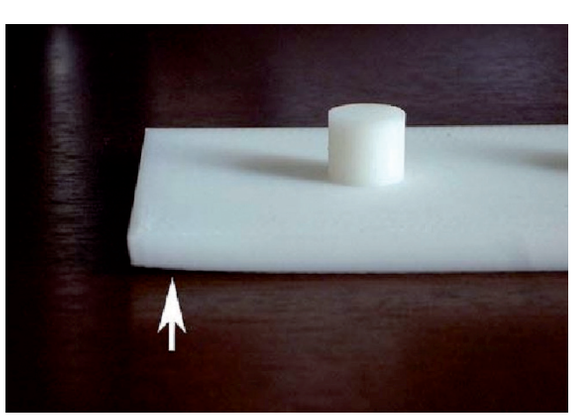

Fig. 3: Deformación típica de tensión residual [5]

- **Limitación de tamaño:** el tamaño de las piezas está limitado por la máquina que las produce.
- **Coste de fabricación:** la maquinaria para el prototipado rápido suele tener un coste elevado.

2.5. INTRODUCCIÓN A LA COMUNIDAD REPRAP

RepRap es una máquina de prototipado rápido del tipo modelado por fusión y solidificación con boquilla, auto-replicante, y de código abierto. Está siendo desarrollado por una comunidad abierta en RepRap.org, que fue fundada por Adrian Bowyer en la Universidad de Bath en 2004. Al estar el término *Fused Deposition Modeling* registrado por Stratasys, la comunidad RepRap ha acuñado el término *Fused Filament Fabrication* (FFF) que puede ser usado por cualquiera sin restricción [4].

RepRap es auto-replicante porque es capaz de generar una fracción significativa de sus propios componentes. El resto de ellos han sido seleccionados entre materiales estándares disponibles a bajo precio en cualquier tienda especializada.

RepRap está registrado por la Universidad de Bath, y es de código abierto porque está licenciado bajo una licencia GPL versión 2 [3]. Bajo estas condiciones, cualquier persona puede distribuir y modificar la máquina RepRap, pero debe mantener las modificaciones realizadas bajo esta licencia. Es decir, los cambios deben seguir siendo públicos. Como la máquina es libre y de código abierto, cualquier persona puede, sin pago de derechos de ningún tipo, construir un número ilimitado de copias, para él o para cualquier otro, usando las propias máquinas RepRap para construir las partes plásticas de las copias.

Los fundadores de RepRap plantearon la reproducción de la máquina de prototipado con un símil biológico, comparándolo con una relación de mutualismo (en las que dos seres vivos se benefician mutuamente de su interacción) también conocida como simbiosis. En esta relación, la máquina se beneficia del humano mediante su ayuda para la reproducción,

ya que el humano tiene que completar el montaje de la nueva máquina con las piezas que no son auto-replicables y montar la máquina. Y el beneficio del humano es el uso que hace de la máquina para crear los prototipos que desee. Debido a la inspiración biológica de su creación, las máquinas RepRap han sido bautizadas con los apellidos de conocidos biólogos (Charles Darwin, Gregor Mendel, Thomas Henry Huxley y Alfred Russel Wallace).

2.6. CARACTERÍSTICAS Y MODELOS DE REPRAP

Las impresoras 3D desarrolladas por la comunidad RepRap tienen las siguientes características:

- Son máquinas del tipo FFF (*Fused Filament Fabrication*), y usan como material compuestos termoplásticos (normalmente ABS y PLA).
- Ya se han desarrollado hasta la fecha cuatro modelos (Darwin, Mendel, Huxley y Wallace) con diversas variantes (Prusa Mendel, MendelMax, RepRapPro Huxley y RepRapPro Mendel).
- La precisión de los modelos viene dada por el diámetro de la boquilla, que suele ser de 0,4-0,5 mm.
- Las especificaciones de la máquina RepRap Mendel (la última generación estable de RepRap) vienen recogidas en el cuadro 1.

