



DIRECCIÓN
E INGENIERÍA
DE PROYECTOS

N.º 4

Diseño, energía y digitalización en proyectos de I D+i

Andrés Pastor Fernández (ed.)

Índice

PRÓLOGO 7

CAPÍTULO 1

La impresión 3D como pilar tecnológico de la Industria 4.0 10

CAPÍTULO 2

Factores críticos de las interfaces industriales para la digitalización de la industria 47

CAPÍTULO 3

Experiencias y desafíos actuales en relación al desarrollo de proyectos internacionales de ingeniería térmica y energías renovables 76

CAPÍTULO 4

Directrices para proyectar soluciones de climatización solar Fresnel con almacenamiento en sales. Caso de éxito: rehabilitación del Instituto Rosario (Cádiz) 114

CAPÍTULO 5

La prueba del software como parte esencial en la industria 4.0 162

CAPÍTULO 6

Hacia la mejora de procesos: propuesta metodológica en el ámbito astillero 4.0 198

BIBLIOGRAFÍA 227

AUTORES Y AFILIACIONES PROFESIONALES 250

CAPÍTULO 1

La impresión 3D como pilar tecnológico de la Industria 4.0

Juan Pablo Carrasco-Amador

José Luis Canito-Lobo

Diego Carmona-Fernández

Jacinto Salas-Cortés

1. Introducción y justificación

La digitalización de nuestras vidas es algo que ya asumimos con naturalidad. En las últimas décadas, numerosas tecnologías innovadoras como los *smartphones*, las *tablets*, la robótica, la inteligencia artificial, el internet de las cosas y la cultura «hágalo usted mismo», entre otras muchas tecnologías disruptivas, han tenido una gran influencia en prácticamente todos los aspectos de la sociedad actual (Morales, 2017a). Convirtiéndose, todo ello, en el motor precursor de lo que se conoce hoy en día como la Industria 4.0 o cuarta revolución industrial.

El término Industria 4.0 surge como impulso del gobierno alemán y del sector automovilístico (año 2010) para favorecer la modernización de su tejido empresarial, muy dependiente del sector productivo (Schroeder, 2017). Se busca fomentar industrias capaces de desarrollar productos de alto valor añadido, capaces de adaptarse a las necesidades del mercado, en un corto espacio de tiempo. Es decir, se busca el desarrollo de una producción más descentralizada e innovadora.

FIGURA 1. Evolución de la industria (reelaborada a partir de MITYC, 2015)



La Industria 4.0, como se puede observar en la figura 1, implica la promesa de una nueva revolución, que combina técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías inteligentes que se integrarán en las organizaciones y en las personas (Deloitte, 2017). Aunque para una parte importante de la población el término Industria 4.0 pueda pasar desapercibido, lo que sí que es cierto es que este nuevo panorama tecnológico e industrial nos afecta a todos.

La factoría del futuro se prevé con la capacidad de producir objetos diversos dentro de la misma línea de producción, mediando poca intervención humana, capaz de convertir la fabricación y la producción en un servicio más. Las nuevas tecnologías favorecen una disminución de los costes de entrada en los medios de producción y la fabricación sencilla permite llevar la innovación a todos los sectores de la población (TRSD, 2018c).

1.1 Pilares de la industria 4.0

Según el Ministerio de Industria, Energía y Turismo (2015) son cinco los aspectos principales de la cuarta revolución industrial: los sistemas ciberfísicos, la industria y los productos inteligentes, el internet de las cosas, la hiperconectividad y el *big data*. Sin embargo, desde el Consejo General de Colegios Oficiales de Ingenieros Industriales de España se señala una clasificación más extensa que agrupa de manera más exhaustiva los distintos elementos de la Industria 4.0 (CGCOOI, 2016):

- *Big data* e inteligencia artificial: El denominado *big data* constituye el cúmulo de informaciones dedicadas a encontrar patrones. Aplicado a la industria, está adquiriendo gran relevancia gracias a su uso para lograr una mayor eficiencia de los procesos industriales. Esta nueva disciplina viene asociada a la inteligencia artificial, ya que, gracias a los datos masivos, las máquinas podrán aprender de forma más eficaz y continua.
- Internet de las cosas: La hiperconectividad está a la orden del día y cada vez más objetos cotidianos cuentan con conexión a internet.
- Robótica: Como tal, la robótica, ya viene estando presente en la industria desde hace años, si bien, el desarrollo de máquinas autónomas, mediante el uso de sensores, abre nuevos campos en multitud de sectores.

