



Introducción a la Fabricación Aditiva

(CÓMO Y PORQUÉ DE LA IMPRESIÓN 3D)

Germán Martín Boizas

Dedicatoria

A mi mujer, que está sorprendentemente acostumbrada a vivir con mis múltiples manías, y responde siempre con una sonrisa a los miles de veces que le hago leer y releer algo.

Nota informativa

Este libro se ofrece sin coste alguno. No debería haber pagado por él. Sin embargo, el copyright del mismo sigue siendo propiedad exclusiva del autor y por lo tanto no se permite su reproducción ni copiado ya sea con fines comerciales o sin ánimos de lucro, aunque si su libre distribución.

El autor no será responsable de cualesquiera consecuencias derivadas del uso de la información aquí contenida, de decisiones tomadas a partir de ella, ni de la precisión de la misma.

© Germán Martín Boizas 2018. Todos los derechos reservados.

Primera Edición: Mayo 2018

Contenido

- PRÓLOGO..... 1
- INTRODUCCIÓN 3
- Definición y conceptos clave..... 5
 - ¿Qué es la fabricación aditiva? 5
- ¿CÓMO SE HACE? 14
- Proceso genérico de fabricación aditiva 16
 - Paso 1: Generación de modelo 3D..... 17
 - Paso 2: Simplificación a formato válido para el Sistema de fabricación aditiva 20
 - Paso 3: Rebanado (“Slicing”)..... 21
 - Paso 4: Ejecución en la Máquina de fabricación aditiva 24
 - Paso 5: Extracción 25
 - Paso 6: Acabado y post-producción..... 26
- VENTAJAS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA..... 29
- Ventajas..... 31
 - Residuos y moldes 31
 - Geometrías 32
 - 34
 - Curvas de coste..... 35
 - Resumen de las ventajas de la fabricación aditiva..... 41
- PROBLEMAS DE LA FABRICACIÓN ADITIVA..... 42
- Problemas..... 44
 - De vuelta con las curvas de coste 44
 - Problemas en el rebanado 45
 - Anisotropía..... 48
 - Repetibilidad 49
 - Propiedades de algunos materiales..... 50
 - Tamaño 50
 - Estándares..... 50
 - Escasez de conocimiento 51
 - Nuevos competidores 51
 - Resumen de los problemas de la fabricación aditiva..... 52
- HISTORIA..... 53
- Historia 55

APLICACIONES Y EJEMPLOS SECTORIALES.....	57
Cuando aplicar una fabricación aditiva	59
Estrategias.....	59
Prototipado rápido.....	59
Copia	60
Repuestos	63
Arquitectura.....	64
Joyería y Decoración	67
.....	67
Moda.....	67
En el espacio	68
Sector aéreo.....	70
Industria automovilística	71
Ayuda humanitaria.....	71
Medicina personalizada	72
Bioimpresión	75
Imprimiendo comida.....	76
Electrónica	78
Internet of Things (IoT)	78
Enseñanza	79
El Movimiento <i>Maker</i>	80
Moldes de inyección	81
 TRANSFORMANDO LA FORMA EN QUE PRODUCIMOS Y CONSUMIMOS.....	 82
La nueva cadena de suministro.....	84
Introducción.....	84
Cambios posibles debidos a la fabricación aditiva.....	86
 OTROS FACTORES	 92
Seguridad y Ciberseguridad	94
Seguridad	94
Seguridad de la impresión 3D	96
Aspectos legales y éticos	100
Recursos humanos	102
Estándares en la Fabricación Aditiva	104
Medio ambiente.....	106
Uso de material.....	106
Transporte de mercancías	106
Ahorro en almacenamiento	107
Cuestión de peso.....	107
Tiradas más cortas	107
Residuos.....	108
Reciclaje	108
Reduciendo la obsolescencia.....	108
Consumo de Energía	109
Materiales	109
 Impresión 4D.....	 111

¿4D?	111
EVALUACIÓN PARA LA ADOPCIÓN DE FABRICACIÓN ADITIVA.....	113
Analizando la opción de la fabricación aditiva.....	115
Algunas preguntas previas a hacerse.....	115
¿Sí o no?.....	116
Análisis de costes en la fabricación aditiva	119
Externalizar o no	121
Un posible modelo de referencia.....	124
PRINCIPALES TECNOLOGÍAS	132
Tipos de Tecnologías de Fabricación Aditiva.....	134
Material Extrusion.....	136
FDM / FFF.....	136
Materiales	140
Ventajas e inconvenientes	141
Syringe Extrusion	142
Vat Polymerization	144
SLA	144
DLP	147
Ventajas e inconvenientes.....	147
Powder Bed Fusion.....	149
SLM/DMLS	149
SLS.....	151
EBM.....	153
Material Jetting	155
Inyección de Materiales.....	155
Multi-jet fusion	156
Binder Jetting	159
Inyección de Aglutinante	159
Directed Energy Deposition	161
DED	161
Sheet Lamination	163
Laminated Object Manufacturing.....	163
Ultrasonic Additive Manufacturing.....	164
Resumen comparado de tecnologías de fabricación aditiva.....	166
Resumen	166
VISIÓN DE FUTURO	168
¿Qué esperar del futuro?.....	170
Empecemos por lo fácil.....	170
Impresión 3D industrial.....	170
La impresión 3D en casa	172

¿Hasta dónde?	173
PRUEBA DE COMPRENSIÓN.....	175
Examen	177
Soluciones	182
DESPEDIDA.....	183
Glosario de términos	185
Contraportada.....	196

Prólogo

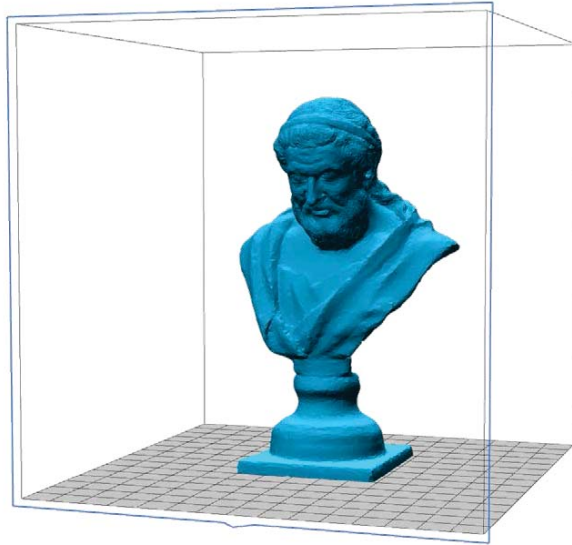
EN LOS ÚLTIMOS AÑOS resulta poco menos que imposible no haber oído hablar de la Fabricación Aditiva, con este término o en su forma más conocida para el gran público, impresión 3D. Nos hemos ya acostumbrado a los titulares tipo “el primer coche impreso en 3D” y las impresoras 3D de uso personal no hacen sino reducir año a año su precio, haciéndolas muy atractivas para los aficionados a la tecnología o al bricolaje. De igual modo, son muy pocas ya las universidades que no incluyen planes formativos específicos en estas tecnologías para sus alumnos en los programas de sus diversas titulaciones, y no sólo en las de ingeniería.

Oímos cantos de sirena afirmando que la impresión 3D terminará por eliminar a los procesos de fabricación alternativos y en un futuro no muy lejano todos tendremos una impresora en casa que nos facilitará prácticamente todo lo que necesitemos, desde un tornillo para arreglar la mesa hasta incluso nuestra comida.

Las promesas de la Fabricación Aditiva, ¿son reales?, ¿es tan revolucionaria su tecnología?, ¿desaparecerán las fábricas tal y como las conocemos?, ¿qué ventajas e inconvenientes tiene? Mi propósito al escribir esto es simplemente facilitar un primer acercamiento a esta nueva forma de fabricación, con el objetivo de que el lector sea capaz de evaluar por sí mismo la veracidad de esta nueva revolución tecnológica

Introducción

La Fabricación Aditiva o impresión 3D es posiblemente el componente más conocido de la llamada Industria 4.0, la nueva revolución industrial, y sin embargo no todos conocen en qué consiste y el porqué de este nuevo tipo de fabricación.



“El comienzo es la parte más importante del recorrido”
Platón

¿Qué es la fabricación aditiva?

Si atendemos a la definición que podemos encontrar hoy día en Wikipedia *“La impresión 3D es un grupo de tecnologías de fabricación por adición donde un objeto tridimensional es creado mediante la superposición de capas sucesivas de material”*.

Sin embargo, si nos atenemos estrictamente a lo que dice esta definición no parece algo muy moderno. Por ejemplo, la humanidad lleva miles de años haciendo paredes a base de poner ladrillos unos sobre otros.



Figura 1: Sin duda las pirámides de Egipto son un “objeto tridimensional creado mediante la superposición de capas sucesivas de grandes piedras” (Foto: Pixabay)

Resulta por tanto necesario añadir algo más a la definición que explique el porqué de tanto revuelo. En definitiva, se trata de distinguir entre una fabricación aditiva artesanal y la actual tecnología industrial, por lo que creo necesario reformular la definición añadiendo un mayor nivel de detalle:

Definición de Fabricación Aditiva

La Fabricación Aditiva es el conjunto de tecnologías de fabricación por las que un diseño digital en 3D se transforma en un objeto real, uniendo poco a poco material (o materiales) de

forma controlada por un ordenador, como oposición a las tecnologías sustractivas.

Añadimos así a la definición inicial varios puntos muy importantes, como son que el proceso está controlado por un ordenador, o que el inicio del mismo es un modelo informático en tres dimensiones, haciendo además mención a que es el “proceso opuesto” a una metodología sustractiva.

Para entender por tanto la fabricación aditiva es necesario entender los mecanismos de fabricación alternativos, agrupados de forma general en dos grandes grupos: la fabricación conformativa y la fabricación sustractiva.

Llamamos fabricación **conformativa** (o formativa, según otros autores) a aquella en la que un material es obligado (por presión, a golpes, derretiéndolo o por cualquier otro procedimiento) a adquirir la forma y dimensiones que nos interese. La fabricación **sustractiva** sería aquella en la que se van eliminando trozos de material (a golpes, lijado, fresado u otro procedimiento) de un bloque compacto inicial hasta conseguir el producto deseado.

Sería difícil establecer cuál de ellas es más antigua, puesto que ambas técnicas eran empleadas por el hombre prehistórico cuando moldeaba arcilla con sus manos hasta conseguir la forma de un cuenco (fabricación conformativa) o cuando golpeaba una piedra de sílex quitándole lascas hasta conseguir una punta de hacha afilada (fabricación sustractiva).

Podemos ver ejemplos de técnicas conformativas tradicionales en la Galería 1,



Foto: Pixabay



Foto © Germán Martín



Foto © Germán Martín

Galería 1: Ejemplos de fabricación conformativa tradicional. Hay muchas maneras distintas de forzar un material a adquirir una forma determinada.

y ejemplos de técnicas sustractivas en la Galería 2:



Imagen por Stanislav Traykov, Niabot (cut out) – Image: Michelangelo's Pieta 5450.jpg, CC BY 2.5, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=3667077>



Foto: Pixabay



Foto © Germán Martín

Galería 2: Ejemplos de fabricación sustractiva tradicional. Como decía Miguel Angel: "La escultura ya estaba dentro de la piedra. Yo, únicamente, he debido eliminar el mármol que le sobraba"

Todos los actuales procesos industriales (exceptuando los nuevos de fabricación aditiva, claro) pueden agruparse en alguna de estas dos categorías.

Así, un ejemplo común de empleo de la fabricación conformativa en la actualidad sería la tecnología de inyección de plástico dentro de un molde, con un proceso genérico similar al presentado en el diagrama 1.1:

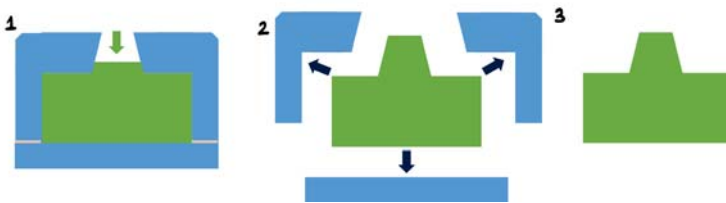


Diagrama 1.1: Proceso típico de fabricación conformativa. (a) inyección de material en el molde; (b) separación del molde; (c) producto terminado.

Los ejemplos de productos realizados con fabricación conformativa industrial moderna nos rodean en prácticamente todos los objetos de plástico (ver Galería 3).



Botellas hechas por inyección de plástico en un molde. (Foto: Pixabay)

Los tradicionales soldaditos de juguete hechos de plástico son otro ejemplo clásico de inyección de materiales. (Foto: Pixabay)

Galería 3: Ejemplos de fabricación conformativa moderna.

De igual modo, un ejemplo moderno de la fabricación sustractiva sería el empleo de máquinas CNC (Control Numérico Computerizado) de fresado. En ellas, una máquina-herramienta es programada mediante ordenador para la ejecución de una serie de trabajos mecanizados por arranque de viruta mediante el movimiento de una fresa (herramienta rotativa de corte). Con ello, la fresa elimina todo el sobrante de un bloque de material hasta conseguir el producto deseado de una forma automática.

El proceso genérico de la fabricación sustractiva sería por tanto el presentado en el diagrama 1.2.



Diagrama 1.2: Proceso típico de fabricación sustractiva. (a) Partimos de un bloque de material; (b) eliminación de material hasta adquirir la forma deseada; (c) producto terminado.

A la vista del proceso sustractivo, es más sencillo ver en qué consiste una fabricación aditiva; justo en todo lo contrario: partimos de la “nada”, y vamos añadiendo de forma sucesiva material (poquito a poquito, generalmente capa a capa) hasta conseguir el producto final.

A modo de ejemplo, una forma teóricamente posible de fabricar un sencillo vaso sería ir superponiendo una serie de aros de plástico, pegándolos sobre una base redonda, en la forma siguiente descrita en la imagen:

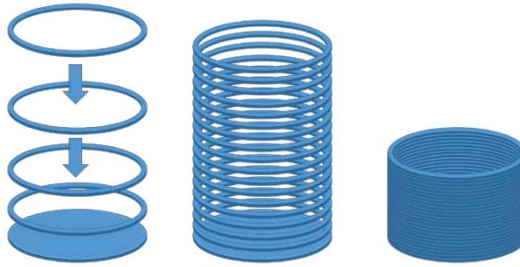


Figura 2: Al ir pegando uno a uno aros de plástico sobre una base circular terminamos construyendo un vaso.

La moderna impresión 3D consiste precisamente en eso: en ir añadiendo elementos de material de forma muy precisa, asegurando la correcta unión entre los distintos elementos añadidos (por ejemplo, haciendo que el material esté a una temperatura tal que una adecuada fusión entre capas es posible); y todo ello de forma automática, controlada por un ordenador y a partir de un diseño preliminar en 3D.

Como analogía, vamos a revisar cómo obtenemos una imagen impresa en un papel mediante una impresora de inyección de tinta.

Partimos de una imagen digital que, como sabrá, está compuesta de múltiples puntos, llamados *pixels*. Es la unión de millones de pequeños *pixels*, imperceptibles uno a uno a simple vista, lo que construye la imagen final. Estamos tan acostumbrados al mundo de la imagen digital que parece que ya no recordamos que hace nada las imágenes no se hacían así.

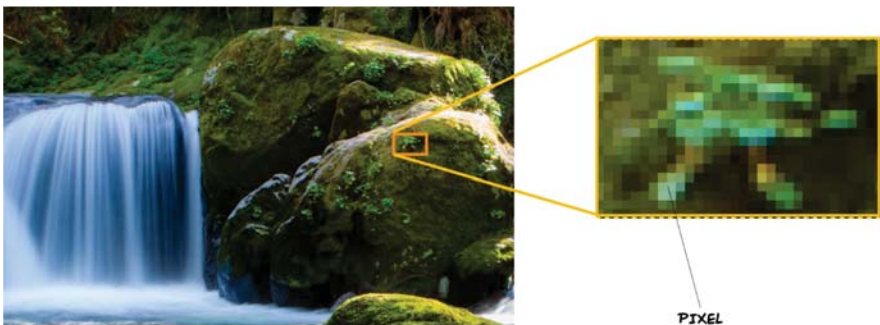


Figura 3: Concepto de pixel.

A continuación, tenemos que llevar cada uno de esos pixels a un papel. La forma normal de hacerlo es mediante el “*driver*” de la impresora, un programa que se encarga de transformar cada uno de esos pixels en uno (o varios) puntos (*dots*) que serán la “unidad imprimible”.

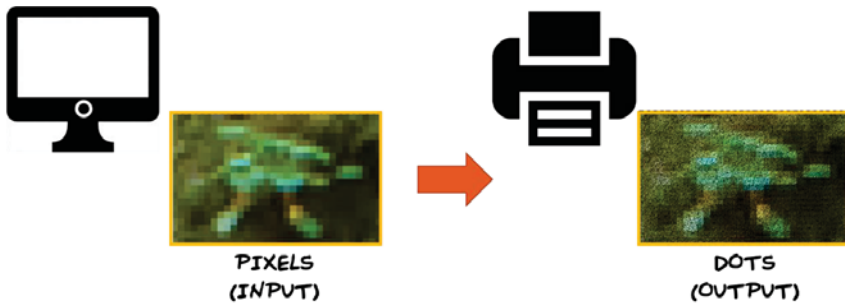


Figura 4: Para imprimir transformamos pixels en puntos.

Finalmente, nuestro hardware (la impresora de inyección de tinta) ejecutará las acciones pertinentes para escribir los puntos del color adecuado (basado en 4 colores básicos) en la posición deseada del papel.

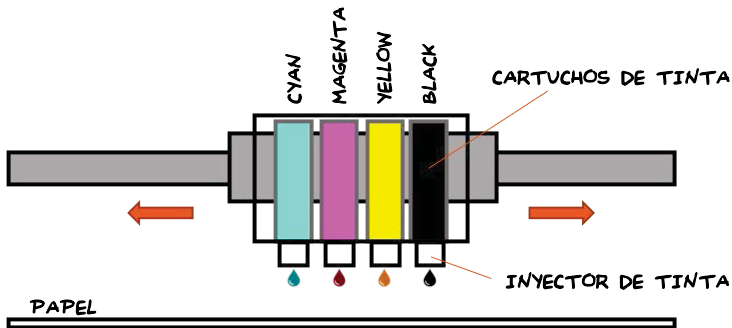


Figura 5: Funcionamiento esquemático de una impresora de inyección de tinta.

Pues bien, si llevamos este mismo principio a las tres dimensiones, podemos considerar que cualquier objeto está compuesto de “*pixels en 3D*”, llamados **vóxels** (del inglés, *volumetric pixel*, pixels con volumen).

Si fuésemos capaces de ir añadiendo “cubitos” de materia en los sitios adecuados podríamos teóricamente construir cualquier cosa, de modo análogo a como construimos una imagen digital a partir de sus pixels. Al fin y al cabo, los objetos están compuestos de átomos de distintos elementos que componen los materiales, todos ellos unidos entre sí.

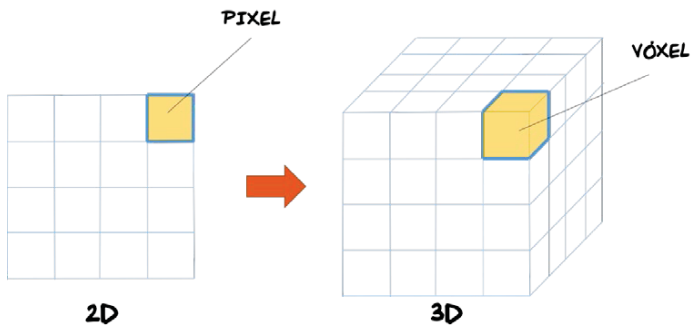


Figura 6: Concepto de vóxel.

No estamos ni de lejos cerca de fabricar algo a base de unir átomos, en lo que es habitual en las películas de ciencia-ficción (aunque en laboratorio se trabaja ya a nivel molecular). Y ni siquiera muchas tecnologías de fabricación aditiva tienen control a nivel de vóxel, sino que están más enfocadas hacia líneas superpuestas (varios vóxels a la misma altura). Pero el principio es el mismo.



Figura 7: Construcción de un objeto a partir de vóxels.

En la medida que la tecnología de fabricación aditiva evoluciona permite capas más y más finas, con resoluciones ya inferiores a la décima de milímetro, y así la percepción para el usuario empieza a ser casi invisible.



Figura 8: Representación de un objeto 3D con diferentes tamaños de vóxels. Puede observarse que al reducir el tamaño del vóxel mejora la resolución hasta el punto de ser imperceptible

Continuando con el símil de las imágenes digitales, ahora es difícil recordarlo, pero hubo un tiempo en el que, al ser totalmente perceptibles, el aspecto de cada pixel resultaba significativo. Por ejemplo, ciertos sistemas de imagen digital (como los que buscan mantener la compatibilidad con películas de televisión) no usan un pixel cuadrado, sino pixels rectangulares en los cuales la altura del pixel es diferente de su anchura. La relación de aspecto de un pixel (*pixel aspect ratio*) es lo que describe la diferencia. De igual modo, el vóxel que consigamos fabricar, tampoco tiene por qué ser perfecto, pudiendo tener diferentes dimensiones x,y,z:

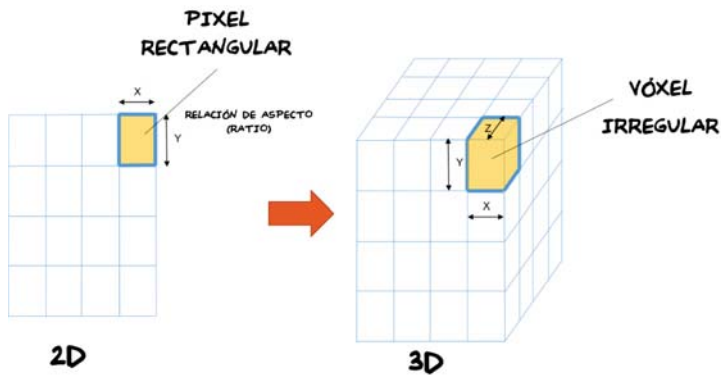


Figura 9: Relación de aspecto.

De hecho, en muchas tecnologías de impresión 3D, podemos considerar que, más que un vóxel con forma de prisma, tenemos una especie de esfera irregular capaz de fundirse con las vecinas. Es la unión de muchas de ellas la que permitirá construir el objeto final, de forma similar a como en la impresión digital un pixel se transforma en uno o más puntos (*dots*):

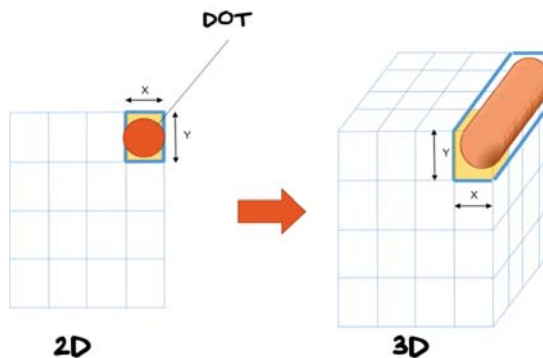


Figura 10: Vóxels impresos.

Y, por supuesto, la adición de múltiples de capas así confeccionadas es lo que terminará construyendo nuestro objeto final:

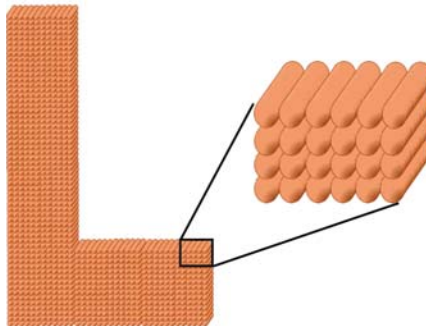


Figura 11: Una letra L impresa en 3D

Para poder comparar posteriormente con respecto a los procesos de fabricación conformativa y sustractiva presentados en los diagramas 1 y 2, nos quedaría así este proceso simplificado para la fabricación aditiva:

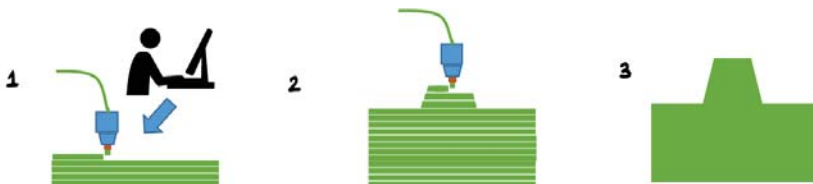


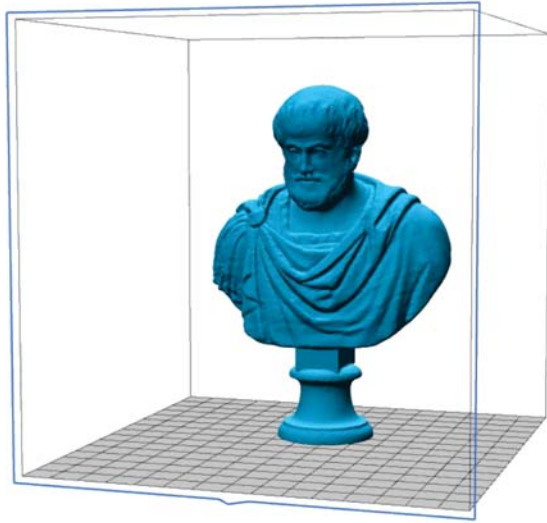
Diagrama 1.3: Proceso típico simplificado de fabricación aditiva.

(a) Un diseño 3D es enviado a una impresora 3D; (b) capa a capa se construye el modelo; (c) producto terminado

Hemos encontrado por tanto una “tercera vía” para fabricar un mismo objeto. ¿Y qué?, se preguntará el lector. Al fin y al cabo, aunque por distintos caminos, los tres procesos acaban generando aparentemente el mismo producto. Para entender las ventajas que supone emplear esta tercera vía es necesario entrar un poco más en detalle en el proceso de fabricación aditiva.

¿Cómo se hace?

Bajo la denominación de Fabricación Aditiva se agrupan ya decenas de nuevas tecnologías de fabricación. Sin embargo, sin entrar en demasiados detalles técnicos, es posible explicar de una forma general en qué consisten todas ellas.



“No se puede desatar un nudo sin saber cómo está hecho”.

Aristóteles.

Proceso genérico de fabricación aditiva

Como veremos más adelante, existen actualmente una multitud de tecnologías de fabricación aditiva, si bien es posible establecer un **proceso genérico común** a todas ellas, que consta de 6 fases:

1. Generación de un modelo 3D en ordenador.
2. Simplificación del modelo al formato válido para la máquina de fabricación.
3. Rebanado / Troceado de la pieza
4. Fabricación capa a capa con la tecnología 3D seleccionada.
5. Extracción del producto fabricado.
6. Acabado y post-producción

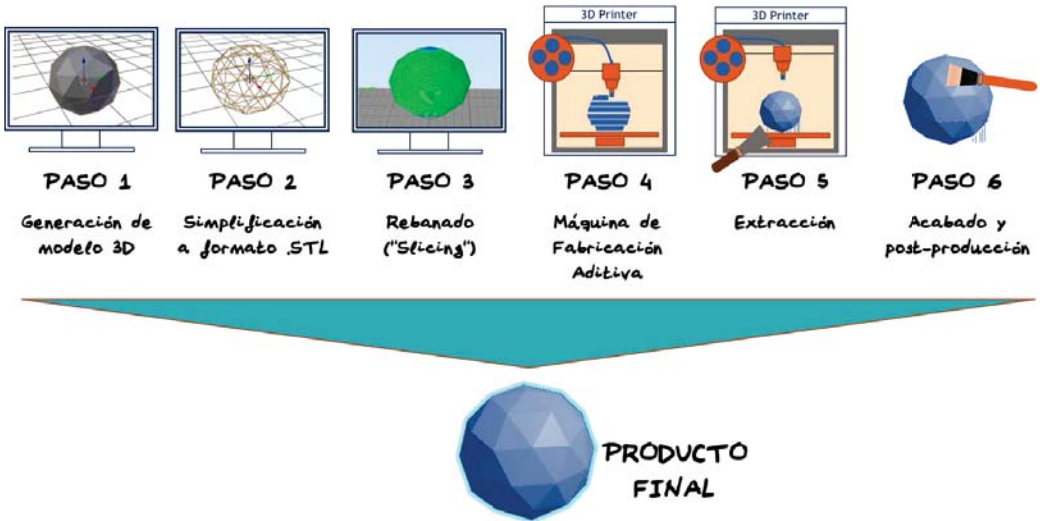
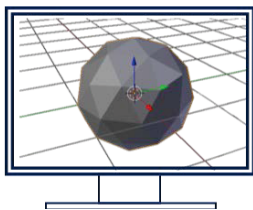


Figura 12: Proceso genérico de fabricación aditiva

Paso 1: Generación de modelo 3D



El primer paso común a un proceso de fabricación aditiva es generar un modelo de ordenador en 3D del producto que queremos obtener.

Existen actualmente múltiples sistemas de diseño de piezas en 3D, si bien de forma general podemos considerar 3 tipos:

- Herramientas de CAD / Modelado de Sólidos.
- Herramientas de Escultura 3D
- Modelado de superficie / malla 3D.

No es el objetivo del presente libro revisar las distintas herramientas de diseño 3D, por lo que nos limitaremos a señalar algunas de las más conocidas de cada tipo:

- CAD: *OpenSCAD*, *Autodesk 123D*, *3D Slash*, *SelfCAD*, *TinkerCAD*, *SketchUp*, *AutoCAD*, *SolidWorks*
- Escultura: *ZBrush*, *Sculptris*, *MudBox*
- Malla / Superficie: *MeshMixer*, *3DS Max*, *Blender*, *Rhino3D*

En la actualidad, sin embargo, una opción alternativa a diseñar el modelo es simplemente obtener un modelo 3D ya hecho, seleccionando de entre los miles disponibles en los sitios de internet dedicados a la compartición de modelos. Existen tanto modelos gratuitos como de pago. Algunos de los sitios más conocidos son:

- 3D Marvels
- 3D Via
- GrabCAD
- Google 3D Warehouse
- Ponoko Product Plans
- Shapeways 3D Parts Database
- Thingiverse
- Turbosquid

A la hora de adquirir un modelo es importante diferenciar entre aquellos ya diseñados específicamente para su fabricación en impresión 3D, frente a los diseñados para otros propósitos. Contrario a la promesa de la fabricación aditiva de posibilitar todo tipo de diseños, algunos modelos pueden dar grandes problemas para su fabricación, dependiendo de las limitaciones de la tecnología escogida. Un diseño específicamente diseñado para una tecnología de impresión 3D concreta garantiza un mejor resultado.

Finalmente, otra opción alternativa a la generación del modelo en el ordenador es el escaneo de un objeto real, en un proceso conocido como **escaneo 3D** (*3D scanning*).

Existen varias opciones disponibles, como son:

1- Multi-fotografía (también conocida como *fotogrametría*). Una técnica que consiste en realizar una serie de fotografías de un objeto, desde todos los ángulos posibles. A continuación, un software se encarga de encontrar los puntos comunes entre las distintas fotografías hasta crear una malla representando el objeto tridimensional. Existen múltiples programas capaces de hacer esta actividad como *Agisoft PhotoScan*, *Trno* o *Autodesk ReCap*, tanto para usar la cámara del móvil (la opción más barata) como cámaras profesionales.

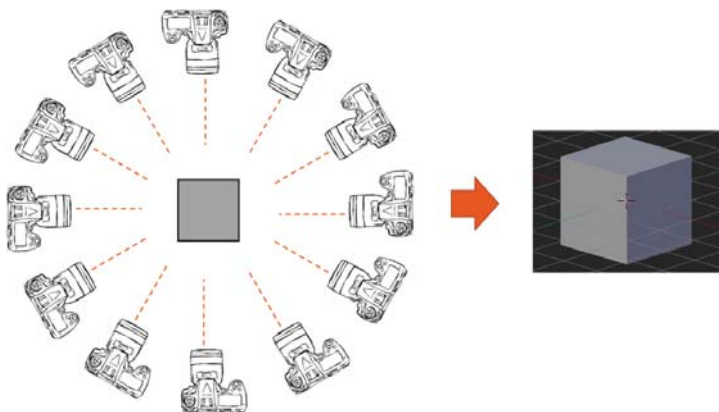


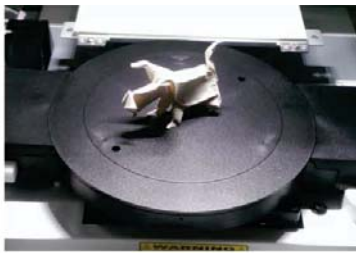
Figura 13: Reconstrucción de un cubo mediante fotogrametría.

2- Scanner láser / óptico. Se trata de un aparato que emite una luz láser, midiendo el ángulo en que se devuelve la luz, al mismo tiempo que rota el objeto (o el escáner alrededor de éste) de manera que determina la forma del objeto original.

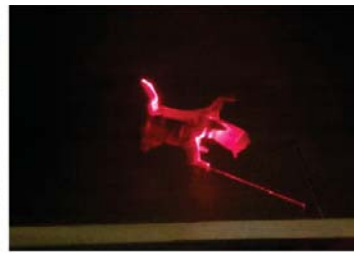
Así, por ejemplo, para escanear la figura de papiroflexia de la fotografía, la pondríamos en nuestro escáner (1), el escáner giraría el objeto midiendo la luz reflejada (2), a partir de la información generaría una nube de puntos (3), que sería finalmente “limpiada” hasta tener nuestro objeto 3D (4).



Figura 14 © Germán Martín



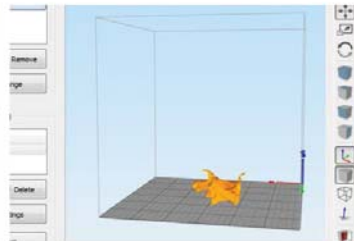
1



2



3



4

Figura 15. Proceso de 3D Scanning. Foto © Germán Martín.

3- Tomografía por ordenador. Se trata de la opción más cara pero la más rápida y precisa, al ser un aparato equivalente a los empleados en medicina.

4- Medición mecánica, mediante una máquina de medición por coordenadas (CMM, del inglés *Coordinate Measuring Machine*). Es un instrumento de medición directa que emplea un puntero físico con el que se va tocando al objeto al mismo tiempo que se envían

coordenadas. Se miden así completamente todas las dimensiones del objeto, siendo un procedimiento muy preciso, pero también muy lento.

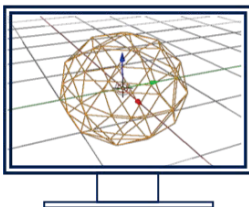
5- Finalmente, si no hay otra alternativa, la única opción posible será **medir manualmente** (con el metro de toda la vida o similar) las dimensiones más relevantes del objeto, para a continuación construir con esas medidas su diseño 3D en la herramienta de diseño favorita.

La comparativa de las opciones de escaneo 3D quedaría resumida en la siguiente tabla:

SISTEMAS DE ESCANEO 3D	COSTE	TIEMPO	PRECISIÓN
MULTI-FOTOGRAFÍA	BAJO	RÁPIDO	BAJA
SCANNER LÁSER	MEDIO	RÁPIDO	MEDIA
TOMOGRAFÍA POR ORDENADOR	ALTO	RÁPIDO	ALTA
MEDICIÓN MECÁNICA (CMM)	ALTO	LENTO	ALTA
MEDICIÓN MANUAL	BAJO	MUY LENTO	MEDIA

Tabla 1: Resumen de opciones de escaneo 3D

Paso 2: Simplificación a formato válido para el Sistema de fabricación aditiva



Tenemos ya un objeto 3D en el ordenador. Pero esto no significa que dicho objeto sea directamente imprimible; por ejemplo, muchos objetos creados para la animación 3D son totalmente huecos, sin volumen ni siquiera en su superficie, y sería imposible imprimirlos así. Es necesario asegurar que el diseño 3D es imprimible (técnicamente, se denomina *reparar* el modelo para evitar problemas).

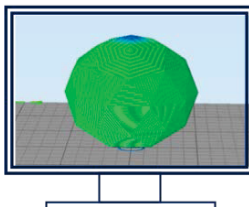
Además, aunque hay múltiples excepciones, la mayoría de los sistemas de impresión 3D no soportan todos los formatos de objetos 3D, sino que se limitan normalmente a los más simples.

De forma genérica, y por motivos históricos, el formato normalmente empleado es .STL. Este formato adquiere su nombre de la primera tecnología de fabricación 3D inventada, la *estereolitografía* (**STereoLithography**), y guarda los modelos 3D como conjuntos de triángulos unidos entre sí.

La mayoría de los sistemas de diseño 3D son capaces de transformar un modelo a formato .STL, si bien generalmente se emplea el software específico del fabricante de la máquina de fabricación aditiva (la impresora 3D) que estemos utilizando.

A pesar de ser el formato más utilizado, es un formato que empieza a quedarse muy anticuado para las tecnologías modernas (por poner un ejemplo, no contiene información sobre distintos colores) por lo que los fabricantes buscan la estandarización de un nuevo formato más avanzado. Por ejemplo, el consorcio 3MF (<https://3mf.io>) está formado por jugadores clave en la industria como *Ultimaker*, *Stratasys*, *GE*, *HP*, *Siemens* o *Autodesk*, con el objetivo de acordar una especificación (el formato *.3mf*) que elimine las limitaciones de los formatos actuales y fomente la interoperabilidad entre fabricantes.

Paso 3: Rebanado (“Slicing”)



Una vez tenemos el modelo 3D en un formato adecuado, la siguiente fase es establecer las capas que, una a una, van a construir el producto final; esto se hace cortando (rebanando) el modelo en trozos superpuestos muy finos uno sobre otro.

Podría parecer que esta fase es algo trivial o estándar; al fin y al cabo, se trata simplemente de cortar por planos horizontales paralelos un objeto conocido. Sin embargo, no es así: esta fase es la que define exactamente en qué forma nuestra máquina va a generar el producto; vamos a traducir un modelo de ordenador a órdenes de la máquina para, trocito a trocito, fabricar un objeto.

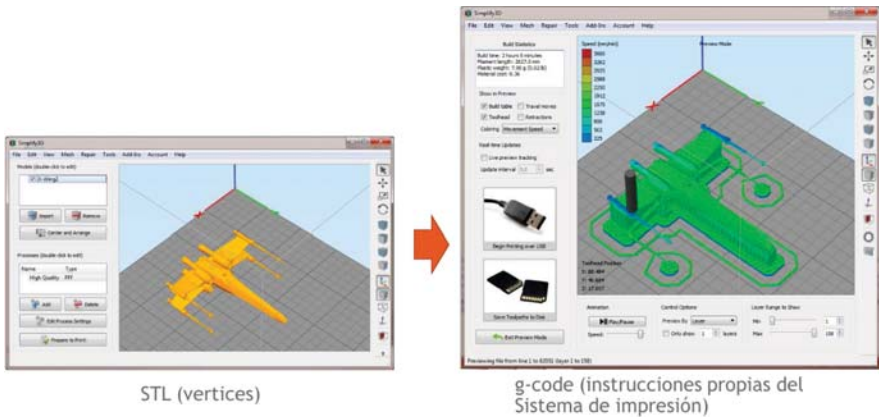


Figura 16: Ejemplo de rebanado con el software Simplify3D

Para completar su tarea de la forma más eficaz el programa de rebanado tendrá que tener en cuenta las características de la impresora y la geometría del modelo 3D si queremos obtener los mejores resultados. Se trata por tanto de la fase más crítica.

Son muchos los factores que habrán de tenerse en cuenta para un correcto “slicing”. Para empezar, la altura de cada capa nos dará mayor o menor resolución (al igual que veíamos con el tamaño de vóxel), a costa de más tiempo de fabricación.

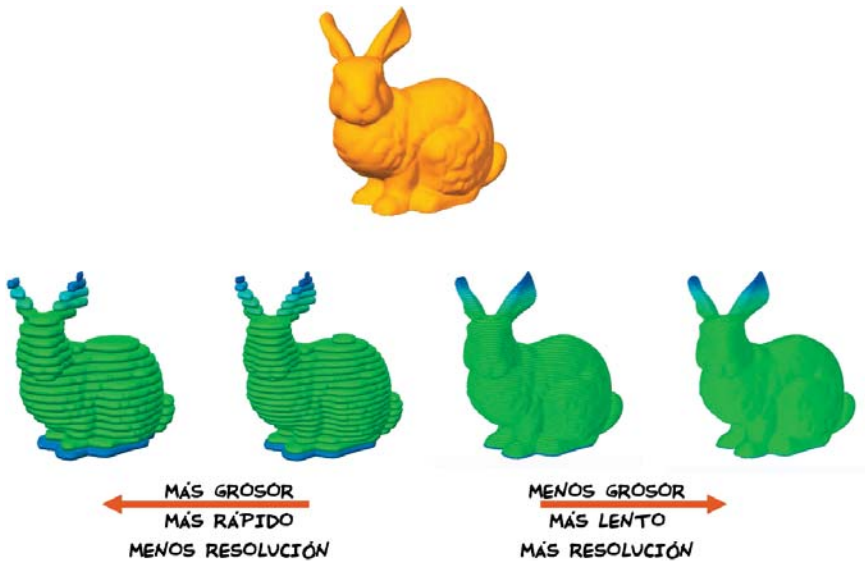


Figura 17: Rebanado con distintos grosores de capa.