La máquina RepRap versión I (Darwin) fue la primera en construirse (en 2007). La versión II se denomina Mendel y es la máquina RepRap que más éxito ha tenido, al menos por la cantidad de derivadas.

La RepRap Prusa Mendel es una versión de Mendel mejorada. Es mucho más fácil de construir, modificar, imprimir y reparar.

La versión III se denomina Huxley. Es una versión más pequeña y transportable que la Mendel. La comunidad pretende seguir desarrollando las derivadas de Huxley y Mendel al mismo tiempo, siendo Huxley la versión más simple y rápida, mientras Mendel tendrá todas las innovaciones posibles.

Los modelos derivados y las mejoras surgen de modo continuo, dadas las características de la comunidad RepRap. Entre otros modelos se han desarrollado la RepRapPro Mendel, la RepRapPro Huxley, y la Printerbot, la versión más simple y barata de la impresora RepRap, y su evolución, el modelo Wallace.

2.7. COMPONENTES BÁSICOS DE LAS MÁQUINAS REPRAP

Los componentes básicos de las máquinas RepRap son los siguientes:

-**Componentes plásticos:** es la fracción auto-replicante de los componentes de la máquina, ya que pueden ser construidos por otra máquina RepRap. En las máquinas Darwin y Mendel representan un 48% del total de los elementos [5].

-**Componentes estructurales no replicables y componentes electrónicos:** llamados "vitaminas" por los miembros de la comunidad RepRap, incluyen el resto de componentes estructurales necesarios para fabricar la máquina (barras roscadas y lisas, arandelas, tuercas, rodamientos, piezas especiales para el extrusor, correas, etc.) y los componentes electrónicos (microordenador y placa electrónica, motores paso a paso, sensores de temperatura y fin de carro, resistencias para calentar el extrusor y la base, cables, sensores de fin de carro, etc.)

-**Software:** necesario para que funcione el equipo, tanto el instalado en el microrordenador de la RepRap (firmware) como el instalado en el ordenador que se conecte a la impresora.

3. RESULTADOS MONTAJE DE UNA REPRAP PRUSA

El montaje de una RepRap no es una tarea compleja. Adquirimos un kit completo en RepRap BCN [7] con las siguientes características:

-Algunas de las piezas imprimibles están realizadas en SLS, y el resto en PLA.

-El kit incluye una base caliente de aluminio, para evitar deformaciones por enfriamiento rápido.

-La electrónica está formada por un *Arduino Mega* y una RAMPS v1.4.

-Los sensores de fin de carro son mecánicos.

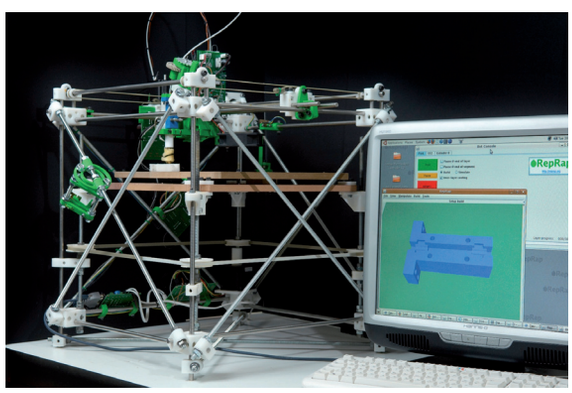

Fig. 4: RepRap Darwin [6]

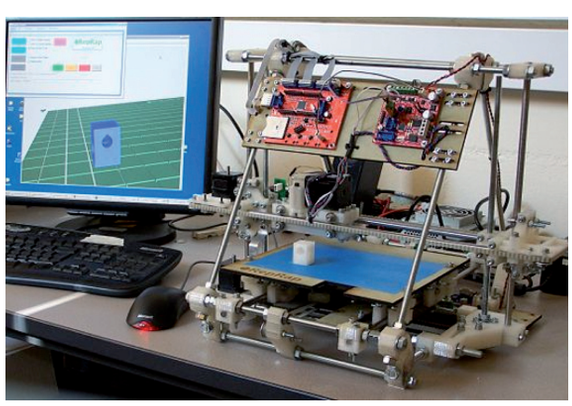

Fig. 5: RepRap Mendel [6]