- Realidad aumentada y realidad virtual: Están permitiendo tanto la monitorización de procesos como la simulación de tareas, haciendo sistemas flexibles capaces de anteponerse al fallo, aprender de él o enfrentarse a nuevos productos y retos sin tener que mediar el operario.
- Cibermercados: La economía global, tras la digitalización por medio del desarrollo de Internet, ha permitido una nueva forma de comunicación, de compraventa y de transacciones financieras mucho más directa y rápida. Además, la producción basada en demandas generadas automáticamente, adaptadas y, por tanto, personalizadas al usuario, son un paso más en la producción en cadena personalizada, de cara a proveer aquello que el cliente necesita en un mundo cambiante.
- Impresión 3D y fabricación aditiva: Aunque la hemos dejado para el final, constituye, al igual que los anteriores, un pilar fundamental sobre los que se sustenta esta nueva revolución industrial. La impresión 3D tiene un papel fundamental en este proceso de evolución de los sistemas de fabricación tradicionales hacia una fabricación capaz de convertir la información del diseño en el producto deseado, sin mediar la fabricación, el ensayo de herramientas y el utillaje, reduciendo notablemente el post-procesado, así como el exceso de material. Como curiosidad cabe mencionar que la fabricación aditiva la lleva empleando el ser humano desde hace miles de años en la cerámica.

En la factoría robotizada del presente y del futuro, que confía en la inteligencia artificial, los robots flexibles y la impresión 3D, las posibilidades de personalización y adaptación de la producción, junto a la reducción de costes y a la especialización del trabajo, pretenden lograr el resurgir de la fabricación en Europa y EE. UU. (3DFils, 2018) (TRSD, 2018b). Lo que subyace también detrás de la Industria 4.0 es la necesidad de relocalizar las fábricas. El aumento de los precios de mano de obra en China, así como las recientes crisis diplomáticas, han fomentado la necesidad de una producción cercana y de calidad, lo que además genera una salida muy válida al personal altamente cualificado europeo y estadounidense. Todo lo anterior, con sus correspondientes conexiones, a las que se añaden otras tecnologías no menores, es hoy en día compartido por la mayoría de los expertos en la materia según se debatió en el

Congreso de la Industria Conectada 4.0 celebrado en Madrid en septiembre de 2018, del cual entresacamos el esquema reflejado en la figura 2.

FIGURA 2. Pilares de la industria 4.0 (reelaborada a partir de Palacios, 2016)



2. Objetivos

El presente capítulo tiene como objetivo principal describir cómo la impresión 3D se ha transformado en pilar fundamental de la Industria 4.0, algo que ha sido posible gracias al notable desarrollo experimentado en los últimos años. Como objetivos adicionales, se pretende dar respuesta a algunas cuestiones del tipo: ¿qué ventajas aporta? ¿En qué sectores se aplica? ¿Cómo se realiza la impresión mediante deposición fundida? Además, se aportan ejemplos de proyectos e investigaciones, se detallan metodologías que hacen posible su implantación, se alerta de la necesidad de gestionar y regular aspectos tan importantes como su certificación y explotación como modelo de negocio y, por último, se aporta una visión sobre cuál será su futuro.

3. Origen y desarrollo de la impresión 3D

No es fácil concretar una fecha que fije su origen, pero sí que hay ciertas fechas claves en el desarrollo de esta tecnología. Una de ellas es el año 1984, en este año Charles Hull, cofundador de 3D Systems, desarrolló la estereolitografía, conocida como SLA o SL. También conocida como fabricación óptica o foto-solidificación (3DFils, 2018), consiste en un sistema de fabricación orientado a la prueba de modelos, patrones o prototipos funcionales antes de su paso a la fabricación real. En el año 1986, Charles Hull obtuvo la patente del método y del equipo para realizar objetos sólidos mediante impresión sucesiva de finas capas de un material, que se endurece por polimerización mediante la exposición a la luz ultravioleta, proceso también denominado cura. Igualmente, también se atribuye a Charles Hull el desarrollo del formato de archivo STL, utilizado hoy en día por la mayoría de *softwares* para impresión (3DFils, 2018). En esa misma década de los años ochenta se produjo también el desarrollo de las otras dos principales tecnologías de fabricación aditiva.

En el año 1988, Carl Deckard (Universidad de Texas) presentó la patente para la tecnología de sinterización por láser selectiva (SLS). Se trata de una técnica de fabricación aditiva que emplea polvo, que es posteriormente fundido y pegado entre sí, mediante el uso de un láser como fuente de energía. Se consigue crear una estructura sólida, uniendo el material por medio de un láser, que apunta automáticamente a los puntos definidos en el espacio por un modelo 3D. En esos mismos años, Scott Crump, cofundador de Stratays, desarrolla y crea la última de las tres tecnologías principales de impresión 3D que se emplean hoy día. Nos referimos a la deposición por material fundido o modelado por deposición fundida (FMD). Crumpt inventó y patentó la tecnología FMD en 1989. Esta tecnología es la que está detrás de las impresoras 3D de escritorio. Esta técnica es considerada frecuentemente el método existente más sencillo (Sánchez, 2017).