Otro factor clave en esta fase será determinar en qué forma vamos a rellenar las partes sólidas del objeto (*infill*). En general, con rellenos del orden 15-20% el resultado es lo suficientemente robusto, si bien dependerá de la geometría escogida, del material de fabricación, y de las propiedades que necesitemos para el objeto en cuestión. Hay obviamente muchas formas de rellenar una capa, si bien las más comunes son en panal (hexagonal) o triangular, por su mayor resistencia con un menor relleno. Lógicamente, a mayor relleno además de la resistencia física, mayor será también el consumo de material y el peso final.

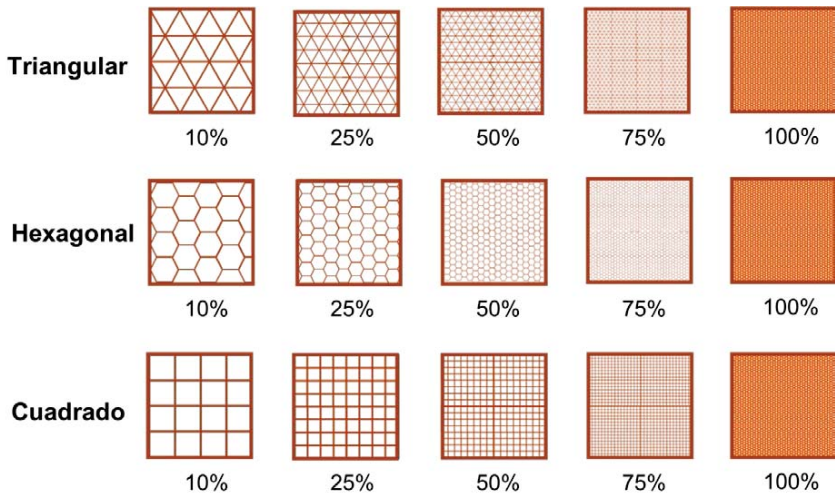


Figura 18: Diferentes tipos de relleno (*infill*).

Por último, mencionar también que será diferencial el camino (*path*) por el que vamos a rellenar cada capa. Con excepción de algunas tecnologías (en las que se imprime una capa entera simultáneamente), dicho camino puede también afectar a la calidad del producto o su aspecto final.



Figura 19: Ejemplo de camino para imprimir una capa

En este paso es también el momento en el que se averiguará si es necesario el uso de **soportes** al imprimir, tema del que hablaremos en un capítulo posterior.

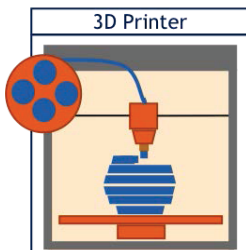
En general, si el objeto ha sido diseñado correctamente, con el objetivo de imprimirse en 3D y

con una tecnología concreta ya en mente, esta fase será mucho más sencilla que si tenemos que investigar ahora la mejor manera de fabricarla. De ahí la importancia de comenzar el diseño de un nuevo producto con el proceso de fabricación aditiva extremo a extremo claro desde un principio.

Existen múltiples herramientas para el rebanado. Para empezar, la práctica totalidad de fabricantes tienen un software propietario específico para su impresora, capaz de leer un objeto 3D en diversos formatos y rebanarlo. Pero siendo como decíamos esta fase la más crítica hay muchas alternativas tanto gratuitas, como de pago, en programas de sobremesa o en la nube.

Algunas de las alternativas más conocidas son *Slic3r*, *Cura*, *Simplify3D*, *CraftWare*, *SliceCrafter* y *3DPrinterOS*.

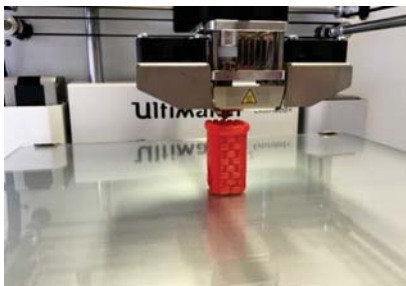
Paso 4: Ejecución en la Máquina de fabricación aditiva



Se trata de la impresión propiamente dicha. En esta fase nuestra máquina de fabricación aditiva, nuestra impresora 3D, ejecutará los comandos para construir el rebanado definido en la fase anterior, capa a capa.

Lógicamente, esta fase es totalmente dependiente de la tecnología de fabricación 3D seleccionada. Más adelante veremos un resumen de las principales tecnologías, si bien en este momento merece la pena mencionar el código *g-code*, por ser este el formato más extendido de instrucciones para una impresora 3D. Cada orden en código *g-code* indica a la impresora la acción detallada que tiene que hacer (ir a la posición XYZ del espacio, depositar un poco de material en esa posición, etc...).

Galería 4: Ejemplos de impresión 3D



24 *Figura 21: Impresión con tecnología de extrusión de materiales. Foto: Pixabay*

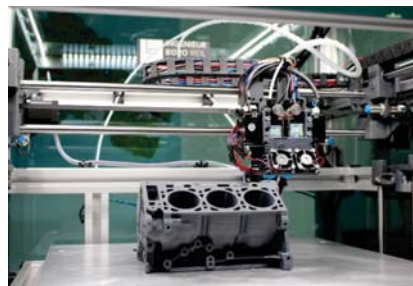


Figura 20: Impresión 3D por inyección de materiales. Foto: Pixabay.

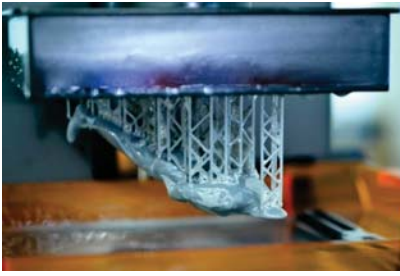
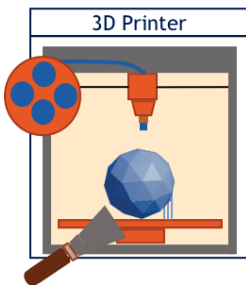


Figura 22: Fabricación por estereolitografía.
© Mari1408 | Dreamstime.com
http://www.dreamstime.com/mari1408_info



Figura 23: Una maquina de impresión 3D en metales por tecnología DMLS
© Moreno Soppelsa | Dreamstime.com
http://www.dreamstime.com/morenosoppelsa_info

Paso 5: Extracción



Una vez finalizada la ejecución de la impresión 3D propiamente dicha, tendremos que extraer el producto terminado de la máquina.

Puede parecer que esta fase es absolutamente trivial, y de hecho lo es en muchos casos: tan sencillo como abrir una puerta y coger el modelo terminado.

Sin embargo -nuevamente, dependiente de la tecnología empleada- en ocasiones será necesario algo más complejo, que puede ir desde simplemente esperar el enfriamiento de un material demasiado caliente para ser extraído inmediatamente hasta fases más complejas de lavado o eliminación de polvo sobrante. Consideraremos esta fase separada de la fase de acabado/post-producción final puesto que en algunas tecnologías no es algo opcional, sino absolutamente necesario y por tanto que puede suponer un tiempo (y un coste) relevante en la fabricación de la pieza independientemente de la calidad final que se necesite.

Paso 6: Acabado y post-producción

En ocasiones, el producto tal y como lo hemos extraído de nuestra máquina de impresión 3D no será suficiente para cumplir con las necesidades finales. Así, dependiendo de la tecnología empleada, en esta fase pueden aparecer trabajos adicionales como:



- Lijado
- Lavado en agua o diferentes disolventes
- Eliminación de soportes
- Secado
- Pintado
- Cromado
- Vaporizado
- Inyección de material adicional / dopaje para dar mayor resistencia
- Etc...

Tareas todas ellas con el objetivo de mejorar en algún aspecto el producto y que pueden alargar el tiempo total de fabricación de forma relevante., y por tanto afectar al coste total de producción.

Una vez que hemos visto el proceso genérico podemos comprobar cómo muchas de las fases suceden únicamente en el mundo digital. Este es un elemento diferencial con respecto a otros procesos de fabricación, aun cuando en la actualidad muchos procesos industriales están controlados por ordenador y ejecutados por robots; el adoptar una fabricación aditiva implicará por tanto una transformación de la empresa dentro de una más global estrategia digital. Para sacarle todo el jugo a la fabricación aditiva no sólo se tratará pues únicamente de la compra de una nueva máquina, sino de adecuar el resto de fases, desde el diseño a la distribución del producto, a esta nueva realidad.

La impresión 3D posibilita el movimiento desde una fabricación tradicional hacia un mundo digital, en el que se habla de *smart manufacturing* o *digital manufacturing*.

Tradicionalmente se sigue un esquema paso a paso en el que cada elemento de la cadena sólo tiene relación con el siguiente y además lleva típicamente unas cuantas semanas (o meses, dependiendo del producto) pasar de uno al siguiente. El departamento de diseño se encarga de diseñar un nuevo producto y, una vez hecho, lo pasa a fabricación que es quien se encarga de ver la forma más óptima de fabricarlo y posteriormente de hacerlo. Posteriormente alguien se encarga de la distribución por el canal, mientras marketing y ventas interactúan con el cliente final, terminando el ciclo dando *feedback* al departamento de diseño para la evolución y rediseño del producto. Este ciclo en cascada es, por naturaleza, lento y se adapta mal a un mercado de demanda muy rápida.

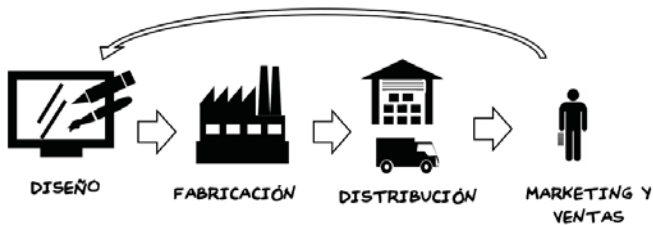


Figura 24: Fabricación tradicional

Por el contrario, en un mundo completamente digital es posible que cada elemento interactúe con los demás aportando sus ideas y problemas. El ciclo es así mucho más rápido, y todos tienen acceso inmediato a la información. El hecho de poder “intercambiar” un objeto digital que sólo existe en el ordenador por uno real sin más que pulsar un botón (el ideal de la fabricación aditiva) permite esta opción.

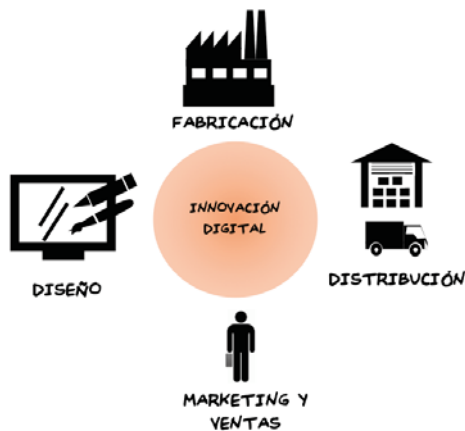


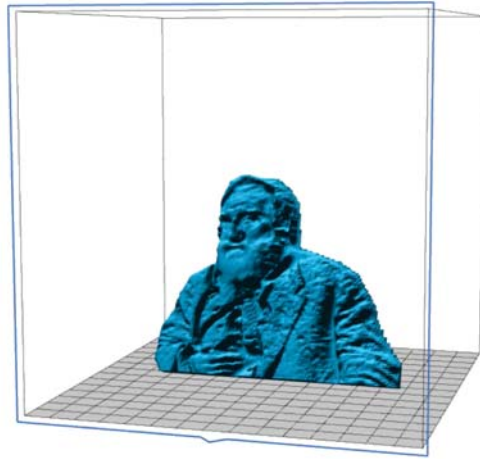
Figura 25: Fabricación digital

Por supuesto, una fabricación digital es mucho más que simplemente trabajar con unas máquinas de impresión 3D, pero está claro que una fabricación aditiva posibilita enormemente movernos hacia un *smart manufacturing*.

Además de posibilitar una transformación digital, estamos ahora en condiciones de analizar en detalle qué ventajas tiene esta nueva forma de hacer las cosas.

Ventajas de la Fabricación Aditiva

La impresión 3D está desplazando a los métodos tradicionales en muchas ocasiones. Veamos porqué.



“Nunca andes por el camino trazado
pues te conducirá a donde otros ya
fueron”

Alexander Graham Bell

Residuos y moldes

Para averiguar las ventajas de la fabricación aditiva, repasemos las tres formas posibles de fabricación que hemos visto, pero de forma conjunta:

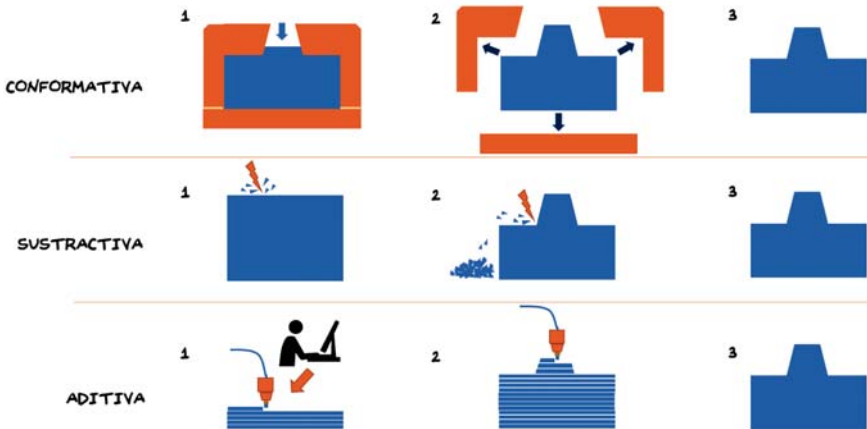


Figura 26: Resumen tipos de fabricación.

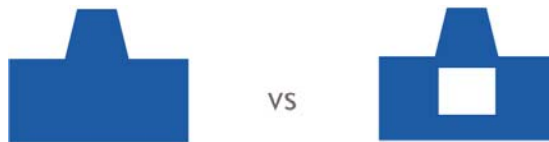
A la vista del diagrama comparado, pueden observarse dos ventajas diferenciales de la fabricación aditiva con respecto a los otros dos tipos:

- I. No hay residuos de material, como ocurre con la fabricación sustractiva. Esto a su vez tiene dos implicaciones:
 - A. Menor coste de material.
 - B. Menor impacto en el medio ambiente.
- II. No necesitamos moldes. Lo que supone por tanto un menor (¿nulo?) tiempo de preparación, y en consecuencia:
 - A. Más rapidez para hacer frente a cambios, especialmente pequeños cambios en el producto final.
 - B. Menor coste de producción de un objeto individual.

Geometrías

Como luego veremos, no es del todo cierto que la fabricación aditiva (con las tecnologías actuales) esté totalmente libre de residuos o que el tiempo de preparación sea cero; pero a la vista del diagrama resulta evidente que en ambos aspectos es un método mejor a los otros dos.

Analicemos ahora otras posibles ventajas de fabricar objetos capa a capa. A modo de prueba, a nuestro producto intentemos añadirle una nueva característica: un hueco en su interior, por ejemplo, para reducir el peso total de la pieza:



E intentemos aplicar nuestras tres conocidas metodologías de fabricación, siguiendo el mismo esquema anterior, para poder comparar los resultados:

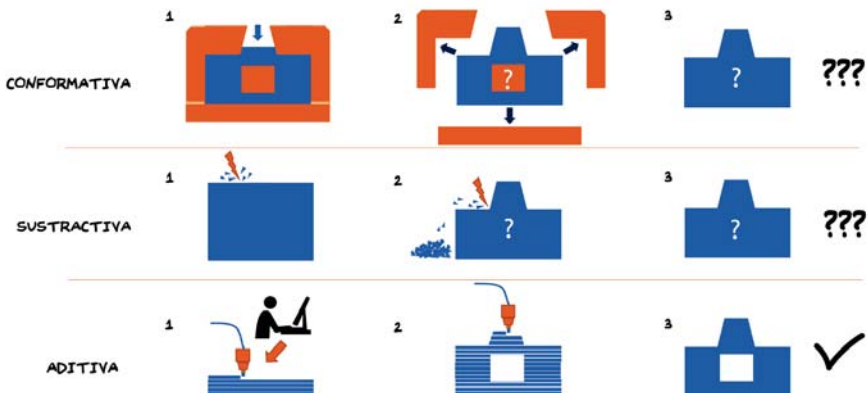


Figura 27: Comparativa de intento de fabricación de un objeto hueco por diferentes tecnologías

En el caso de la fabricación conformativa resulta imposible fabricar un molde que genere un hueco perfecto (¿cómo? ¿suspendido?) en el interior de la pieza. Y aunque así pudiéramos hacerlo, no podríamos quitar el molde del interior de la pieza final.

Con métodos sustractivos no tenemos mejor suerte: una vez obtenido el contorno final de la pieza, no hay forma de eliminar el interior sin agujerear la pieza.

En ambos casos, por tanto, no queda otra opción más que fabricar este producto en dos o más piezas, que será necesario posteriormente unir, con el consiguiente coste y tiempo.

Sin embargo, con la fabricación aditiva, añadiendo capa a capa vemos que sí es perfectamente posible (al menos teóricamente, nótese que algunas tecnologías podrían tener problemas con un hueco cuadrado similar al dibujado) construir el objeto hueco de una sola pieza, con el consiguiente ahorro en tiempo y -muy probablemente- una mejor resistencia mecánica.

Hemos encontrado así una tercera ventaja de la impresión 3D: nos da acceso a nuevas geometrías, a figuras que antes eran totalmente imposibles de fabricar. En ocasiones, se habla también de geometrías imposibles para referirse a estos nuevos objetos fabricados de una sola pieza.

Un ejemplo clásico de geometría imposible es intentar fabricar un objeto tan cotidiano como un silbato:



No existe forma alguna de hacer uno de una única pieza con los procedimientos tradicionales. Sin embargo, podemos hacerlo todo (sí, ¡incluyendo la bolita interior!) con una única impresión en 3D, con el consiguiente ahorro en mano de obra al no tener que ensamblar varias piezas.

Este acceso a nuevas geometrías nos permite encontrarnos con diseños elegantes que solucionan problemas anteriormente muy complejos. Un gran ejemplo puede verse en *The incredible shrinking antenna*, <https://3dprint.com/tag/3d-printed-antennas/>, la historia de cómo una avanzada antena de satélite anteriormente compuesta por más de 100 partes distintas pasó a imprimirse con una sola.

Otro ejemplo: el cinturón de seguridad de un avión es algo muy común y conocido por todos. Sin embargo, puede obtenerse un diseño optimizado con fabricación aditiva que pese menos de la mitad (de 155g a 70g). Puede parecer poca cosa unos simples gramos; pero para un Airbus 380 con una media de 850 asientos eso supone un ahorro de 72,5 Kg de peso durante toda la vida del avión, lo que a la

larga supone un ahorro de ¡millones de litros de combustible!. Puede leer el detalle en *The Saving project*,

<https://www.3trpd.co.uk/portfolio/saving-project-saving-litres-of-aviation-fuel/>.

Y no sólo hablamos de ahorros en la fabricación o de propiedades (peso, resistencia, etc...) antes no alcanzables, sino también en muchas ocasiones de diseños de una gran belleza estructural.

A modo de resumen, tenemos pues ya identificada otra ventaja: el acceso a geometrías optimizadas:

- previamente imposibles
- con menor número de partes
- sin ensamblado y mejor mantenimiento
- con menos pasos de fabricación

Galería 5: Ejemplos de "geometrías imposibles"



Figura 29: Es imposible construir una esfera así con moldes. (Foto: Pixabay)



Figura 28: Otra pieza imposible de hacer con moldes. (Foto: © Germán Martín)



Figura 31: Cadenas impresas con los eslabones ya unidos entre sí. (Foto: Pixabay)



Figura 30: Una llave inglesa fabricada de una sola pieza. (Foto: Pixabay)

Curvas de coste

Pero no hemos terminado ahí. Veamos que ocurre por ejemplo cuando analizamos el comportamiento de la fabricación aditiva frente a las economías de escala.

¿Qué son las economías de escala? Pues sencillamente a lo que nos lleva el hecho de que en algunos métodos de producción los costes fijos de fabricar algo (los costes que tenemos independientemente del número de unidades fabricadas) sean mucho mayores que los costes variables (los asociados directamente a fabricar una unidad más). Llevamos muchos años oyendo hablar de ello; por ejemplo, cuando quisimos hacer unas camisetas para la clase de fin de curso y resultó que prácticamente nos costaba lo mismo encargar 50 que 100. O fabricar una placa electrónica cuesta lo mismo que veinte. Y eso, ¿por qué? porque preparar las máquinas, hacer moldes, etc.. es la mayor parte del coste final. El hacer una unidad más es darle a la máquina en cuestión un par de minutos, con un coste mínimo.



Figura 32: Economías de escala en la producción "tradicional".

Nos encontramos así con una gráfica como la de la figura. Los ahorros de las economías de escala hacen que el coste unitario baje exponencialmente según fabricamos más y más unidades. Esto ocurre así en casi todos los procesos industriales tradicionales, intensivos en maquinaria y preparación.

Sin embargo, en la fabricación aditiva no ocurre así. Prácticamente nos cuesta lo mismo fabricar uno que muchos. Es cuestión de mandar otra vez la orden de trabajo a la impresora 3D. Se considera así que la

impresión 3D no tiene economías de escala, quedando por tanto una gráfica totalmente distinta, como puede verse.

Esta es la gráfica teórica, pero en realidad esto no es totalmente exacto: sí que hay economías de escala en la fabricación aditiva (posibles mejoras en postproducción agrupando elementos, reutilización del procesado 3D, etc...), lo que ocurre es que son mucho menores que para otros

esquemas de fabricación. En la práctica quedaría por tanto algo como una curva con menor inclinación. No obstante, se suele emplear directamente la primera, afirmando que la fabricación aditiva no tiene economías de escala de ningún tipo.

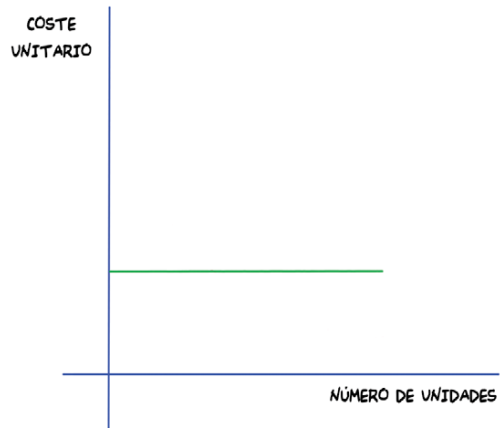


Figura 33: ¿Economías de escala en la fabricación aditiva?

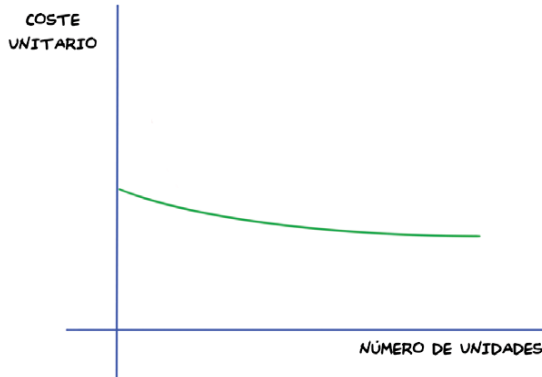


Figura 34: Economías de escala en la fabricación aditiva

¿Y qué más da que tenga o no economías de escala? Parece que incluso debería ser malo no tener economías de escala, ¿no? Se ve mucho más claro cuando comparamos ambas gráficas:

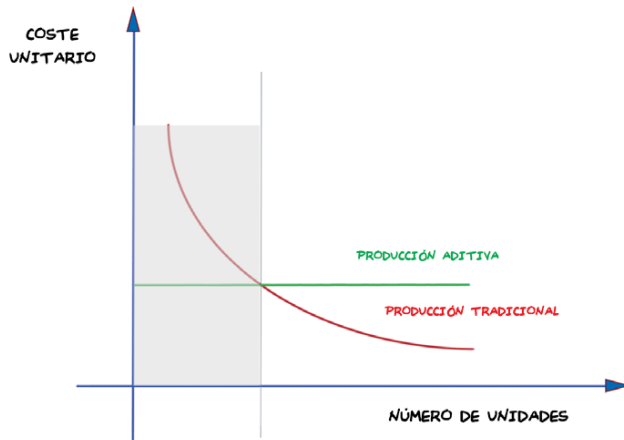


Figura 35: Comparativa de economías de escala.

En la zona gris de la gráfica (a la izquierda del corte entre ambas curvas) está la zona que nos interesa: es aquella en la que el coste unitario de la producción aditiva es menor que para la producción tradicional. Como puede verse, cuando el número de unidades es muy pequeño (una, dos, etc...) la diferencia de costes es muy significativa, hasta el punto de hacerla económicamente posible.

Queda así clara una nueva ventaja de la impresión 3D: es mucho más barato para series de fabricación corta (tamaño de lote reducido, incluso cercano a la unidad). Los analistas hablan así de dos nuevos fenómenos aportados por la fabricación aditiva:

- a) La **democratización de la producción**. Es decir, hacer accesible la fabricación de determinados objetos a empresas o individuos que antes no lo hacían porque no tenían necesidad de fabricar un alto número de productos, y el coste de hacerlo para uno solo resultaba absolutamente prohibitivo. Esta es una de las claves del fenómeno “*maker*” del que hablaremos más adelante.
- b) La **personalización** (“*customización*”) del producto, por cuanto que podemos cambiarlo y adaptarlo a las necesidades individuales de cada cliente. Ya no es imprescindible fabricar miles de unidades exactamente iguales y dar a cada cliente lo mismo para que resulte suficientemente competitivo en precio. ¡Podemos fabricar con el mismo coste uno a uno productos ligeramente diferentes adaptados a cada necesidad individual! En la misma línea, el “time to market” de un nuevo producto se reduce radicalmente.

Analicemos ahora cómo se comporta el coste unitario de fabricación conforme aumentamos la **complejidad** (geometría complicada) del

producto. Hasta ahora, con las tecnologías tradicionales resulta obvio que cuanto más complejo sea el objeto a fabricar, mayor será el coste (mayor número de piezas, tratamientos adicionales para unirlos, múltiples moldes, pasos de fabricación en cadena, etc...), hasta llegar a un punto en que el producto es tan complejo que hacerlo es realmente caro.

Gráficamente, sería algo semejante a esto:

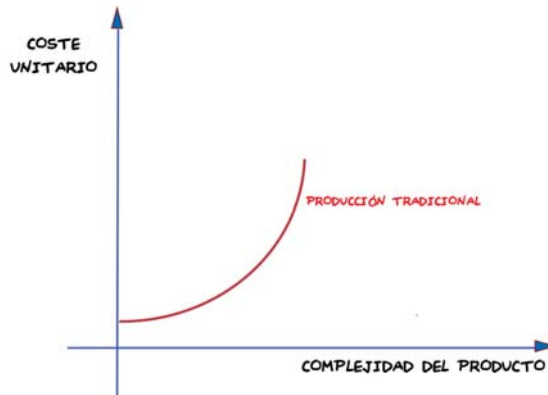


Figura 36: Coste por complejidad de producto en la producción "tradicional".

En cambio, como ya hablamos antes, una de las grandes ventajas de la fabricación aditiva es precisamente su capacidad de hacer fácil las piezas complejas, de forma que el incremento de coste con la complejidad es mínimo:

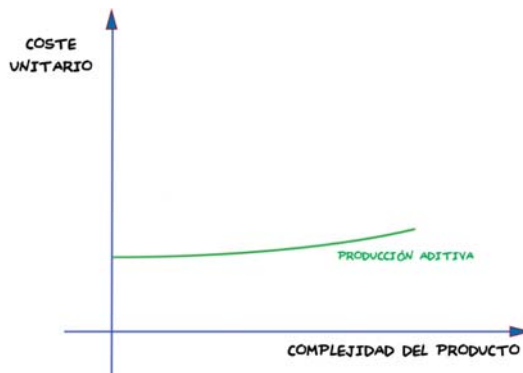


Figura 37: Coste por complejidad de producto en la fabricación aditiva.

Comparando ambas curvas de coste, vemos claro que, cuanto mayor sea la complejidad, más interesará adoptar una estrategia de fabricación aditiva.

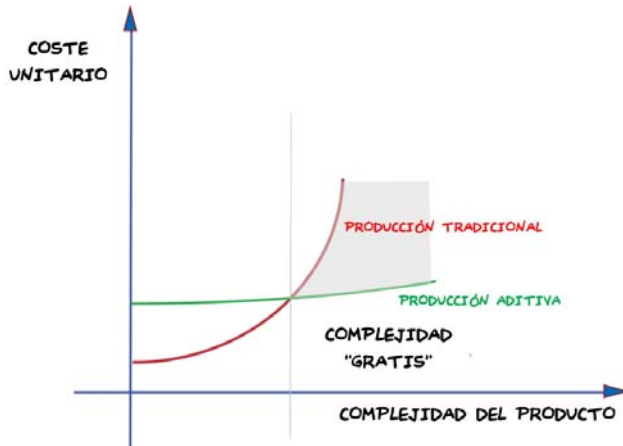


Figura 38: Comparativa de costes por complejidad de producto.

Algunos autores definen así la zona de la derecha de la curva como la de la **“complejidad gratis”**, puesto que el coste de complicar el producto es prácticamente despreciable.

Sigamos con nuestro análisis de los costes unitarios frente a otras variables, analizando ahora qué ocurre cuando es necesario entregar nuestro producto a un lugar lejano o aislado para su uso:

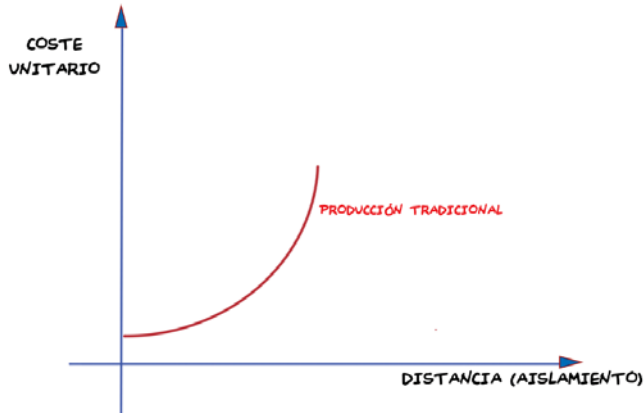


Figura 39: Evolución de los costes con la distancia.

Lógicamente, cuanto más lejos hay que llevarlo mayor será el coste. Y llegará un punto en el que los costes de transporte superarán con mucho el coste de fabricación.

En cambio, con nuestra nueva tecnología de fabricación aditiva ¿para qué necesitamos enviar el producto? Resulta más sencillo enviar nuestro modelo 3D (o las órdenes *g-code* directamente) y fabricar en el mismo lugar (o uno cercano) en el que el producto se va a consumir.

Así, idealmente, los costes de transporte serán cero, y nos dará lo mismo el lugar de consumo. En la práctica, claro, no será totalmente invariable con la distancia (entre otras cosas, habrá a lo mejor que enviar el

material fungible, el sistema de impresión o retos similares); pero lo que está claro es que **los costes de transporte serán en comparación irrelevantes en la fabricación aditiva:**

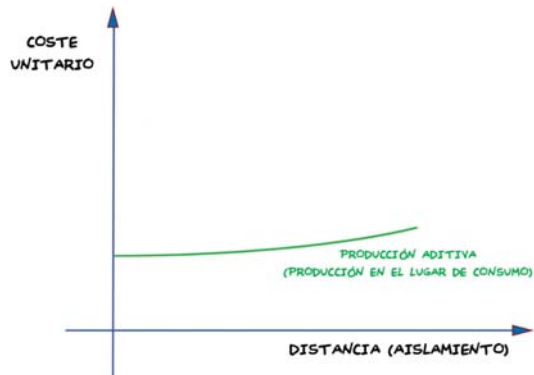


Figura 40: Evolución de los costes con la distancia en la fabricación aditiva



Si llevamos este concepto al extremo, aparece aquí una nueva figura: la del consumidor que se auto-abastece, produciendo lo que necesite consumir. A este nuevo jugador se le denomina **prosumidor**, y -de hecho- la gran duda es si al final todos nos convertiremos en prosumidores con futuras tecnologías de impresión 3D. Pero sin llegar a aceptar a corto plazo que tal cosa ocurra, lo que resulta innegable, y dedicaremos un capítulo a ello, es que la cadena de suministro (el viaje desde el fabricante hasta el consumidor) se va a ver totalmente alterado.

Finalmente, el adoptar una estrategia de fabricación aditiva nos trae otra ventaja que no es tan evidente: al “democratizar” la producción

tendremos miles de potenciales diseñadores y fabricantes para un producto (esto obviamente puede ser también un problema, por la proliferación de competidores, pero ahora estamos hablando de ventajas). Pues bien, el hecho de que exista este número nos habilita el acceso a lo que se ha dado en llamar “**inteligencia colectiva**”: no porque las masas vayan a solucionar nuestro problema... sino porque entre los miles de individuos es posible que alguien dé con el diseño perfecto. Y ¿cómo hacemos que miles de personas trabajen para nosotros? en los últimos tiempos se ha generalizado la opción de lanzar un “reto” (**challenge**) a la comunidad en Internet, ofreciendo a cambio un premio en metálico. La ventaja de hacerlo así es que casi seguro nos costará mucho menos que diseñarlo internamente; y conseguiremos un buen resultado. Eso sí, costará luego mantenerlo en secreto, pero de eso hablamos en el próximo capítulo...

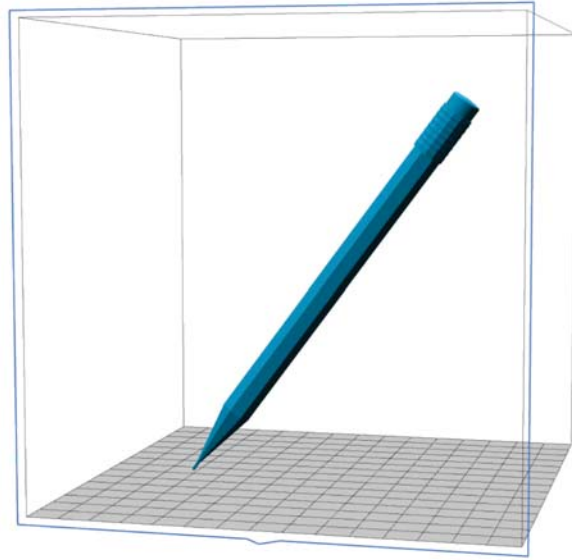
Resumen de las ventajas de la fabricación aditiva

- I. Menor residuo = Menor coste e impacto en el medio ambiente
- II. No necesitamos moldes = Menor tiempo de preparación:
 - a. Rapidez.
 - b. Menor coste de producción.
- III. Geometrías optimizadas:
 - a. Previamente imposibles.
 - b. Con menor número de partes / sin ensamblado y mejor mantenimiento
 - c. Con menos pasos de fabricación.
- IV. Permite producción de bajo volumen.
- V. Rapidez de respuesta a variaciones.
- VI. Democratización de la producción / Personalización.
- VII. Complejidad “gratis”.
- VIII. Cadenas de suministro más cortas -> “*Prosumidores*”
- IX. Posibilidad de acceso a la “inteligencia colectiva” (“*Challenges*”).

Problemas de la Fabricación Aditiva

Hasta ahora no hemos hablado más que maravillas de la fabricación aditiva; ¿reemplazará entonces completamente -como dicen algunos- a las demás tecnologías de fabricación?

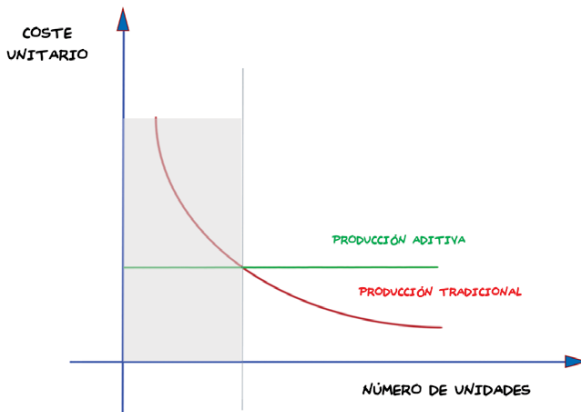
Puede que a largo plazo así ocurra, pero por el momento las cosas no son tan ideales como aparentan...



“Nada es perfecto: por eso
los lápices tienen borrador”
Anónimo

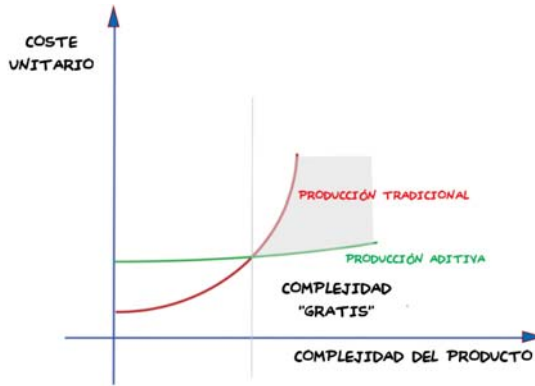
De vuelta con las curvas de coste

En el capítulo anterior nos fijábamos en cómo las tecnologías de fabricación aditiva resultaban más económicas para tamaño de lote corto y mucha complejidad. Ahora bien, estas curvas pueden también verse justo al contrario: imaginemos que únicamente se conocieran las tecnologías de fabricación aditiva y acabásemos de descubrir la fabricación por inyección en moldes; pondríamos la gráfica de economía de escala anterior:



e inmediatamente nos fijaríamos en la parte derecha de la curva y diríamos: acabamos de descubrir una tecnología que es **mucho mejor para grandes tamaños de lote**. Y así es: hoy por hoy no tiene mucho sentido hacer por ejemplo botellas de plástico con fabricación aditiva; es infinitamente más competitivo hacerlo por inyección, aunque haya que añadir el coste de transporte.

De igual modo ocurre con la gráfica de la complejidad del capítulo anterior:



Puede verse que **para objetos sencillos es más barato hacerlo por otros mecanismos** que por la fabricación aditiva.

En conclusión, es razonable esperar que a corto y medio plazo, objetos simples y de uso común (con largas tiradas) sigan siendo producidos con los procedimientos que ya conocemos. ¿Será así para siempre? Según se siguen optimizando las tecnologías de impresión 3D la curva de producción aditiva se desplazará hacia abajo, limitando cada vez más en qué situaciones la inyección en moldes es más competitiva. No es completamente seguro pero tampoco parece razonable que baje hasta tal punto que elimine completamente otras opciones.

Problemas en el rebanado

Ya hemos visto como posiblemente la fase más crítica de la fabricación aditiva es la de rebanado, cuando definimos cómo cada capa de material va a ir siendo superpuesta sobre la anterior hasta completar el objeto final.

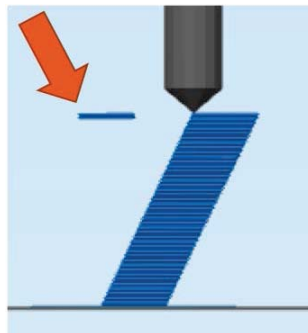
Esta fase no está exenta de problemas. Veamos un ejemplo: si queremos imprimir en 3D una letra V, no hay problema, simplemente vamos poniendo las capas hasta el final:



Pensamos que esto va a ser así siempre. Sin embargo, veamos qué ocurre si intentamos imprimir un 7 como el de la figura:



Iremos poniendo capas, pero en un determinado punto, ¡tenemos un problema! ¡No podemos poner una capa sobre el aire!:



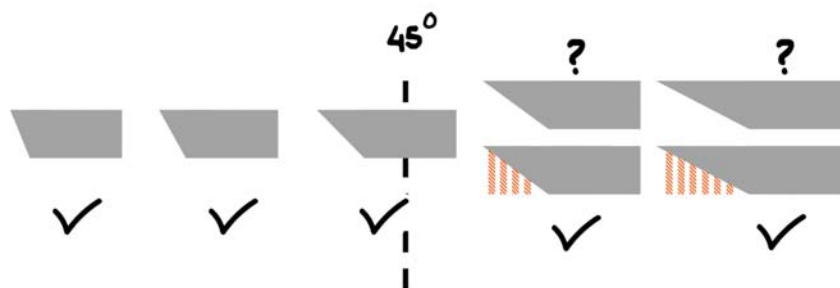
¿Qué hacemos entonces? Tenemos que imprimir algo definiendo una estructura hasta llegar a ese punto. Ese algo son lo que se conocen como **soportes**: un “extra” de material que se imprime con el único propósito de poder servir de apoyo a las capas que vengan por encima. Pero, lógicamente, lo que se imprime no será entonces la figura que queremos sino la figura con soportes. Será necesario un procesamiento posterior (manual, por disolución, limado o como sea, dependiendo de la tecnología empleada) para la eliminación de estos soportes en la fase de post-procesado.