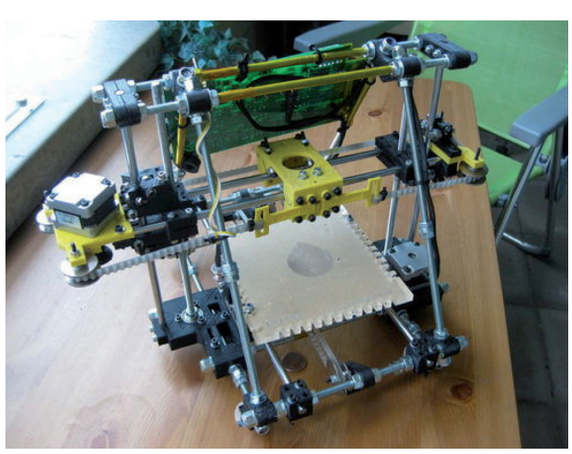

Fig. 6: RepRap Huxley [6]

Los problemas normales de RepRap son los indicados anteriormente para las máquinas de prototipado rápido, excepto el precio, ya que se puede adquirir un kit completo de una impresora RepRap por aproximadamente 600 €. Además, las máquinas RepRap tienen los problemas derivados de que el montaje debe realizarlo uno mismo. También puede adquirirse una RepRap ya montada aunque a mayor precio.

Montamos y probamos la máquina RepRap, detectando los siguientes problemas en el proceso (ver Figuras 7 y 8):

-Las instrucciones de montaje no están actualizadas. Los kits que se venden incluyen mejoras que están poco documentadas.

-El firmware instalado no era compatible con la versión del micrordenador Arduino, que era más moderno. Hubo que modificar el firmware ligeramente para eliminar los errores de compilación.

-Para la calibración de la máquina tan solo hubo que ajustar el tipo de termistor y modificar la calibración de los ejes después de imprimir la primera pieza. Es resto de valores por defecto dio un resultado satisfactorio en el primer uso.

-Para no dejar un ordenador permanentemente conectado a la RepRap (lo que puede incrementar el presupuesto notablemente), el software de control puede ser instalado en diversos ordenadores. Es necesario llevar un control sobre el firmware instalado y sus variaciones, y tenerlo accesible a los diversos usuarios.