La década de los noventa permitió un lento pero continuo desarrollo de las tecnologías comentadas, acompañado también de una diversificación en usos y aplicaciones. Destacaron los desarrollos de Tim Anderson y Jim Bredt, ambos estudiantes del MIT, quienes decidieron en el año 1995 sustituir la tinta de las impresoras que tenemos en casa por un material granulado (Grupo Garatu IT solutions, 2018). Como hemos visto, aunque la tecnología aplicada

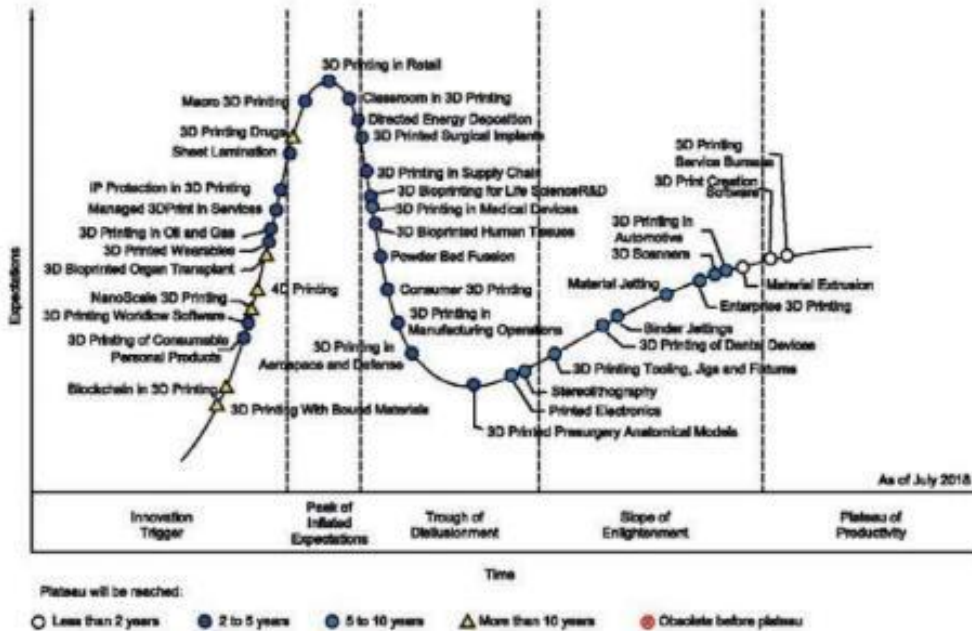
en la impresión 3D tiene ya más de treinta años, no fue hasta la primera década del siglo XXI cuando esta tecnología pudo dar el salto que necesitaba al mercado comercial.

En lo relativo a la deposición por material fundido (FMD) el año 2005 fue clave. En esa fecha, Adrian Browyer inició el proyecto RepRap, de impacto mundial para la auto-replicación de impresoras 3D de código abierto. Su iniciativa consiste en crear una máquina autorreplicable que pueda ser usada para prototipado rápido y manufactura. Es decir, una impresora 3D capaz de fabricar objetos en tres dimensiones cuya base es un modelo hecho en ordenador (Martínez, 2011). Debido al potencial de la autorreplicación, el profesor Browyer advirtió la posibilidad de distribuir a bajo coste máquinas RepRap a personas y comunidades, permitiéndoles crear (o descargar de Internet) productos y objetos complejos, sin la necesidad de maquinaria industrial costosa. Esto da a RepRap el potencial de transformarse en una poderosa tecnología disruptiva, similar a otras que han anticipado bajos costos en tecnologías de fabricación.

Hoy en día esta técnica de fabricación está presente tanto en procesos productivos a gran escala como en muchas viviendas, a modo de herramienta de trabajo personal o de simple pasatiempo (Grupo Garatu, 2018). El año 2009 también representa un antes y un después en el sector, al ser el año en el que la patente de la tecnología FDM caducó. Esto provocó la creación de un gran número de empresas, cuya irrupción en el mercado generó una mayor oferta y por tanto, una caída en los precios de las máquinas, haciéndolas más accesibles y socializando la impresión 3D.

Desde el año 2010 hasta el día de hoy hemos vivido una gran expansión de las impresoras 3D de uso doméstico, que han invadido el mercado. Con este gran número de máquinas, de aplicaciones, de usos y de usuarios, este tipo de impresión ha conseguido una presencia más que notable en la sociedad, lo que se ha visto favorecido gracias a su aparición en los medios de comunicación, Internet y redes sociales. Las impresoras 3D no paran de evolucionar día a día, saliendo al mercado nuevos modelos que cada vez imprimen más rápido, son más eficientes y permiten el uso de más materiales. La tecnología de fabricación aditiva está llegando muy rápidamente a su madurez según la conocida curva de Gartner (Goehrke, 2019). Así es como se denomina a la representación de la madurez, adopción y aplicación comercial de una tecnología específica, como se muestra en la figura 3.

FIGURA 3. Curva de Gartner de la impresión 3D (reelaborada a partir de Goehrke, 2019)



4. ¿Qué ventajas aporta la impresión 3D y qué inconvenientes presenta?