El problema de la necesidad de soportes no sólo aparece en casos como el anterior en que tendríamos que imprimir sobre la nada, sino que también aparecerá cuando el ángulo en el que cada capa se apoya sobre la siguiente sea demasiado agresivo y esté en una situación de voladizo (*overhang*).



Figura 41: Las letras Y, H, T nos muestran la situación de overhang.

Hay muchas variables que definirán en qué momento ese voladizo imprimirá una correcta impresión del objeto (tecnología empleada, temperatura, material, velocidad de impresión, altura de la capa, etc.) pero en general se considera que para ángulos superiores a los 45° será necesario imprimir soportes.



Así, la necesidad de soportes puede aumentar significativamente el coste de fabricación de un producto por impresión 3D. Y, por supuesto, la dificultad de su diseño: un diseño optimizado será aquel que permita la impresión de un objeto con la cantidad mínima de soporte que permita su eliminación de la mejor manera posible.

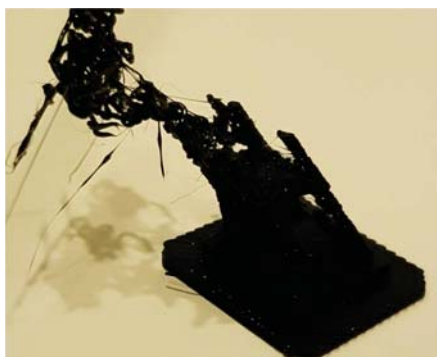


Figura 42: Intentar imprimir sin soportes cuando el ángulo es mayor de 45° suele tener malos resultados. (Foto: © Germán Martín)

Por supuesto, también puede ser una solución reorientar el diseño de forma que a la hora de imprimir no sean necesarios soportes. Así, en nuestro ejemplo anterior del número siete bastaría girar 90° alrededor del eje x para poder imprimir la figura sin problemas. Claro que esto

no es tan sencillo para modelos más complicados. De ahí la importancia de que los diseños del objeto en 3D se hagan con la vista puesta en su facilidad de fabricación posterior.

No todas las tecnologías de fabricación aditiva necesitan soportes, aunque sí la mayoría de ellas. En algunas tecnologías la eliminación de esos soportes puede hacerse de forma que no quede ni rastro de los mismos; en otras, la eliminación de soportes afea de forma significativa la terminación del producto.

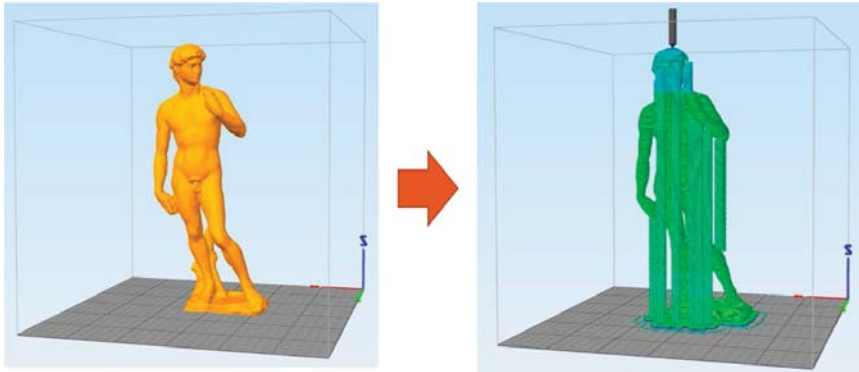
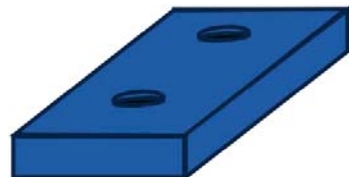


Figura 43: Imprimir el David de Miguel Angel implica una compleja estructura de soportes.

Anisotropía

Un fenómeno inherente a la fabricación 3D se deriva del hecho de que el objeto fabricado no tiene exactamente las mismas propiedades en todas sus dimensiones en función de cómo haya sido fabricado. Veamos un ejemplo.

Supongamos que queremos fabricar una pieza como la de la figura, un simple rectángulo con dos agujeros, que queremos posteriormente usar para unir otras piezas.



Pues bien, resulta que el ángulo en el que imprimamos la pieza afecta a la resistencia final de la misma. ¿Y eso por qué? pues porque en general las capas que se han ido superponiendo una a la otra no lo hacen con la misma fortaleza físico-química que lo hacen elementos consecutivos (vóxels a un mismo nivel). Así, podemos ver en la imagen como nuestra pieza resulta tener un máximo de resistencia cuando las

capas están impresas en un ángulo de 45° con respecto a la fuerza que van a tener que soportar.

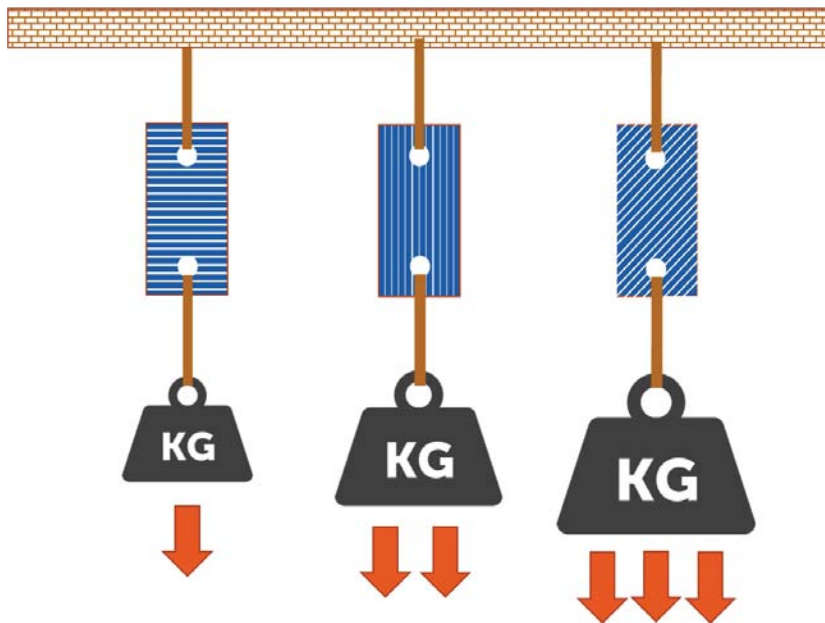


Figura 44: Ejemplo de anisotropía

Este fenómeno de no poseer las mismas propiedades dependiendo de la dirección se denomina **anisotropía**, y es más relevante de lo que parece. Para empezar, el diseño tendrá que tener esto en cuenta, y, aún más importante, certificar que una pieza cumple determinadas especificaciones se vuelve mucho más complicado.

Debido a ello, en muchas tecnologías de impresión 3D, los objetos por defecto se fabrican girados en un ángulo de 45° y con soportes.

De hecho, investigadores han demostrado recientemente que pequeñas variaciones en el ángulo en el que se añaden las capas, del orden de 3-5°, pueden tener grandes implicaciones de variabilidad en las propiedades finales de la pieza fabricada. Esto hace a muchas tecnologías de fabricación aditiva muy vulnerables a sabotajes o a imperfecciones difíciles de detectar en el momento de la fabricación.

Repetibilidad

Fenómenos como el de la anisotropía, y el hecho de que en muchas tecnologías la cantidad de parámetros que se pueden variar a la hora

de fabricar un objeto sean muy amplias, hacen que sea muy complicado asegurar que cada objeto producido sea exactamente igual al anterior. Así, es muy difícil confirmar una consistencia absoluta entre productos iguales del mismo fabricante, con el consiguiente problema de comercialización.

Propiedades de algunos materiales

Mes a mes se añaden nuevos materiales a las diversas tecnologías de fabricación 3D. Pero es importante señalar aquí que algunas de las tecnologías más populares (como la extrusión de materiales) emplean plásticos o polímeros que tienen una resistencia limitada al calor o la luz. Otro problema suele ser la duración del color en algunas tecnologías multi-color.

Tamaño

Aunque cada día se construyen impresoras más y más grandes, el tamaño de la cámara de impresión limita el tamaño máximo de objetos que se pueden producir con fabricación aditiva. Para impresoras de sobremesa, tamaños máximos de 20x20x20 cm suelen ser habituales, mientras que para las industriales es más común 1mx1mx1m como máximo. Existen impresoras mucho más grandes, capaces de fabricar hasta un coche de una pieza, pero no son lo habitual.

Estándares

Los estándares nos rodean por todas partes. Y, aunque para el consumidor final parezcan algo superfluo o directamente innecesario, para la industria no es así. El asegurar que una pieza cumple un estándar determinado permite a la industria emplearla en determinados nuevos diseños, produciendo otros productos a su vez empleados en la fabricación de otros, todo ello asegurando que la pieza inicial va a cumplir con nuestras necesidades.

En un entorno abierto y cambiante de múltiples tecnologías, evolucionando de forma acelerada, y en las que además la

repetibilidad es complicada y con productos que sufren de anisotropía resulta muy complicado que estos estándares existan.

Por supuesto, la industria trabaja fuertemente en conseguir cuanto antes dichos estándares (ver por ejemplo la estructura de estándares aprobada en las normas ASTM F42 e ISO TC261), pero aún no tenemos un marco estable.

Escasez de conocimiento

En todo campo que crece muy rápidamente uno de los problemas es siempre la falta de expertos en la empresa que nos permitan adaptar nuevos cambios con rapidez. Además, con las decenas de opciones tecnológicas disponibles actualmente es muy complicado poner en marcha un programa de formación que asegure tener una fuerza laboral operativa en un corto plazo.

Más aún, como ya se ha comentado, la fabricación aditiva no sólo supone añadir “una máquina más” sino que muchas empresas se ven obligadas a adoptar un mayor proyecto de transformación digital que aumenta aún más la dificultad de reciclar trabajadores en esta nueva tecnología.

Nuevos competidores

Como decíamos en el capítulo anterior, al “democratizar” la producción tendremos miles de potenciales diseñadores y fabricantes para un producto. Como consumidores, es perfecto. Pero como actuales fabricantes resulta evidente que tendremos que hacer frente a un entorno mucho más competitivo.

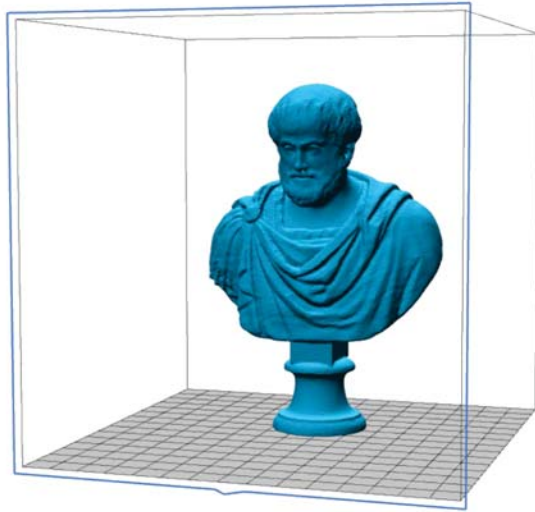
Además de este acceso a nuevos jugadores a la industria, con una fabricación aditiva queda claro que el mundo digital tiene un mayor peso; las barreras de entrada tecnológicas disminuyen en gran medida y la posibilidad de copiar/adaptar diseños de competidores se hace muy barata y fácil, en lo que constituyen claras amenazas a la propiedad intelectual.

Resumen de los problemas de la fabricación aditiva

- I. Mayor coste para un gran tamaño de lote.
- II. Más costoso para productos simples.
- III. Mejor transportar que producir si la distancia es corta
- IV. Posible necesidad de soportes -> Mayor coste, tiempo y menor calidad.
- V. Anisotropía / impredecibilidad de Tolerancias.
- VI. Repetibilidad y consistencia entre productos iguales
- VII. Resistencia limitada al calor, rozamiento y duración del color.
- VIII. Falta de estándares
- IX. Tiempo de impresión
- X. Necesidad de un diseño ad-hoc.
- XI. Falta de conocimiento y experiencia entre los trabajadores.
- XII. Nuevos competidores en un entorno digital

Historia

La Fabricación Aditiva resulta ser bastante más antigua de lo que podríamos pensar.



“La Historia cuenta lo que sucedió;
la poesía lo que debía suceder”

Aristóteles.

Para mucha gente la fabricación aditiva es algo muy moderno, y empezó a saber de ello a raíz de la popularización de la primera impresora de sobremesa que ya no era un kit de automontaje, la *MakerBot Replicator 2* en 2012, en venta por tan solo 2.199 dólares. La portada de la revista *Wired* en Septiembre con Bre Pettis sosteniéndola y el título "*This machine will change the world*" se hizo muy popular. Para los algo más frikis, fue la aparición dentro del proyecto *RepRap* en 2008 de la primera impresora auto-replicante, que podía imprimir la mayoría de sus componentes y que desató la fiebre de los kits DIY (*Do It Yourself*) lo que les dio a conocer la existencia de la impresión 3D unos años antes.

Sin embargo, la historia es bastante más antigua. Generalmente se fecha su origen en 1984, cuando el ingeniero norteamericano Charles Hull inventa la **estereolitografía** (SLA), primera tecnología de fabricación aditiva basada en polímeros sensibles a la luz ultravioleta que sería posteriormente patentada en 1986, creando además la empresa *3D Systems*.

No obstante, en 1981 Hideo Kodama, del Nagoya Municipal Industrial Research Institute publicó un primer sistema de prototipado rápido mediante polímeros.

En esta línea de tiempo se reflejan algunos de los acontecimientos más destacados desde entonces.

U.S. Patent Mar. 11, 1986 Sheet 2 of 4 4,575,330

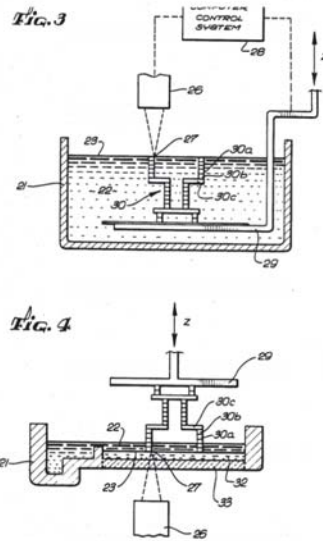
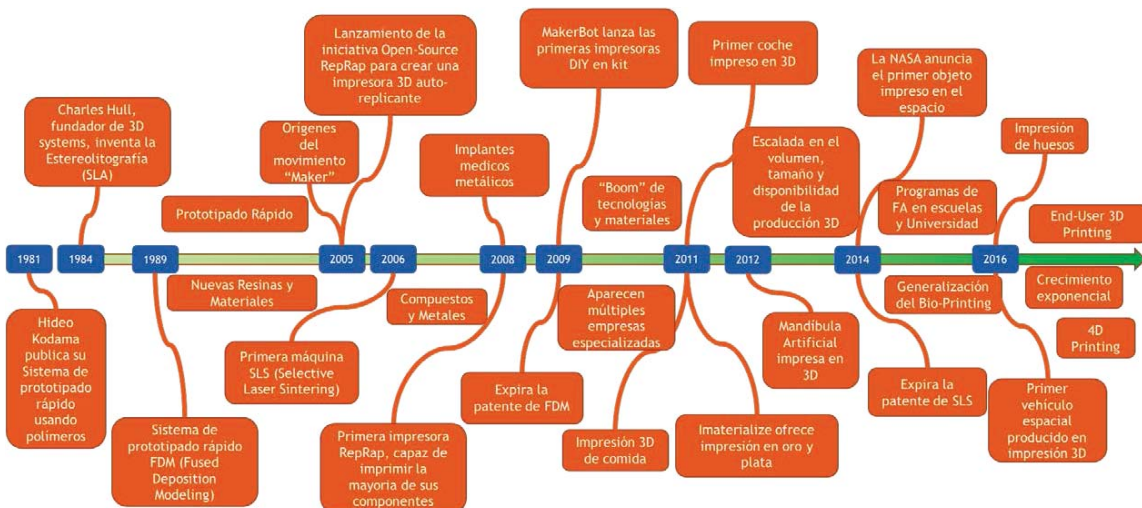


Figura 45: Primera patente de la estereolitografía en 1986.

Fuente: <https://patents.google.com/patent/US4575330A/en>

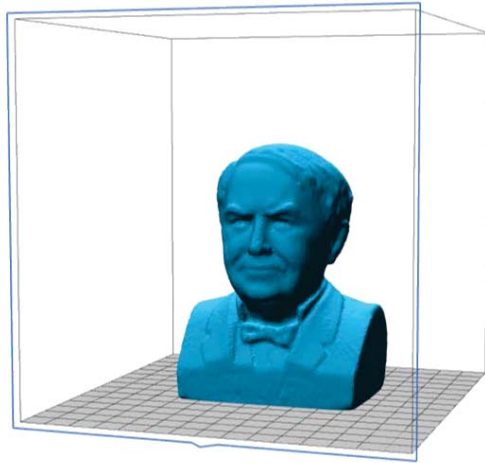


Cuatro son los principales motivos de la gran expansión de la fabricación aditiva en los últimos años:

- El vencimiento de algunas de las patentes de las principales tecnologías, que limitaba su uso a los propietarios de dichas patentes, y que ha permitido la proliferación de empresas especializadas.
- El desarrollo de múltiples materiales: resinas, compuestos cerámicos, metálicos, etc, que han permitido conseguir un producto final más adecuado a cada situación.
- La popularidad del movimiento "Maker", que ha dado a conocer la impresión 3D en el mercado amateur, con las tecnologías más baratas de extrusión de materiales.
- Por último, el propio marketing de las empresas líderes del sector, tanto fabricantes de máquinas de impresión 3D como de intermediarios en la producción, que ha desarrollado el uso industrial y el personal.

Aplicaciones y ejemplos sectoriales

Aunque es imposible echar un vistazo a todos los sectores en los que la impresión 3D está ya pegando con fuerza, repasaremos algunas de las aplicaciones más importantes.



“El valor de una idea radica
en el uso de la misma”
Thomas Edison

Cuando aplicar una fabricación aditiva

Estrategias

En el capítulo dedicado a las ventajas de la fabricación aditiva, veámos las distintas curvas de costes unitarios. Pues bien, si las analizamos en conjunto, podemos encontrar cuatro estrategias o motivos por los que empezar a aplicar la fabricación aditiva, basadas en las 3 gráficas:

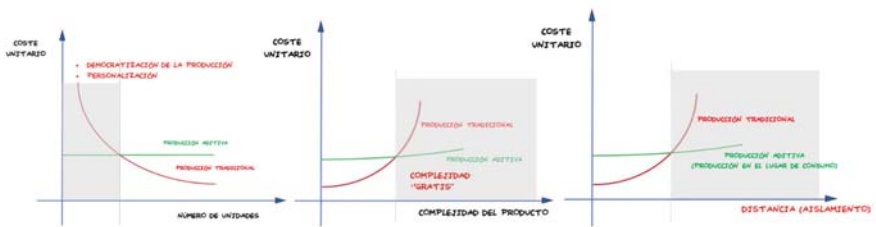


Figura 46: Recordatorio: las curvas de coste unitario en la fabricación aditiva

- I. Menor coste para un menor tamaño de lote, a su vez motivado por una de estas dos alternativas:
 - A. Posibilidad de tiradas cortas o incluso de una única unidad
 - B. Personalización del producto
- II. Mejor producto
- III. Mejora en la cadena de suministro

Veamos ahora cómo los distintos sectores están aplicando una (o varias a la vez) de estas estrategias empleando la impresión 3D como herramienta competitiva.

Prototipado rápido

La primera aplicación de la *estereolitografía*, la primera tecnología de impresión 3D, fue precisamente hacer uso de la posibilidad de producir un único objeto a bajo coste. Los materiales con los que se hacía (las resinas fotosensibles) no eran normalmente el material deseado para

el objeto final, pero fabricar un objeto a partir de un diseño preliminar en sólo unas horas (en lugar de semanas, como hasta ese momento) supuso un cambio radical.

Los ingenieros y diseñadores saben bien la diferencia entre tener un diseño en una pantalla a tenerlo entre las manos. Un prototipo preliminar con existencia física permite validar muchas propiedades y, especialmente, asegurar que el cliente verifica la calidad del producto esperado antes de la fabricación final.

Tan extendido estuvo el uso de la impresión 3D para el prototipado rápido en la industria que ambos términos son aún empleados como sinónimos en muchos casos, si bien poco a poco empiezan a separarse.

Actualmente, el prototipado rápido se emplea no sólo con estereolitografía, sino con todas las tecnologías de fabricación aditiva, aunque -como es lógico- son más usadas las tecnologías más baratas como la de extrusión de materiales. Y se emplea no sólo en sectores de diseño de caras piezas industriales como en sus inicios, sino que está extendido a un amplio abanico de sectores.

En definitiva, la experiencia de prototipado rápido permite mejorar el producto y acortar los plazos por:

- a) La validación anticipada del diseño.
- b) La reducción de errores en las fases previas a la fabricación.
- c) La mejor comunicación de ideas dentro del equipo y con el cliente final.
- d) La posibilidad de hacer múltiples iteraciones de fabricación, cuando antes se hacían apenas un par de ellas.

Copia

Cuando tenía 7 años leí por primera vez *Tintín y el lago de los tiburones*. En este cómic el profesor Tornasol muestra su último gran logro: una máquina capaz de reproducir cualquier objeto en tres dimensiones sin más que ponerlo en la máquina y pulsar un botón. Tan maravilloso invento despierta la codicia del enemigo de Tintín, Rastapopoulos, que ve en ella la posibilidad de hacer perfectas falsificaciones de obras de arte y forrarse con ello. Recuerdo perfectamente cómo me gustaba la idea de ser capaz de construir una

máquina tan maravillosa, y durante mucho tiempo fantaseé con acabar siendo un famoso científico-inventor. Supongo que este hecho, entre otros muchos, influyó en mí para acabar estudiando ingeniería.

Lo que realmente no esperaba es que de alguna forma mis sueños infantiles llegara a verlos hechos realidad: ¡la impresión 3D ha hecho posible la copia hiper-realista de cualquier objeto! Como ya vimos, basta con un buen escáner de tres dimensiones para estudiar un objeto cualquiera, generar su modelo 3D y -tras el tratamiento adecuado- copiarlo en el mismo u otro material.

Así dicho, parece que la palabra “copia” no nos va a traer sino problemas, en un mundo como el actual en el que estamos permanentemente en lucha con las falsificaciones de objetos de marca y la descarga ilegal de música, libros, películas, programas y todo tipo de información digital.

Sin embargo, si lo pensamos bien, fue precisamente la facultad de copiar lo que posibilitó la aparición de la imprenta y la posibilidad de popularizar la lectura. Supongo que en la época no le haría ninguna gracia al propietario de una amplia biblioteca de manuscritos que, de repente, casi cualquiera pudiera leer sus historias igual de bien que él.

Pues bien, tomar un objeto singular y reproducirlo hace accesible al gran público el estudio cercano de cosas que antes estaban únicamente accesibles a unos pocos privilegiados.

En Febrero de 2011, *The Economist* llevaba en su portada la foto de un violín impreso en una impresora DMLS, con el título “*Print me a Stradivarius*” (Imprímeme un Stradivarius) como ejemplo de cómo la impresión 3D iba a cambiar el mundo. Lo más sorprendente para muchos es que el violín, fabricado en metal a diferencia del original, sonaba perfectamente.

Son muchas las aplicaciones de poder hacer una copia fiable, especialmente en el mundo del estudio. Por ejemplo, los restos fósiles -especialmente los de animales grandes como los dinosaurios- son escasos y delicados. El poder trabajar en una copia, permite a paleontólogos, investigadores y aficionados analizar y estudiar los distintos huesos y los posibles movimientos de las articulaciones sin temor a causar un daño irreparable.

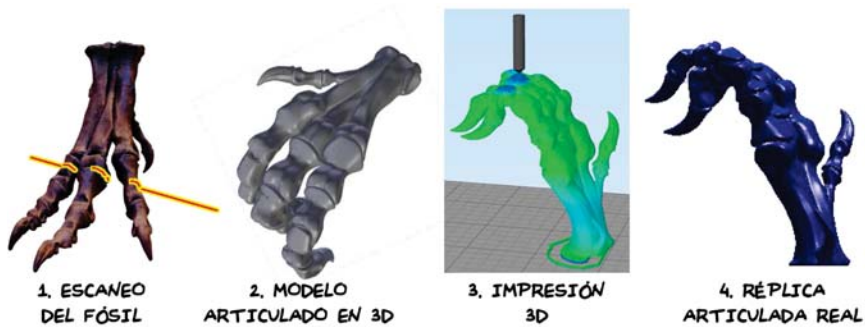


Figura 47: Generación de una copia exacta de un fósil.

Podemos encontrar en Internet múltiples ejemplos similares. Así, en *africanfossils.org* encontramos un sitio que se define a sí mismo como un “laboratorio virtual con una espectacular colección de fósiles y artefactos encontrados en África”. En el mismo se invita a interactuar con los distintos objetos 3D de forma online o descargarlos e imprimirlos en 3D para estudiarlos con todo detalle. Una forma fantástica de acceder a detalles hasta ahora impensable.

En un caso parecido, en 2012 investigadores de la Universidad de Leicester en el Reino Unido decidieron escanear los restos del rey Ricardo III, descubiertos ese año por casualidad, y modelizarlos en 3D. Así, pudieron analizar en detalle posibles escenarios de su muerte (narrada entre otros por Shakespeare) sin miedo a dañar unos restos relativamente frágiles.

En una iniciativa muy similar, en Noviembre de 2014 el British Museum anunciaba que había realizado y liberaba modelos en 3D de objetos de sus principales colecciones para dar la opción de crear cada uno sus propias copias en casa (dentro de su iniciativa, “*A museum of the world, for the world*”). Por supuesto, no es posible con la tecnología actual hacer las copias en piedra, marfil o hueso (por decir algunos de los materiales más comunes de los objetos en museos), pero eso no quita que sea una opción muy atractiva especialmente para estudiantes y amantes de la Historia. Al fin y al cabo, ¿a quién no le gustaría tener la piedra Rosetta en casa?



Figura 48: Una copia hecha en PLA por el autor de la figura del rey del conocido ajedrez de Lewis, del siglo XII, que se conserva en el Museo Británico. Éste y otros muchos modelos del museo están accesibles en <https://sketchfab.com/britishmuseum/models>

Otro ejemplo de la utilidad de una copia perfecta es, por supuesto, su aplicación a la medicina. Hablaré posteriormente en detalle de la aplicación de la fabricación aditiva al sector sanitario, pero es importante mencionar aquí que la copia permite la impresión 3D de órganos (y no sólo de huesos, sino de todo el organismo, incluyendo tumores) para la planificación quirúrgica y la enseñanza a estudiantes: podemos ahora probar diferentes opciones previamente a la operación en sí, lo que es muy relevante en operaciones complejas.

Por supuesto, la posibilidad de copiar tiene un lado negativo: en el futuro será casi imposible mantener diseños en exclusiva, por muy complejos que sean. Incluso sin considerar la facilidad de copiar un modelo 3D en formato digital, siempre es posible generar una copia a partir de un objeto original. Eso incluirá, por supuesto, la copia de objetos a los que antes se tenía difícil acceso, tales como armamento o tecnología militar, aspectos estos que comentaremos al hablar de seguridad.

Repuestos

Cuantas veces se nos ha caído al suelo un objeto cotidiano que teníamos en casa (un pequeño electrodoméstico, un juguete, un adaptador, una clavija, cualquier cosa de plástico) y nos hemos encontrado con que se le había roto un pequeño trozo. Hasta ahora, nuestra primera opción era intentar pegarlo lo mejor que pudiéramos. Y, como siempre, las cosas suelen romperse donde más molesta (por ejemplo, en la pestaña que mantiene dentro las pilas de un aparato) y no es nada fácil que nuestra chapucilla casera funcione. Así que sólo queda la opción de llevarlo a alguna tienda para intentar arreglarlo, pero la respuesta suele ser que, desgraciadamente, ¡ya no quedan piezas de ese modelo!

Internet ha posibilitado que ahora podamos ampliar nuestra capacidad de búsqueda de piezas de repuesto a casi cualquier lugar del mundo. Eso sí, además de tardar tiempo en buscarlas, enviarlas no nos saldrá gratis. Así las cosas, la opción que se acababa tomando era la de comprar un aparato nuevo.

Otra clarísima aplicación de las tiradas cortas (o simplemente unitarias) que ha hecho posible la fabricación aditiva es precisamente la capacidad de hacer nuestras propias piezas. Aún hay que tener conocimientos tecnológicos para hacer un modelo en 3D de una pieza rota e imprimirlo en casa, pero además de ser una solución para los manitas, veo perfectamente un futuro a medio plazo en el que la tienda de la esquina sí sea capaz de escanear/generar/descargar esa pieza que necesitamos en sólo unos minutos.



Figura 49: Una pieza de repuesto fabricada por el autor. Seguro que ni se imagina para qué.

Por supuesto, una cosa son los repuestos en casa para el usuario final y otra muy distinta para los fabricantes y empresas industriales. Es indudable que actualmente se emplea una gran cantidad de espacio y dinero en almacenar piezas de repuesto de múltiples máquinas y productos. La impresión 3D nos permite sustituir todo ese inventario físico por uno digital, sin coste alguno, e imprimir aquello que vayamos necesitando justo en el momento que lo necesitemos.

Arquitectura

Los arquitectos llevan muchos años intentando mostrar y validar la excelencia de sus diseños a sus clientes mediante la construcción de maquetas. La producción de una buena maqueta podía llevar semanas e incluso meses; se hacía de una forma absolutamente artesanal y se dependía de la habilidad de unas pocas personas.

Las tecnologías de fabricación aditiva son capaces de producir modelos de arquitectura con todo detalle y en todo tipo de materiales. Puesto que además actualmente la práctica totalidad del diseño arquitectónico se hace en programas de ordenador, es posible generar una maqueta de un nuevo diseño en cuestión de minutos. Esto supone una auténtica revolución en el sector, porque facilita enormemente la

comunicación con los clientes y asegura con rapidez la viabilidad y cumplimiento de necesidades de cada proyecto.

Pero no sólo eso, la posibilidad de repetir de forma rápida y sencilla una maqueta, permite hacer múltiples variaciones de un mismo proyecto, desde el primer día del mismo hasta que el proyecto ya está finalizado; incluyendo, por supuesto, geometrías complejas que antes no era nada sencillo -o directamente imposible- de representar.



Figura 50: Ejemplos de generación de maquetas en minutos.

No termina aquí la cosa, puesto que la tecnología de fabricación aditiva está ya empleándose no sólo en las maquetas, sino en la construcción de edificios completos. Al fin y al cabo, materiales como hormigón, cemento, etc, pueden manejarse en un estado viscoso como si fuera material de una impresora de extrusión. El concepto es exactamente el mismo. En Mayo de 2016 se fabricó la primera oficina impresa en 3D en Dubai, Emiratos Árabes Unidos, con el proyecto “*Office of the Future*”.



Figura 51: "Office of the Future": Oficina impresa en 3D en Dubai, inaugurada en Mayo de 2016 como el primer edificio de su clase. Puede verse el detalle de su construcción en www.officeofthefuture.ae © neatgroup via Twenty20 <http://twenty20.com/neatgroup>

El primer puente peatonal creado con tecnología de impresión 3D está en la localidad madrileña de Alcobendas, con una longitud de unos doce metros, donde se inauguró en Diciembre de 2016. Se trata de un puente impreso en hormigón diseñado por el Instituto de Arquitectura Avanzada de Cataluña (IAAC).

Es de esperar que en un corto plazo grandes máquinas de fabricación aditiva formen parte del panorama en un entorno de construcción junto a grúas y excavadoras.



Figura 52: El primer puente peatonal impreso en 3D. (Foto: © Germán Martín)

Finalmente, se puede también emplear la fabricación aditiva para la fabricación de detalles de ornamentación finales (por ejemplo, gárgolas) añadidos sobre el proyecto una vez construido.

Joyería y Decoración

En este caso, lo que busca la industria es la capacidad de hacer tiradas muy cortas y al mismo tiempo de una geometría compleja. Por un lado, podemos atender a los gustos del cliente; por el otro, podemos construir unos objetos de un diseño antes sólo posible en el ordenador.

Además, emplear la fabricación aditiva tiene la ventaja de poder realizar pruebas en materiales baratos (plástico, cristal, etc...) antes de fabricar el objeto final en materiales caros (oro, titanio, etc...).

Ejemplos de objetos decorativos fabricados en 3D



Figura 53: © Copyright Tdhster /
Dreamstime.com
http://www.dreamstime.com/tdhster_info



Figura 54: © Copyright Mari1408 /
Dreamstime.com
http://www.dreamstime.com/mari1408_info

Moda

Es aún muy incipiente el impacto de la fabricación aditiva en el mundo de la moda, pero ya pueden verse sus posibles 3 grandes áreas de aplicación:

1. Fabricar vestidos y complementos con geometrías “imposibles”.
2. Fabricar vestidos totalmente personalizados, adaptados a cada cliente.

3. Fabricar modelos exactos del cliente, para emplearlos de maniqués sobre los que probar nuevas prendas.

En 2016, la compañía Nike anunciaba una alianza con HP para “acelerar aún más su capacidad de adaptar productos de alto rendimiento para ayudar a los atletas a alcanzar su máximo potencial”. Se trata pues de una iniciativa de emplear la tecnología de impresión 3D de HP al prototipado rápido de material deportivo, desde zapatillas hasta cascos, pasando por bolsas y todo tipo de accesorios.



*Figura 55: Moda impresa en 3D. Foto © sashapritchard via Twenty20
<http://twenty20.com/sashapritchard>*

En el espacio

En nuestra tercera curva de coste veíamos cómo la fabricación aditiva es mucho más barata si hay que transportar algo lejos. Pero ¿qué ocurre si ni siquiera podemos transportarlo? Algo similar es lo que ocurre en las misiones espaciales: una vez lanzadas es muy costoso o directamente imposible transportar un nuevo objeto.

El coste por kilogramo enviado al espacio depende, lógicamente, del cohete empleado para hacerlo. Pero incluso en los casos más económicos hablamos de miles de dólares.

Por otro lado, es obvio que necesitamos llevar piezas de repuesto por si ocurre algún problema; pero claro, llevar un repuesto de todo lo que

se pueda romper aumenta en gran medida el peso. Una solución es pues llevar una impresora 3D y los diseños y materiales requeridos para fabricar los repuestos únicamente cuando sean necesarios. Ya les hubiera gustado tener una impresora así a los astronautas de la misión Apolo XIII.

La fabricación aditiva es por tanto un área de mucho interés para la investigación espacial. En el año 2014 la NASA envió una impresora 3D a la Estación Espacial Internacional (ISS) y fabricó allí el primer objeto impreso en el espacio.



*Figura 56: La impresora 3D instalada en la ISS, dentro de la cámara de microgravedad.
Fuente / Image credit: NASA*

Cuando hablamos de fabricación aditiva en el espacio tenemos que distinguir entre fabricar dentro de una nave (el ejemplo de la ISS) o fabricar directamente fuera de la misma. En el primer caso hablamos de hacerle la vida más fácil a los astronautas haciendo repuestos, herramientas, etc. En el segundo y aún más difícil caso, hablamos de la posibilidad de crear estructuras complejas en el exterior (por ejemplo, satélites). Las grandes estructuras complejas son difíciles de almacenar y llevar a bordo, y además hay que ensamblarlas. Si podemos fabricarlas directamente donde las necesitamos se facilita mucho el trabajo.

El problema, claro, es que imprimir directamente en el espacio exterior es más complejo: hacen falta materiales e impresoras mucho más resistentes. Y hay que tener en cuenta también el tema de los residuos. Diferentes experimentos se están llevando a cabo actualmente para

posibilitar la impresión en el vacío espacial, como *SpiderSat*, o *the Refabricator*.

En definitiva, la fabricación aditiva ofrece a la exploración espacial el potencial de:

- Reducir el tamaño de los vehículos de lanzamiento, al aligerar la necesidad de transportar repuestos, reduciendo su coste.
- Fabricar las estructuras en el espacio, en lugar de transportarlas.
- Posibilitar el diseño de materiales y geometrías que no han sido nunca creadas antes, que funcionen bien en un entorno de gravedad cero, pero no en la Tierra.

Conscientes de la gran oportunidad abierta, la NASA lanzó en 2017 el “*3D-Printed Habitat Challenge*”, un reto público a la comunidad para idear la forma de enviar materiales y equipos de fabricación que posibiliten la construcción de hábitats en la Luna o Marte.

Sector aéreo

Sin llegar a los elevadísimos costes de enviar un kilogramo de material al espacio, cada kilo de más en un avión cuesta dinero. Dicho de otra forma, cada kilo que aligeremos supone un ahorro importante. Así, una aplicación directa de la fabricación aditiva es la creación de piezas no totalmente sólidas, variando su proporción de relleno (*infill*) de forma que mantengan su forma y todas sus propiedades mecánicas pero disminuyendo su peso. Esta estrategia se aplica especialmente en los elementos estéticos, cajetines, etc.

También es posible emplear la impresión 3D para crear objetos con menor número de piezas como forma de mejorar sus propiedades al mismo tiempo que se reduce el coste de ensamblado. General Electric emplea ya esta tecnología para fabricar componentes, incluso empieza ya a hacerlo para motores de avión. Es significativo señalar también que al mismo tiempo ha hecho uso de lo abierto de esta tecnología para lanzar su propio reto a la comunidad para buscar diseños más ligeros que los existentes, en otro ejemplo de acceso a la “inteligencia colectiva”.

Industria automovilística

Como podemos también imaginar, en un automóvil ahorrar en el peso del vehículo supone un ahorro, aunque no tan importante como en el caso anterior.

La cosa cambia, por supuesto, si en vez de un automóvil normal hablamos de un fórmula 1, donde se estima que el ahorro de 1Kg de peso es de más de 100.000 dólares, sector en el que se buscan ya esos ahorros de peso, empleando la fabricación aditiva en la producción de algunas piezas, por ejemplo en el sistema de refrigeración, así como en la generación de prototipos.

En el sector automovilístico en general se usa ya la fabricación aditiva para distintos elementos como parachoques, adornos exteriores, válvulas y bombas de fluido, etc. En un futuro es de esperar que se aplique también a elementos más estructurales como la suspensión o la electrónica.

Está aún por ver su aplicación para hacer coches individualizados a las demandas del cliente, pero parece claro que será pronto una opción, al menos en los elementos más decorativos o externos del vehículo. Entre la automatización y la impresión 3D en poco tiempo pediremos nuestros automóviles “a la carta”.

Ayuda humanitaria

La distancia entre la fabricación y el consumo no sólo puede ser física, sino también lógica: en una emergencia humanitaria, sobre el terreno, el caos es importante y las posibilidades de acceso a muchos útiles elementales es limitada. En los países del tercer mundo las carreteras y vías de comunicación son malas y muy escasas, por lo que solicitar un repuesto de algo que se ha roto puede tardar semanas o incluso meses.

Field Ready (fieldready.org) es una ONG cuyo objetivo es precisamente la ayuda logística sobre el terreno, empleando la tecnología para resolver los problemas localmente. En su sitio de Internet pueden encontrarse múltiples ejemplos de la impresión 3D y su aplicación en estos casos.

Algunos de los objetos que pueden imprimirse en 3D sobre el terreno y que resultan de mucha utilidad son, por ejemplo:

- a) Conectores de tuberías, dispensadores de agua, grifos, cobertura para letrinas, etc...
- b) Útiles médicos, máscaras de oxígeno, pinzas, contenedores para desechos,...
- c) Rótulos, señales, etc...
- d) Clavijas para tiendas de campaña.
- e) Utensilios para comida, tales como vasos, cucharas, etc...
- f) Silbatos, instrumentos musicales, juguetes, herramientas de enseñanza
- g) Organizadores de cables, bobinas, fundas para conectores.

Medicina personalizada

En Diciembre de 2011 Ivan Owen, un artista especializado en efectos especiales, subió un video a YouTube. En él, Ivan mostraba una mano gigante controlada por hilos que había hecho para uno de sus muñecos. Entre los centenares de personas que vieron su video estaba Richard Van As, un carpintero sudafricano que había recientemente perdido los dedos de una mano en un accidente. Richard contactó por correo a Ivan y le pidió que diseñara una prótesis específica para su caso. Durante un tiempo trabajaron juntos en remoto tratando de resolver el problema, usando piezas ya disponibles en tiendas e intentando encontrar un diseño óptimo, lo que no era nada fácil. Pero cuando contactó con ellos la madre de un niño en Sudáfrica que también necesitaba una prótesis, se dieron cuenta de que su caso sería aún más difícil, porque al ir creciendo el niño necesitaría a su vez ir adaptando el diseño a los cambios de su cuerpo.