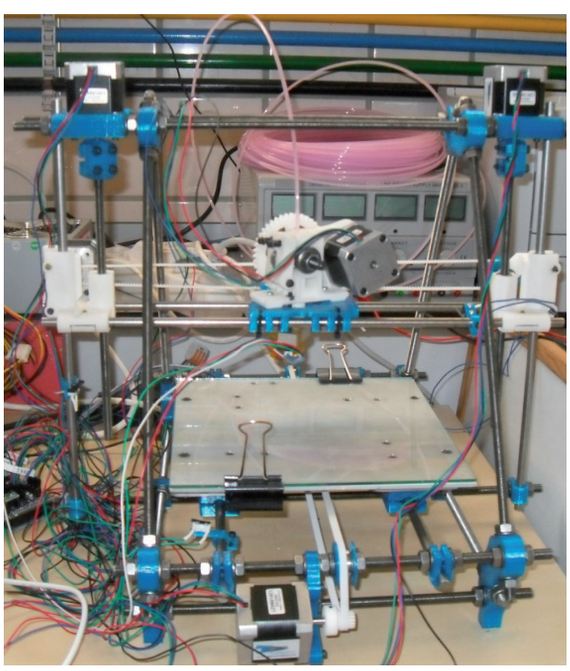

Fig. 7: RepRap Prusa Mendel

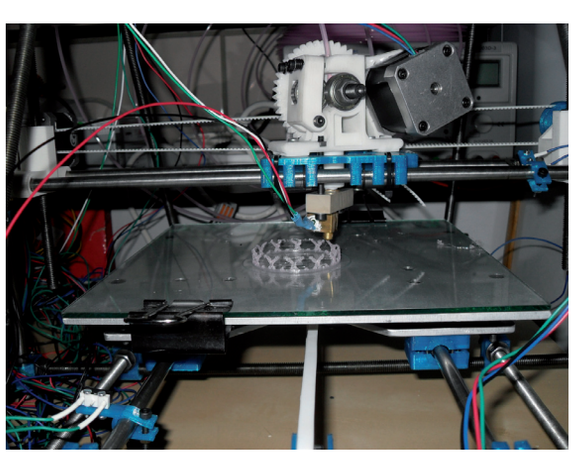

Fig. 8: RepRap Prusa Mendel en funcionamiento

4. CONCLUSIONES

En el presente documento, se han descrito las principales tecnologías de prototipado rápido y se ha realizado una revisión del estado actual de la iniciativa de hardware libre RepRap, consistente en una máquina de prototipado rápido del tipo modelado por fusión. RepRap ha entrado con fuerza en muchos entornos tecnológicos y creemos que en breve entrará en la dinámica de la empresa industrial, haciendo competitivo el diseño y fabricación de prototipos como nunca hasta ahora.

Esta irrupción de la tecnología RepRap nos recuerda a la implantación de los ordenadores personales compatibles (PC), también en código abierto, en los años ochenta del siglo pasado. Hasta entonces las empresas disponían de grandes ordenadores que realizaban el trabajo, pero la aparición del PC permitió a muchas pequeñas y medianas empresas tener su propio ordenador, y en muy pocos años todas las familias disponían de uno, para dedicarlo a tareas que entonces eran impensables.

La tecnología RepRap va a permitir que muchas pequeñas empresas y estudios de ingeniería o arquitectura tengan su propia máquina de prototipado. Incluso, si vemos cómo está evolucionando el mercado, más de un aficionado tendrá una máquina en su domicilio como un juguete -o una máquina de bricolaje-, del que obtendrá unos resultados que hoy por hoy sólo podemos prever a medias.

PARA SABER MÁS:

[1] 3D Systems, Inc. *Stereolithography interface specification*, P/n. 50065-S01-00, 1989.

[2] Chua C K, Leong K F, Lim C S. *Rapid Prototyping. Principles and Applications.* 3ra edición. World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd, 2010, p. 19-21. doi:10.1142/9789812388834_0001.

[3] Free Software Foundation. *Licencias.*[en línea] Disponible en Web: http://www.gnu.org/licenses/licenses.es.html [Consulta 1 de diciembre de 2012]

[4] Jones R. Haufe P, Sells E et al. *Reprap: the replicating rapid prototyper.* Robotica, 2011. Vol.29 p.177-191. http://dx.doi.org/10.1017/S026357471000069X.

[5] Pei Eujin, Campbell R Ian, de Beer Deon, (2011) *Entry-level RP machines: how well can they cope with geometric complexity?*, Assembly Automation, Vol. 31, p.153-160. http://dx.doi.org/10.1108/01445151111117737.

[6] RepRap Community. *RepRap.* [en línea] Disponible en Web: http://www.reprap.org [Consulta 1 de diciembre de 2012]

[7] RepRapBcn. *Full kit + Greg's Extruder.* [en línea] Disponible en Web: http://www.reprapbcn.com/catalog/index.php/full-kits/full-prusa-kit-all-you-need.html [Consulta 1 de diciembre de 2012]

[8] Yan Y, Li S, Zhang R et al. *Rapid prototyping and manufacturing technology: Principle, representative technics, applications, and development trends.* Tsinghua Science and Technology, 2009. Vol.14 p.1-12. http://dx.doi.org/10.1016/S1007-0214(09)70059-8