Antes de señalar las ventajas e inconvenientes que presenta la fabricación aditiva repasemos los sistemas convencionales de fabricación tradicional:

- ✓ Por extracción de material. Se da la forma a la pieza a fabricar, sustrayendo material de un bloque, para darle el formato deseado. Estos tipos de máquinas son los tornos, las fresadoras, los CNC, etcétera. Permite tratamientos posteriores para mejorar las características de las piezas.
- ✓ Por fundición por colada. El material se funde y se vierte en un molde hasta que este se llena. Cuando se enfría se retira el molde, pasando la pieza a un postprocesado o no. Este método también permite tratamientos posteriores para mejorar las características de las piezas.

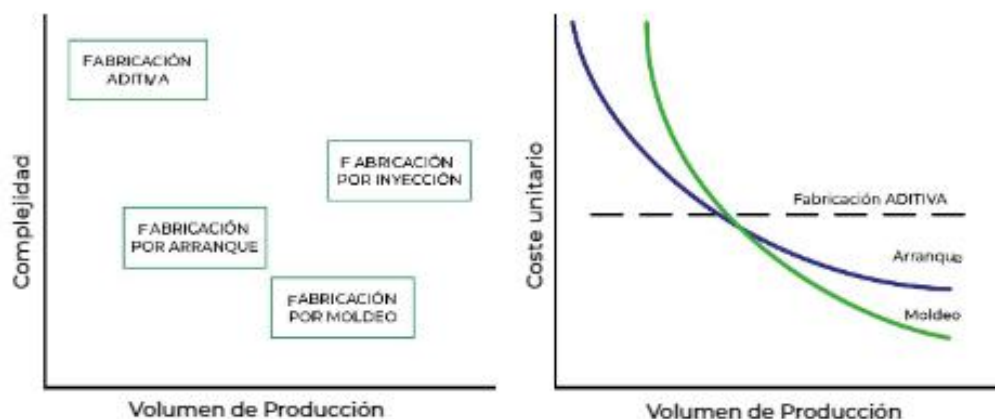
- ✓ Inyección de material. El material se funde y se introduce en un molde a presión mediante inyección por boquillas. Variante de este sistema sería la fabricación por extrusión.

Como adelanto de la comparativa, se muestra un gráfico en el que se sitúan las distintas tecnologías de fabricación en función del número de piezas a fabricar y la complejidad de las mismas y otro que refleja su situación en base al volumen de producción y al coste unitario (figura 4).

Dentro de las ventajas que la impresión 3D ofrece frente a los procesos de fabricación convencionales, las más destacables son (Grupo Garatu, 2018) (Gómez Reyes, 2017):

- Se trata de una fabricación competitiva cuando se habla de series pequeñas de productos en función de la demanda. Además, este método no está atado a una alta inversión inicial necesaria para otros métodos de fabricación, como son los tradicionales moldes.
- La posibilidad de reproducir prácticamente cualquier geometría, liberando el proceso de diseño de las restricciones de la producción tradicional.

FIGURA 4. Tecnologías de fabricación en función del número de piezas a fabricar y la complejidad de las mismas (izquierda), volumen de producción y coste unitario (derecha)



- El hecho de añadir dificultad geométrica a una pieza no conlleva un incremento significativo de los costes de producción.
- Permite la diferenciación y la personalización de los productos por parte de los consumidores, no encareciendo por ello el coste.
- Ofrece a los desarrolladores del producto la capacidad para imprimir partes y montajes con diferentes materiales, con diferentes propiedades mecánicas y físicas, en un simple proceso de ensamblaje.
- Una menor cantidad de material de desecho.
- Una mayor velocidad de fabricación. El tiempo que transcurre desde que una pieza pasa del diseño al final de su fabricación es mucho menor que en cualquiera de los otros métodos.
- Su velocidad y facilidad del prototipado, esto permite un menor riesgo al acceder a los mercados y corregir errores en el diseño, por ejemplo, de moldes, con un bajo coste.

Señalamos, asimismo, los inconvenientes más relevantes que presenta con respecto a los métodos de fabricación tradicionales:

- Mayor coste frente a producciones largas.
- Menos materiales disponibles, colores, calidades...
- Menor resistencia mecánica.
- Menor precisión.
- Peores acabados.

No debe obviarse, a tenor de lo dicho, que la fabricación mediante impresoras 3D no puede sustituir los métodos tradicionales en multitud de aplicaciones en un futuro próximo.

5. Tecnologías para la impresión 3D

Seguidamente se exponen las distintas tecnologías que utilizan las impresoras 3D. Cada una de ellas cuenta con diversas singularidades, por ejemplo, el coste del equipo, los materiales que puede utilizar, el tiempo de fabricación, el acabado, el coste de la pieza, etcétera. Todas son tecnologías en proceso de mejora continua, que avanzan a un ritmo que se puede calificar como exponencial.