Ivan Owen empezó a dedicar más y más esfuerzo a investigar sobre fabricación de prótesis, y así encontró en Internet la historia del cabo John Coles, un militar que había perdido una mano en un accidente de artillería, y de cómo un dentista, el doctor Robert Norman, le había hecho una prótesis en el año 1845 que le permitió llevar una vida normal durante más de 30 años. Este diseño del siglo XIX, confeccionado con huesos de ballena y cables de metal, estaba accesible en el sitio de la Librería Nacional de Australia y dio a Ivan los detalles que le faltaban para conseguir hacer un diseño totalmente funcional.

El éxito de su colaboración se disparó cuando empezaron a emplear impresoras 3D, lo que les permitió personalizar por completo el diseño y adaptarlo a cada caso particular. Y ello con un coste de la prótesis mínimo, especialmente si lo comparamos con lo que costaba entonces fabricar algo similar, del orden de miles de dólares.

En lugar de patentar su diseño, decidieron hacerlo público y subir los objetos 3D a *Thingiverse* en el año 2013, con la idea de que quién quisiera pudiera reutilizarlo gratuitamente para sus propios fines. Al poco tiempo, Jon Schull, profesor del *Rochester Institute of Technology*, conoció la historia y creó un grupo dedicado a voluntarios que empleasen sus impresoras 3D a fabricar prótesis gratis para quién lo necesitara. Nació así la comunidad *e-NABLE*, que desde entonces ha fabricado miles de manos artificiales, accesible en su página enablingthefuture.org.

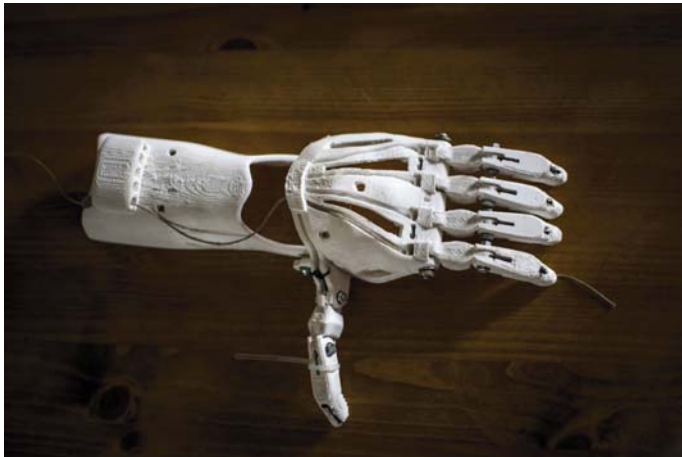


Figura 57: Una mano protésica fabricada en una impresora 3D. (Foto: Pixabay)

Es ésta una historia de solidaridad y de éxito de la tecnología de impresión 3D, que nos muestra la gran aplicación de la misma al futuro de la medicina. Hasta ahora todas las prótesis se diseñaban para resolver el problema de una forma genérica (por ejemplo, una muleta) o personalizada a las necesidades de un individuo pero con un altísimo coste. Al cambiar la necesidad de una serie larga de fabricación, podemos crear todo tipo de objetos como implantes o prótesis específicamente diseñados para cada caso y con un coste mucho menor. En el caso de las manos artificiales, hablamos de 30-40 euros, varios órdenes de magnitud inferior a lo que costaban hasta ahora, 5.000-8.000 €.

En este sentido, sin lugar a dudas el mayor éxito de la estereolitografía ha sido la fabricación de audífonos, de los que actualmente la práctica

totalidad (>96%) se fabrican así. ¿Por qué? Por las múltiples ventajas que se unen en este caso:

Tradicionalmente el proceso era largo y laborioso, comenzando por tomar un molde del oído del cliente a partir del cual se hacía a su vez un negativo y se procedía a fabricar con moldes el nuevo audífono. Finalmente, había que montar las piezas y asegurar un terminado suave y pulido del conjunto. Todos estos pasos para que luego, en un porcentaje muy alto, el usuario final del audífono lo rechazara y vuelta a empezar el proceso.

La impresión 3D no sólo ha reducido los costes de fabricación de una forma significativa al acortar muchos de los pasos (sin moldes, sin ensamblado de piezas, y además la estereolitografía produce objetos con acabados muy suaves), sino que también ha reducido las tasas de rechazo al emplearse ahora escáneres 3D que modelan el oído del cliente con mayor precisión.

La posibilidad de la personalización en la impresión 3D nos permite dar una solución específica a cada problema de cada paciente individual. Así, por ejemplo, la tecnología se emplea para la impresión de huesos artificiales, que duplican perfectamente la forma, el tamaño e incluso el peso del original, para garantizar el éxito del implante. Esto es especialmente relevante en casos para los que antes no había una solución, como puede ser implantar una nueva mandíbula. Con el tiempo, es de esperar que la práctica totalidad de implantes sean así, totalmente personalizados a cada paciente.



Figura 58: Modelo de columna vertebral impresa en 3D para planificar una cirugía.

© paigeinrealife via Twenty20
<http://twenty20.com/paigeinrealife>

Pero hay también otras aplicaciones de la fabricación aditiva en medicina: al abarataarse los costes de fabricación pueden producirse modelos de casi cualquier órgano o situación que luego se empleen en la práctica clínica o quirúrgica. La posibilidad de que nuevos estudiantes de medicina tengan a su alcance múltiples modelos equivale a decenas de años de práctica con anterioridad.

Otra importante aplicación es la capacidad de confeccionar modelos específicos de pacientes para la planificación quirúrgica, que reducen el tiempo de una operación compleja. Ahora puede planearse el detalle de una operación (dónde y qué cortar, reemplazar, etc...) y prácticamente hacer un simulacro

de la misma antes de realizarla, lo que a la postre reduce el tiempo de cirugía y la posibilidad de errores.

También en los últimos años se han llevado a cabo diversas investigaciones farmacológicas orientadas a producir en el futuro medicamentos personalizados mediante impresión 3D. En concreto se trabaja en impresoras 3D que fabrican medicamento a base de polvo, cambiando la estructura en función de la posología del medicamento recetado a cada paciente; o en comprimidos tan personalizados capa a capa que hagan dosificaciones distintas en función del tiempo. Asimismo, también se buscan opciones más atractivas en la presentación de medicamentos, especialmente relevantes en su aplicación para niños.



*Figura 59: Modelo de cráneo humano.
© natashialewismd via Twenty20
<http://twenty20.com/natashialewismd>*

La dentadura de un ser humano le identifica individualmente. Esto quiere decir, claro, que cada una es totalmente única, y por tanto, cualquier problema requiere una solución personalizada. Lógicamente, la impresión 3D tiene mucho que decir en cuanto a personalización se refiere: puentes, coronas o dientes artificiales están ya siendo fabricados.

Pero hay también otras aplicaciones de la fabricación aditiva en la salud dental, como pueden ser todo el material para ortodoncia. O las guías para intervenciones complejas: en aquellos casos, por ejemplo, que se requiera un alto nivel de precisión al realizar una perforación, están ya muy en uso guías personalizadas de resina confeccionadas para cada paciente que mejoran en gran medida el porcentaje de éxito en este tipo de intervención.

Bioimpresión

Sin terminar de salirnos del campo de la medicina, la aplicación de la fabricación aditiva a materiales biológicos nos eleva el listón de sus aplicaciones a límites casi de ciencia ficción, en el encuentro de la ingeniería y la biología.

En estos casos, lo que se emplea es el concepto de añadir material poco a poco (normalmente con tecnologías de impresión 3D *syringe extrusion*, “extrusión de jeringuilla” o similares) pero con la particularidad de que el material es biológico. Así, se ha conseguido ya la impresión de piel y tejidos en general, con el claro objetivo de “fabricar órganos” de todo tipo según sean necesarios.

La idea es emplear células madre cultivadas, que se utilicen a modo de bio-material de impresión, para la creación bajo demanda de órganos que puedan reemplazar a los originales mediante trasplante; la parte mecánica no plantea ya complicación, sino que el auténtico reto está en la parte del material, la biológica. La investigación actual se centra en replicar la estructura, complementando el material biológico con otros materiales. Según algunos expertos, la creación de órganos de alta complejidad como un hígado o un corazón aún llevará más de 10 años, aunque otros afirman que la creación de riñones completamente artificiales es algo ya muy cercano.

Imprimiendo comida

Puesto que muchos componentes alimenticios pueden encontrarse en un estado viscoso que se adhiere y solidifica al enfriarse, es relativamente sencillo aplicar las técnicas mecánicas de la impresión 3D a la creación de comida.

El principio es, naturalmente, el mismo: ir añadiendo capas de material (comida en este caso) hasta conseguir el producto final. Después de todo, esta es la función básica de una manga pastelera tradicional.

Así, es muy conocida ya la impresión 3D de chocolate, para construir todo tipo de figuras. En general, cualquier producto que conste de un sólo ingrediente en estado viscoso (por ejemplo, pasta, caramelo o masa para hacer galletas) puede usarse en una impresora de extrusión de jeringuilla sin ningún problema.

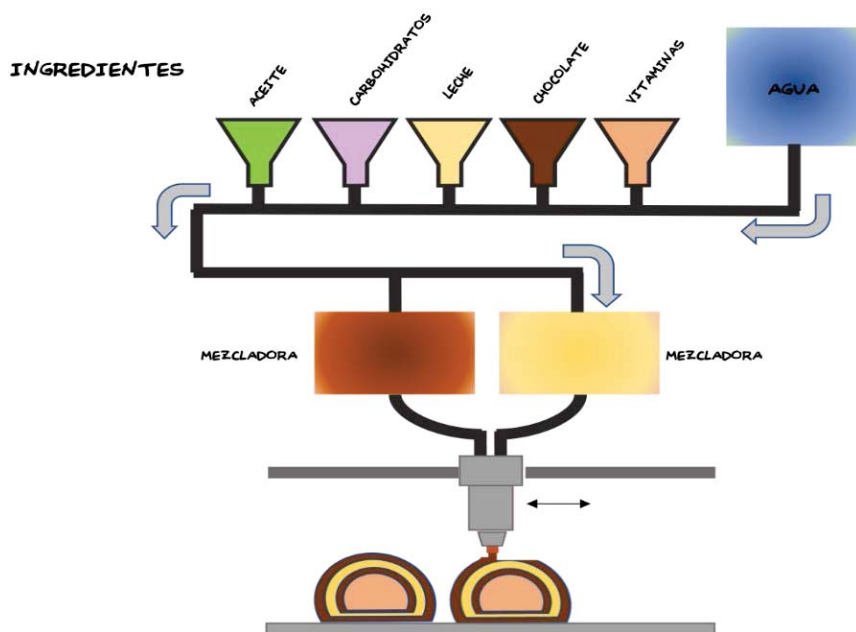


Figura 60: Esquema de una impresora alimentaria

Para cuando el producto es más complejo, se aplica una estructura similar a la de la figura: los distintos ingredientes se mezclan en una, dos o más mezcladoras en las proporciones adecuadas. El cabezal que distribuye el material a imprimir se mueve en las direcciones adecuadas para depositarlo en el punto exacto construyendo capa a capa la comida.

Estamos también en los primeros pasos de la fabricación de comida elaborada, pero es un campo que a largo plazo tiene un gran recorrido.

A Winston Churchill se la atribuye la siguiente frase en 1932: *“Debemos escapar de lo absurdo de criar un pollo entero para comer la pechuga o el ala, y sustituirlo por el crecimiento de estas partes por separado en un medio adecuado”*

Pues bien, estamos ya relativamente cerca de alcanzar este punto: en 2013 se presentó en Londres la primera hamburguesa de carne cultivada *in vitro*. Mark Post, profesor de la Universidad de Maastrich, presentó una hamburguesa que costó unos 300.000 euros, basada en el cultivo de células madre de bovino y su crecimiento artificial. Según avance esta biotecnología, en combinación con la impresión 3D, nos llevará a la auténtica impresión de comida animal sin necesidad de criar y matar animales.

Electrónica

Según avanzan las opciones de impresión multi-material, se hace más posible fabricar componentes electromecánicos mediante fabricación aditiva en su totalidad. Esto introduce nuevas posibilidades en el diseño y fabricación de aparatos electrónicos.

Se han ido encontrando ya varias opciones para la fabricación de conductores mediante impresión 3D, incluyendo las famosas “tintas conductoras”, basadas en nanomateriales o el uso del grafeno.

La posibilidad de hacer todo el producto, incluyendo la electrónica, en una sola fase disminuye enormemente los costes de ensamblaje de aparatos eléctricos, lo que abriría la puerta a realmente hacer una personalización a nivel de circuito de las funcionalidades de un producto. Hace también posible avanzar un paso más en la miniaturización de aparatos, al no necesitar cajas ni tornillos para la parte electrónica.

Otra alternativa muy prometedora es la opción de hacer circuitos impresos en cualquier superficie en lugar de -como hasta ahora- en el plano, lo que nos proporcionará la posibilidad de crear nuevos y complejos diseños y la optimización de las dimensiones todo tipo de aparatos, área en la que destacan -de nuevo- prótesis eléctricas o todo tipo de electrónica de la llamada “*vestible*” (*wearable*), ya que podremos hacer el diseño totalmente en base a la funcionalidad del mismo y no en las exigencias del proceso de fabricación.

Internet of Things (IoT)

El concepto de Internet de las cosas, IoT por sus siglas en inglés, aparece como el nombre a que se refiere la tendencia actual de ir interconectando más y más objetos cotidianos que nos rodeen con Internet. Lámparas, termostatos, persianas, calderas, puertas, aparatos de aire acondicionado, etc. han sido los primeros dentro de la llamada *domótica*, pero la aparición de múltiples sensores (de consumo eléctrico, temperatura, humedad, luz, pH, etc.) de tamaño y coste muy reducidos junto con la electrónica de conexión a redes wi-fi cada vez más económica hacen que estemos pensando en un mundo en el que habrá millones de objetos conectados, desde todos los electrodomésticos de casa (cafetera, lavadora, nevera, etc...) hasta medicinas o libros, que nos permitan controlarlos desde nuestro móvil estemos donde estemos.

¿Qué tiene que ver esto con la impresión 3D? Mucho: se trata de un área de múltiples oportunidades para inventores y pequeñas empresas, en la que la impresión 3D permite una innovación barata y rápida de prototipos y soluciones que de otra manera nunca verían la luz. Y si imprimimos directamente la electrónica, mucho más, claro.

La fabricación aditiva nos aporta geometrías complejas que permiten poner unas baterías o un conector wi-fi donde antes era imposible.

Enseñanza

La impresión 3D tiene también una gran aplicación en el entorno educativo: por un lado, las impresoras baratas permiten su uso en clase por parte de los alumnos, acercándoles conceptos de ingeniería y creación de objetos en tres dimensiones que antes quedaban muy lejanos. Por otro lado, la posibilidad de prototipado rápido y copia de objetos permite a los estudiantes acceder a interesante material de estudio; ya vimos que los estudiantes de medicina pueden acceder a modelos impresos de cualquier órgano del ser humano, pero podemos pensar en muchos otros ejemplos:

- I. Estudiantes de química imprimiendo modelos 3D de las estructuras moleculares.
- II. Estudiantes de matemáticas pueden imprimir funciones o soluciones espaciales, ayudando a su comprensión.
- III. Estudiantes de arquitectura y diseño imprimiendo obras ya conocidas o las suyas propias.
- IV. Estudiantes de biología, generando modelos de organismos, células, virus, etc...
- V. Estudiantes de mecánica, imprimiendo sus propias piezas y engranajes.
- VI. Estudiantes de historia, estudiando sus propias copias de objetos históricos.

La lista es prácticamente interminable. La continua reducción de precios tanto en las impresoras como en los materiales, junto con la aparición de paquetes de software mucho más sencillos de usar hacen que el empleo de impresoras 3D en las aulas sea cada vez más y más frecuente.

El Movimiento *Maker*

De toda la vida ha existido gente con ganas de fabricar objetos con sus propias manos: manitas, artesanos, ingenieros, artistas, inventores, etc... Sin embargo, en el año 2005, y al abrigo del lanzamiento de una nueva revista (*MAKE Magazine*) se produjo un fenómeno de catálisis y unión de los amantes del *DIY* (el *Do It Yourself*, o hágalo usted mismo), que comenzaron a auto-denominarse *makers*, y a su movimiento, el movimiento *Maker*.

Su filosofía es sencilla: desde los orígenes el ser humano tuvo la necesidad de hacer cosas: sus herramientas, su comida, su ropa. El desarrollo de la humanidad y la innovación ha venido de la mano de ese hacer; en la sociedad actual, en cambio, el hombre no tiene necesidad de hacer, sino que puede comprar todo hecho. Sin embargo, el hombre sigue teniendo en su naturaleza ese deseo de hacer cosas.

Ha sido la combinación del acceso a nuevas tecnologías baratas como los microcontroladores *Arduino*, o los miniordenadores *Raspberry Pi* junto con la aparición de las miles de páginas de Internet dedicadas a compartir tutoriales de cómo fabricar algo lo que ha terminado de convertir el movimiento **maker** en un fenómeno mundial.

Entre estas tecnologías, para cualquier *Maker* destaca la impresión 3D: el sueño de cualquier aficionado, tener su propia fábrica en casa. Recuerdo hace años, cuando uno tenía que reciclar las cajas de plástico y objetos a su alrededor, o buscar desesperadamente “algo parecido a esto” en las tiendas para hacer realidad un diseño. Hoy día, basta con hacerlo en una herramienta CAD e imprimirlo; y compartir un diseño o mejorar/reutilizar algo que ya ha hecho otro está al acceso de cualquiera. La fabricación aditiva está ya totalmente ligada a este fenómeno.

Los *makers* siguen siendo aficionados, entusiastas, ingenieros o estudiantes, pero sobre todo lo que son más que nada es un nuevo camino de innovación, que une entre sí a una gran comunidad de gente curiosa y creativa.

Para aquellos interesados en el tema, recomiendo el libro “*Free to Make*” de Dale Dougherty, fundador de la revista *Make*.

Moldes de inyección

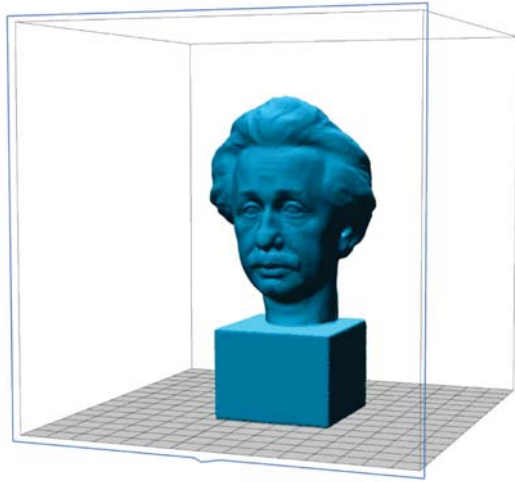
Hasta ahora hemos visto aplicaciones en las que se empleaba únicamente fabricación aditiva. Sin embargo, aunque sea posiblemente una de las aplicaciones con menos glamour, la creación de moldes (o en general, la **aplicación mixta** de tecnologías de fabricación aditiva, conformativa y sustractiva) es probablemente una de las que más fácilmente pueden adoptarse y que tiene un gran impacto en la producción.

La inyección de plásticos en moldes se emplea en muchísimos sectores para muchísimos productos, siendo casi el ejemplo típico de producción en masa barata. En estos casos, típicamente, lo que cuesta es fabricar un molde (en metal) que aguante miles de iteraciones del proceso de inyección. La creación de este molde es una tarea larga y laboriosa.

Para tiradas muy largas, fabricar los moldes con una impresora 3D no parece la mejor opción. Pero para tiradas cortas (50 - 100 -200 piezas fabricadas) sí puede ser una excelente opción, combinando la agilidad y la posibilidad de personalización de la impresión 3D con el bajo coste de la inyección de plásticos.

Transformando la forma en que producimos y consumimos

La Fabricación Aditiva tiene el potencial de cambiar los actuales paradigmas de producción y consumo como ninguna otra tecnología de fabricación lo había hecho antes.



“La medida de la inteligencia es la
capacidad de cambiar”

Albert Einstein

Introducción

La cadena de suministro (**supply chain**) es el nombre que se le da a la secuencia de pasos ejecutados para la producción, distribución y venta de un producto desde su inicio hasta llegar al consumidor final. Lógicamente, esta cadena será distinta para cada producto individual, pero podemos generalizar a una cadena estándar, más o menos válida para todos los casos.

Así, podemos comenzar por una cadena de suministro “tradicional”, como la mostrada en la figura:

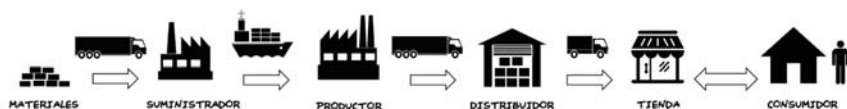


Figura 61: Una cadena de suministro tradicional

En ella vemos como partimos de las materias primas, que llegan a un primer fabricante que construye las piezas básicas que luego serán trasladadas al siguiente paso, en el que mediante una fase de ensamblado y nuevos pasos de fabricación un productor fabrica productos de mayor complejidad. Típicamente los productos cuanto más básicos más sensibles a economías de escala son, y por ello tienden a fabricarse en cantidades masivas en países en los que la mano de obra es más barata; por eso las piezas o componentes suelen tener un paso de transporte en contenedor desde estos países a países más industrializados. Una vez el producto está fabricado, se envía a los principales distribuidores, agrupados por áreas geográficas, que a su vez lo envían a las tiendas. El consumidor “clásico” va a su tienda más cercana y compra el producto.

Por supuesto, esta cadena genérica puede complicarse (o simplificarse) en función del bien concreto. Puede tener más de un paso de fabricación, con más productores intermedios; cuanto más complejo, más pasos distintos puede llegar a tener. En todo caso, puede observarse que en esta cadena los múltiples pasos hacen que el coste del producto final aumente, y cómo los costes de transporte constituyen una parte muy significativa del mismo.

A lo largo de décadas, las empresas han trabajado en optimizar sus costes para ser más competitivas, y por tanto han buscado la forma de

reducir los distintos pasos de la cadena, reduciendo así sus costes sin afectar (o mejorando) a la calidad del producto final. Un ejemplo clásico es el de los grandes almacenes / centros comerciales; buscan reducir un paso en la cadena, juntando dos elementos en uno: la distribución y la tienda. Reducen así los costes de transporte (no hay transporte a la tienda final). Al consumidor se le pide entonces que se desplace a la gran superficie, cosa que hace voluntariamente atraído por unos mejores precios o por la variedad de productos disponibles; parte del coste de transporte se ha pues eliminado y otra se ha trasladado directamente al consumidor final, pudiéndose así reducir los precios y/o aumentar los márgenes al mismo tiempo.

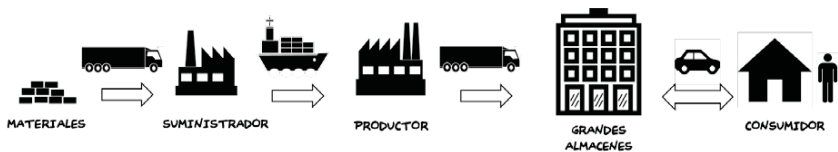


Figura 62: Cambio en la cadena por la aparición de un gran almacén.

Hay, por supuesto, muchas otras opciones de optimización de la cadena en los diferentes pasos, en la llamada integración hacia delante o hacia atrás. Por ejemplo, cuando un fabricante abre tienda propia, o cuando un gran fabricante “obliga” a sus principales suministradores a ser más competitivos situándose junto a sus fábricas para eliminar el coste de transporte de piezas.

La aparición de Internet supuso una ruptura total con los modelos más tradicionales, en el sentido de que ahora el consumidor final podía acceder directamente a cualquier paso anterior de la cadena, saltándose intermediarios. Ya no dependía de la tienda, ni siquiera de la gran superficie más cercana. El consumidor puede a través de internet acceder directamente al fabricante y solicitar el producto; incluso acceder al fabricante de piezas para obtener repuestos mucho más baratos. Y lo mismo ocurre con los otros actores, claro: se cambian no solo los modelos B2C (*Business to consumer*) sino toda la relación entre cada paso (modelos B2B, *Business to Business*).

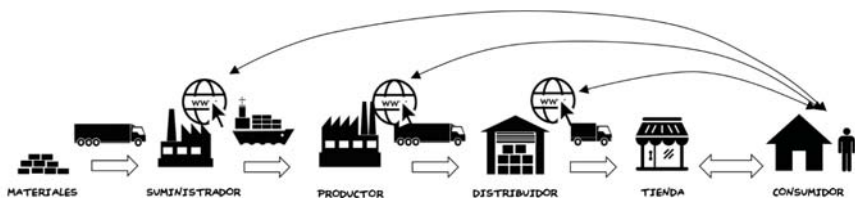


Figura 63: La revolución de Internet en la cadena de suministro

A pesar de lo inicialmente planteado por algunos analistas, que preveían un futuro en el que el cliente sería todopoderoso accediendo a todos los fabricantes directamente, por encima de otros modelos la cadena de suministro que se va implantando cada vez más es la del gran distribuidor en Internet, tipo *Amazon* o *Alibaba*: grandes empresas de logística super-optimizada y con un volumen tan enorme que pueden conseguir los mejores precios de todos los fabricantes. Para el usuario final, una logística ágil le facilita la recepción del pedido en su propia casa y sin coste adicional para él.

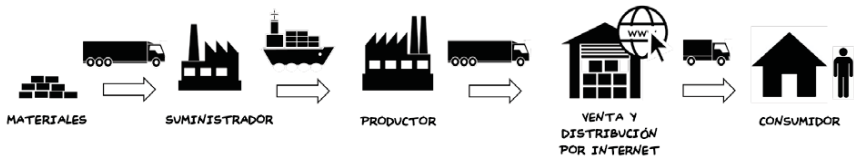


Figura 64: El gran distribuidor en Internet.

Cambios posibles debidos a la fabricación aditiva

Pero estamos aquí para hablar de la fabricación aditiva. ¿En qué medida la fabricación aditiva puede modificar la cadena de suministro? ¡De muchas formas!

Una de las más obvias es la siguiente: Podríamos pensar que una opción es que el fabricante/ensamblador imprima sus propias piezas básicas según las necesita. Aunque es una alternativa posible, en principio no tendría sentido hacerlo así, puesto que ya vimos que las economías de escala siguen haciendo que piezas sencillas sigan siendo más rentables de fabricar con los métodos tradicionales. Sin embargo, también vimos cómo la fabricación aditiva permite la producción de geometrías más complejas, en muchos casos eliminando la necesidad de ensamblar varias piezas; el efecto combinado de ambas dos cosas hace que sí que sea efectiva la producción en local, eliminando así el primer paso de suministrador de piezas. Al tratarse típicamente de eliminar la importación desde países de mano de obra barata como China, India, etc... esta opción hace que la impresión 3D sea utilizada frecuentemente en discursos políticos como la "oportunidad de volver a traer puestos de trabajo al país". En cualquier caso, se trata de un fenómeno que está ya ocurriendo, en mayor medida cuanto mayores sean las opciones de personalización (*customization*) de nuestro producto final, puesto que añadimos una justificación más al empleo de la fabricación aditiva. Los

beneficios de fabricación aditiva en esta modalidad para el fabricante, además de eliminar los costes del suministrador de partes, son unos niveles de inventario más reducido y, en consecuencia, unos requerimientos de almacenaje menores.

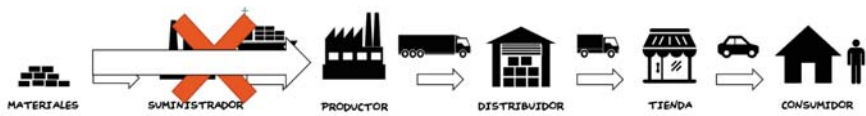


Figura 65: El productor fabrica sus propias piezas

Otra forma de nueva cadena de suministro surge con la aparición de los nuevos centros de impresión 3D bajo demanda (*3D printing as a service*). En este caso se propone al consumidor final lo siguiente: localiza un modelo en 3D del objeto que necesites (en Internet, en cualquiera de los sitios especializados en modelos 3D, bien gratuitos bien de pago) y nosotros lo fabricamos por ti, en el material que requieras y enviándolo a tu casa lo antes posible.



Figura 66: Fabricación como servicio

Las ventajas para el consumidor son principalmente el acceso a un amplio abanico de opciones de fabricación (materiales, colores, superficie, terminación, etc...) dado que estos **hubs de impresión** facilitan casi cualquier tecnología existente actualmente y la personalización absoluta, puesto que puede elegir exactamente lo que necesita. Puede incluso –si tiene las habilidades necesarias para ello, claro- modificar el diseño inicial para adaptarlo aún más a sus necesidades.

En este escenario vemos como la fabricación aditiva ayuda a uno de los fenómenos asociados a la transformación digital: el empoderamiento del cliente (*customer empowerment*) que tiene ahora más poder sobre todo el ciclo.

Sculpteo, *i.materialize*, *Ponoko* o *Shapeways* son algunas de las empresas globales que dan servicios de fabricación como servicio (*3D Printing as-a-service*) a través de sus sitios de Internet.

En todos ellos, el proceso para el usuario es muy similar: el consumidor es el responsable de localizar el modelo 3D de lo que necesita y subirlo a la web (paso 1). En algunos casos, también se permite buscar entre los modelos ya disponibles en el hub. El paso 2 es seleccionar el material, color y terminado requerido; el servicio selecciona la mejor tecnología de impresión de entre todas las opciones disponibles y nos hace sus recomendaciones. El siguiente paso, claro, es aceptar el presupuesto y pagar por el servicio solicitado. En el paso 4 el hub se encarga de la producción del objeto y posteriormente lo envía al cliente.



Figura 67: Pasos del 3D-printing-as-a-service

Los servicios de impresión bajo demanda pueden a su vez hacer una integración física o lógica, simplemente agrupando en una plataforma a posibles fabricantes. Es el caso de, por ejemplo, *3Dhubs.com* o *TreatStock*. Así, en el paso 4 anterior, de forma transparente al usuario, no se fabrica el objeto directamente, sino que se busca –de entre los miles de fabricantes que se han dado de alta en la plataforma– el fabricante más próximo al consumidor con la tecnología deseada, y es él el que se encarga de este paso final de fabricación y envío. De esta forma, al igual que *Uber* consigue ser una compañía de transporte sin ningún automóvil, *3DHubs* consigue ser un fabricante sin tener porqué tener ninguna línea de fabricación.

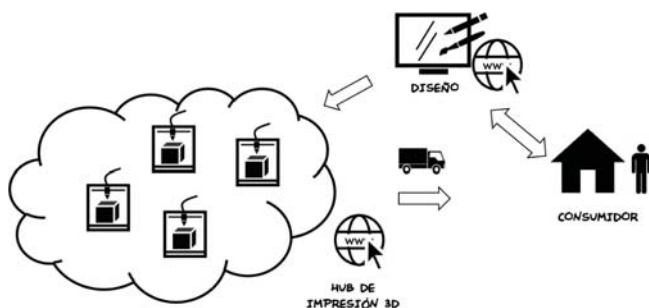


Figura 68: 3D Printing Hub

Fenómenos así, nos llevan a un proceso creciente de descentralización de la producción, en el que los grandes centros de fabricación que buscaban reducir los costes de transporte y maximizar las economías de escala tienen menos sentido. En su informe “*The disruptive nature of 3D printing. Jan 2017*”, la Comisión Europea para

la Monitorización de la Transformación Digital, asegura que el 43% de las compañías esperan que la impresión 3D tenga un gran impacto en la localización de nuevas plantas de fabricación.

Por supuesto, este tipo de servicios de impresión 3D bajo demanda puede ser usado no sólo por el consumidor final, sino por cualquier otro. Por tanto es particularmente útil para usuarios avanzados (aquellos que son capaces de diseñar sus propias necesidades) o pequeños productores que no quieren invertir en tener sistemas de impresión 3D propios y sin embargo quieren aprovechar las ventajas de esta tecnología. En estos casos el fabricante se convierte únicamente en diseñador, puesto que no interviene en el resto de pasos de la cadena.



Figura 69: Consumidor/diseñador - Pequeño fabricante

Otro posible escenario que está aún por desarrollar: la aparición de tiendas locales, cercanas al cliente final, y con capacidades de producción en las tecnologías básicas. Así, el usuario selecciona en la tienda lo que quiere entre el amplio catálogo virtual y la tienda lo imprime en el acto para el usuario. Alternativamente el usuario acude con el diseño de lo que necesita para que se lo hagan en el momento. La ventaja para el usuario es que puede tocar y ver los distintos acabados y comprobar que está satisfecho con su compra, a la que accede antes de pagar.

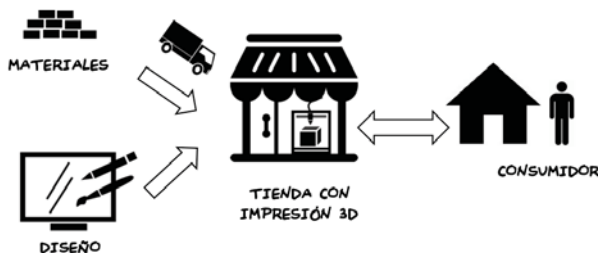


Figura 70: Impresión 3D en la tienda

Es este un modelo particularmente válido para recambios. ¿Cuántas veces no hemos ido a la ferretería con la frase “quiero un tornillo como éste” ante un aparato antiguo que se nos acaba de romper?. Con un

scanner 3D adecuado, la tienda podría generarnos sin problemas cuantas copias queramos sin depender de almacenes y listas de productos ya descatalogados.

Al final, todas estas opciones alternativas nos llevan a un futuro que puede resumirse en la siguiente figura:

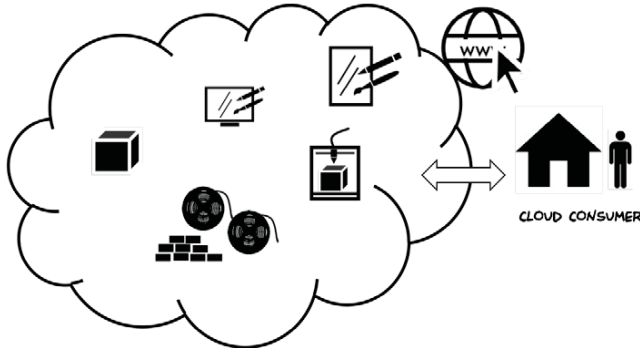


Figura 71: Todo en la nube

Una cadena en la que “todo está en la nube”. El consumidor accede a Internet y busca aquello que necesite, sea el producto ya fabricado, el diseño de aquello que necesite, un diseñador que se lo haga, un fabricante que se lo produzca o materiales para fabricárselo él mismo. Todo un mundo de alternativas a los pies del usuario.

¿Quién ganará entonces en un escenario así?

- Obviamente las plataformas: sitios de internet que aglutinen toda la oferta y la presenten en la mejor forma a los miles de usuarios.
- El usuario, que ve aumentado su poder y capacidad de encontrar lo que quiere.
- El pequeño fabricante / diseñador, quien tiene ahora la posibilidad de acceder a un mercado que antes dominaban los grandes. Si es capaz de hacer un producto de calidad, tendrá hueco en el mercado.

¿Quién lo tiene más complicado?

- Los fabricantes tradicionales que tendrán que adaptarse a los nuevos tiempos: poco a poco su labor será más la de asegurar que tienen el control de los mejores diseños en un mundo digital en el que la fabricación tendrá menos valor, o especializarse en la producción en algunas tecnologías y conectarse en estas

plataformas para asegurarse que son un jugador efectivo en este futuro virtual.

- -Los distribuidores, que serán poco a poco reemplazados por los nuevos grandes distribuidores.
- -Los fabricantes de pieza indiferenciada, basada únicamente en economías de escala, y que puedan ser ahora fabricadas bajo demanda ya ensambladas.

Para un análisis más en detalle, puede consultarse el informe “*Additive Manufacturing: The Most Promising Technology to Alter the Supply Chain and Logistics. 2017*” del *Journal of Service Science and Management*.

Llevado al extremo, con todas las tecnologías de diseño, escaneado e impresión accesibles al consumidor este potencialmente podría también auto-abastecerse y fabricarse todo aquello que vaya a necesitar. Este escenario, denominado “**prosumidor**” por cuanto las funciones de producción y consumo se unen en la misma persona, está aún lejos para el consumidor normal. Es, sin embargo, cada vez más el caso de los aficionados a la fabricación, dentro del llamado movimiento *maker*.

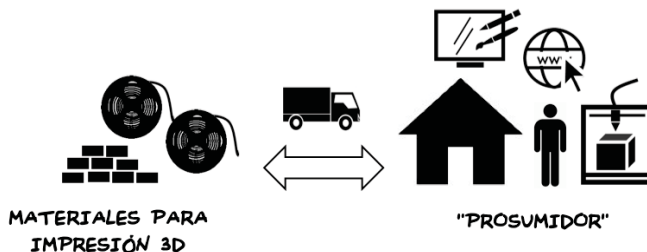
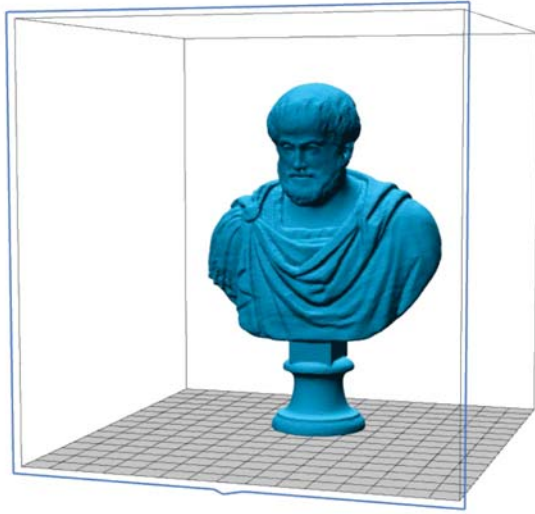


Figura 72: El Prosumidor.

¿Llegaremos a un escenario en el que todo el mundo tiene una impresora 3D en casa de igual forma que tiene ahora la posibilidad de imprimir en papel lo que necesite? Este es realmente algo así como el “*Santo Grial*” de la fabricación aditiva: una satisfacción de la demanda propia de película de ciencia-ficción tipo *Star-Trek*. La tecnología actual aún no está madura hasta este punto, pero no es algo totalmente descartable en el largo plazo, si bien aún parece lejano.

Otros factores

Veremos ahora otros factores que de forma directa o indirecta pueden afectar la implantación de soluciones de impresión 3D.



“Nunca se alcanza la verdad total, ni nunca se está totalmente alejado de ella.”

Aristóteles.

Si hablamos de seguridad junto con la impresión 3D, podemos considerar de dos áreas generales: una es cómo la fabricación aditiva afecta a la seguridad, otra es el conjunto de los problemas de seguridad que puede tener la fabricación aditiva en sí misma.

Seguridad

En este apartado hablaremos de cómo la impresión 3D puede tener consecuencias en la seguridad a nuestro alrededor.

Como ya hemos visto, la fabricación aditiva “democratiza” el acceso a la fabricación de muchos elementos; entre ellos, por supuesto, están aquellos que tradicionalmente los gobiernos han querido que estén sólo al alcance de unos pocos, por motivos de seguridad.

Así, en 2013 se hizo viral la noticia de la primera pistola impresa en 3D, *the Liberator*. Esta pistola estaba hecha prácticamente en su totalidad en plástico (ABS); el único elemento que no era de este material era una punta de metal (de las que encontramos fácilmente en cualquier ferretería) que hacía las veces de percutor. Esta pistola se hizo precisamente con la intención de demostrar que estamos ahora en una nueva era y cualquiera en cualquier lugar del mundo puede ya fabricar sus propias armas. Con el detalle adicional de que una pistola así es prácticamente indetectable en un control de metales estándar, o camuflarse en piezas aparentemente inofensivas.

Hacer algo así es, por supuesto, ilegal en casi todos los países del mundo; pero eso no quita que sea un futuro quebradero de cabeza para las fuerzas de seguridad.

Esta primera pistola era muy limitada y acabó explotando a los pocos disparos; pero eso no impide que se puedan hacer diseños mucho mejores, y no sólo de pistolas. Conforme la tecnología de impresión en metales se abarata (acaba de salir una de las primeras impresoras de sobremesa capaz de imprimir en metal de forma relativamente económica) las opciones de fabricar armas en casa aumentan día a día. Y eso, desgraciadamente, no sólo incluye pistolas o rifles, sino todo tipo de objetos armamentísticos de más calibre.

Pero no sólo hablamos de armas. Tradicionalmente determinadas naciones consideradas “peligrosas” han tenido un embargo comercial que limitaba el tipo de productos de alta tecnología que se les podía vender legalmente. Con la impresión 3D es mucho más sencillo terminar con cualquier tipo de embargo, bien porque se adquieran los productos como modelos 3D en software de difícil control, bien porque estos países copien los productos originales sin más que escanear uno de ellos a los que consigan acceso.