Al margen del abaratamiento de los equipos, que se aprecia continuamente, se están produciendo nuevos avances especialmente, desde el punto de vista de las impresoras, en la velocidad de impresión, así como en la posibilidad de utilizar nuevos materiales.

Como consecuencia de la distribución del *software* y *hardware* libre, se ha creado una comunidad a nivel internacional de los llamados *makers*, que difunden sus experiencias y conocimientos de forma gratuita y desinteresada a los usuarios de las máquinas de código abierto, resolviendo las dudas que puedan surgir en el montaje, ajuste, puesta a punto, mantenimiento o cualquier otro tema, de las máquinas más utilizadas (Morales, 2017b).

Cabe destacar también la creación de los FABLAB (acrónimo del inglés Fabrication Laboratory), talleres de fabricación digital de uso personal, es decir, un espacio de producción de objetos físicos, a escala personal o local, que agrupa máquinas controladas por ordenadores. Igualmente debemos remarcar la creación de las redes de esos mismos. Su particularidad reside en su tamaño y en su fuerte vinculación con la sociedad más que con la industria, convirtiéndose en centros de formación, de generación de ideas, de oportunidades y de conocimientos digitales. Lo que, en ocasiones, sin lugar a dudas, hace de ellos puntas de lanza de la visión de la tecnología y, por tanto, de la Industria 4.0.

Por otra parte, las grandes corporaciones están apostando fuerte en I+D+i en fabricación aditiva, inversiones que van en aumento por cuestiones, entre otras, de la propia actuación de las empresas, buscando ventaja competitiva (TRSD, 2018a). Estas dos filosofías, las de los *makers* y la de las empresas, complementarias entre sí, están haciendo posible un extraordinario crecimiento de la fabricación aditiva. Las tecnologías más desarrolladas en la actualidad se pueden dividir en varios grupos, esquematizándose en la figura 5 y mencionados a continuación (Romero, 2017):

- Fotopolimerización. Dentro de este grupo se encuentran las impresoras SLA (Estereolitografía), las DLP (Digital Light Processing) así como las CDLP (Continuous Digital Light Processing). Son las llamadas impresoras 3D de resinas. El funcionamiento es similar en las tres: consiste en un fotopolímero líquido (resina) en una cubeta, que se endurece selectivamente, capa a capa, mediante polimerización activada por la luz. En la SLA mediante luz láser, en la DLP con una luz digital, y la impresión CDLP es similar a la DLP, solo que consigue una mayor velocidad de impresión por el propio funcionamiento mecánico de la impresora. Tienen muy limitados los materiales, siempre plásticos termoestables que pueden utilizar. La calidad y los detalles que se obtienen de las piezas impresas son muy relevantes. Cuenta con espesores de capas entre 25 y 300 micras. Los equipos de sobremesa, con base de impresión del orden de 20x20 cm, tienen un coste poco mayor que las FDM. Las piezas necesitan un curado posterior para consolidar sus propiedades, normalmente con alcohol isopropílico.

FIGURA 5. Fablab Escuela de Ingenierías Industriales UEx



- **Extrusión de material (FDM).** Este tipo de impresoras son las más extendidas y populares. Tienen un coste bajo, tanto de adquisición como de mantenimiento, teniendo además otras ventajas sobre las otras tecnologías. Las impresoras FDM (Fused Deposition Modeling) cuentan con un carrete de filamento, de base un polímero, al que se le pueden agregar aditivos que alimenta a un cabezal de extrusión, que está equipado con una boquilla calentada. Una vez que la boquilla alcanza la temperatura deseada un motor impulsa el filamento a través de ella, fundiéndolo. La impresora mueve el cabezal de extrusión, o la base donde se fabrica la pieza, depositando el material fundido en lugares precisos, donde se enfría y se solidifica. Cuando se termina una capa, se crea otra encima de la anterior y de esta forma se termina la pieza. Después de la impresión la pieza generalmente está lista para usar, pero puede requerir algún tratamiento posterior, como la eliminación de las estructuras de soporte o el alisado de la superficie.
- **Material Jetting (MJ).** Esta tecnología de impresión funciona de manera parecida a una impresora de papel (2D). El cabezal de impresión, similar al utilizado para la impresión por inyección de tinta, dispensa gotas de un material fotosensible que se solidifica bajo luz ultravioleta (UV), formando así capa por capa. Los materiales utilizados en MJ son fotopolímeros termoestables (acrílicos) en forma líquida. La impresión de cada capa se realiza de una sola pasada (a diferencia de las impresoras de fotopolimerización). El espesor de la capa está entre las 16 y las 32 micras. La impresión de materiales múltiples, existiendo una amplia gama de ellos, permite conferir a las piezas propiedades distintas por zonas de una misma capa. Actualmente existen tres tipos de máquinas MJ, las que imprimen polímeros (MJ), las de metal (NPJ) y las de cera (DOD). Son máquinas con un alto coste de adquisición.
- **Binder jetting (BJ).** Esta tecnología de impresión utiliza una cama de polvo (polímero, metal o cerámico) sobre la que se deposita un aglomerante de manera selectiva, uniendo estas áreas para formar una parte sólida. Una vez terminada esa capa, la máquina extiende sobre el lecho anterior otra fina capa del polvo, volviendo a hacer otra pasada el dispensador de aglutinante, repitiéndose el proceso hasta que se termina la pieza. Esta

queda sumergida en el polvo suelto de las múltiples pasadas. Después, en muchos casos, es necesario someterla a algún posprocesado, por ejemplo, sinterizado. La altura de la capa, en el caso de los metales, suele ser del orden de 50 micras. Son equipos con un elevado coste.