Además de todo ello, tenemos el problema de que la copia de objetos puede también utilizarse para fines indeseables.

En primer lugar, resulta obvio que el mercado de falsificaciones de marca se verá relanzado por la opción de poder hacer copias muy perfectas y de forma accesible casi a cualquiera.

La copia puede ser también de objetos que en sí mismos no son un problema pero sí cuando se les da un mal uso. Por ejemplo, en 2014 un hombre francés fue detenido acusado de robar cientos de miles de euros. El procedimiento para ello fue usar una impresora 3D para hacer unas réplicas perfectas del frontal de cajeros automáticos que ponía encima de los auténticos cajeros; los clientes eran incapaces de detectar la diferencia e introducían su tarjeta que era copiada sin problemas por el criminal.

Otro ejemplo: en el año 2012 durante la conferencia *Hackers On Planet Earth* (HOPE) en Nueva York, un hacker alemán demostró que podía abrir sin problemas esposas de alta seguridad de las empleadas por la policía. ¿Cómo lo hizo? Las esposas, para asegurar que un sospechoso detenido por un policía puede ser liberado posteriormente por otro, tienen una cerradura estándar conocida; pues bien, nuestro hacker en primer lugar fue capaz de localizar una de esas llaves de seguridad en eBay; midió con precisión todas sus características y con la ayuda de una impresora 3D y una cortadora láser de precisión fue capaz de hacer una réplica perfecta de la llave. Historias parecidas aplicadas a cerraduras de puertas y demás aparecen periódicamente en Internet. En el momento en que escribo estas líneas hay tres modelos de llaves de cerraduras de esposas de alta seguridad disponibles en *Thingiverse*.

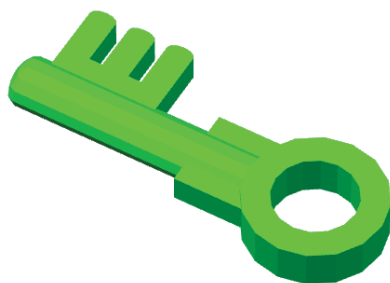


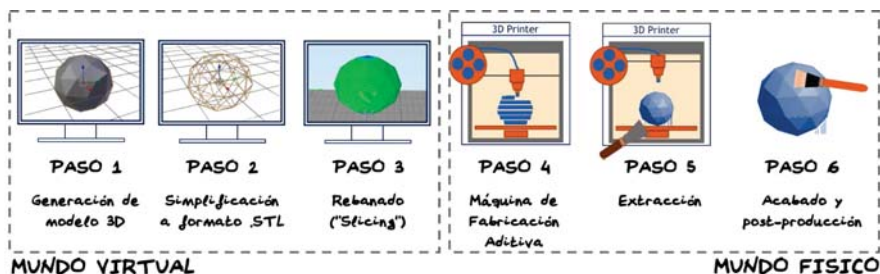
Figura 73: Modelo de una llave Bonowi de alta seguridad descargada de Thingiverse

Como es conocido, los criminales probablemente ya encontraban formas de comprometer la seguridad de una cerradura antes de la invención de la fabricación aditiva. La diferencia ahora es que la impresión 3D les ha facilitado mucho el trabajo; y es de esperar que esta tendencia continúe.

Seguridad de la impresión 3D.

Hablemos ahora de qué posibles problemas de seguridad puede tener la propia impresión 3D.

Recordemos por un momento las fases por las que está compuesta una fabricación aditiva de forma genérica y que vimos en el capítulo 2:



Podemos ver cómo los 3 primeros pasos ocurren únicamente en el mundo digital, mientras que a partir del 4º paso realizamos actividades en el mundo real. Las amenazas en uno u otro caso no son las mismas, pero conviene enumerarlas para ver a qué nuevas amenazas puede enfrentarse una empresa que adopta una estrategia de fabricación por impresión 3D.

Comencemos por el mundo digital:

En primer lugar, como se ha comentado ya varias veces a lo largo de este libro tenemos el problema de la facilidad de **copia**; eso es bueno cuando queremos reutilizar información pública, pero es malo cuando lo que queremos es mantener privado un diseño propietario. Antes las propias tecnologías de fabricación, moldes y demás eran una cierta barrera de entrada ante posibles competidores y falsificadores; con la impresión 3D eso ya no es así.

Tendremos por tanto -si es que nuestra empresa no lo ha hecho ya- que establecer los mecanismos de ciberseguridad que sean necesarios para mantener nuestros diseños 3D seguros. El problema es que tradicionalmente las fábricas tenían el foco puesto en la seguridad física (el acceso de instalaciones, evitar el robo de material sensible, etc...) mientras que la seguridad informática se limitaba a las oficinas de diseño. La fabricación aditiva convierte en digital todo lo que toca, y como tal habrá que gestionarlo.

De forma similar, será necesario mantener y gestionar una política de **propiedad intelectual**. Política que deberá incluir, principalmente, nuestros propios diseños, pero también deberá contemplar cómo asegurar que inadvertidamente no incurrimos en algún problema legal con la propiedad intelectual de otros. Con miles de diseños accesibles en Internet, muchos serán gratis, otros podrán usarse pero no ser modificados y otros muchos no deberían ser usados sin pagar algún tipo de canon; y no siempre será fácil distinguir entre acceso y licencia de uso.

Un punto muy importante a destacar aquí es el hecho de que la fabricación aditiva, siendo mucho más sensible a la seguridad informática que la fabricación tradicional, lo es también a una posible **denegación de servicio**: esto es, que un posible ataque informático literalmente “nos pare la fábrica” al hacernos imposible enviar órdenes de impresión a nuestras máquinas de fabricación. De igual modo que la web pública de la empresa, la infraestructura de comunicaciones dentro de la fábrica se convierte en un elemento crítico que hay que proteger.

Otro aspecto controvertido es el posible **sabotaje**. Está claro que si alguien entra en nuestros sistemas puede sabotear la producción; lo que es interesante destacar aquí no es tanto la posibilidad de ataque como la de hacerlo sin ser detectado hasta que el producto está en manos del cliente. Hasta ahora para que un saboteador hiciera cambios en el producto final tenía que acceder físicamente y además cambiar, romper o modificar moldes o algo físico en la cadena de fabricación. Ahora puede simplemente cambiar las órdenes (típicamente *g-code*) de impresión para generar algo defectuoso.

Como vimos al hablar de los problemas de la fabricación aditiva, la *anisotropía* (el hecho de que el objeto fabricado no tiene las mismas propiedades en todas las direcciones) es algo inherente a muchas tecnologías de impresión 3D. Pues bien, investigadores han determinado que cambios tan sutiles como giros de 3-4° a la hora de imprimir un objeto pueden tener grandes diferencias en las propiedades mecánicas del producto final. Un cambio así resultaría totalmente imperceptible a simple vista y pasaría desapercibido por los operarios, hasta que el producto estuviera en funcionamiento y se rompiera.

En un experimento hecho público, un grupo de investigadores entraron en la red de fabricación y modificaron la fabricación de un dron, introduciendo pequeños defectos de tan sólo 1mm de espesor en la zona de las hélices sin que nadie lo notara, y pasando sin problemas los controles de calidad establecidos. El dron se estrelló tras su puesta en marcha.

Por este tipo de problemas, en el año 2017, un grupo de investigadores del Georgia Institute of Technology y de la Rutgers University presentaron en una ponencia del *USENIX Security Symposium* un modelo para la detección de actividad maliciosa en la impresión 3D (“*See No Evil, Hear No Evil, Feel No Evil, Print No Evil?. Malicious Fill Pattern Detection in Additive Manufacturing*”). Christian Bayens & others. Accesible en <https://www.usenix.org/system/files/conference/usenixsecurity17/sec17-bayens.pdf>.

En su modelo, asumiendo que un atacante tiene acceso al ordenador que controla la impresión (o a la propia impresora, en su *firmware*), el objetivo es determinar si el objeto una vez fabricado ha sido alterado o no. Proponen para ello los siguientes controles al finalizar la impresión:

- Chequeos físicos de fabricación tradicionales, como fortaleza mecánica, inspección visual y similares.
- Análisis de imagen, por espectroscopía o por tomografía.
- Verificación giroscópica: esto es, proponen añadir un giróscopo al cabezal de impresión para verificar que los movimientos son los que deberían haber sido si la impresión es correcta.
- Verificación acústica, esto es, chequear que los sonidos producidos por la impresora son aquellos que debería haber hecho.

Este último control es sorprendente, porque nos indica que los sonidos generados son únicos por cada modelo impreso. Esto a su vez nos

genera un nuevo problema, y es la posibilidad de que alguien copie nuestro diseño sin más que escuchar a nuestra impresora. En un artículo de la Universidad de Búfalo (“*My Smartphone Knows What You Print: Exploring Smartphone-based Side-channel Attacks Against 3D Printers*”. Chen Song, Feng Lin, Zongjie Ba. University of Buffalo. Disponible en <https://www.cse.buffalo.edu/~wenyaoxu/papers/conference/xu-ccs2016.pdf>) los investigadores demuestran que ¡es posible replicar un diseño sin más que haber dejado un teléfono grabando sonidos cercano a la impresora mientras trabaja!.

Por tanto, tenemos en el mundo físico, más allá de los ataques tradicionales (acceso a las máquinas, sabotaje físico, alteraciones de material, robo de componentes, etc...) dos nuevas posibles amenazas: por un lado, el acceso a la impresora que puede modificar el *firmware* (y por tanto, como la impresora reacciona a las órdenes de trabajo, un ataque similar de modificación del producto impreso, e incluso el robo remoto de esas órdenes si la impresora está conectada a la red) y por otro, el robo de diseños por la mera visualización o escucha de la actividad de nuestra impresora en el momento de fabricación.

En definitiva, como consecuencia de todo lo anteriormente expuesto, tendremos que acostumbrarnos a un mundo en el que será mucho más sencillo copiar un diseño novedoso o sabotear a la competencia, y no será una opción mirar hacia otro lado: tendremos que emplear los medios necesarios para protegernos.

MUNDO VIRTUAL

AMENAZAS:

- ROBO DE DISEÑOS / COPIA
- PROPIEDAD INTELECTUAL
- DENEGACIÓN DE SERVICIO
- MODIFICACIÓN DEL PRODUCTO A IMPRIMIR /COMANDOS AL SISTEMA DE IMPRESION -> SABOTAJE (DEFECTOS/ORIENTACION)

MUNDO FISICO

AMENAZAS:

- CAMBIOS NO AUTORIZADOS EN EL FIRMWARE / SOFTWARE CONTROLADOR DE LA IMPRESORA 3D.
- ROBO DE DISEÑOS POR LA ACTIVIDAD DE LA IMPRESORA 3D.

Figura 74: Resumen de amenazas contra la fabricación aditiva



Aspectos legales y éticos

Además de los problemas derivados de la fabricación de objetos prohibidos (tales como armas, llaves y demás) que vimos en el apartado anterior, al adoptar una fabricación mediante impresión 3D nos vemos abocados a un mundo fundamentalmente digital, con los problemas de piratería y copia ilegal que lleva aparejados y desgraciadamente conocemos.

La diferencia fundamental es que hasta ahora la piratería digital estaba centrada en problemas de copyright (copia de música, libros, etc.) por uso sin autorización. En cambio, al copiar ilegalmente diseños en 3D y replicar sin permisos objetos estaremos hablando también de potenciales violaciones de derechos de propiedad industrial, los referidos a patentes y diseños industriales.

Por tanto, en este ámbito de la propiedad industrial, nos podemos encontrar con los siguientes problemas:

- Mala gestión de patentes y diseños industriales: el que una impresora sea capaz de imprimir un objeto no significa que sea legal: piezas, herramientas, etc., registrados bajo una patente sólo pueden ser legalmente fabricados por el propietario de dicha patente. Fabricar por tanto en casa un diseño patentado será ilegal.
- Derechos de imagen: mediante un escáner o copiando modelos ya existente es posible imprimir modelos de personas reales (o ficticias registradas). En este caso, sin el consentimiento de la persona correspondiente, será también ilegal la creación de figuras de personas famosas, artistas, jugadores de fútbol o personas existentes en general.
- Uso indebido de marcas: al igual que en el caso anterior, para imprimir marcas en 3D necesitaremos permiso para ello; la impresión en casa de objetos con la forma de una marca registrada será también algo ilegal.

Y, por supuesto, al igual que otros contenidos digitales con copyright, la propiedad intelectual protegerá los correspondientes derechos y por tanto será ilegal:

- La descarga y almacenamiento de modelos 3D que no estén en el dominio público (y por extensión, su impresión, claro).

- La modificación de un modelo 3D con copyright. El propietario de la propiedad intelectual de un modelo tiene también el derecho de prohibir que se hagan modificaciones al mismo.
- Hacer copias ilimitadas de un modelo, aun cuando se haya pagado por él, a no ser que explícitamente se haya autorizado.

Finalmente, comentar que -al igual que ocurre con las imágenes- está prohibido representar determinados contenidos (por ejemplo, modelos de pornografía infantil) en tres dimensiones.

Por todo lo anterior, es de esperar que la legislación vaya también evolucionando para adaptarse a las nuevas realidades. En paralelo, también la tecnología de gestión digital de modelos lo hará para facilitar la gestión de la propiedad intelectual, por ejemplo con la aparición de sistemas de gestión de derechos digitales (*DRM - Digital Right Management*) específicos para ficheros de modelos 3D a imprimir, que permitan su impresión un número limitado de veces, en la máquina con número de serie X o únicamente sobre ciertos materiales. Ya hay compañías como *Identify 3D* que tienen una plataforma con soluciones para ello. En una iniciativa paralela, se trabaja también en conseguir cómo imprimir objetos que lleven algún tipo de “marca de agua” química que permita identificar que fabricante produjo un objeto, con idea de luchar contra las falsificaciones.

Cuando se hacen encuestas en la industria sobre los factores que más dudas suscitan a la hora de adoptar una solución de fabricación aditiva siempre aparece entre los más destacados la falta de conocimiento en la empresa sobre este tipo de tecnologías.

Además del problema habitual de falta de conocimiento en toda área recién aparecida, en este caso hay un problema generacional, que afecta a la composición actual de la fuerza de trabajo. Por un lado, los hijos del *baby-boom* comienzan a retirarse, pero las generaciones posteriores en general no han tenido interés en encontrar trabajos en la industria de fabricación, sino que se han orientado más hacia los servicios; por otro lado, este tipo de industria no se ha caracterizado en general por una gran inversión en el desarrollo de sus empleados en áreas de nuevas tecnologías como Internet, diseño 3D, etc. En consecuencia, nos encontramos con que hay pocos trabajadores actualmente que tengan un perfil adecuado para que -tras una formación mínima- puedan ocuparse de trabajar con este tipo de maquinaria.

En USA, los expertos (ver por ejemplo, el estudio de Deloitte “*The Skills Gap in U.S. Manufacturing*”) han calculado que la fabricación aditiva requerirá en los próximos 10 años unos 3,5 millones de trabajos, y, sin embargo, esos mismos expertos hablan de que aproximadamente la mitad de esos puestos de trabajo quedarán sin cubrirse por falta de personal adecuado.

Hay que tener en cuenta que, si realmente estamos avanzando hacia la fabricación digital (y deberíamos, si queremos obtener todos los beneficios de la fabricación aditiva), el mero conocimiento de cómo operar una impresora 3D de alta gama no será suficiente. Los trabajadores deberán comprender el proceso completo de fabricación desde el diseño y necesitan controlar detalles con respecto al material a usar, ángulos de impresión, relleno, etc. que serán críticos para una óptima calidad de producto.

Otro problema es la falta de oportunidades de formación adecuada en el área, y la incompatibilidad entre los equipos de los distintos fabricantes. Hay poca oferta, y además la formación adquirida en un fabricante es poco útil para otro, sin contar las múltiples tecnologías existentes. Si a eso le añadimos la percepción negativa que las nuevas generaciones tienen del trabajo en una fábrica, como algo sucio, peligroso y poco atractivo, podemos hacernos una idea del problema.

Sin embargo, a largo plazo, resulta ahora una buena inversión para las empresas que establezcan, desarrollen y conserven una fuerza de trabajo bien formada en fabricación aditiva. Conforme los costes de la tecnología disminuyan y la impresión 3D se expanda, tener esos trabajadores acabará siendo una ventaja competitiva importante.

Por otro lado, afortunadamente, las impresoras 3D forman parte de los planes de formación en muchos colegios y universidades, por lo que a medio plazo la llegada de una nueva generación con los conocimientos adecuados parece garantizada.



Estándares en la Fabricación Aditiva

Como comentábamos al hablar de los problemas de la fabricación aditiva, en un entorno de plena expansión, abierto y cambiante, de múltiples materiales y tecnologías, evolucionando de forma acelerada, y en las que además la repetibilidad es complicada y con productos que sufren de anisotropía resulta muy complicado la existencia de un consenso de estándares.

Sin embargo, al mismo tiempo, los estándares son algo muy necesario, pues permiten asegurar niveles de calidad en la interacción de unas empresas con otras. Evidentemente es un tema muy complejo, en el que las principales áreas dónde se necesitan estándares más urgentemente son:

- Validación y certificación de modelos para su fabricación.
- Estandarización de materiales y tolerancias.
- Estándares de partes producidas con fabricación aditiva.
- Estandarización de testeo de materiales y partes.

Las entidades internacionales que están trabajando en el área son el *International Committee F42 for Additive Manufacturing Technologies* de ASTM (*American Society for Testing and Materials*), establecido en 2009, y el comité *ISO TC 261 Additive manufacturing*, junto con su homólogo europeo *CEN/TC 438 Additive Manufacturing*; entidades éstas que colaboran en elaborar los estándares fundamentales que permitan un rápido desarrollo de la fabricación aditiva. Estos comités están a cargo de la estandarización de todos los procesos de fabricación y prueba, calidad y acuerdos de suministro.

En 2011, ISO y ATSM firmaron un acuerdo de colaboración en el *Partner Standards Developing Organization (PSDO)*, ligando sus comités TC 261 y F42 para trabajar conjuntamente, y en 2016 establecieron un marco de colaboración que garantiza la cohesión entre los estándares de Fabricación Aditiva, evitando la duplicación o superposición de normas, y priorizando las diferentes áreas.

Este marco establece tres niveles de trabajo:

- a) Estándares generales, comunes a todas las tecnologías de fabricación, que cubre elementos como definiciones globales, procedimientos globales, seguridad, etc.

- b) Estándares para grandes categorías de materiales, equipos y productos terminados. Por ejemplo, normas aplicables a trabajos con polvos metálicos.
- c) Estándares para materiales, equipos, procesos y sectores específicos. Por ejemplo, extrusión de materiales con PLA, o aplicaciones aeroespaciales.

De entre los estándares ya disponibles, destaca por ejemplo el *ISO / ASTM52900-15 Standard Terminology for Additive Manufacturing*, que establece y define los términos más comúnmente usados en la fabricación aditiva.



Otro tema que ya se comentó anteriormente es la necesidad de establecer un formato mejorado para los modelos en 3D. El tradicional formato .STL es ya insuficiente puesto que no permite incluir información de aspectos necesarios como colores o materiales. Así, el estándar *ISO / ASTM52915-16 Standard Specification for Additive Manufacturing File Format (AMF)* proporciona un marco para un formato de intercambio que solucione los problemas actuales y futuros. El detalle del formato AMF (su *schema definition* en XML) está disponible en <http://standards.iso.org/iso/52915>.

Finalmente, otro estándar destacable es el *ISO / ASTM52910-17, Standard Guidelines for Design for Additive Manufacturing*, que proporciona guías y mejores prácticas para el diseño de productos que vayan a ser fabricados por metodologías de fabricación aditiva.

Una de las promesas de la fabricación aditiva es precisamente su impacto positivo en el medio ambiente; sus defensores nos hablan de las múltiples ventajas en este aspecto. Analicemos ahora los diferentes factores por los que la impresión 3D tiene un impacto ecológico positivo, pero veamos también sus posibles problemas medioambientales.

Uso de material

Frente a otras tecnologías como el CNC (fabricación sustractiva) la impresión 3D vemos que utiliza menos material, por varios motivos. Por un lado, por mera definición de fabricación aditiva, deberíamos considerar únicamente el material que añadimos, frente a quitar material de un bloque; desgraciadamente en casi todas las tecnologías hay un cierto porcentaje de pérdida, por lo que esto no es tan puro; pero en todo caso sí es mejor que con otros métodos de fabricación, tanto mejor cuanto más complicada sea la geometría del objeto. Por otro lado, tendremos que considerar también la ventaja de poder hacer rellenos no totalmente sólidos (variando el grado de *infill*), lo que no es posible en otras tecnologías. Obviamente, el ahorro dependerá entonces de muchos factores, pero en líneas generales podemos estar hablando de un ahorro del 20-40% en uso de material, con el consiguiente impacto medioambiental.

Pero no sólo eso: un uso menor de material significa un menor transporte de materias primas luego menos contaminación de ese transporte, y un menor inventario/almacenaje, con menos impacto en superficie construida.

Transporte de mercancías

Ya hemos visto cómo la fabricación aditiva permite una optimización de la cadena de suministro en muy distintas posibilidades. Claramente cuanto mayor sea esta optimización menor será el transporte, hasta llegar a una producción en el lugar de consumo que potencialmente

hace cero el transporte, y por tanto cero emisiones y contaminación derivada del mismo. Esta es una de las áreas de mayor potencial medioambiental.

Ahorro en almacenamiento

Relacionado con lo anterior, la optimización de la cadena de suministro lleva aparejada una reducción del stock. Esto significará una menor necesidad de espacio, almacenes más pequeños y fábricas de menor tamaño con un menor impacto en el medio ambiente a su alrededor.

Cuestión de peso

Vimos también que, gracias a las posibilidades de optimización en la geometría que tiene la fabricación aditiva, es posible fabricar objetos que realicen eficientemente las mismas funciones que otros pero con mucho menor peso. Las diferentes opciones de relleno (*infill*) de la impresión 3D prácticamente garantizan que en todos los casos el objeto así fabricado tendrá un peso menor que su homólogo hecho con otras tecnologías.

Y, lógicamente, a menor peso, menor será el consumo de energía para moverlo. La aplicación de la fabricación aditiva en automóviles, aviación, herramientas, trenes, etc. aumentará la eficiencia de todos ellos y por tanto no sólo serán más baratos sino que su contaminación será menor.

Tiradas más cortas

Al fabricar en series de producción con lotes más pequeños, se puede empezar a fabricar casi bajo demanda, reduciéndose en gran medida el número de productos fabricados y no vendidos. Eso implica ahorrar la cantidad de energía y materiales que se habrían empleado en un producto inútil, así como evitar su posterior almacenamiento y reciclaje.

Residuos

En una fabricación aditiva “perfecta” el residuo debería ser cero; pero en la práctica no es así en ninguna, con la posible excepción de la tecnología de DED. En extrusión de materiales los residuos por restos de filamento deberían ser bajos, pero a ellos habrá que sumar los derivados de soportes, que pueden llegar a ser significativos en geometrías complicadas. En otras tecnologías, como las de lecho de polvo, el porcentaje de reutilización del polvo no usado varía con la tecnología o el fabricante, variando entre el 40% y el 80% de reutilización; esto significa que el resto no reutilizado se pierde en forma de residuo. En todo caso, los residuos sí que deberían de ser significativamente menores que en una tecnología sustractiva; en el caso de tecnologías de inyección no tiene por qué ser así.

Reciclaje

Con determinadas tecnologías y materiales existe ya la posibilidad de reciclar los residuos. Por ejemplo, existen recicladoras de ABS capaces de volver a generar un filamento nuevo a partir de los restos de impresiones anteriores.

Se está investigando mucho en el uso de plásticos reciclados como el PET y transformarlos en material de extrusión. Así, en una fábrica de producción mixta se conseguiría al mismo tiempo una fuente barata de material para la impresión y el reciclaje de los desperdicios. La posibilidad de auto-abastecerse de material a partir de la propia basura significaría un ahorro increíble en CO₂.

Además de fabricarse PLA a partir del almidón de maíz, también se ha conseguido hacerlo de otros materiales como algas o incluso conchas marinas, lo que permitiría el reciclaje de desechos de esta naturaleza en restaurantes.

Reduciendo la obsolescencia

La impresión 3D permite la obtención barata y ágil de piezas de repuesto que estén ya obsoletas. Esto a su vez podrá hacer que los aparatos duren más y por tanto disminuya el desperdicio de tirarlo y comprar uno nuevo.

Y todo ello, sin necesidad de almacenar dichas piezas de repuesto, como hasta ahora.

Todos los puntos anteriores suponen por tanto ventajas para la fabricación aditiva desde el punto de vista medioambiental. Sin embargo, también hay algunos problemas que estas nuevas tecnologías deben solucionar:

Consumo de Energía

Las investigaciones en el área continúan: nuevos avances aparecen mes a mes, pero hoy por hoy el coste de energía de producir un objeto mediante fabricación aditiva frente a otras técnicas más consolidadas es mucho mayor.

Lógicamente, varía de unas tecnologías a otras. Diversos estudios para la fabricación de metales hablan de entre el 75% y el 160% adicional de consumo de energía si usamos una impresión 3D. Para plásticos (siempre comparando el coste energético por pieza pero imprimiendo un lote completo) es de un 60-80% mayor en el caso de la extrusión. Un estudio del MIT no obstante apreciaba un consumo energético mucho mayor cuando se empleaba un láser para calentar material plástico. Obviamente es mucho más efectivo, no obstante, para un bajo número de objetos fabricados.

Materiales

No todos los materiales empleados en la fabricación aditiva son reciclables. Es más, en la actualidad los materiales plásticos y sus derivados son los más empleados, por lo que hay una gran dependencia de los combustibles fósiles.

Muchos de los objetos fabricados no son por tanto fácilmente reciclables o lo son únicamente en circunstancias muy controladas.

Otro aspecto es el hecho de que la impresión 3D en casi todas sus tecnologías emite partículas, las denominadas partículas ultra finas (de un tamaño inferior a 100 nm de diámetro), que potencialmente pueden depositarse en las vías respiratorias. Pero no hay que alarmarse: los niveles medidos en una impresora de sobremesa son inferiores a los niveles de partículas similares generadas al cocinar.

Es cierto también que materiales muy usados como el ABS, al alcanzar la temperatura de fusión emiten gases nocivos como cianuro de hidrógeno y dióxido de carbono, pero en cantidades muy pequeñas; basta con asegurar una buena ventilación en la habitación en la que esté la impresora para solucionar el problema.

Los conocidos como bio-materiales son mucho más respetuosos con el medio ambiente, por lo que es de esperar que según lleguen nuevos avances tecnológicos que además reduzcan el consumo energético la ventaja de la fabricación aditiva sea aún mayor.

¿4D?

¿Cuatro dimensiones? No en el espacio en el que vivimos, en el que los seres humanos sólo percibimos 3 dimensiones espaciales, pero como popularizó Einstein, el tiempo es considerado como la cuarta dimensión.

Pues bien, la impresión 4D es una iniciativa para conseguir hacer a la fabricación aditiva incluso más atractiva de lo que ya es, mediante la creación de objetos que pueden transformar su estructura en una forma conocida en respuesta a un estímulo, o simplemente por el paso del tiempo.

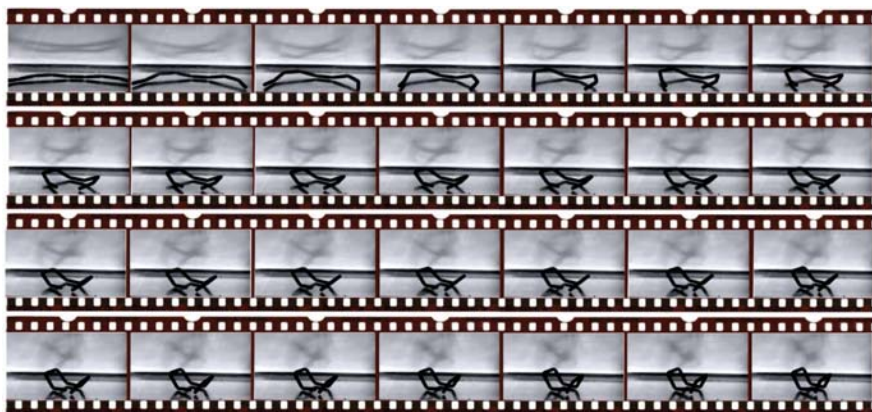


Figura 75: Un fotopolímero reaccionando y cambiando su forma al ser introducido en agua
By Matthew Young (<https://all3dp.com/4d-printing/>) [CC BY 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)], via Wikimedia Commons

¿Para qué puede servir esto? Por ejemplo, imagine una estructura plana en dos dimensiones (y por tanto fácilmente transportable apilada una sobre otra) que toma su forma definitiva al añadirle agua; esto permitiría unos costes de almacenaje mucho menores hasta el momento en que fuera necesario su uso. Otro ejemplo podría ser una estructura que sea capaz de envolver un objeto, adoptando la forma definitiva de éste, como mecanismo para su protección.

La capacidad de hacer algo así está basada en las prácticamente infinitas combinaciones que tiene la materia a nivel molecular, siendo posible crear sólidos con distribuciones espaciales diseñadas a propósito para reaccionar en la forma buscada. Se habla así de

“*materia programable*”. Otros nombres por los que se conoce la impresión en cuatro dimensiones son *origami activo* o sistemas de cambio de forma. El origami, para aquellos que no estén familiarizados con el término, viene de las palabras japonesas oru (doblar) y kami (papel), y es el nombre con el que se conoce popularmente a la papiroflexia en el mundo. Activo, porque se consigue doblar un material hasta adquirir una forma perseguida, tal y como hace el origami para hacer una figura de papel.

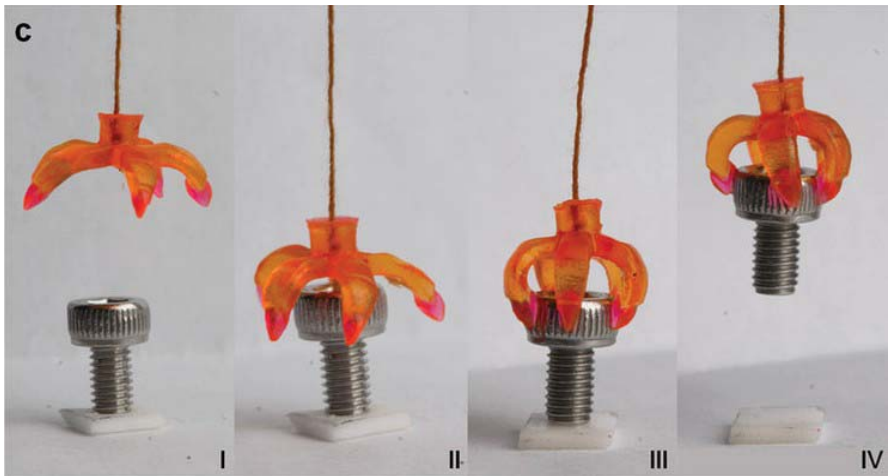
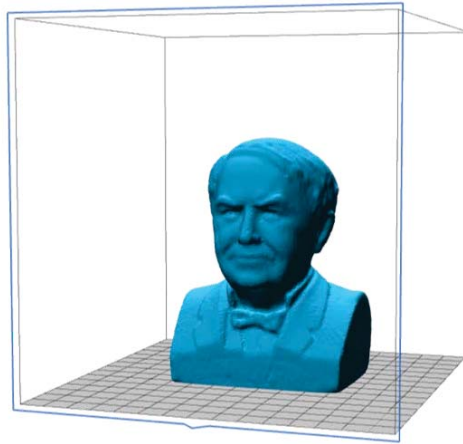


Figura 76: Una pinza fabricada de forma que es capaz de agarrar un objeto como respuesta a la temperatura a la que se la somete. By Qi Ge, Amir Hosein Sakhaei, Howon Lee, Conner K. Dunn, Nicholas X. Fang & Martin L. Dunn [CC BY 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)], via Wikimedia Commons

Estamos ahora mismo en una fase embrionaria de la impresión 4D, que ha surgido precisamente del aumento de la precisión en la impresión 3D hasta llegar a niveles moleculares, pero hay ya muchas ideas sobre el tema que podrán cambiar nuestro futuro en un plazo no muy lejano. Por ejemplo, se habla de materiales sanitarios auto-deformables que podrían implantarse en el cuerpo humano y cambiar en caso de necesidad, como una arteria artificial que cambiase en caso de una cirugía. O de calzado o neumáticos que podrían adaptar su superficie en función de las condiciones externas de humedad para mejorar el agarre al suelo. Las posibilidades son inmensas.

Evaluación para la adopción de Fabricación Aditiva

¿Qué factores deberíamos considerar para comenzar la aventura de una fabricación aditiva a nivel empresarial? El objetivo de este capítulo es establecer un marco de análisis que nos permita evaluar la idoneidad de que una empresa adopte o no soluciones de fabricación aditiva, así como determinar la mejor manera de ponerse en marcha.



“El fin de todo trabajo es producir o lograr algo, y para cualquiera de esos fines debe existir la previsión, un sistema, la planificación, la inteligencia y el propósito honesto.”

Thomas Edison

Algunas preguntas previas a hacerse

Antes de comenzar el viaje de la impresión 3D desde el punto de vista empresarial, sería bueno establecer con claridad cada entorno concreto. Para ello, tendríamos que responder de forma global a algunas cuestiones que son aplicables a la práctica totalidad de las empresas ante una decisión de cambio:

- ¿Dónde está realmente el valor de mi compañía? Puede ser una pregunta genérica, pero tiene mucho calado. En el fondo, se trata de responder honestamente a la pregunta de por qué los clientes nos compran a nosotros y no a la competencia. ¿Es diferencial nuestro producto? ¿Nuestro precio? ¿El servicio de soporte? ¿La proximidad al cliente? Debemos tener claro cuál es el tesoro que deberíamos proteger, no vaya a ser que al intentar cambiar lo perdamos.
 - Como colofón de la pregunta anterior, ¿Cómo puedo maximizar ese valor?
 - ¿Qué elementos de cambio / disrupción veo para los próximos 2-5-10 años en el sector?
 - ¿Cómo está de avanzada la revolución por transformación digital en mi sector? ¿y en mi empresa?
 - ¿Cuáles son las capacidades en términos de conocimiento, experiencia, interés, etc. de mi fuerza laboral?
- ¿Cuál es mi capacidad de inversión?

De todo lo anterior tendremos una primera visión global o no de hasta qué punto debemos cambiar y con qué urgencia, en términos globales.

¿Sí o no?

Continuemos por decidir si deberíamos o no adoptar una solución de Fabricación Aditiva.

Ya hemos visto las diferentes curvas de coste y su relación con las distintas tecnologías de fabricación. Las curvas nos dan claramente, como vimos en el capítulo anterior, cuatro motivaciones para adoptar la impresión 3D: La posibilidad de tiradas cortas de fabricación, la personalización del producto, el acceso a geometrías complejas y las mejoras en la cadena de suministro. Hay otros factores relacionados con éstos que también pueden ser importantes como *drivers* para comenzar a dar el paso; entre ellos podemos considerar:

- El nivel de rapidez del mercado: en un mercado volátil, el ser capaz de responder rápidamente a los cambios es importante. En la medida en que nuestro mercado necesite el rápido desarrollo de nuevos productos aplicará más adoptar una solución de prototipado rápido que sólo la impresión 3D puede proporcionar.
- Hasta qué punto nuestro sector está ya siendo impactado por la transformación digital. Ya hemos visto que la fabricación aditiva está íntimamente ligada con la digitalización de nuestra empresa. Si el sector ya está avanzando en este sentido, será un motivo más para la adopción de la impresión 3D.
- Si nuestra producción tiene problemas de sostenibilidad medio-ambiental: la impresión 3D, como ya se ha comentado, no soluciona todos los problemas; pero es indudable que su impacto en el medio ambiente es mejor que muchas otras alternativas de fabricación. El decantarnos por esta opción puede ayudar a resolver problemas de impacto en el medio ambiente además de mejorar nuestra imagen en el mercado como empresa moderna y responsable.
- La situación y formación de nuestra fuerza laboral. Si los recursos humanos de la empresa ya tienen experiencia y formación en el mundo digital, adoptar una solución de impresión 3D será por un lado más sencillo y por el otro ayudará a integrar la fase de fabricación entre todos los departamentos de la empresa. Por el contrario, si nuestros empleados tienen una capacitación más

tradicional será más complicado la puesta en marcha de la impresión 3D.

- El coste de nuestro producto actual. Obviamente, dependerá de los detalles específicos en cada caso, pero podemos ver algunas tendencias generales: si nuestro producto es muy barato, es muy probable que sea el resultado de años de optimización en la producción y la cadena de suministro; difícilmente seremos capaces de mantener esos precios con la actual tecnología de impresión 3D. En el caso contrario, si nuestro producto es de alto precio, será necesario evaluar la causa raíz: si, por ejemplo, es fruto de la necesidad de ensamblaje de múltiples partes que podrían eliminarse mediante la impresión 3D puede ser una oportunidad. Sin embargo, en general, un alto precio viene dado por un producto muy complejo que será complicado de transformar en su totalidad introduciendo la fabricación aditiva; será en principio más factible introducir las nuevas tecnologías de fabricación en alguna fase del proceso o hacerlo en aquellos casos en los que el coste del producto es de nivel medio.
- El tamaño de nuestro producto. Hay bastantes tecnologías de impresión 3D que están limitadas en su tamaño máximo por la capacidad de una cámara/cama de la impresora, por lo que en general hoy por hoy no es una opción recomendable para productos de gran tamaño. Por otro lado, los datos empíricos demuestran que la fabricación aditiva se vuelve menos efectiva cuanto mayor es el tamaño del objeto a fabricar: el tiempo de impresión de muchas capas se vuelve más y más relevante, al mismo tiempo que se hace más difícil el fabricar varios objetos en paralelo en la misma impresión por la limitación de espacio.

En el siguiente cuadro podemos ver un resumen de las principales razones para dar el Sí a la fabricación aditiva en nuestra empresa:

Variable	Bajo	Medio	Alto
Volumen (Nº Unidades)	***	*	
Coste de transporte vs Coste Total / Complejidad de la cadena de suministro			***
Nivel de personalización del producto		*	***
Costes de producto		**	*
Nivel de rapidez del mercado		*	***
Complejidad del producto (Geometría)		*	***
Tamaño del producto	**	**	
Nivel de transformación digital del sector			***
Preparación de la fuerza laboral al mundo digital		*	***
Problemática de impacto medio-ambiental			***

*** *Muy alta recomendación para la introducción de impresión 3D*

** *Alta recomendación para la introducción de impresión 3D*

* *Recomendación media para la introducción de impresión 3D*

En su estudio de 2017, “*State of 3D Printing*”, la empresa de servicios de impresión 3D *Sculpteo* preguntaba a los entrevistados cuáles eran las razones que les habían llevado a adoptar una solución de fabricación aditiva. En definitiva, por qué le habían dado el Sí a la impresión 3D. Este fue el resultado de las más populares:

- Por acelerar el desarrollo de producto, 28%.
- Por ofrecer productos personalizados a los clientes, 16%
- Por aumentar la flexibilidad de la producción, 13%
- Por posibilitar la co-creación y la innovación, 9%.

Se ve claro que la velocidad, tanto en prototipado como en adaptarse a los cambios es una de las claves para la mayoría. La personalización y posibilidades de diseño la otra. Por otro lado, es significativo que otras opciones asociadas con la reducción de costes y la optimización

de la cadena de suministros (gestión de suministros, optimización de gastos de demos, etc...) están aún lejos de los puestos de cabeza.

Por el contrario, en un estudio de la consultora PwC se les pregunta por las principales barreras percibidas, los motivos para el NO. El "top-3" de las razones eran:

- Incertidumbre con respecto a la calidad del producto final.
- Falta de experiencia y conocimiento dentro de la compañía / difícil de reclutar.
- Las máquinas industriales de fabricación aditiva son demasiado caras.

De las tres razones, dos de ellas van mejorando al mismo tiempo que evoluciona la tecnología de impresión y se afianzan los estándares de fabricación, pudiendo consolidar un buen producto, repetible y con un coste razonable.

Y es que, al final, se espera que el factor más limitativo sea precisamente el factor humano.

Análisis de costes en la fabricación aditiva

Para la evaluación de los costes de adoptar un modelo de fabricación mediante impresión 3D, deberíamos considerar los siguientes apartados:

a) **Costes de material.**

Obviamente varía de una tecnología a otra, pero aunque la fabricación aditiva usa menos cantidad de material que otras tecnologías, hoy por hoy el coste en bruto es mayor porque se trata de materiales más preparados y con menor demanda; se trata de resinas, metales en polvo, etc. que tienen que tener unas características determinadas para asegurar la óptima impresión. Para la correcta estimación del coste de material que emplearemos deberemos considerar:

- El tamaño medio del objeto a fabricar.
- La densidad / relleno (*infill*) de impresión media.