- **Powder bed fusión.** Esta familia de impresoras utiliza un láser que sinteriza selectivamente las partículas de un polvo, fusionándolas y construyendo una parte, capa por capa. El funcionamiento es similar a la BJ, solo que en este caso las partículas quedan fusionadas, no aglutinadas. Se utiliza tanto para la creación de prototipos de componentes funcionales como para series de producción pequeñas, ya que ofrece una gran libertad de diseño, una alta precisión y produce piezas con buenas propiedades mecánicas. Las impresoras de esta familia son las SLS (Selective Laser Sintering) para sinterizados de polímeros termoplásticos que se suministran en forma de grana. Dentro de este tipo está la tecnología desarrollada por HP, denominada Multi Jet Fusion (MJF). También encontramos las Direct Metal Laser Sintering (DMLS) y las Selective Laser Melting (SLM) para sinterizado de metales y, por último, las Electron Beam Melting (EBM) para metales. Este tipo de equipos se están «democratizando» al tener un precio con tendencia a la baja, en especial las SLS y MJF. Los polímeros preferentemente usados son de la familia de las poliamidas. El espesor de la capa está en torno a la horquilla de 70 a 120 micras.
- **Direct energy deposition y Sheet lamination.** Dentro de esta familia, que permite la impresión en metal, están las impresoras Láser Engineering Net Shape (LENS). Estas se pueden utilizar durante todo el ciclo de vida del producto para reparar y fabricar de manera rentable, componentes metálicos de alto rendimiento, en materiales como el titanio, el acero inoxidable y las superaleaciones, las Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM). Por último, consideramos las impresoras Laminated Object Manufacturing (LOM), que pueden imprimir láminas y formar composites. Estas tecnologías están, en la mayoría de los casos, desarrolladas por las empresas que las fabrican. Tienen unas prestaciones espectaculares, pero debe apreciarse que su precio solo está al alcance de grandes corporaciones que hayan apostado por la industria 4.0.

FIGURA 6. Tecnologías para la fabricación aditiva



6. Materiales en la impresión 3D

Sin duda, uno de los grandes retos de la fabricación aditiva en la actualidad es la generación de nuevos materiales, mezclas o aleaciones de estos, así como su presentación y coste. Aunque hay una gran variedad de ellos, todavía creemos que se está lejos de alcanzar los que se puedan utilizar con tecnologías de fabricación tradicionales. Buena prueba de ello es la cantidad de universidades, empresas, centros de investigación, etc., con grandes dotaciones de medios humanos y materiales destinados a investigar en este fin.

La presentación del material que se imprime depende de cada tipo de tecnología y máquina. Las presentaciones más comunes de materiales, en base a las impresoras utilizadas, son las siguientes:

- Impresoras FDM: filamento suministrado en bobinas de distintos pesos, con diámetros estandarizados de 1,75 mm y de 2,85 mm. También hay máquinas que se alimentan con materiales en grano, o en caso de las bioimpresoras, con biogeles.
- Impresoras SLA, DLP y CDLP. Las resinas se adquieren en forma líquida y se depositan en las cubas de estas máquinas.
- Impresoras de las familias MJ, BJ, SLS, DMLS, etc., se alimentan con polvos o granos de material.

Las propiedades que se buscan en cada material no difieren de las que se exigen a otros sistemas de fabricación, siempre con las limitaciones de la fabricación aditiva. Es posible destacar atributos tales como resistencia mecánica, flexibilidad, textura, color, biodegradabilidad, biocompatibilidad, dureza, tenacidad, etcétera. A continuación, se describen los principales materiales utilizados en la fabricación aditiva (figura 7):

FIGURA 7. Materiales para la fabricación aditiva



- ✓ Filamentos. Los materiales comúnmente utilizados en las impresoras FDM son los siguientes (Sánchez, 2017):
 - PLA (Ácido poliláctico). Es biodegradable, admite mezclas con trazas de metales, maderas y diversidad de colores. Es económico. Este material es el más popular de los utilizados a día de hoy. La temperatura de trabajo suele estar comprendida entre 180 °C y 220 °C. En cuanto a las desventajas de este material encontramos su poca resistencia térmica, su sensibilidad a la humedad y su mayor fragilidad respecto a otros filamentos.
 - ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno). Más resistente que el PLA, admite mezclarse con otros materiales para mejorar sus propiedades. Su temperatura de extrusión es de 220 °C – 235 °C. Conserva la tenacidad a temperaturas extremas, contando con una alta capacidad de mecanizado: se puede lijar, perforar... siendo, además, resistente a ataques químicos.
 - PETG (Polietilentereftalato Glicol Modificado). Es un material muy fuerte y versátil, con una gran resistencia térmica. Es un gran material para la impresión de piezas mecánicas.
 - TPU (Poliuretano termoplástico). Es un material elástico, con una alta resistencia al desgaste y a la abrasión, a la tracción y al desgarre, a las grasas, los aceites, al oxígeno y al ozono y con una dureza Shore de 95A.
 - TPE (Elastómero termoplástico). Es un material de impresión 3D flexible que se siente y actúa como un caucho flexible. El filamento de TPE se puede usar para hacer piezas que pueden o deben doblarse para adaptarse a su entorno. Además es un material muy suave y reciclable.
 - PA (Poliamida). Termoplástico que ofrece una combinación óptima de resistencia mecánica al desgaste, rigidez y la tenacidad. Todo ello hace de

este material ser un buen aislante eléctrico y poseer una buena resistencia química.

- PEEK (Polieteretercetona). Es un material que dispone de muy buenas propiedades dieléctricas y que puede trabajar a temperaturas muy elevadas, de hasta 260 °C. Su combinación de estructura semicristalina ofrece unas propiedades únicas muy elevadas, resistencia a altas temperaturas y excelente fortaleza química al desgaste y a la abrasión.
- PVA (Alcohol polivinílico). Es un polímero plástico soluble en agua caliente. Precisamente esta característica es la que se aprovecha en su uso comercial.
- ASA. Es un acrilato de estireno acrilonitrilo. Resistente a la intemperie, se utiliza para aplicaciones de uso exterior. Cuenta con una alta resistencia al calor y a los rayos UV.
- Nylon. Es un polímero sintético resistente y duradero con un acabado sedoso translúcido. Es flexible pero fuerte, con facilidad para ser teñido. Cuenta con resistencia UV y química.
- ULTEM. Es una subclase de materiales de polieteramida, como PEEK. Tiene una gran durabilidad a temperatura ambiente y resistencia mecánica. Además, cuenta con una gran resistencia al calor y al fuego, con baja evolución del humo. Su absorción de humedad es mínima. Sin embargo, requiere alta temperatura para la impresión.

FIGURA 8. Materiales en la impresión 3D (imágenes CC www.pixabay.com)



Cada filamento necesita unas condiciones para depositarse correctamente en la cama de la impresora, que deben respetarse para terminar el trabajo con la garantía, la calidad de acabado y las características requeridas. Estas condiciones se fijan con el *software* de impresión, en el que se configuran parámetros como velocidad, altura de la capa, temperatura de la cama y del extrusor, etcétera. Casi siempre hay que hacer varios intentos con el equipo para conseguir lo que queremos. Los parámetros de impresión pueden cambiar ante un mismo material de dos proveedores distintos.

La lista de materiales de los filamentos en bobina va aumentando continuamente. Se fabrican con fibra de carbono, con grafeno, con aditivos reflectantes, con acabado de tungsteno, transparentes, magnéticos, solubles en agua como el PVA, etcétera.

- ✓ Resinas. Las resinas que se utilizan en los equipos SLA y DLP son generalmente suministradas por el fabricante de la impresora, aunque recientemente están ofreciéndose al mercado resinas de «marca blanca» que, aunque no llegan a la calidad de las del fabricante de la máquina, su precio es mucho más competitivo.
- ✓ Polvos para sinterizados. Las máquinas que utilizan polvo para aglutinado de material suelen utilizar alguno de los siguientes, dependiendo del fabricante y la propia tecnología.
 - Poliamida (PA). Termoplástico que ofrece una combinación óptima de resistencia mecánica, química y al desgaste, rigidez, resiliencia y tenacidad. Todo ello hace de este material un buen aislante eléctrico, ideal para la fabricación de elementos mecánicos y para el mantenimiento industrial. Se caracteriza por tener una alta resistencia a la fatiga, buenas propiedades dieléctricas, alto poder amortiguador y buenas propiedades de deslizamiento. Las poliamidas, además de dureza y tenacidad alta, también poseen una alta resistencia a la deformación térmica (resistencia a temperaturas desde -40 °C hasta +100 °C). Se comercializan en distintas versiones PA12, PA6, etcétera. (Elaplas, 2019).
 - Titanio (TiAl6V4). El TiAl6V4, una de las aleaciones mejor conocidas en el campo de la impresión 3D en metal, combina unas excelentes propieda-

des mecánicas y térmicas, con un peso específico muy bajo. Este material es resistente a la corrosión y se utiliza en diferentes entornos de ingeniería con requisitos exigentes, como el aeronáutico. Las aplicaciones incluyen los prototipos, las piezas sólidas para uso final, los dispositivos médicos y las piezas de repuesto (Materialise, 2019).