- La eficiencia de uso de la tecnología empleada y su porcentaje de residuos.
- Costes de capital / amortización de la maquinaria.

Posiblemente será inicialmente nuestro coste más significativo, por lo que en muchos casos será recomendable comenzar nuestra andadura en la impresión 3D con tecnologías más baratas o buscando un tercero de confianza que lo haga por nosotros (ver el siguiente apartado con respecto a la posible externalización). Según el *Wohlers Report*, informe de referencia en el sector de la impresión 3D, el precio medio de una impresora 3D industrial era en 2017 de 104.222 dólares; pero la horquilla de opciones es realmente muy amplia: desde los pocos miles (o incluso menos, si comenzamos con una batería de impresoras de sobremesa) hasta los más de 300.000 para los sistemas más avanzados.

b) Costes de mano de obra.

Se estiman entre un 2 y un 3% del coste total el coste del operario de la máquina, aunque lógicamente será muy variable en función del tiempo dedicado a esta función (si es exclusivo o no), la formación en otras tecnologías, etc.

c) Costes energéticos, dependientes de la especificación del fabricante y de los volúmenes a fabricar.

Tenga en cuenta que, según algunos autores, el distinto ángulo de orientación del objeto a imprimir puede resultar en cambios de hasta el 160% en la energía consumida.

d) Costes de transporte, a evaluar en función de la cadena de suministro existente, nueva o transformada que queramos implantar. Como se ya se vio en el capítulo dedicado en exclusiva a la cadena de suministro, puede suponer un ahorro significativo frente a los métodos de producción actuales.

e) Porcentajes estimados de sobre-producción / sobre-trabajo derivados de una incorrecta evaluación de la demanda.

f) Costes de repetición por defectos o problemas, claramente ligados con la complejidad media de la pieza fabricada. A mayor complejidad geométrica y mayores requerimientos de precisión, mayor será el porcentaje de fallos, especialmente si hay una gran variabilidad de productos. Es de esperar que el porcentaje de fallos sea alto al principio pero disminuya con una curva de aprendizaje de los operarios.

- g) **Costes de pre-proceso y de post-proceso**, también totalmente dependientes de la tecnología(s) seleccionadas y de la calidad de producto final necesaria.
- h) **Costes derivados de la espera** entre las distintas fases de proceso, incluyendo posibles fases de producción desatendida.
- i) **Costes derivados de ineficiencias**, por no emplear en su totalidad la capacidad de la cámara de fabricación. Utilizar o no la capacidad total de una máquina de fabricación aditiva puede cambiar el coste por unidad de una forma muy significativa.
- j) **Costes de inventario.**
- k) **Costes de etiquetado y/o envasado.**
- l) **Otros costes**, como pueden ser costes de formación, software, infraestructura digital, nuevas necesidades de espacio en planta, seguros, costes de terceros, etc.

Por otro lado, frente a estos costes, habrá que considerar unos ingresos posiblemente mayores por:

- Mayor precio (por un mejor producto, con una vida útil extendida, etc.)
- Mayores ventas (más clientes, más canales, negocios alternativos -por ejemplo, venta de repuestos o incluso modelos 3D-, etc.)

Externalizar o no

A la hora de decidir si externalizamos o no nuestra fabricación aditiva a un tercero, deberemos considerar una serie de factores:

a) El puro volumen y calidad del producto a fabricar.

Resulta obvio que si queremos fabricar muy pequeñas cantidades y además con un alto nivel de calidad o variando los materiales de fabricación, será difícil justificar la inversión en la maquinaria de impresión 3D propia necesaria. Por otro lado, si estimamos un número de piezas considerable al mes (mayor de 250, por ejemplo), con una complejidad alta y siempre con el mismo material (por ejemplo, metal), si compensará dicha inversión.

Si el nivel de calidad exigido no es alto y requerimos un número medio-alto de piezas, especialmente si varía mucho de mes a mes, es muy posible que nos interese hacer la inversión en una serie de pequeñas impresoras 3D de sobremesa, que nos den esa flexibilidad requerida. Posiblemente, será interesante además complementar esta opción con el uso de un servicio de impresión externo por si en algún caso puntual necesitamos más calidad.

Finalmente, si el volumen es bajo, y especialmente si necesitamos un muy buen terminado de fabricación, la opción más aconsejable será la de un servicio de impresión externo.



Figura 77: Opciones recomendadas de acceso a la impresión 3D en función del volumen y calidad del producto a fabricar.

b) Por la naturaleza del producto a fabricar.

- Prototipos funcionales. Si su número es bajo, y podemos garantizar una confidencialidad del diseño 3D con el partner o nuestro diseño no es de muy alto valor, podemos plantearnos externalizar su fabricación. Eso sí, tenga en cuenta que –obviamente– el tiempo en el que se tendrá este prototipo no será inmediato (dependiendo del servicio de impresión 3D, podríamos hablar de 1 ó 2 semanas), por lo que si el mercado nos pide re-diseños permanentes y rápidos será mejor la impresión *in-house*.

- Modelos de prueba de concepto / demos. Típicamente nos interesará una alta calidad, por lo que son los candidatos perfectos a externalizar: un diseño conocido en el mercado (no hay mucho riesgo de copia) y queremos un perfecto lo más acabado posible, muy probablemente multi-color o multi-material.

- Repuestos y Reparaciones. Aplicará aquí el volumen de los mismos y la velocidad en que se necesiten. Una buena opción puede ser reducir el stock de repuestos e ir reponiendo con un servicio externo de impresión.

- Partes y producto final. En principio no parece la mejor opción a externalizar, por cuanto afectará a nuestro proceso clave de fabricación; puede plantearse para líneas de bajo volumen como un primer acercamiento a la impresión 3D sin hacer la inversión, o bien en productos que exijan un alto nivel de personalización pero no sean realmente claves para la compañía.

En general, como en cualquier proceso de externalización, no deberíamos externalizar nuestro “tesoro”, aquello por lo que somos reconocidos en el mercado.

c) Si intentamos o no transformarnos hacia una fabricación digital.

No podremos aprovecharnos de las ventajas de una digitalización ágil y completa si externalizamos el servicio. La ventaja de una fabricación digital es precisamente la ambivalencia entre el objeto digital y el real por la facilidad de pasar de uno a otro. Si externalizamos la función, como ya se ha comentado, los retrasos serán importantes, perdiéndose toda la agilidad que suele ser una de las claves para la adopción digital.

Algunos autores hablan de diferentes niveles de externalización de la fabricación aditiva, de menor a mayor valor, según estemos externalizando:

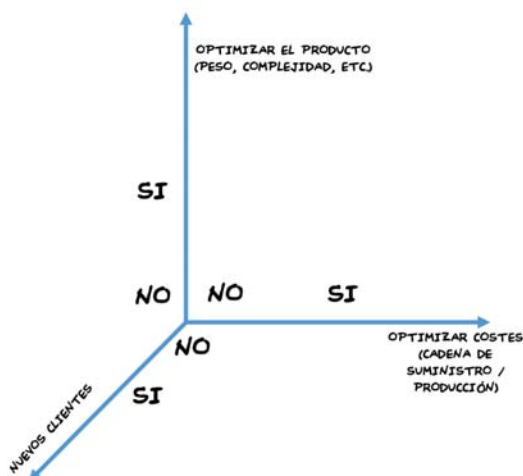
- A nivel técnico (simplemente porque no tenemos el conocimiento / capacidad en la casa).
- A nivel económico (costes) porque es más rentable hacerlo así.
- Por optimización del producto (posibilidades de rediseño más ágiles).
- Por cambios en el portfolio.

En todos los casos tendremos que analizar por tanto las ventajas e inconvenientes, pero sobre todo el riesgo que adquirimos por externalizar esta tarea.

Un posible modelo de referencia

Puesto que una vez que comencemos a adoptar una fabricación aditiva nos encontraremos en mayor o menor medida con todos los factores mencionados anteriormente como razones para el SÍ, tan importante como decidir si seguimos adelante o no será el cómo hacerlo.

Para facilitar el análisis, propongo un marco de referencia en el que voy a considerar 3 ejes de posibles estrategias de mejora:

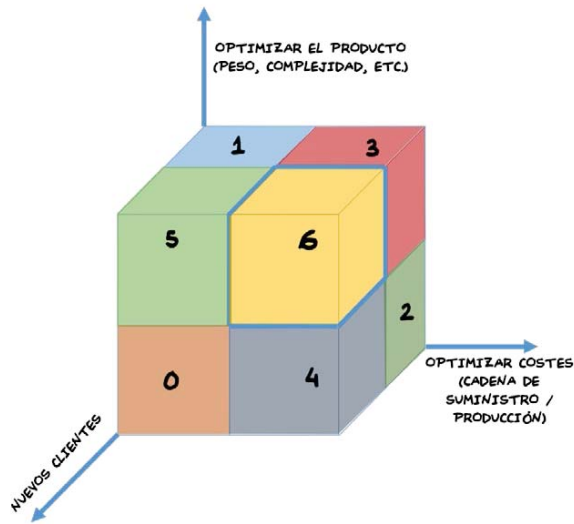


Por un lado, en el eje X, pondremos la opción de emplear la fabricación aditiva como una palanca para optimizar nuestros costes, bien sea por cambios en la cadena de suministro, bien sea porque nuestros costes directos de fabricación son mejores debido a esta tecnología.

En el eje Y pondremos la opción de optimizar o mejorar nuestro producto en alguna de sus características finales.

Finalmente en el eje Z pondremos si nuestra intención es la de acceder a nuevos mercados, o por el contrario planeamos continuar con los clientes actuales.

Si combinamos las tres variables, obtenemos ocho posibles cuadrantes, de los cuales únicamente nos van a interesar seis:



Zona 0: Donde nos movemos actualmente (el cuadrante que no se ve o sencillamente tratamos de adquirir nuevos clientes por otros procedimientos que no tienen nada que ver con la fabricación aditiva.)

Zona 1: Empleamos la fabricación aditiva para “simplemente” mejorar un producto que ya tenemos. Hacerlo más ligero, más atractivo, etc. En definitiva, añadirle alguna propiedad que ahora no posee.

Zona 2: Vamos a emplear impresión 3D para hacer el mismo o similar producto que hasta ahora pero de forma más económica. Típicamente, planeamos reducir nuestra cadena de suministro: por ejemplo, hacer nosotros mismos las piezas que antes comprábamos fuera.

Probablemente tratamos de reducir fases de ensamblaje o similar. Otra opción es que nuestras tiradas de producción fueran tan cortas que la fabricación aditiva proporciona ahorros directos.

Zona 3: Planeamos mejorar el producto y al mismo tiempo mejorar sus costes.

Zona 4: Nuestras mejoras en coste parece que nos llevan a poder competir en mercados donde no estábamos.

Zona 5: Buscamos nuevo cliente al que queremos acceder a través de un producto novedoso.

Zona 6: Completa transformación de nuestros productos y cadena de valor.

A continuación veamos los factores críticos de éxito en cada uno de los casos.

Zona 0: Donde nos movemos actualmente.

Aunque no tengamos el plan de adoptar la impresión 3D en el corto plazo, sí que podemos plantearnos hacer los primeros pasos con el objetivo de empezar a comprender la nueva tecnología, aunque sea sin mayor objetivo que a lo mejor ir aprendiendo nuevas técnicas, acceso al prototipado rápido, modelos de primeros diseños o temas similares.

Una buena idea puede ser contactar con alguna empresa local cercana que tenga capacidades de fabricación aditiva y subcontratarles algunos modelos de productos futuros para demos o expositores; de esta forma también nuestros equipos irán acostumbrándose a esta tecnología y a sus aplicaciones.

Zona 1: Empleamos la fabricación aditiva para mejorar un producto que ya tenemos.

Dentro de esta zona, podemos encontrarnos aquí por diferentes razones:

- a) Por producir un prototipo rápido que nos ayude a acortar el proceso de diseño.
- b) Por ser capaces de hacer nuevos productos de una forma más rápida, adaptándonos a las demandas del mercado. La velocidad de cambio de nuestro producto es la clave.
- c) Por la demanda de personalización de nuestro producto a unas demandas muy cambiantes en función del cliente.
- d) Por conseguir un producto similar al actual pero con alguna propiedad que ahora no posee. Por ejemplo, más ligero por no fabricarlo completamente sólido.
- e) Por hacer un producto más complejo, con una nueva geometría hasta ahora inaccesible, y que por ello tiene mejores propiedades.

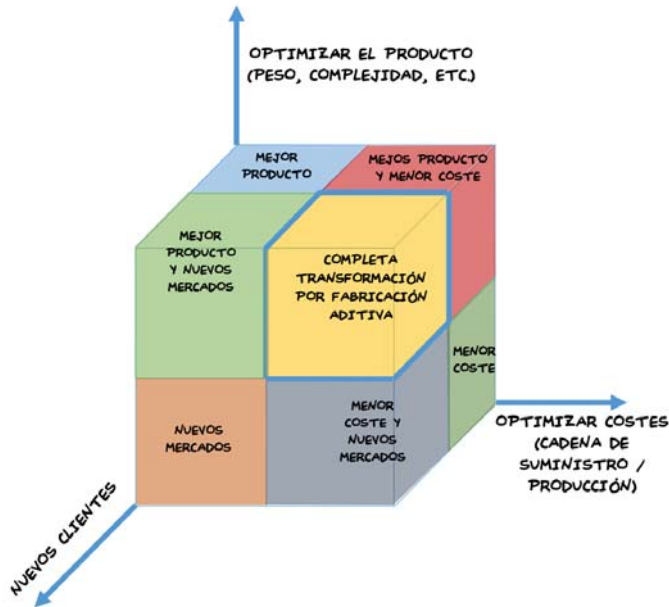


Figura 78: Modelo de referencia para el estudio de la adopción de la fabricación aditiva.

En definitiva, se trata de formas de ir creciendo en el eje Y, con diferentes niveles de profundidad que van desde ir aprendiendo esta nueva tecnología sin mucho riesgo (a), tener mejores herramientas pero sin abandonar los productos en marcha (b y c), hasta tener una mayor funcionalidad de producto (d y e).

Cuanto más nos desplazemos por el eje Y hacia arriba, mayor será nuestra dependencia de la nueva tecnología de fabricación y más crítico será haber escogido una opción correcta. En las primeras fases será más posible simplemente externalizar la fabricación, pero no lo será tanto para productos más complejos que suponen realmente nuestra diferenciación en el mercado.

Puntos críticos a cuidar en esta zona son tener un departamento de diseño capaz de desarrollar productos óptimos para la fabricación aditiva, y ser capaces de seleccionar y operar las nuevas máquinas de impresión 3D.

Zona 2: Vamos a emplear la fabricación aditiva para hacer lo mismo pero de forma más económica.

Puesto que, salvo que estemos hablando de tiradas muy cortas, en general los costes directos de fabricación serán mayores en la

fabricación aditiva que con la tecnología actual, tendremos que considerar los posibles elementos de ahorro que justifiquen ir por este camino:

- Reducción del tiempo de ensamblado (con la impresión 3D fabricamos varias piezas ya ensambladas a la vez).
- Reducción del tiempo de control de calidad (por reducción del número de pasos).
- Reducción tiempo de rediseño.
- Reducción tiempo de pruebas.
- Ahorro de costes de personal (por eliminar fases y sustituirlas por fabricación desatendida).
- Ahorro costes de pre y post-procesado.
- Ahorro de materiales (por menor grado de relleno).
- Ahorro por menores residuos.
- Mejor gestión de la demanda (reducción de la sobre-producción).
- Reducción de inventario.
- Acortar la cadena de suministro (por ejemplo, por suministros más baratos).

En cualquier caso, creo que todos los elementos de ahorro de la Zona 2 aquí mencionados deberían ser siempre valorados. Podemos estar seguros de que si alguno de los elementos mencionados tiene un ahorro importante por introducir la fabricación aditiva, más pronto que tarde nuestra competencia lo hará.

Debemos no obstante tener claro que si nuestros ahorros vienen por cambios en la cadena de suministro/reducción de inventario, puesto que no estamos direccionando a nuevos clientes sino a nuestros clientes habituales, eso tendrá un impacto en nuestros colaboradores actuales. ¿En qué medida vamos a reducir el volumen de negocio de nuestro suministrador o de nuestro canal de ventas? ¿Cómo reaccionarán? ¿Tienen alternativas? ¿Dependemos aún de ellos para otras líneas de producto? Antes de hacer cambios drásticos en nuestra cadena de suministro tendremos que ver las respuestas a estas preguntas y a otras similares relacionadas con nuestra cadena actual.

Puntos críticos a cuidar en esta zona son por tanto garantizar que podemos cambiar el método de fabricación si sufrir ningún tipo de problema en el nivel de calidad al que nuestros clientes están actualmente acostumbrados, y por otro asegurar que no creamos un problema en nuestra cadena de suministro, regalando clientes o suministros baratos a nuestros competidores.

Zona 3: Planeamos mejorar el producto y al mismo tiempo mejorar sus costes.

En esta zona nos estamos planteando opciones como “dar más por menos”, que nos permitiría ser mucho más agresivos que nuestros competidores o defendernos de ellos. En principio puede parecer difícil que una estrategia así se limite a nuestros clientes actuales, pero estamos hablando en cualquier caso de –sean clientes nuestros o no– del mercado tradicional al que nos hemos dirigido de forma natural hasta ahora. Por tanto, esta opción llevará aparejada las mismas preguntas que en los casos 1 y 2, pero además tenemos que estar seguros de que realmente los ahorros nos van a permitir una aproximación agresiva de precios o no. En general, puesto que estamos ya ofreciendo mejoras de producto, suele ser más prudente mantener los precios y esperar a consolidar los prometidos ahorros de la impresión 3D antes de lanzarnos a una campaña más agresiva, salvo que no tengamos otra opción por presión competitiva.

Zona 4: Nuestras mejoras en coste nos llevan a poder competir en mercados donde no estábamos.

Se trata de una aproximación cuando menos peligrosa, que no parece la más recomendable como primera opción: queremos entrar en nuevos clientes por precio a base de las mejoras en la producción y la cadena de suministro.

Salvo que realmente la optimización en la cadena sea muy apreciable, sólo tendrá sentido esta opción si nuestros productos son susceptibles de una aproximación de “*mass customization*”, es decir la personalización/adaptación al individuo nos llevará a llegar a muchos más clientes, o bien nuestra transformación de la cadena de suministro nos hará llegar a muchos más canales.

De otra forma, es muy posible que al intentar entrar en nuevos clientes, reduzcamos el precio y de una forma u otra provoquemos una canibalización del negocio actual, reduciendo nuestros márgenes.

Zona 5: Buscamos nuevo cliente por un producto novedoso.

En esta área estamos realmente planteándonos emplear las posibilidades de la fabricación aditiva por cuanto buscamos un producto que hasta ahora no podíamos producir, y ello nos lleva a nuevos mercados.

Tendremos que ver los mismos puntos que para la zona 1, pero la diferencia fundamental con la zona 1 y la 3 es que, al direccionar nuevos clientes, para bien o para mal, tenemos un cierto grado de libertad de acción. Posibles errores que cometamos no nos penalizarán tanto, puesto que no deberían afectar directamente a nuestros clientes actuales; puede ser por tanto una buena opción para experimentar con las nuevas tecnologías de fabricación con un riesgo más limitado que por otros caminos.

Al mismo tiempo, como cualquier experto en marketing nos hará recordar, es siempre más difícil conseguir un nuevo cliente que vender algo nuevo a nuestro cliente habitual. Por tanto, tenemos que estar realmente seguros de que las nuevas características que añadimos a nuestro producto son realmente diferenciales como para hacerlo atractivo a un cliente desconocido hasta ahora.

Si estamos hablando además de muy bajos tamaños de lote, recordemos asimismo que esto también añade más poder al cliente, en el fenómeno conocido como el “*customer empowerment*”, que habrá que manejar. Estamos entonces en un escenario de alta personalización y por tanto alta exigencia por parte del cliente.

Zona 6: Completa transformación de nuestros productos y cadena de valor, dirigiéndonos a un nuevo mercado.

Es obviamente la opción más agresiva, y por tanto la de más riesgo pero también con mejores potenciales resultados. Se trata en definitiva de un nuevo modelo de negocio, por lo que recomendaría ir allí realmente con un planteamiento tal y como si fuera una nueva empresa. Eso nos puede permitir intentar lanzar nuevas líneas de producto intentando realmente aproximarnos a lo que sería una estrategia de fabricación digital, con todo lo que ello supone.

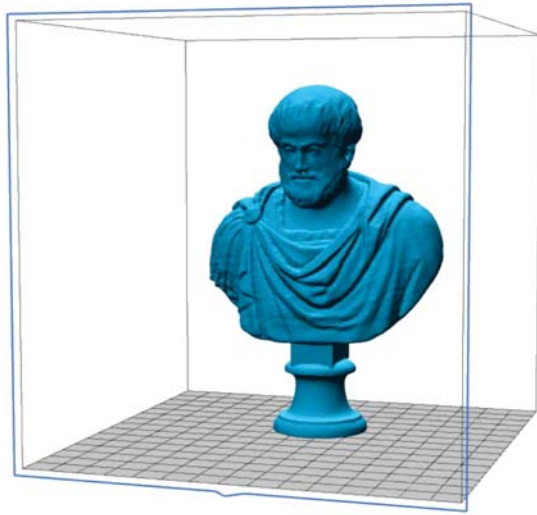
Será por tanto la ocasión de organizar un proceso completamente virtual extremo a extremo, que permita a los diseñadores y a marketing ver los resultados del proceso antes de invertir dinero en la fabricación, con todos los implicados participando en un diseño muy ágil.

Lógicamente, es un modelo de trabajo que requiere una inversión para hacerlo, pero –sobre todo- requiere de unas capacidades y de unas actitudes muy diferentes al negocio habitual, por lo que habrá que calibrar muy bien la capacidad de acometer una iniciativa así.

Principales tecnologías

La Fabricación Aditiva agrupa actualmente a múltiples tecnologías diferentes, cada una de ellas con sus propias características diferenciales, sus ventajas, sus inconvenientes y su ámbito de aplicación. Conocerlas es necesario para seleccionar la mejor opción para cada necesidad, sabiendo porqué algunos diseños pueden ser óptimos en algunas tecnologías y materiales pero no en otros.

El mero hecho de la existencia de tantas opciones diferentes nos debería indicar que ninguna de ellas es perfecta.



“La inteligencia consiste no sólo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica.”

Aristóteles



Tipos de Tecnologías de Fabricación Aditiva

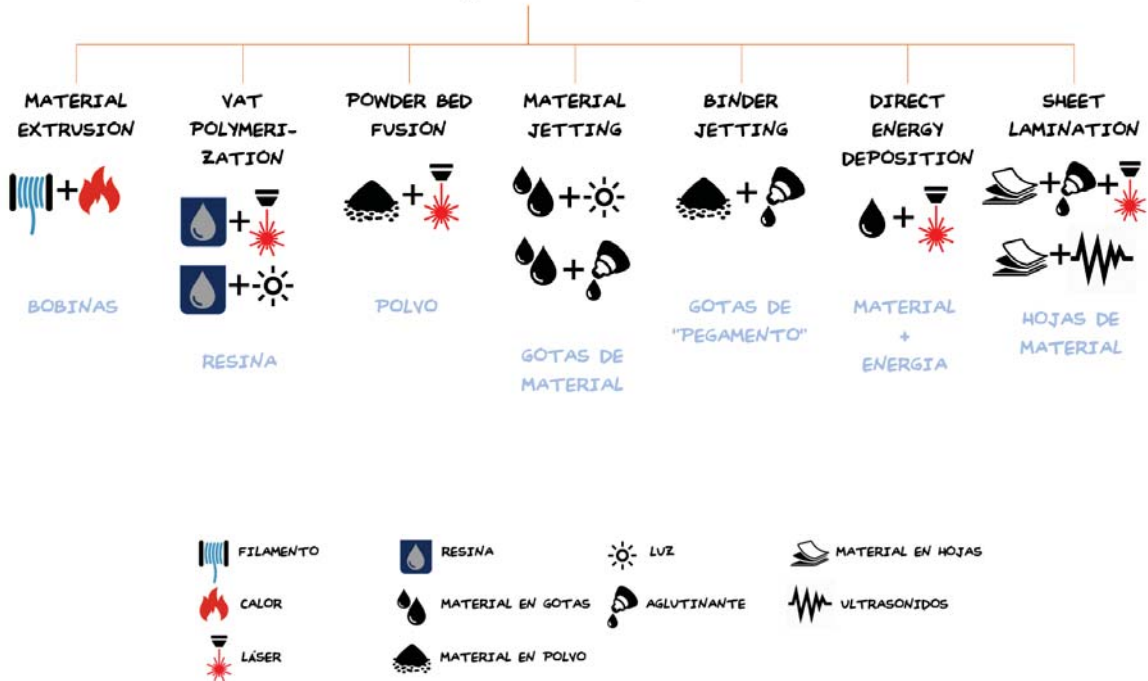
Cuando por primera vez se ve incluso un “breve resumen” de las tecnologías de fabricación aditiva existentes actualmente es inevitable hacerse un lío y tener la sensación de que resulta muy complicado conocerlas todas.

Y así es si realmente queremos ser expertos en todas. Pero no es tan complicado hacerse un esquema mental de las opciones disponibles. Así, podemos pensar en las alternativas que tendríamos para construir un objeto “a trocitos”; de forma genérica podríamos:

- I. Derretir el material y depositarlo poco a poco de forma similar a como lo hace una manga de pastelero.
- II. Tener un material líquido sensible a la luz y solidificarlo con luz.
- III. Tener el material en polvo y fundirlo con calor.
- IV. Inyectar el material gota a gota.
- V. Tener el material en polvo e ir inyectando aglutinante (pegamento) para solidificarlo.
- VI. Inyectar al mismo tiempo material y energía para fundirlo.
- VII. Tener el material en hojas que vamos cortando con la forma necesaria, pegando una sobre otra.

Pues bien, estas siete opciones definen las familias de tecnologías de fabricación aditiva que veremos a continuación.

TECNOLOGÍAS DE IMPRESIÓN 3D



Material Extrusion

FDM / FFF

Aunque no fue la primera tecnología de fabricación aditiva, la extrusión de materiales es de largo la más conocida y extendida. Entre los aficionados e impresoras de sobremesa, esta tecnología supone probablemente más del 90% del mercado. Es también la más usada en el entorno profesional, con el 36% de uso en la industria según el informe de *Sculpteo, The state of 3D printing 2017*.

La denominación de tecnología como FDM (*Fused Deposition Modeling*) es *copyright* de la compañía *Stratasys*, por lo que se usa normalmente el término FFF (*Fused Filament Fabrication*) para referirnos a la técnica de fabricación en la que se usa un filamento de plástico que, convenientemente controlado, se lleva a través de un extrusor que lo calienta y lo deposita poco a poco hasta construir el objeto.

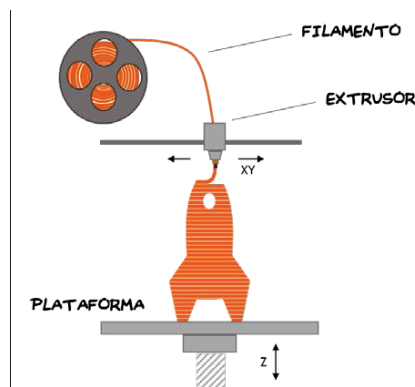


Figura 79: Esquema general de una impresora de extrusión de material.

En el diagrama podemos ver el funcionamiento general de esta tecnología: Por un lado, un motor paso a paso empuja el filamento desde la bobina hasta que sale por la boquilla de un extrusor. En este extrusor se calienta el material para fundirlo y ser depositado en muy pequeñas cantidades a través de la boquilla del extrusor. El extrusor tiene a su vez capacidad de moverse en todas las direcciones, x e y para depositar una capa de material sobre la plataforma. Una vez que

se ha impreso la primera capa, la plataforma se mueve ligeramente hacia abajo para imprimir la siguiente capa sobre ella. Normalmente además la impresora suele incluir tubos de guía y engranajes para asegurar el correcto movimiento del filamento durante todo el proceso de impresión.

La precisión de la impresora y por tanto la calidad del producto fabricado dependerá de múltiples factores, como son la precisión del motor para que salga la cantidad exacta de material necesario en cada fracción de giro, la altura de cada capa (determinada por el movimiento vertical de la plataforma o del extrusor), el ancho de la boquilla del extrusor (cuanto más pequeño, más preciso y suave será el terminado) y la precisión en el movimiento del extrusor.

Con el límite de la capacidad física del hardware utilizado, en esta tecnología todos esos factores son normalmente ajustables mediante el software controlador de la impresora, dando al usuario una gran variedad de opciones para imprimir con más o menos calidad, en más o menos tiempo.

En otros formatos la plataforma es fija y es el extrusor el que se mueve en las tres dimensiones, pero por lo demás el funcionamiento es exactamente el mismo.

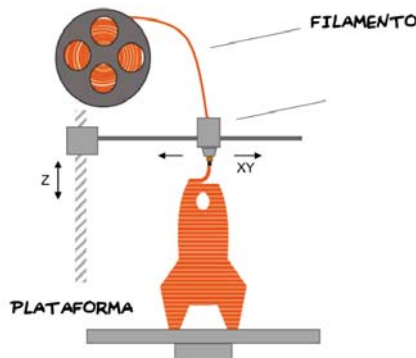


Figura 80: Impresora FFF de plataforma fija.

La tecnología de extrusión de materiales está afectada por el problema de no poder poner una capa “en el aire”, por lo que siempre necesita la impresión de soportes y la consiguiente fase de post-proceso eliminándolos.

Una característica del objeto así obtenido es que todo el objeto es fabricado con el mismo material y color. Puede, no obstante, jugarse con las órdenes de impresión para cambiar el filamento en un momento determinado y obtener así capas de distinto material, pero no deja de ser un procedimiento bastante manual.

Por ello, una mejora bastante típica en las impresoras FFF es la aparición de un segundo extrusor, que puede tener dos propósitos: por un lado, permite la fabricación de objetos en varios colores al mismo tiempo. Por otro, permite imprimir los soportes en un material distinto de la pieza principal, lo que tiene una gran ventaja: si se imprimen los soportes con un material soluble en agua u otro líquido, pueden eliminarse los soportes muy fácilmente sin más que bañar el objeto en un disolvente, sin dejar además feas marcas en la superficie.

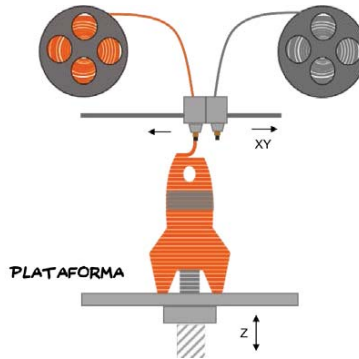


Figura 81: Impresión con varios extrusores

Otras mejoras que están también apareciendo últimamente es la capacidad de añadir distintos colores combinando la tradicional tecnología de inyección de tinta con la FFF: simplemente se añade al extrusor la posibilidad de ir tintando al material en distintos tonos según nos convenga en el momento de fundirse.

Veamos el detalle de cómo funciona un extrusor típico:

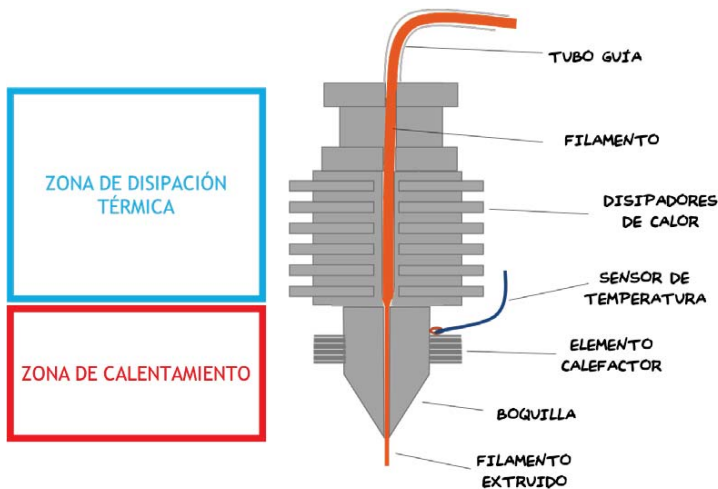


Figura 82: Detalle de un extrusor típico.

El filamento es conducido hasta el extrusor por medio de un tubo guía flexible que permite el movimiento correcto del mismo. Una vez dentro, el filamento llega hasta un elemento calefactor (*hot-end*) que le calienta hasta la temperatura de fusión. El final del extrusor es una fina boquilla que guía el material ya derretido (el filamento extruido) hasta su deposición en la plataforma o en la capa anterior del objeto a fabricar. Mantener la temperatura perfecta para la correcta deposición de material es fundamental; por ello el extrusor cuenta con un sensor de temperatura en la zona de calentamiento que controla el elemento calefactor. Asimismo, un correcto equilibrio entre la zona de calentamiento y la zona de disipación térmica asegura que el filamento únicamente se funde en el momento exacto (esto es, dentro de la boquilla) y no antes, lo que provocaría atascos y problemas en el movimiento controlado paso a paso del filamento. Los radiadores – disipadores de calor- del comienzo del extrusor mantienen el filamento correctamente en estado sólido hasta su paso por el *hot-end*.

La boquilla de salida es simplemente un fino cono a donde va llegando el material fusionado, manteniéndolo caliente, y saliendo por su parte más estrecha final. Como decíamos anteriormente, la calidad de impresión vendrá dada (entre otros factores) por el ancho de esta boquilla. Las medidas más típicas están entre 0,3 y 0,8 mm., de mayor a menor precisión.

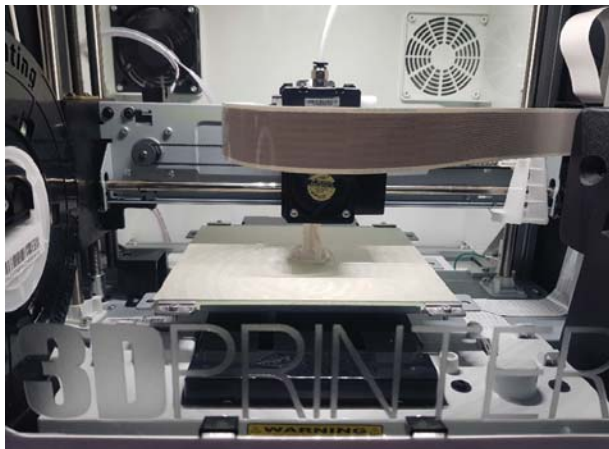


Figura 83: Una impresora FFF en funcionamiento. Foto: © Germán Martín

Los filamentos son de polímeros plásticos, estandarizados en dos anchos, filamentos de 1.75 mm y de 3 mm de diámetro, típicamente de 1Kg de material.

Materiales

Hay muchos materiales plásticos empleados en esta tecnología, pero los más populares (y baratos) son PLA y ABS. Ambos son termoplásticos, esto es plásticos que alcanzan fácilmente un estado moldeable al ser calentados y vuelven a un estado sólido adecuado al enfriarse.

El ABS (siglas de *Acrylonitrile Butadiene Styrene*) es conocido por ser el que encontramos en las famosas piezas de LEGO y en muchas aplicaciones industriales.

La temperatura de fusión del PLA (siglas de *PolyLactic Acid*) (aprox. 200°) es inferior al ABS (alrededor de 240°-250°) por lo que es menos sensible al *warping* (problema explicado más adelante) y más usado como “nivel de entrada” para impresoras de usuarios en el mercado doméstico. Es por tanto mucho más usado por los aficionados que por la industria, donde es mucho menos popular.

Tanto PLA como ABS son materiales muy baratos, de un precio similar entre ellos, mientras que los materiales de gama alta empleados en la gama industrial son mucho más precisos pero también más caros; se trata de termoplásticos como PEEK o PEI.

El ABS se puede mecanizar mejor que el PLA y su acabado es mejor; esto, unido a su mayor resistencia, hace que sea más usado en aplicaciones industriales. Además de las más conocidas piezas de LEGO, es también el material empleado en carcasas de aparatos eléctricos y similares. Puede usarse acetona en la fase de post-producción para un mejor terminado de la pieza en ABS.



Figura 84: Bobinas de PLA
(Foto: © Germán Martín)



Figura 85: Detalle del filamento de PLA (Foto: Germán Martín)

EL PLA, al tener un punto de fusión más bajo es más fácil de utilizar, y tiene más opciones de colores disponibles y en general más vivos que el ABS. Además, no emite gases nocivos, y -bajo las condiciones adecuadas- es biodegradable, al estar hecho de derivados del maíz. Tiene un olor agradable, y al no ser tóxico generalmente se puede usar en aplicaciones alimentarias. Como desventaja, el PLA es menos resistente al calor y su mecanizado es peor.

Por contra, el ABS al alcanzar el punto de fusión desprende gases que en muy alta concentración podrían llegar a ser nocivos, por lo que se recomienda siempre emplearlo en espacios ventilados o que sean lo suficientemente grandes. Sin embargo, han aparecido recicladoras de ABS, máquinas en las que se pone el material sobrante para que la máquina nos haga bobinas de filamento nuevas, cosa que aún no existe para el PLA.

Ventajas e inconvenientes

La gran popularidad de la impresión por extrusión de materiales viene dada por su bajo coste, por lo que la inmensa mayoría de las impresoras de sobremesa son de esta tecnología.

Uno de los problemas que tiene es el conocido como **warping**. Se trata este de un fenómeno derivado de la diferente temperatura que tienen diferentes partes del objeto que está siendo impreso: el material sale del extrusor a alta temperatura (más de 200°) y -especialmente en las primeras capas- se encuentra con la plataforma o capas anteriores a una temperatura muy inferior, creando una fuerza contractiva. Así, el centro del objeto hace fuerza sobre los extremos, provocando que éstos se levanten y la superficie se doble ligeramente. Este es un fenómeno más común imprimiendo en ABS que en PLA (por la mayor

temperatura del extrusor), y para prevenirlo en muchas ocasiones se emplea una plataforma calefactada (a 60, 80 e incluso a 100°). Aun así, este fenómeno de dilatación y compresión hace que la impresión por extrusión de materiales sea poco fiable en cuanto a dimensiones exactas.

Además, la extrusión de materiales, debido al alto número de parámetros (temperatura del extrusor y de la plataforma, altura de la capa, limpieza del extrusor, etc...) que influyen en los resultados, es una tecnología con una baja repetibilidad, lo que la hace apta para prototipado rápido y su uso a nivel amateur, pero poco utilizada en trabajos industriales que requieran alto nivel de precisión.

Syringe Extrusion

Una tecnología de extrusión de materiales de propósito general es la *Syringe extrusion* (literalmente, extrusión de jeringuilla), que se emplea con cualquier tipo de material con tal de que se encuentre en formato cremoso o viscoso.

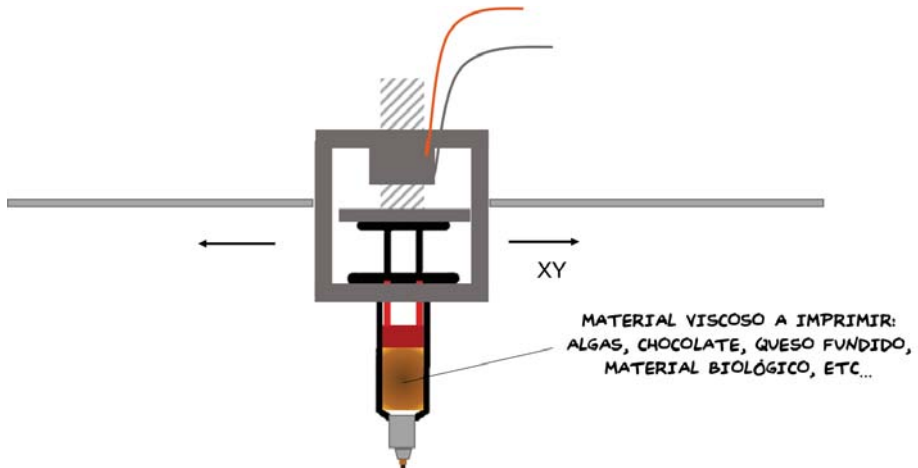


Figura 86: Esquema del funcionamiento de Syringe Extrusion.

Su funcionamiento es muy sencillo: en lugar de un extrusor que calienta el filamento hasta la boquilla, en su lugar tenemos una jeringa motorizada que se ocupa de hacer llegar el material a imprimir en estado sólido hasta la boquilla. Hay múltiples variantes de este esquema general, con depósitos y conducciones antes o después, pero el funcionamiento es igual en todos los casos: el objetivo es hacer

llegar un material en estado viscoso hasta la boquilla, manteniendo una cierta presión para asegurar el correcto flujo del mismo. Lógicamente, la boquilla tiene que estar contenida en alguna estructura que le permita el movimiento en el plano para poder ir creando cada capa de material. En definitiva, esta tecnología sí podemos realmente considerarla como la “manga pastelera de alta precisión”. Se trata por tanto de una solución genérica que es válida para la impresión de casi cualquier cosa, por lo que es la técnica empleada en impresión de tejidos biológicos, impresión de comida, etc...



*Figura 87: La elaboración de galletas podría automatizarse mediante syringe extrusion.
Foto: © Germán Martín*

Vat Polymerization

Bajo este nombre se agrupan las tecnologías que consiguen la impresión 3D mediante la polimerización de una cubeta (VAT) llena de resina fotosensible.

SLA

Como decíamos en el capítulo de Historia, corría el año 1984 cuando el ingeniero norteamericano Charles Hull inventó la estereolitografía (SLA), primera tecnología de fabricación aditiva basada en polímeros sensibles a la luz ultravioleta. Posteriormente patentaría su invento en 1986 y sobre esa patente desarrollaría su empresa 3D Systems.

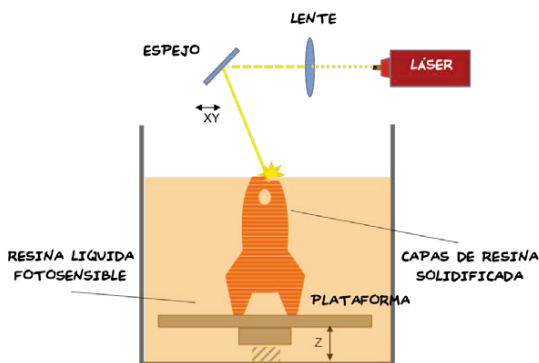


Figura 88: Tecnología SLA.

El esquema de funcionamiento de la estereolitografía es el siguiente: se llena un contenedor de una resina en estado líquido. Esta resina es fotosensible, esto es, reacciona ante la luz solidificándose. Dentro del contenedor se tiene una plataforma capaz de un movimiento vertical, que inicialmente está cercana a la superficie. Mediante un láser dirigido por medio de espejos se va solidificando una primera capa; una vez conseguida esta capa, se desliza hacia abajo la plataforma, la resina líquida invade el nuevo espacio libre dejado y se vuelve a empezar el proceso de solidificar con el láser la siguiente capa; así sucesivamente hasta completar el objeto en su totalidad, capa a capa.

Puesto que la resina llena completamente todo el compartimento, con esta tecnología sólo es posible fabricar objetos con un único material y color. Además, puesto que no hay forma de sujetar capas en el aire,

esta tecnología necesita también el uso de soportes para capas que sobresalgan (*overhang*).

Una interesante particularidad de las tecnologías de Vat Polymerization es que los objetos pueden fabricarse de arriba a abajo, como hemos visto hasta ahora, pero también de abajo a arriba, como puede verse en la figura.

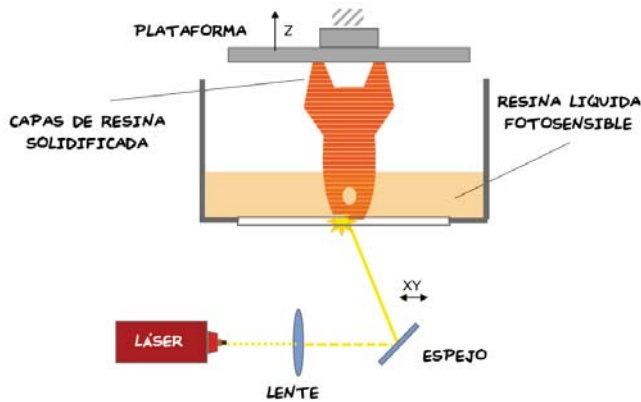


Figura 89: Fabricación SLA de abajo a arriba.

En este caso, el fondo del recipiente que contiene la resina es transparente para dejar pasar la luz e ir solidificando la capa correspondiente. Además, está tratado con material antiadherente para evitar que la capa de resina sólida se quede pegada al fondo, mientras que la capa sí queda adherida a la plataforma. Al finalizar cada capa, la plataforma se mueve hacia arriba (movimiento éste generalmente acompañado de una ligera vibración para facilitar que el fondo quede totalmente despegado) lo que hace que la resina entre en el hueco dejado, para proceder a crear la nueva capa por medio del láser.

¿Qué ventajas tiene hacerlo de un modo u otro? Podemos ver de nuevo el detalle de creación de cada capa en los siguientes esquemas:

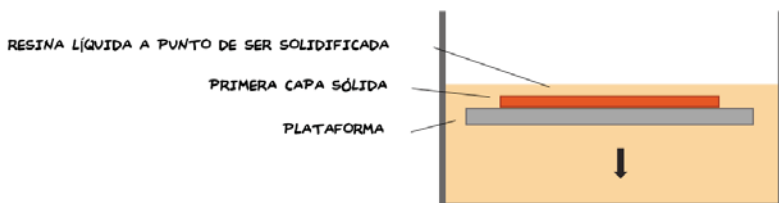


Figura 90: Impresión de la segunda capa de arriba abajo.

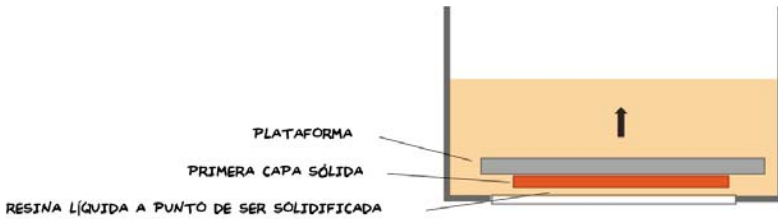


Figura 91: Impresión de la segunda capa de abajo a arriba.

En el primer caso, queda claro que necesitamos que la plataforma empiece a nivel de la superficie y vaya bajando hasta que se imprima todo el objeto. Esto hace que el contenedor de resina tenga que ser mayor si queremos imprimir objetos grandes, lo que supone una limitación y un mayor consumo de resina. Por otro lado, no hay peligro de que una capa se quede adherida al contenedor, como ocurre si imprimimos de abajo a arriba, por lo que en general esta opción es más fiable.

En el segundo caso, la plataforma puede ascender con las distintas capas ya fabricadas sin limitación por la capacidad del contenedor de resina. Así, podemos hacer piezas más altas y el consumo de resina será menor. Por otro lado, el control que tenemos de la altura de cada capa es mayor, por cuanto la resina en el fondo llena con mayor efectividad el hueco dejado al mover la plataforma que si imprimimos de arriba a abajo. La desventaja es que el fondo transparente necesita un mejor mantenimiento, puesto que es crítico que la resina solidificada no se adhiera a él; es necesario un constante reemplazo y tratamiento con sustancias adecuadas. Debido al movimiento necesario para mover la plataforma hacia arriba es además menos fiable.



Figura 92: Un objeto fabricado mediante SLA

La tecnología *Digital Light Processing* (DLP) es otra tecnología muy similar a la estereolitografía. Su única diferencia es la forma en que se consigue la solidificación de la resina; en lugar de emplear un láser, se emplea un proyector digital de luz, lo que tiene la ventaja de que, en un único paso, se proyecta el dibujo de la capa completa a fabricar (aunque en ocasiones, si la capa es muy extensa, este paso puede hacerse en varias fases). Este hecho le da a la tecnología DLP su gran ventaja: es más rápida que la SLA. Sin embargo, carece de la precisión de un láser, por lo que es menos aconsejable para aquellos casos en que se requiere un alto nivel de detalle. Tiene sin embargo control a nivel de vóxel, puesto que la imagen digital de cada capa estará compuesta de los correspondientes pixels.

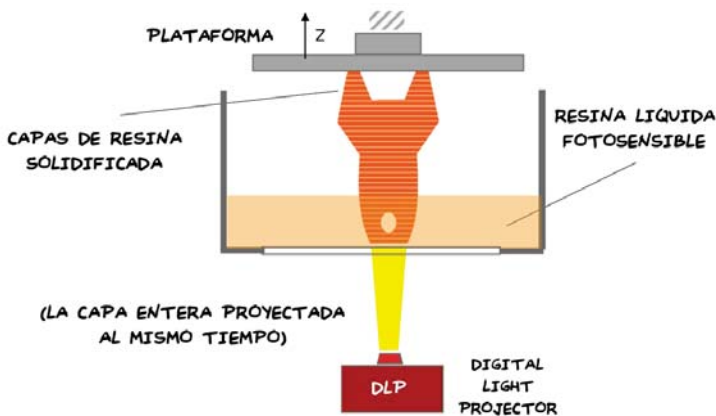


Figura 93: Fabricación con Digital Light Processing.

Al igual que en el caso de SLA, también pueden encontrarse impresoras DLP para fabricación de arriba a abajo o de abajo hacia arriba.

Ventajas e inconvenientes

Las tecnologías de *Vat Polymerization*, precisamente por el uso de resinas líquidas, tienen como principal virtud sus suaves acabados y la gran precisión que son capaces de conseguir en la fabricación de objetos. Por ello, se usan mucho en la producción de prototipos y en la confección de moldes para fabricación conformativa.

De largo, su mayor éxito ha sido la aplicación para la fabricación de audífonos; debido precisamente a su precisión y suavidad, los aparatos así fabricados se adaptan perfectamente al usuario.

Esta tecnología además existe no solamente en forma de gran máquina para la producción industrial sino también en su versión de impresión de sobremesa sin un coste excesivo (aunque superior a las más baratas impresoras 3D FFF).

Entre sus inconvenientes, como ya se ha comentado, está el empleo de un material único para todo el objeto fabricado. Las resinas fotosensibles son polímeros con un precio mayor que el material de otras tecnologías como la extrusión de materiales, y no hay una amplia variedad de colores disponibles. Existen, por supuesto, diferentes materiales con propiedades de mayor o menor dureza, suavidad, etc. y con precios diferentes según su uso, aunque en general no tienen una gran resistencia mecánica. Pueden tener además problemas de resistencia a la luz solar.

Típicamente, una vez fabricada la pieza, es necesario darle un tratamiento de luz ultravioleta, precisamente para mejorar su consistencia en el futuro. Este tiempo de post-procesado, añadido al de extracción y limpieza del objeto fabricado del contenedor de resina hace que no sea de las tecnologías más rápidas.

Finalmente, es imprescindible el uso de soportes, siendo éstos además más complejos de usar en el caso de tecnologías de abajo a arriba. Estos soportes habrá que eliminarlos manualmente, sin poder usarse disolventes o técnicas similares sólo disponibles cuando el soporte está hecho de un material distinto a la pieza.



Powder Bed Fusion

Bajo este nombre se agrupan las diferentes tecnologías que consiguen la fabricación 3D mediante la fusión de un material en polvo, que se encuentra dentro de una cámara. Según sea éste material (metales vs elementos cerámicos, cristales o plásticos) o según el método por el que se consiga la solidificación de ese polvo tenemos las diferentes tecnologías dentro de esta categoría.

SLM/DMLS

Selective Laser Melting (SLM) y *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) son los nombres que recibe la tecnología que emplea polvos metálicos, los cuales consigue solidificar mediante un láser. La diferencia entre la tecnología SLM y la DMLS es que mientras la primera funde completamente el polvo metálico, la segunda emplea aleaciones (en lugar de un polvo metálico homogéneo del mismo metal) y no funde todo el polvo, sino que consigue la unión de partículas que se funden entre sí sin que todo el metal se funda completamente. En ambos casos, el objeto fabricado es de un único material.

Su funcionamiento es el siguiente: En una cámara llena de polvo metálico se tiene una plataforma, sobre la que inicialmente hay una mínima capa de polvo. Mediante un láser se calienta el polvo hasta alcanzar el punto de fusión del metal, dibujándose y produciendo una primera capa. A continuación la plataforma se desliza un paso hacia abajo, un nivelador extiende una nueva capa de polvo metálico por encima de la capa ya fabricada, y se vuelve a iniciar el proceso, capa a capa hasta completar la pieza.

Para facilitar que el metal se funda fácilmente, el polvo metálico en el contenedor se mantiene a una temperatura ligeramente por debajo del punto de fusión; así, al contacto con el láser cada capa funde fácilmente, uniéndose a la anterior. Este hecho hace que sea necesario esperar un tiempo relevante para enfriar el contenedor hasta poder extraer la pieza terminada. Una vez enfriado, se extra la pieza y se limpia de restos de polvo; el polvo sobrante puede reciclarse para un siguiente trabajo en un alto porcentaje, superior al 50%.

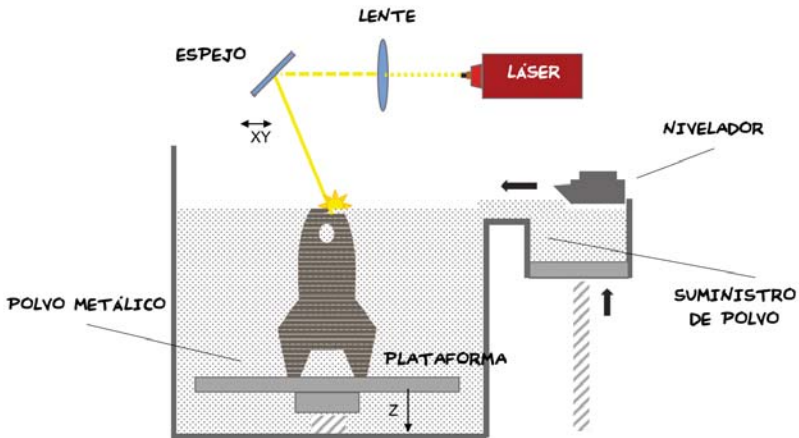


Figura 94: Tecnologías SLM/DMLS.

SLM no está disponible para todos los metales, sólo para aquellos como acero, titanio, cromo y aluminio, que fluyen correctamente al fundirse con el láser. Muchos otros metales no tienen en estado líquido la necesaria fluidez para unirse las capas correctamente con tecnología SLM, por lo que se emplean en su lugar aleaciones y tecnología DMLS.

Lógicamente, al fabricar piezas metálicas, las tecnologías SLM/DMLS son usadas para la producción de piezas que requieren una alta resistencia y tienen una alta complejidad de diseño; es por tanto una tecnología con aplicaciones en la industria aeroespacial, la creación de herramientas, dispositivos médicos o prototipos metálicos.

El acabado de la pieza es más o menos rugoso dependiendo del grano del polvo metálico usado; cuanto más fino el polvo mejor será el acabado. Al mismo tiempo, el uso de un polvo muy fino dificulta el manejo del mismo durante todo el proceso, por lo que se busca un punto de equilibrio entre ambas opciones. Si se requiere una superficie más suave, será necesaria una fase de post-proceso para conseguirla.

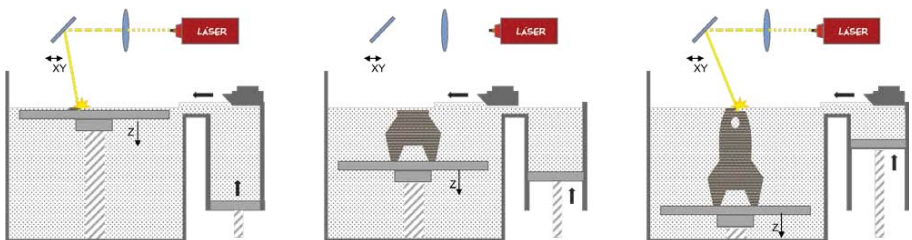


Figura 95: Proceso de fabricación SLS/DMLS.

Debido a las altas temperaturas alcanzadas durante el proceso de impresión esta tecnología también tiene el riesgo de posibles deformaciones / *warping* en piezas anchas.

Generalmente es necesario el uso de soportes, bien para evitar estas deformaciones debidas al calor, bien para permitir la fabricación de piezas con *overhang*, aunque la existencia del polvo metálico alrededor de toda la pieza hasta el final del proceso puede favorecer la sujeción de partes de la pieza en ángulos superiores a 45°.



Figura 96: Impresora DMLS en funcionamiento

© Moreno Soppelsa | Dreamstime.com http://www.dreamstime.com/morenosoppelsa_info

Para garantizar una mejor resistencia final, es también bastante típica una fase de tratamiento de calor posterior a la fabricación, similar a la de otros procedimientos de fabricación tradicionales, en la que se calienta y enfría la pieza de forma controlada para eliminar micro-defectos y homogeneizarla completamente.

Otro de los problemas de las tecnologías DMLS/SLM es su alto coste en comparación con otras tecnologías de fabricación 3D por lo que se limita su uso a aplicaciones con un alto nivel de requerimientos.

SLS

Selective Laser Sintering (SLS) es el nombre de la tecnología empleada para la impresión 3D de materiales no metálicos en *Powder Bed Fusion*. Su funcionamiento es el mismo que SLM: un láser se encarga de ir fundiendo un polvo de material en la capa superficial; una vez impresa esta capa, la plataforma se mueve hacia abajo, se extiende una nueva capa de polvo mediante un nivelador (típicamente

de 0,1mm de espesor) y se continúa el ciclo hasta imprimir todo el objeto.

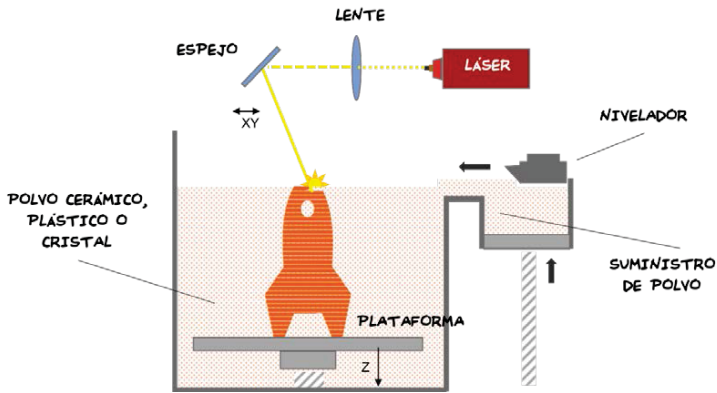


Figura 97: Esquema de la fabricación SLS.

Sin embargo, aparte de emplear materiales distintos, la tecnología SLS tiene una característica fundamental que la diferencia de otras: debido a que el polvo es capaz de sujetar a las capas superiores, esta tecnología **no necesita soportes**.

Este hecho la convierte en la tecnología perfecta para figuras geométricas complejas. Además tiene un alto grado de precisión (aunque no tanto como otras tecnologías) junto con una naturaleza isotrópica: esto es, no sufre del problema de anisotropía.

La superficie de un objeto fabricado por SLS es rugosa y mate, por lo que típicamente su fabricación suele llevar aparejada una fase de post-proceso de lijado y/o pintado/lacado que perfeccione su aspecto final, y que haga al material final no poroso.

Su principal problema es el alto coste de la máquina SLS, mucho más alto que otras tecnologías, y los tiempos necesarios de preparación de la máquina, calentamiento e enfriamiento del polvo.

Aunque se emplean múltiples materiales en SLS, los más usados son los termoplásticos derivados de la poliamida (PA), que tienen buenas características finales. El más conocido de todos ellos es el nylon. También se usan otros tipos de plásticos y cristales.



Figura 98: Un objeto producido por SLS, aún en la cama de polvo. Foto: Pixabay.

EBM

Electron Beam Melting (EBM) es una tecnología de fabricación aditiva que es muy similar a SLM, y -al igual que ésta- produce modelos muy densos a partir de polvo metálico. La diferencia fundamental con SLM es que EBM emplea un haz de electrones de alta energía en lugar de un láser para fundir el polvo metálico.

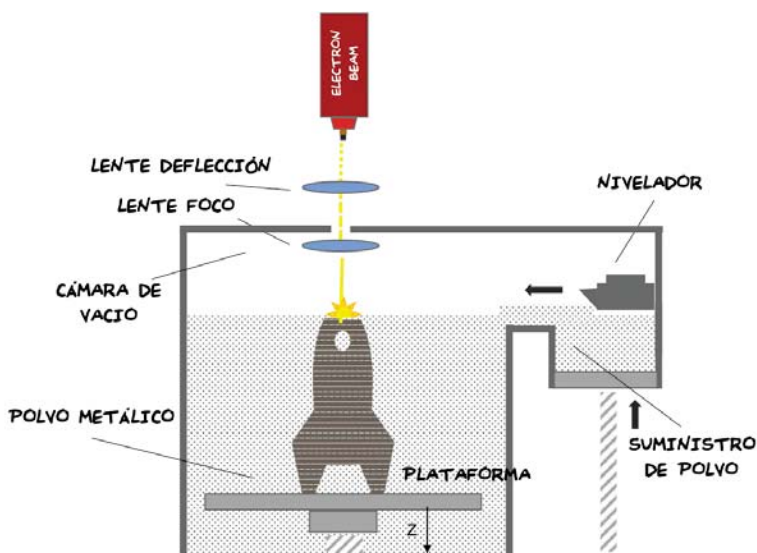


Figura 99: Esquema de la fabricación EBM

En comparación con SLM, la tecnología EBM es más rápida pero por contra lleva aparejada un mayor nivel de grano, grosor de capa y peor acabado superficial.

Actualmente esta técnica está disponible para un número limitado de materiales metálicos, siendo el Titanio el más habitual.

Su principal aplicación es la fabricación de piezas complejas de alta resistencia en la industria aeroespacial.

Inyección de Materiales

Esta tecnología recibe su nombre por su similitud con las tecnologías de inyección de tinta (*Inkjet*) empleadas en las impresoras en papel. Su funcionamiento es el siguiente: una cabeza móvil en los ejes X e Y se encarga de inyectar múltiples pequeñas gotas de material en estado viscoso, que inmediatamente se solidifican mediante una lámpara de rayos ultra-violeta. Una vez fabricada una capa, la plataforma se desplaza hacia abajo y se vuelve a comenzar el proceso hasta terminar el objeto. De alguna forma, funciona como si tuviéramos múltiples mini-extrusores en una impresora FDM.

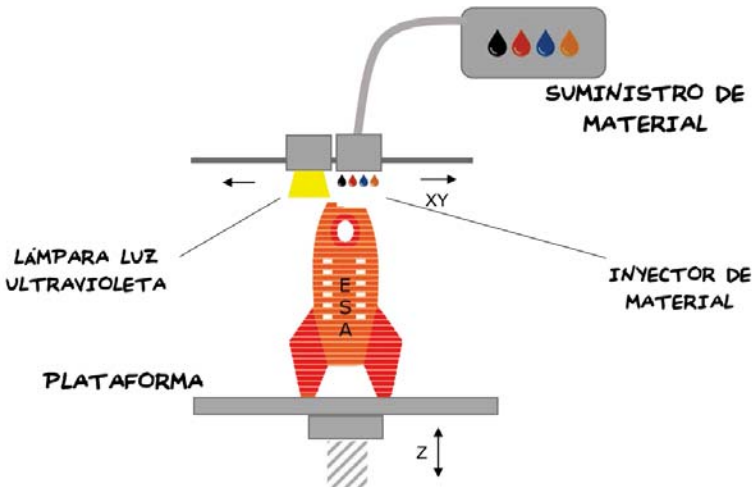


Figura 100: Esquema de la tecnología de inyección de materiales.

Este tipo de tecnología tiene varias ventajas sobre otras. Una de las más relevantes es que, al poder inyectar distintos materiales, es una tecnología capaz de generar objetos de múltiples materiales y de múltiples colores, por lo que es ideal para demos y productos visualmente muy atractivos.

Es una tecnología que, como muchas otras de fabricación aditiva, necesita del uso de soportes. Sin embargo, al ser capaz de usar muchos materiales, la práctica totalidad de máquinas de inyección de materiales imprimen los soportes en un material distinto al objeto, típicamente soluble en algún disolvente. Así, los soportes son

eficazmente eliminados en una fase de post-producción sin dejar ningún tipo de rastro.

Además, la impresión se realiza en una temperatura normal, sin necesidad de calentar un contenedor (como ocurre por ejemplo en SLS), por lo que normalmente no tiene problemas de deformación de la pieza por calor (*warping*) y además permite generar objetos muy grandes, al no tener limitación de cámaras cerradas más pequeñas. Así, objetos de más de un metro son generados sin problemas con esta técnica, sin tener alteraciones en las dimensiones. Además, al no tener que esperar una fase de enfriamiento, es una opción más rápida que otras.

Se trata por tanto de una tecnología de alta precisión, y que emplea materiales similares a SLA, resinas fotosensibles de diferentes colores. Éste es fundamentalmente su principal problema: las piezas así generadas tienen baja resistencia mecánica y se degradan bajo ciertas circunstancias de luz solar.

Su otra desventaja es el alto coste de fabricación en comparación con otras tecnologías.

Su principal aplicación es la generación de prototipos visualmente atractivos, aplicaciones médicas y generación de moldes.

Multi-jet fusion

Esta tecnología desarrollada por HP es en realidad un híbrido entre la tecnología SLS y la inyección de materiales, buscando obtener lo mejor de ambos mundos.

Su funcionamiento es el siguiente: Se parte de un compartimento lleno del material a imprimir en polvo, y se extiende una primera capa sobre la plataforma mediante un nivelador, calentándolo a una temperatura cercana a la fusión. A continuación una cabeza móvil deposita sobre el polvo dos sustancias: una de ellas deposita un “agente de fusión”, que es el que facilita que los granos de polvo se unan entre sí; la otra es un “agente de detalle”, que hace lo contrario: impedir la fusión en los límites de cada capa a imprimir, para asegurar que no se funde más que lo exactamente necesario y se obtienen bordes limpios. A continuación, se calienta el área con energía de infrarrojos,

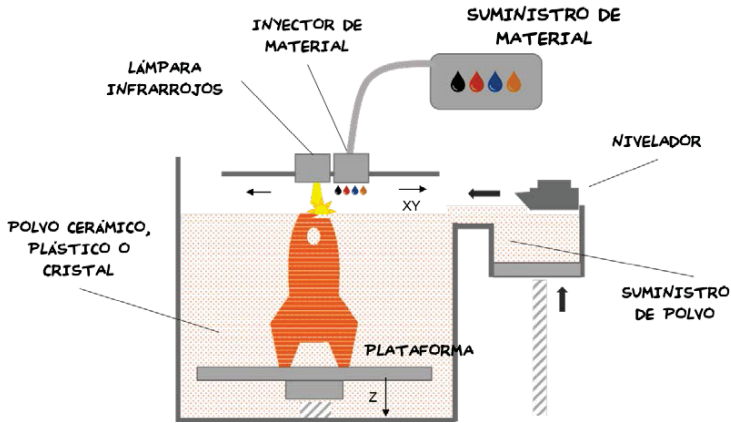


Figura 101: Esquema de fabricación Multi-jet Fusion.

consiguiéndose la fusión únicamente en las zonas deseadas (las afectadas por el agente de fusión); se consigue así una alta precisión en la capa a generar. Una vez finalizada esta capa, como siempre, se desplaza la plataforma hacia abajo, se extiende una nueva capa de polvo y vuelta a empezar el ciclo hasta terminar el objeto a fabricar.

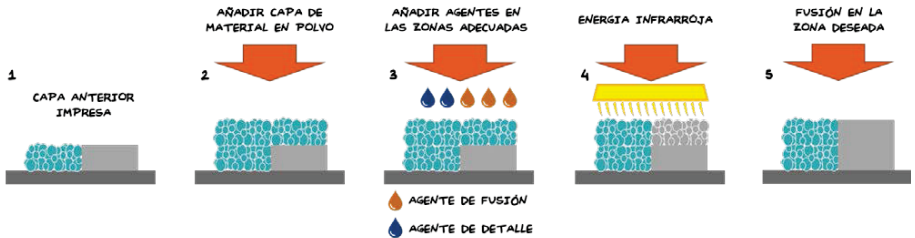


Figura 102: Detalle de funcionamiento de la tecnología Multi-jet.

Al generar la fusión de una sola pasada más global sobre un área, es una tecnología rápida, como la inyección de materiales, y –al usar materiales en polvo- genera piezas más resistentes desde el punto de vista mecánico, comparables a SLS pero producidas un orden de magnitud más rápido.

Multi-jet es por tanto una tecnología de alta precisión, con capas inferiores a 0,1 mm de espesor. Con la ventaja adicional de que, al igual que SLS, no necesita soportes, por cuanto el polvo es capaz de sujetar las capas que se impriman por encima.

Sin embargo, al tener que calentar la cámara para poner el polvo cercano a la temperatura de fusión, puede tener problemas de

deformaciones por calor (*warping*) y además es necesario esperar a que disminuya la temperatura para extraer y limpiar la pieza. No obstante, esta fase es más rápida que en la tecnología SLS.

Además, el polvo utilizado en el proceso puede ser reciclado para subsiguientes impresiones en un alto porcentaje, lo que facilita un menor tiempo de mantenimiento.

El material usado es similar al empleado en SLS, y su acabado no es tan suave como en las tecnologías de inyección de materiales o SLA, aunque posee un grano más fino.

Inyección de Aglutinante

La inyección de Aglutinante (*Binder Jetting*) es una tecnología de fabricación aditiva similar a las de fusión de lecho de polvo (*Powder Bed Fusion*) pero con la diferencia de que consigue la fusión de materiales no mediante calor, sino mediante la adición de un material aglutinante que une entre sí las distintas partículas de polvo.

El funcionamiento es muy sencillo: se extiende la capa inicial de material en polvo (normalmente plásticos, arenas o cristales, pero también existe con algunos metales); a continuación se dibuja sobre ella la capa de material a unir con el aglutinante en forma líquida/viscosa; adicionalmente se inyecta también tinta (con la misma tecnología de inyección de tinta que las impresoras de papel) para dar un color determinado a la capa o parte de ella. Una vez finalizada una capa, se mueve la plataforma hacia abajo, y se comienza de nuevo extendiendo una nueva capa de polvo.

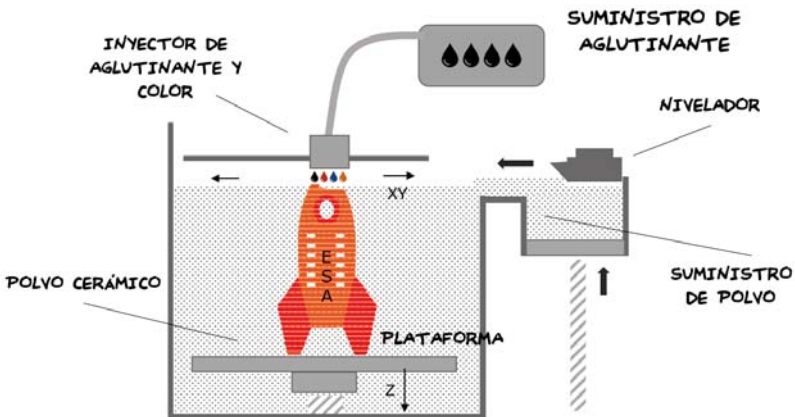


Figura 103: Esquema de funcionamiento de la tecnología de Inyección de Aglutinante.

Finalmente, suele ser bastante común añadir un paso de post-producción en forma de “baño” en el que un líquido final tapa los posibles poros de la pieza y mejora su terminación.

Así, sus principales ventajas son:

- a) La posibilidad de obtener piezas muy coloridas, de gran atractivo visual, al poderse variar el color no sólo a nivel de capa sino prácticamente a nivel de vóxel.
- b) Al igual que otras tecnologías que fusionan un lecho de polvo, no necesita soportes, puesto que el polvo no fundido de capas inferiores sujeta las superiores.
- c) Al no emplear calor como hacen otras tecnologías, no crea estrés adicional en los materiales, y tiene menos problemas de deformación (*warping*).
- d) La velocidad de inyectar aglutinante y tinta es alta en comparación con SLS.
- e) Al no requerir una gran cámara que mantenga la temperatura estable, tiene la posibilidad de generar objetos de gran tamaño.

Sin embargo, tiene también sus inconvenientes:

- a) Dependiendo del material, generalmente requiere un paso de post-proceso bastante costoso. Para materiales plásticos típicamente se añade algún baño de acrílico o similar que tape los poros y mejore el colorido. Para materiales metálicos suele tener una fase de tratamiento de calor y/o infiltración con algún otro metal que tenga un punto de fusión bajo, como el bronce, para mejorar sus propiedades. Naturalmente, en todos los casos es necesario una fase de extracción en la que se limpia la pieza de los polvos sobrantes.
- b) Generalmente las piezas, aún con tratamiento posterior, son menos resistentes mecánicamente hablando que las generadas con otras tecnologías.
- c) La superficie suele tener un alto grado de porosidad (de ahí el tratamiento posterior), y tiene peor acabado que otras tecnologías como SLA.
- d) En comparación con otras tecnologías hay un menor número de materiales disponibles.

Las aplicaciones principales de esta tecnología son: prototipado rápido para la industria, modelos a color de diseños, creación de grandes moldes y piezas de metal de bajo coste.

Directed Energy Deposition

DED

La familia de tecnologías de deposición directa de materiales (*Directed Energy Deposition*), como su propio nombre indica, tiene la particularidad de que funcionan añadiendo pequeñas cantidades de material de forma directa en cualquier punto del espacio que se desee. Dentro de esta familia, encontramos la tecnología *Direct Metal Deposition (DMD)* o *Laser Metal Deposition (LMD)*, según los detalles de cómo se implemente, y funciona de forma genérica de la siguiente forma: sobre un brazo robótico multidimensional (capaz de moverse libremente en las 3 dimensiones) se instala una cabeza que es la responsable de depositar el material; este aparato inyecta al mismo tiempo el material en polvo y la energía para fundirlo (típicamente con un láser de alta precisión, un haz de electrones o un arco de plasma) en el mismo punto con una gran precisión.

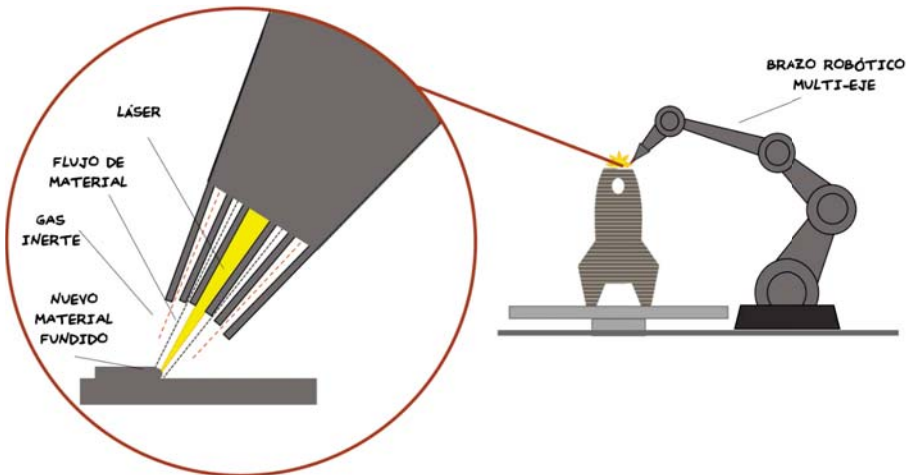


Figura 104: Funcionamiento de la tecnología Directed Metal Deposition.

Para evitar que el material escape o se funda sobre otro sitio que no sea el deseado, se emite además un flujo constante de un gas inerte que crea una zona neutra alrededor e impide que esto ocurra. El metal añadido se funde con el anterior en su totalidad, por lo que el resultado final es un metal denso y compacto con excelentes características mecánicas, comparables a otros métodos de fabricación tradicionales. Obviamente, el brazo robótico es controlado por un ordenador (un sistema de Control Numérico) para asegurar una total precisión.

Una de las grandes ventajas de esta tecnología es que es capaz de añadir material en cualquier sitio, sin necesidad de ir ordenadamente capa a capa como en el resto de tecnologías. Este hecho, unido a su alta precisión, hace posible que se pueda emplearse para casi cualquier aplicación. En definitiva, se trata de la única tecnología que es capaz realmente de añadir únicamente el material necesario en el sitio necesario, cumpliendo la promesa de la fabricación aditiva.

Otra ventaja añadida en comparación con otras tecnologías capaces de producir piezas metálicas es que en este caso no hay prácticamente ningún residuo, puesto que todo el material empleado termina fundiéndose en la pieza.

En cuanto al material, se puede usar cualquier tipo de polvo metálico con esta tecnología, siendo los más comunes acero, titanio, aluminio, o distintas aleaciones. Y potencialmente puede fabricarse una pieza con distintos materiales combinados entre sí.

Su desventaja principal es, sobre todo, su alto precio; se trata de la tecnología de fabricación aditiva más cara actualmente. Por ello, se usa normalmente sólo en casos donde los requerimientos técnicos son tan exigentes que lo justifican. Por ejemplo, es muy empleada en la reparación de piezas de alta tecnología aeroespacial que se han dañado en algún punto por el uso (como un componente de una turbina), o para extender la vida útil de algunas herramientas de alto rendimiento. De esta forma no es necesario desensamblar una estructura compleja o volver a crearla para repararla.

Sheet Lamination

La **laminación de hojas** es una tecnología de impresión 3D que usa material en hojas que se cortan con la capa necesitada y se unen entre sí mediante algún mecanismo. Las hojas pueden ser de metal, de papel o de algún tipo de polímero, y su principal ventaja es que no necesita de altas temperaturas ni de cámaras estancas para su funcionamiento. Las dos tecnologías que usan este sistema son LOM (*Laminated Object Manufacturing*) y UAM (*Ultrasonic Additive Manufacturing*), también conocida como UC (*Ultrasonic Consolidation*).

Laminated Object Manufacturing

Laminated object Manufacturing es la tecnología más común de las dos, y se emplea fundamentalmente en papel recubierto con adhesivo, plástico o un fino laminado metálico. Su funcionamiento es el siguiente: desde un rodillo de material en bruto se va proporcionando cada hoja de material, hasta situarla encima de la plataforma. Una vez en la posición adecuada, se empuja hacia abajo con la ayuda de un rodillo. La capa así construida se une a las anteriores en una combinación de fuerza mecánica y adhesivo. Con ayuda de un láser (u otro dispositivo cortador tipo CNC) se corta el detalle de esa capa. Se desplaza entonces la plataforma ligeramente hacia abajo y se continúa con la siguiente capa hasta finalizar el objeto fabricado. El material sobrante

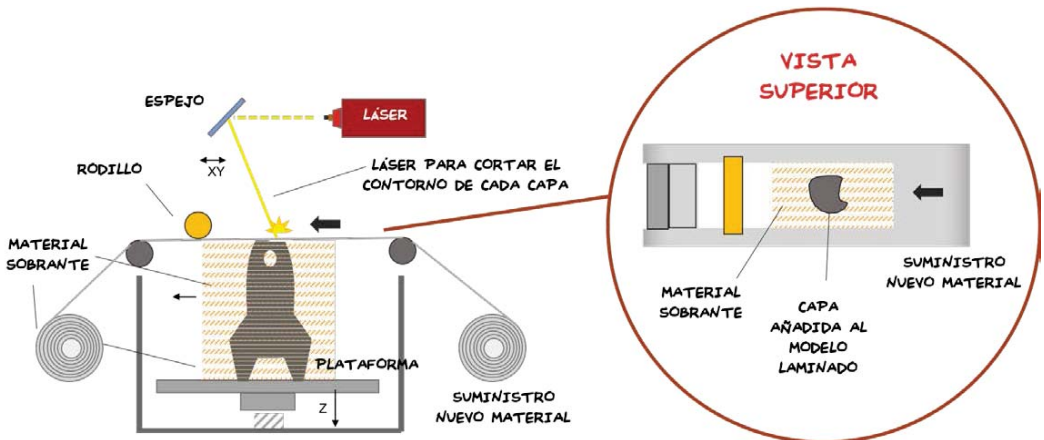


Figura 105: Esquema de fabricación con tecnología LOM (*Laminated Object Manufacturing*).

se va enrollando en un rodillo de salida para su posterior deshecho o reciclaje.

Existen variantes de esta tecnología en la que se emplea papel normal (por ejemplo, hojas en DIN-A4 / DIN-A3) y se va guiando cada hoja hasta el punto adecuado; se corta la capa, se añade un spray adhesivo y se continúa con la siguiente hoja.

Una de sus ventajas es la posibilidad de imprimir diseños en gran tamaño, al poderse fabricar a temperatura ambiente y sin costosas cámaras de vacío.

El material más usado es el papel, lo que hace esta tecnología atractiva por su precio. También, aunque en menor medida, se usan plásticos y metales.

Finalmente, otra de sus posibles ventajas es que necesita menos soportes, puesto que el papel tiene un peso muy bajo, salvo para situaciones de geometrías realmente extremas.

El inconveniente es que su nivel de precisión es bajo y, en general, los terminados son más bastos que los de otras tecnologías, por lo que suele emplearse para prototipos iniciales, maquetas y similares, pero no para objetos que requieran alto detalle o tengan una geometría complicada.

Ultrasonic Additive Manufacturing

Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) es una técnica de laminación de hojas en la cual se unen hojas metálicas: pero en lugar de usar adhesivos químicos o fundir el metal, logra la unión de las capas mediante ultrasonidos. El funcionamiento es el siguiente: cada hoja metálica se extiende sobre la base anterior, se le aplica una presión y mediante un **sonotrodo** se genera una oscilación ultrasónica que es la que consigue una “soldadura ultrasónica” de estado sólido, moviendo las moléculas de ambos materiales provocando que éstas se fundan. Una vez unida esta capa, mediante una fresa CNC se corta la misma, para conseguir la forma requerida, y se continúa con la siguiente capa.

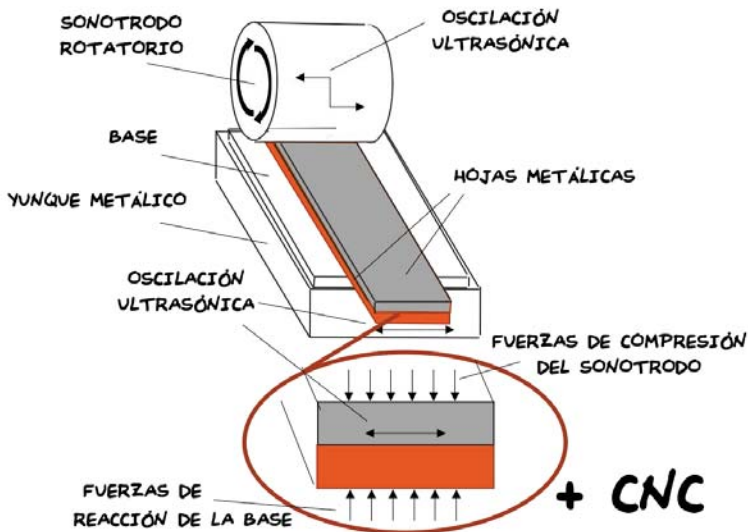


Figura 106: Esquema de funcionamiento de la tecnología UAM.

Su ventaja es la posibilidad de imprimir metales a temperatura ambiente y sin tratamientos químicos, por lo que puede usarse en combinación con elementos electrónicos embebidos u otros elementos (por ejemplo, plásticos) sensibles al calor, además de usar menos energía que con otras tecnologías metálicas. Puesto que no se calienta el material, este no sufre alteraciones en cuanto a sus propiedades elementales. Se suele emplear así en combinación con otras técnicas sustractivas de fabricación.

Otra de sus ventajas es la capacidad de imprimir con metales distintos difíciles de combinar en otras tecnologías, por tener puntos de fusión muy distintos.

Al tener la fase final de fresado CNC, se puede conseguir una superficie lisa, sin escalones entre las capas como ocurre en otras tecnologías

Como inconveniente, la tecnología UAM necesita un tiempo significativo y la fase de CNC genera residuos al igual que una tecnología pura de fabricación sustractiva.

Debido además a la presión que ejerce entre las capas, tampoco es adecuada para estructuras de geometrías complejas o que necesiten soportes.

Resumen comparado de tecnologías

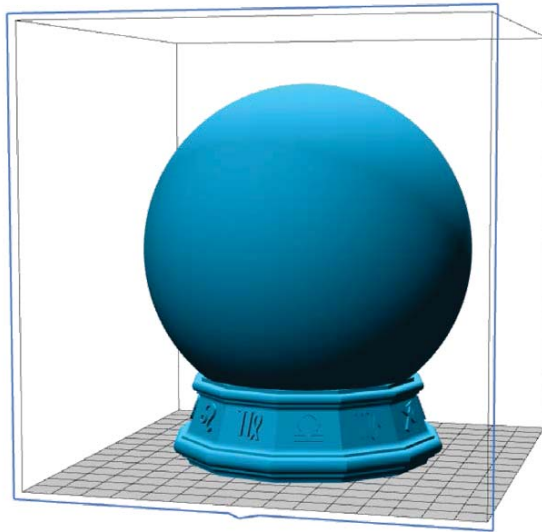
Resumen

CATEGORIA	MATERIAL EXTRUSION	VAT POLYMERIZATION	POWDER BED FUSION	MATERIAL JETTING	BINDER JETTING	DIRECT ENERGY DEPOSITION	SHEET LAMINATION
TECNOLOGIAS	FFF / FDM / SYRINJE EXTRUSION	SLA / SLP	SLS EBM / DMLS	MATERIAL JETTING MULTI-JET FUSION	SAND / METAL BINDER JETTING	DMD / LMD	LOW / VHM
PRECISION MEDIA	0,5 mm	0,2 mm	0,1 - 0,3 mm	0,1 mm	0,2 mm	0,08 mm	0,3 mm
MATERIALES	TERMOPLASTICOS ABS, PLA PEEK, PET	RESINAS FOTOSENSIBLES	NYLON ALUMINIO, ACERO, TITANIO	RESINAS FOTOSENSIBLES CERAMICAS	POLYOS METALICOS / ARENA CERAMICAS	METALES TITANIO, CROMO	PAPEL TERMO-PLASTICOS METALES
SOPORTES NECESARIOS	SI, POSIBLE DISOLVENTES	SI	NO EN NYLON SI EN METALES	SI, DISOLVENTE	NO	SI	NO EN PAPEL
POST-PRODUCCION	ESTETICO: SUAVITADO, LIJADO	LIZ VV ESTETICO	QUITAR POLVO ESTETICO	ESTETICO, BARNIZADO, LIJADO, PINTADO	QUITAR POLVO INFILTRACION PARA REFORZAR	ESTETICO	TRABAJADO FINAL / CNC
VENTAJAS	BAJO COSTE	SUPERFICIES SUAVES	BUENA RESISTENCIA	MULTI-MATERIAL & COLORES / FINALIZACION	COLORES	ALTA CALIDAD MULTIPLES EYES	PUEDE HACERSE DE GRAN TAMAÑO BAJO COSTE
INCONVENIENTES	DEBIL, BAJA REPETIBILIDAD, ANISOTROPIA	DEBIL, BAJA RESISTENCIA A LA LIZ	LENTITUD COSTE	COSTE	PROPIEDADES MECANICAS	MATERIALES ALTO COSTE MUY LENTO	MEJOS PRECISO

Visión de futuro

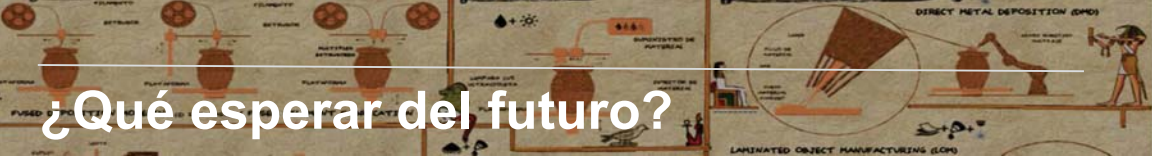
Las tecnologías de impresión 3D evolucionan muy rápidamente.

Intentemos no obstante adivinar el futuro.



“Hacer predicciones es muy difícil,
especialmente cuando se trata del
futuro.”

Niels Bohr.



¿Qué esperar del futuro?

Empecemos por lo fácil

Durante los últimos años, la impresión 3D ha llenado literalmente miles de titulares y ha aparecido en numerosos telediarios y múltiples reportajes. Sin embargo, ahora parece que estamos en un momento de bajón, de una cierta desilusión.

Esto no es algo nuevo, sino que parece tan habitual en la aparición de nuevas tecnologías que hasta se formuló en forma de ley, la llamada **ley de Amara**: “*Tendemos a sobre-estimar el efecto de la tecnología en el corto plazo y a minimizarlo en el largo plazo*”, enunciada por Roy Charles Amara.

Pues bien, a efectos de análisis, resulta adecuado diferenciar entre la fabricación aditiva industrial y su aplicación en el hogar. Los expertos consideran que la impresión 3D en la industria se encuentra ya en una fase consolidada, en la que ya se ha pasado por ese tiovivo de expectativas infladas, y por tanto extendiéndose de una forma sólida en muchas fábricas y en muchos sectores, al ser ya una tecnología conocida.

Sin embargo, la impresión 3D para el consumo personal está claramente en un momento de desilusión, cayendo en picado, tras unos años de mucho ruido mediático. Es por ello que algunas empresas fabricantes de impresoras 3D de sobremesa han anunciado -por vez primera- un decrecimiento en sus ventas.

Impresión 3D industrial

Sin temor a equivocarme, a corto y medio plazo es de esperar una serie de tendencias en la fabricación aditiva, simplemente por las esperadas mejoras tecnológicas y el asentamiento del nuevo paradigma de fabricación:

- Un aumento de la velocidad de trabajo de las impresoras 3D, por múltiples motivos como la introducción de varios láseres en un sistema SLS, o la paralelización de tareas al abarataarse los costes de los distintos componentes.
- Un aumento de la precisión, con capas optimizadas de diferentes grosores, que poco a poco serán cada vez menos perceptibles por el usuario a la vista o al tacto, y que disminuirán a su vez las necesidades de post-producción.
- Una disminución en el precio de las máquinas en todas las tecnologías, junto con un abaratamiento de los materiales (filamentos, polvos, hojas, etc...) que conseguirán que el precio unitario del objeto fabricado en impresora 3D continúe bajando.
- Un mayor volumen de trabajo en todas las tecnologías: cámaras y máquinas cada vez mayores que pondrán cada vez más alto el límite de producción por tamaño del objeto.
- Una mejora de las herramientas de creación de modelos 3D, desde el escaneo al software de modelado, que serán más potentes y fáciles de usar.
- Un mayor conocimiento en el mercado lo que llevará aparejado la disponibilidad de trabajadores más formados y con un menor coste para la empresa.
- En general, una mayor calidad del producto final, que hará que poco a poco algunas tecnologías desaparezcan para dejar únicamente las 3 ó 4 que realmente se revelen como las mejores en cada material.
- La proliferación de fabricantes de maquinaria 3D, de centros de uso y *hubs*, que aumentará el porcentaje de objetos manufacturados con tecnologías de fabricación aditiva.

Todas estas tendencias no eliminarán no obstante aún las otras tecnologías, sino que los tres tipos -aditiva, conformativa y sustractiva-coexistirán y aparecerán procesos mixtos que sacarán lo mejor de cada uno. Lo que sí ocurrirá, lógicamente, es que los puntos en que una tecnología era económicamente más rentable que otra cambiarán. En términos de nuestras curvas de coste, lo que ocurrirá es que la curva de coste unitaria para la fabricación aditiva continuará bajando, y por tanto el número de unidades (tamaño de lote) que habrá que fabricar para que compense la fabricación más tradicional será aún mayor. En definitiva, las economías de escala continuarán

favoreciendo a la fabricación no aditiva, pero se limitará a los casos en que haya que hacer piezas simples y con miles de unidades.

En resumen, la fabricación aditiva continuará su marcha imparable de crecimiento, capturando mercado a las otras opciones, pero sin eliminarlas sino conviviendo con ellas.

La impresión 3D en casa

Hace no muchos años, al poco de nacer, los ordenadores tenían un tamaño descomunal y eran accesibles a sólo unos pocos privilegiados. Cuando imaginaban escenarios futuros, los escritores de ciencia ficción hablaban de ordenadores cada vez más grandes y más potentes hasta alcanzar una inteligencia superior, como la gigantesca *Multivac* de Isaac Asimov.

Pocos imaginaban que el proceso sería pasar del ordenador en el centro de cálculo al ordenador personal producido en masa hasta el mundo actual en el que el móvil más tonto tiene bastante más capacidad de proceso que los grandes ordenadores de los años cincuenta.

Análogamente, los centros de impresión se acabaron convirtiendo en las pequeñas impresoras de chorro de tinta o láser que mucha gente tiene en casa para obtener impresos sus dibujos y trabajos en un momento.

¿Pasará lo mismo con la impresión 3D?

Hay quien opina que en un breve periodo tendremos en los hogares, como un electrodoméstico más, una impresora 3D que nos proporcionará bajo demanda lo que necesitemos. Otros, en cambio, opinan que esto no pasará en el corto o medio plazo, por los múltiples obstáculos que hay que superar hasta llegar a ese escenario.

Es cierto que el tener una impresora de extrusión de filamento en casa empieza a ser algo más conocido, pero en ningún caso puede considerarse que ello vaya a ser algo habitual, por cuanto esta tecnología no es en absoluto suficiente para solucionar las necesidades de un usuario medio. En mi opinión, para llegar al nivel que exigiría la impresora 3D doméstica, falta aún muchísimo y por tanto podemos estar tranquilos: la fábrica no se trasladará a casa. Otra cosa es que -en esto sí que creo que no estamos tan lejos- la fábrica se traslade a la vuelta de la esquina, al menos para determinado tipo de productos.

Mientras tanto, la impresora 3D doméstica permanecerá en el ámbito de los aficionados *makers*, o en los niveles de aprendizaje. ¿Quiere esto decir que recomiendo tener una en casa si no se es un *maker*? Desde el punto de vista de “utilidad” pura y dura, la respuesta es claramente no. Ahora, un consejo, si no quiere perderse aprender de primera mano en qué consiste una de las tecnologías más revolucionarias de los últimos años, mi respuesta es un rotundo sí.

¿Hasta dónde?

Entrando más en detalle de las distintas aplicaciones y tecnologías de la fabricación aditiva, se consideran ya consolidados temas como la impresión de aparatos dentales o los escáneres 3D, de los que podemos esperar por tanto un crecimiento sólido en los próximos años.

Un paso por detrás estarían aplicaciones como los objetos electrónicos fabricados por impresión 3D o la bio-impresión de tejido humano, soluciones que irán consolidándose en periodos más largos de cinco a diez años.

Pero si tratamos realmente de adivinar el futuro, la parte más interesante son aquellas tecnologías que están en un momento inicial de lanzamiento tecnológico y que, por tanto, en condiciones normales debería tardar más de diez años en confirmarse como soluciones reales. ¿Qué podemos encontrar aquí? Un futuro tan interesante como:

- a) Software para el flujo y control de la impresión 3D (es decir, software que haga realmente posible la completa fabricación digital o *smart manufacturing*)
- b) La impresión 4D.
- c) Impresión 3D en “*nanoescala*” y en macro-escala (es decir, objetos minúsculos o gigantescos fabricados así).
- d) Medicinas impresas.
- e) Trasplante de órganos bio-impresos.

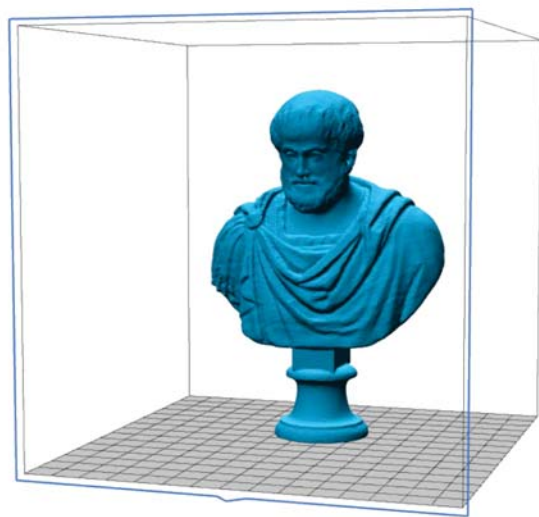
En unos años, como ocurre con otras tecnologías a las que nos hemos acostumbrado muy rápidamente como los smart-phones, nos resultará obvio estar rodeados de aparatos basados de una u otra forma en la impresión 3D. Y para la industria será simplemente un proceso más de

fabricar las cosas mejor y más ágilmente, y nos sorprenderá cuando pensemos que hacía poco tiempo las cosas se hacían de una forma bien distinta.

De todas las aplicaciones y tecnologías, todas ellas con impactos en la sociedad muy relevantes, en mi opinión será precisamente la convergencia de los avances en materiales biológicos y la nanotecnología con la fabricación aditiva la que tenga una mayor relevancia en la transformación de nuestro futuro. La medicina es algo, por definición, personalizado a cada paciente; según mejoremos en ser capaces de solucionar cada problema individualizado avanzaremos hacia un mejor cuidado de la salud. Nuevos profesionales, como los ingenieros biomédicos, nos serán habituales en los centros médicos. Órganos artificiales idénticos a los enfermos a reemplazar o micro-robots capaces de llevar a cabo tareas de cirugía interna dejarán de ser cosa del futuro, y nos llevarán a una sociedad muy distinta a la actual, en la que gracias a la tecnología -la de impresión 3D entre ellas- viviremos más de cien años.

Prueba de Comprensión

Para finalizar, compruebe hasta qué punto ha mejorado su conocimiento de la fabricación aditiva.



“Saber es acordarse.”
Aristóteles

Examen

PREGUNTA 1: La unidad cúbica que compone un objeto tridimensional se conoce como...

- A. Pixel
- B. Vóxel
- C. Téxel
- D. Volumetric Pixel

PREGUNTA 2: ¿Cómo se denomina la fabricación de objetos mediante la eliminación de parte sobrante hasta alcanzar la forma deseada?

- A. Fabricación Aditiva
- B. Fabricación Sustractiva
- C. Fabricación Formativa
- D. Fabricación Eliminativa

PREGUNTA 3: Señale la opción verdadera:

- A. Los modelos 3D a fabricar han de haberse creado con un software específico para la impresión
- B. El rebanado es una fase crítica de la fabricación aditiva
- C. El escáner láser es el método más preciso de escaneo 3D
- D. Cuanto más gruesa sea la capa de rebanado más lenta será la impresión

PREGUNTA 4: La extracción de un objeto impreso en 3D...

- A. Puede llevar un tiempo y procesado relevante dependiendo de la tecnología de impresión
- B. Es una fase trivial
- C. Es crítica en las tecnologías de extrusión de materiales
- D. Ninguna de las anteriores

PREGUNTA 5: El acabado o post-producción de un objeto obtenido por fabricación aditiva...

- A. Consiste en el lijado y lavado del objeto
- B. Consiste en la eliminación de soportes
- C. Consiste en pintarlo
- D. Todas las anteriores, o ninguna, dependiendo de la tecnología

PREGUNTA 6: La rapidez de poder hacer cambios es una cualidad de...

- A. La fabricación aditiva
- B. La fabricación conformativa
- C. La fabricación sustractiva y aditiva
- D. Depende del objeto fabricado

PREGUNTA 7: ¿Cuál de las siguientes es una característica de la fabricación aditiva?

- A. Tiene pocas economías de escala
- B. El coste unitario de producir un objeto aumenta con la complejidad del mismo.
- C. Las geometrías anteriormente imposibles son más baratas de fabricar que las normales.
- D. Permite la democratización de la producción y unas cadenas de suministro más largas.

PREGUNTA 8: Señala las desventajas de la fabricación aditiva

- A. Más costoso que otras tecnologías para grandes tamaños de lote
- B. Anisotropía y baja repetibilidad
- C. La falta de estándares y la posible impredecibilidad de tolerancias
- D. Todas las anteriores

PREGUNTA 9: La fabricación aditiva se ha hecho muy popular en los últimos años...

- A. Por el desarrollo de nuevos materiales y tecnologías y el vencimiento de algunas patentes.
- B. Por el movimiento “*maker*”.
- C. Por el bajo precio de las bobinas de PLA y ABS.
- D. La A y la B son correctas

PREGUNTA 10: ¿Cuál de las siguientes tecnologías es muy usada en la fabricación de objetos metálicos en 3D?

- A. FDM / FFF
- B. Syringe Extrusion
- C. SLS & LOM
- D. Ninguna de las anteriores

PREGUNTA 11: Señale la afirmación falsa sobre la fabricación aditiva:

- A. Puede reducir el inventario.
- B. Tiene los mismos riesgos de seguridad que otras alternativas.
- C. Puede llevar aparejados riesgos de copyright.
- D. Posee ya algunos estándares de fabricación.

PREGUNTA 12: ¿En qué medida mejora el medio ambiente el uso de fabricación aditiva?

- A. Tiene menos residuos y consume menos energía.
- B. Sus materiales son más reciclables.
- C. Tiene menos residuos, reduce el uso de materiales y el coste de transporte.
- D. Todas las anteriores son correctas.

PREGUNTA 13: La impresión 4D...

- A. Es la versión más moderna de la impresión 3D.
- B. Permite introducir en líquidos objetos impresos en 3D.
- C. Programa la materia para cambiar con el tiempo o bajo condiciones particulares.
- D. Todas las anteriores.

PREGUNTA 14: Posibles razones para adoptar una estrategia de fabricación aditiva son...

- A. Mejorar la sostenibilidad medio-ambiental y personalizar el producto.
- B. Hacer geometrías más complejas y mejorar la cadena de producción.
- C. Digitalizar la fabricación
- D. Todas las anteriores.

PREGUNTA 15: Los costes de material en la impresión 3D...

- A. Aumentan al aumentar el tamaño del objeto a fabricar.
- B. Aumentan con el relleno (*infill*).
- C. Son en bruto generalmente más caros que en otras tecnologías.
- D. Todas las anteriores.

PREGUNTA 16: Si queremos fabricar pocos productos al mes pero de alta complejidad mediante impresión 3D, en principio es mejor opción:

- A. Comprar una máquina de impresión 3D de última generación.
- B. Externalizar el trabajo a un proveedor externo de impresión bajo demanda.
- C. Desplegar impresoras de sobremesa y externalizar a un proveedor.
- D. Todas las anteriores, para mejorar nuestra flexibilidad ante la demanda externa.

PREGUNTA 17: ¿Cuál de las siguientes tecnologías NO es de fabricación aditiva?

- A. DLP.
- B. EBM.
- C. CNC.
- D. LOM.

PREGUNTA 18: El papel es un material empleado frecuentemente en la tecnología de:

- A. Ultrasonic Additive Manufacturing
- B. Binder Jetting
- C. Selective Laser Sintering
- D. Laminated Object Manufacturing

PREGUNTA 19: ¿Cuál de las siguientes tecnologías tiene menos problemas de *overhang*?

- A. Syringe Extrusion
- B. SLA / DLP
- C. SLS
- D. Material Jetting

PREGUNTA 20: En el futuro inmediato es razonable esperar:

- A. Un aumento de la precisión y velocidad de trabajo de las impresoras 3D
- B. Una disminución en el precio de las máquinas y disminución de fabricantes y centros de uso
- C. Impresoras 3D capaces de imprimir objetos de mayor tamaño
- D. La A y la C son correctas

Soluciones

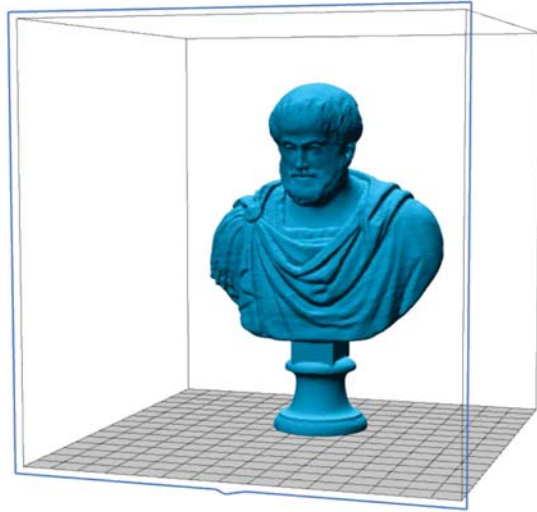
1-B-2-B-3-B-4-A-5-D-6-A-7-A-8-D-9-D-10-D-11-B-12-C-13-C-14-D-15-D-16-B-17-C-18-D-19-C-20-D

Despedida

Enhorabuena. Si el lector ha llegado hasta aquí, y yo he hecho suficientemente bien mi trabajo, debería tener mucho más conocimiento sobre el apasionante mundo de la impresión 3D del que tenía al empezar.

Por otro lado, resulta muy complicado dar una visión exacta de una nueva realidad cuando ésta se modifica - literalmente- mes a mes. Es posible, por tanto, que algunos de los puntos aquí presentados estén ya obsoletos o incluso erróneos.

Estoy seguro que el lector disculpará estos defectos y cualesquiera otros que haya encontrado. Después de todo, recuerde que esta publicación le ha salido gratis...



¡Pobre discípulo el que no deja atrás
a su maestro!

Aristóteles



Glosario de términos

3D printing as a service

Impresión 3D bajo demanda, se refiere el servicio de fabricación por impresión 3D en la cual el usuario envía un modelo 3D en formato digital, escoge el material de fabricación y recibe en su domicilio el objeto fabricado conforme a sus especificaciones.

ABS

El ABS (siglas de *Acrylonitrile Butadiene Styrene*) es un material plástico muy usado en la fabricación aditiva por extrusión de materiales, muy conocido por ser el que encontramos en las famosas piezas de LEGO y en muchas aplicaciones industriales.

Anisotropía

Propiedad de un objeto según la cual algunas cualidades como resistencia, elasticidad, etc. varían según la dirección en que se examine el objeto.

Arduino

Es el nombre de una compañía y de un proyecto hardware de *open-source*, que fabrica placas de desarrollo sencillas y baratas para favorecer la construcción de dispositivos que puedan controlar todo tipo de objetos de la vida real.

B2B

Abreviatura de *Business To Business*, se refiere a las relaciones y transacciones comerciales entre empresas.

B2C

Abreviatura de *Business To Consumer*, se refiere a las estrategias de las empresas comerciales para llegar al cliente final.

CAD

CAD (Computer Assisted Design) es el software de diseño asistido por ordenador en 2D y 3D para la creación de objetos en 2 y 3 dimensiones.

CMM

(CMM, del inglés *Coordinate-Measuring Machine* es un instrumento de medición directa de objetos que emplea un puntero físico con el que se va tocando al objeto al mismo tiempo que se envían coordenadas. Se miden así completamente todas las dimensiones del objeto, siendo un procedimiento muy preciso, pero también muy lento.

CNC

CNC (Control Numérico Computerizado) es una tecnología en la cual una máquina-herramienta es programada mediante ordenador para la ejecución de una serie de trabajos mecanizados por arranque de viruta mediante el movimiento de una fresa (herramienta rotativa de corte).

Complejidad gratis

Una de las grandes ventajas de la fabricación aditiva es precisamente su capacidad de hacer fácil las piezas complejas, de forma que el incremento de coste con la complejidad es mínimo.

Customer empowerment

Customer empowerment o empoderamiento del cliente se refiere a la situación en la que el consumidor tiene un mayor control de sus procesos de compra, muy relacionado con el auto-servicio del cliente.

DED

La familia de tecnologías de deposición directa de materiales (*Directed Energy Deposition*), como su propio nombre indica, tiene la particularidad de que funcionan añadiendo pequeñas cantidades de material de forma directa en cualquier punto del espacio que se desee. Dentro de esta familia, encontramos la tecnología *Direct Metal Deposition (DMD)* o *Laser Metal Deposition (LMD)*.

Democratización de la producción

Hacer accesible la fabricación de determinados objetos a empresas o individuos que antes no lo hacían porque no tenían necesidad de fabricar un alto número de productos, y el coste de hacerlo para uno solo resultaba absolutamente prohibitivo. Esta es una de las principales ventajas de la fabricación aditiva.

Denegación de servicio

Conocido también como ataque DoS (*Denial of Service*), es un tipo de ataque informático en el cual el atacante impide el correcto funcionamiento del elemento informático atacado.

DLP

La tecnología *Digital Light Processing* (DLP) es otra tecnología muy similar a la estereolitografía. Su única diferencia es la forma en que se consigue la solidificación de la resina; en lugar de emplear un láser, se emplea un proyector digital de luz,

DMLS

Selective Laser Melting (SLM) y *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) son los nombres que recibe la tecnología de Powder Bed Fusion que emplea polvos metálicos, los cuales consigue solidificar mediante un láser. La diferencia entre la tecnología SLM y la DMLS es que mientras la primera funde completamente el polvo metálico, la segunda emplea aleaciones (en lugar de un polvo metálico homogéneo del mismo metal) y no funde todo el polvo, sino que consigue la unión de partículas que se funden entre sí sin que todo el metal se funda completamente.

Do It Yourself (DIY)

Literalmente “Hágalo usted mismo” es la denominación que recibe el fenómeno de querer hacer una solución a una necesidad en lugar de comprarla hecha.

Domótica

Conjunto de técnicas orientadas a automatizar una vivienda, integrando los sistemas de seguridad, gestión energética, ocio o telecomunicaciones.

DRM

Sistemas de gestión de derechos digitales (*DRM - Digital Right Management*), es el nombre que reciben las tecnologías que buscan impedir la copia ilegal de archivos digitales.

EBM

Electron Beam Melting (EBM) es una tecnología de fabricación aditiva que es muy similar a SLM, y -al igual que esta- produce modelos muy densos a partir de polvo metálico. La diferencia fundamental con SLM es que EBM emplea un

haz de electrones de alta energía en lugar de un láser para fundir el polvo metálico.

Escaneo 3D (3D scanning)

Es el proceso de generación de un modelo 3D de ordenador a partir de un objeto real.

Estereolitografía (SLA)

Charles Hull inventó la estereolitografía (SLA), primera tecnología de fabricación aditiva basada en polímeros sensibles a la luz ultravioleta (reaccionan ante la luz solidificándose).

Posteriormente patentaría su invento en 1986 y sobre esa patente desarrollaría su empresa 3D Systems.

Extrusor

El extrusor es la pieza de una impresora 3D que calienta el filamento de material y la deposita de forma precisa moviéndose hasta el punto exacto. Hay muchos tipos distintos de extrusores. Es la pieza que en mayor medida determina la calidad de la pieza impresa, por lo que suelen ser intercambiables.

Fabricación aditiva

Conjunto de tecnologías de fabricación por las que un diseño digital en 3D se transforma en un objeto real, uniendo poco a poco material (o materiales) de forma controlada por un ordenador, como oposición a las tecnologías sustractivas.

Fabricación conformativa

Aquella fabricación en la que un material es obligado (por presión, a golpes, derritiéndolo o por cualquier otro procedimiento) a adquirir la forma y dimensiones que nos interese.

Fabricación sustractiva

Aquella en la que se van eliminando trozos de material (a golpes, lijado, fresado u otro procedimiento) de un bloque compacto inicial hasta conseguir el producto deseado.

FDM

La denominación de tecnología como FDM (*Fused Deposition Modeling*) es *copyright* de la compañía *Stratasys*, por lo que se usa normalmente el término FFF (*Fused Filament Fabrication*) para referirnos a la técnica de fabricación en la que se usa un filamento de plástico que, convenientemente controlado, se lleva a través de un extrusor que lo calienta y lo deposita poco a poco hasta construir el objeto.

FFF

La denominación de tecnología como FDM (*Fused Deposition Modeling*) es *copyright* de la compañía *Stratasys*, por lo que se usa normalmente el término FFF (*Fused Filament Fabrication*) para referirnos a la técnica de fabricación en la que se usa un filamento de plástico que, convenientemente controlado, se lleva a través de un extrusor que lo calienta y lo deposita poco a poco hasta construir el objeto.

Fotogrametría

Una técnica de escaneo 3D que consiste en realizar una serie de fotografías de un objeto, desde todos los ángulos posibles. A continuación, un software se encarga de encontrar los puntos comunes entre las distintas fotografías hasta crear una malla representando el objeto tridimensional.

G-code

Es el nombre más conocido del lenguaje de programación RS-274 empleado en control numérico, usado principalmente en automatización y en la impresión 3D.

Geometrías imposibles

Se denomina así a la forma de objetos que la fabricación aditiva ha hecho posible su producción de una única pieza y que anteriormente es imposible de fabricar por otras tecnologías a no ser que se hiciera en varias partes que eran posteriormente unidas entre sí.

Infill

Término que designa la forma en que vamos a rellenar las partes sólidas del objeto fabricado con impresión 3D. En general, con rellenos del orden 15-20% el resultado es lo suficientemente robusto, si bien dependerá de la geometría escogida, del material de fabricación, y de las propiedades que necesitemos para el objeto en cuestión. Hay obviamente muchas formas de rellenar una

capa, si bien las más comunes son en panal (hexagonal) o triangular, por su mayor resistencia con un menor relleno.

Inteligencia colectiva

Término con el que se conoce al fenómeno mediante el cual entre toda la comunidad de Internet especialista en algún área, compuesta de miles de individuos, es posible encontrar la mejor solución a un problema. En los últimos años se ha generalizado la opción de plantear retos (*challenges*) a la comunidad ofreciendo un pequeño premio en metálico a la mejor solución, lo que ha demostrado ser una forma eficaz y barata de resolver problemas.

Internet of Things (IoT)

El concepto de Internet de las cosas, IoT por sus siglas en inglés, aparece como el nombre a que se refiere la tendencia actual de ir interconectando más y más objetos cotidianos que nos rodeen con Internet.

Inyección de Aglutinante

La inyección de Aglutinante (Binder Jetting) es una tecnología de fabricación aditiva similar a las de fusión de lecho de polvo (Powder Bed Fusion) pero con la diferencia de que consigue la fusión de materiales no mediante calor, sino mediante la adición de un material aglutinante que une entre sí las distintas partículas de polvo.

Inyección de Materiales

Tecnología de fabricación aditiva que recibe su nombre por su similitud con las tecnologías de inyección de tinta (*Inkjet*) empleadas en las impresoras en papel. Su funcionamiento es el siguiente: una cabeza móvil en los ejes X e Y se encarga de inyectar múltiples pequeñas gotas de material en estado viscoso, que inmediatamente se solidifican mediante una lámpara de rayos ultra-violeta

Laminación de hojas

La **laminación de hojas** es una tecnología de impresión 3D que usa material en hojas que se cortan con la capa necesitada y se unen entre sí mediante algún mecanismo.

Laminated Object Manufacturing

Laminated object Manufacturing es la tecnología de laminación de hojas más común, y se emplea fundamentalmente en papel recubierto con adhesivo, plástico o un fino laminado metálico.

Maker

De toda la vida ha existido gente con ganas de fabricar objetos con sus propias manos: manitas, artesanos, ingenieros, artistas, inventores, etc... Sin embargo, en el año 2005, y al abrigo del lanzamiento de una nueva revista (*MAKE Magazine*) se produjo un fenómeno de catálisis y unión de los amantes del *DIY* (el *Do It Yourself*, o hágalo usted mismo), que comenzaron a auto-denominarse *makers*, y a su movimiento, el movimiento *Maker*.

Mass customization

Estrategia comercial en la cual llevamos la personalización/adaptación al individuo de nuestro producto a muchos más clientes. Cada cliente recibe un producto único.

Multi-jet fusion

Tecnología desarrollada por HP, híbrido entre la tecnología SLS y la inyección de materiales, buscando obtener lo mejor de ambos mundos.

Overhang

Nombre que reciben las partes de un objeto 3D que están en voladizo y que por ello tendrán problemas en ser impresas si no se emplean soportes.

PEEK

Polieteretercetona (PEEK): Polímero técnico termoplástico semi-cristalino, empleado en la fabricación de extrusión de materiales, de mucha mayor calidad que PLA y ABS.

PEI

La poliéterimida (PEI) es un termoplástico de alta resistencia a la temperatura y al impacto, y buena rigidez.

Personalización

Personalización (“*customización*”) del producto, es el nombre que se da a la posibilidad de cambiarlo y adaptarlo a las necesidades individuales de cada cliente.

Pixel

Unidad básica de la que están compuestas las imágenes digitales. Es la unión de millones de pequeños *pixels*, puntos de color imperceptibles uno a uno a simple vista, lo que construye la imagen final.

PLA

Siglas de *PolyLactic Acid*, el PLA es un material plástico muy usado en la fabricación aditiva por extrusión de materiales. La temperatura de fusión del PLA (aprox. 200°) es inferior al ABS (alrededor de 240°-250°) por lo que es menos sensible al *warping* y más usado como “nivel de entrada” para impresoras de usuarios en el mercado doméstico.

Powder Bed Fusion

Bajo este nombre se agrupan las diferentes tecnologías que consiguen la fabricación 3D mediante la fusión de un material en polvo, que se encuentra dentro de una cámara. Según sea éste material (metales vs elementos cerámicos, cristales o plásticos) o según el método por el que se consiga la solidificación de ese polvo tenemos las diferentes tecnologías dentro de esta categoría.

Prosumidor

Consumidor que se auto-abastece, produciendo lo que necesite consumir, y que se considera el estado último de la fabricación aditiva.

Prototipado rápido

Se denomina así a la primera aplicación de la fabricación aditiva: la posibilidad de fabricar muy rápidamente un nuevo diseño que, aunque no tenga exactamente las mismas propiedades del producto final, permita evaluar y analizar la validez del diseño, ahorrando así costosos errores de producción. Por ser su primera aplicación, aún es común emplear indistintamente los términos sistemas de prototipado rápido, impresión 3D y fabricación aditiva.

Raspberry Pi

Es un ordenador muy sencillo y de bajo costo fabricado en el Reino Unido por una fundación de igual nombre con el objetivo inicial de estimular la enseñanza de la computación en escuelas, pero que ha sido usado por la comunidad open source para el desarrollo de todo tipo de soluciones tecnológicas de bajo coste.

Rebanado (Slicing)

Tercera fase de la fabricación aditiva, consistente en establecer las capas que, una a una, van a construir el producto final; esto se hace cortando (rebanando) el modelo en trozos superpuestos muy finos uno sobre otro.

SLA

Primera tecnología de fabricación aditiva basada en polímeros sensibles a la luz ultravioleta (reaccionan ante la luz solidificándose).

SLM

Selective Laser Melting (SLM) y *Direct Metal Laser Sintering* (DMLS) son los nombres que recibe la tecnología de Powder Bed Fusion que emplea polvos metálicos, los cuales consigue solidificar mediante un láser. La diferencia entre la tecnología SLM y la DMLS es que mientras la primera funde completamente el polvo metálico, la segunda emplea aleaciones (en lugar de un polvo metálico homogéneo del mismo metal) y no funde todo el polvo, sino que consigue la unión de partículas que se funden entre sí sin que todo el metal se funda completamente.

SLS

Selective Laser Sintering (SLS) es el nombre de la tecnología empleada para la impresión 3D de materiales no metálicos en *Powder Bed Fusion*.

Smart manufacturing

Smart manufacturing o *digital manufacturing* es el término con el que se conoce el futuro modelo de fabricación en el que todos los procesos se realizan de forma digital y colaborativa entre todos los intervinientes (diseño, fabricación, distribución, etc...).

Sonotrodo

En una herramienta de soldadura, el sonotrodo es la parte del conjunto oscilante que se apoya en una de las piezas a soldar, transmitiendo vibraciones hasta lograr la fusión.

Soportes

Se denomina así al material extra impreso junto al objeto fabricado con el único propósito de soportar las partes de este que caso de no existir lo soportes

estarían al aire o sobresaliendo con un ángulo tal que sería imposible su impresión.

Supply chain

La cadena de suministro (*supply chain*) es el nombre que se le da a la secuencia de pasos ejecutados para la producción, distribución y venta de un producto desde su inicio hasta llegar al consumidor final.

Syringe extrusion

Tecnología de extrusión de materiales de propósito general (literalmente, extrusión de jeringuilla), que se emplea con cualquier tipo de material con tal de que se encuentre en formato cremoso o viscoso.

Su funcionamiento es muy sencillo: en lugar de un extrusor que caliente el filamento hasta la boquilla, en su lugar tenemos una jeringa motorizada que se ocupa de hacer llegar el material a imprimir en estado sólido hasta la boquilla.

Ultrasonic Additive Manufacturing

Ultrasonic Additive Manufacturing (UAM) es una técnica de laminación de hojas en la cual se unen hojas metálicas: pero en lugar de usar adhesivos químicos o fundir el metal, logra la unión de las capas mediante ultrasonidos.

Vat Polymerization

Bajo este nombre se agrupan las tecnologías que consiguen la impresión 3D mediante la polimerización de una cubeta (VAT) llena de resina fotosensible.

Vóxel

Llevando el concepto de pixel a las tres dimensiones, podemos considerar que cualquier objeto está compuesto de “*pixels en 3D*”, llamados **vóxels** (del inglés, *volumetric pixel*, pixels con volumen).

Warping

Problema típico en la fabricación por extrusión de materiales, derivado de la diferente temperatura que tienen diferentes partes del objeto que está siendo impreso: el material sale del extrusor a alta temperatura y -especialmente en las primeras capas- se encuentra con la plataforma o capas anteriores a una temperatura muy inferior, creando una fuerza contractiva que deforma el objeto.

Wearable

Anglicismo con el que se denomina a los objetos tecnológicos que se llevan puestos como si fueran ropa o accesorios de moda.

DIRECTED ENERGY DEPOSITION

DIRECT METAL DEPOSITION (DMD)

Seguro que ha oído hablar de la Fabricación Aditiva, si no con este término, en su forma más conocida de impresión 3D. En este libro se explica en qué consiste esta nueva tecnología y porqué cambiará la forma en que producimos y consumimos actualmente.

Contenido:

- Definición y Conceptos clave
- ¿Cómo se hace? El proceso genérico de fabricación aditiva.
- Ventajas y Problemas de la fabricación aditiva
- Historia
- Aplicaciones y ejemplos sectoriales
- La creación de nuevas cadenas de suministro
- Evaluación de una solución de fabricación aditiva
- Otros factores como Seguridad, Medio ambiente, aspectos legales, ...
- Explicación de las principales tecnologías: FFF, SLA, DLP, SLM SLS, LOM, UAM, ...
- El futuro de la fabricación aditiva
- Preguntas de repaso