- Aluminio (AlSi10Mg). Es una aleación de aluminio que combina buenas propiedades térmicas y de resistencia, con un peso ligero y posibilidades de flexibilidad en el post-procesado. Por estos motivos, se trata de un material que suele usarse en los sectores de automoción, aeroespacial y automatización (Materialise, 2019).
- Acero inoxidable (316L o 1,4404). Es una aleación de acero inoxidable con bajo contenido en carbono, altamente resistente a la corrosión, que ofrece una excelente resistencia. El acero inoxidable impreso en 3D cuenta con una alta ductilidad y buenas propiedades térmicas. Este material puede utilizarse para aplicaciones de uso alimentario, componentes de maquinaria y herramientas de producción.
- Inconel (IN718). Ofrece una resistencia térmica excepcional (hasta 700 °C), así como un excelente vigor a la oxidación y a la corrosión, por lo que es una opción muy interesante para los entornos con temperaturas extremas como aquellos en los que intervienen turbinas o dispositivos criogénicos. Las piezas impresas en 3D con Inconel 718 son ideales para los sectores aeroespaciales y de la automoción.

7. ¿Cómo se realiza la impresión mediante deposición fundida?

La tecnología de modelado por deposición fundida, o FDM, se basa en tres elementos principales: una placa de impresión (también denominada cama) en la que se imprime la pieza, una bobina de filamento, que sirve como material de impresión, y un extrusor, consistente en un cabezal en el que se inyecta el material. El filamento es arrastrado y fundido por el extrusor de la impresora.

ra 3D, que deposita el material de forma precisa, capa por capa, sobre la cama de impresión (Sánchez, 2017), siguiendo el diseño previamente elaborado.

Como acabamos de indicar, todo comienza con el diseño del objeto, para lo que se precisa el empleo de algún *software* de diseño 3D, entre los que se encuentran: Inventor, SolidWorks, TinkerCAD, Blender, etcétera. El archivo 3D generado, en la mayoría de casos en formato STL, se divide en varias capas, utilizando un *software* denominado *slicer*. Los más usuales son Repetier, Cura o Makerware, en el que es posible seleccionar los distintos parámetros de la impresión. Una vez configurado todo, se puede realizar la impresión en 3D.

El proceso propiamente dicho de impresión comienza cuando la máquina alcanza la temperatura necesaria para la fusión del material. Entre los materiales de impresión 3D más populares en la deposición por fusión se encuentran el PLA (ácido poliláctico) y el ABS (Acrilonitrilo butadieno estireno). No obstante, el material utilizado siempre dependerá de los requerimientos de la pieza a imprimir.

Durante la impresión se pueden utilizar soportes, también denominados *puentes*, para mejorar la calidad de ciertos modelos y hacer viable la impresión de ciertas partes, que de otra forma quedarían suspendidas en el aire imposibilitando su impresión. Su misión es servir de apoyo a las partes sobresalientes del modelo 3D. Imaginemos que queremos imprimir la estructura de un puente (para cruzar un río) formado por varios «ojos», y que queremos imprimirlo en la misma posición en la que se instalaría en la vida real. En este caso es imprescindible sustentar todos y cada uno de los huecos que configuran los ojos del puente para que, al ser impresos en 3D, no queden en el aire y, por tanto, se vengán abajo. Estos soportes pueden estar hechos del mismo material que el objeto impreso, o en un material que sea soluble en agua, por ejemplo. También es usual que las impresoras 3D estén equipadas con varios extrusores, permitiendo en este caso combinar varios colores o materiales (materiales de soporte en general).

En lo relativo a materiales compatibles con el modelado por deposición fundida, en los últimos años se está viviendo un gran desarrollo en este campo. Además de los tradicionales filamentos de polímeros termoplásticos, PLA y ABS, o de policarbonatos como PETG, PS, ASA, PVA, nylon y ULTEM, están surgiendo numerosos filamentos compuestos que ofrecen interesantes propiedades en materia de biocompatibilidad, conductividad, resistencia a

temperaturas o condiciones extremas, mejoras en sus propiedades mecánicas, etcétera. Además, al sustituir el extrusor de una impresora 3D por un sistema de inyección, similar al de una jeringa, se posibilita usar biogeles para bioimpresión, así como para piezas de cerámica, arcilla o materiales alimenticios como jarabe o chocolate.

8. Aplicaciones de la impresión 3D

La fabricación aditiva nació como una tecnología para acelerar el prototipado rápido y actualmente tiene cabida en gran multitud de sectores, con aplicaciones tan diversas como:

- Medicina. En el campo de la salud, la fabricación aditiva tiene actualmente una relevancia muy destacada, en la que ya son realidad numerosas aplicaciones. Podemos destacar las siguientes (Morales, 2017b), (Ortiz, 2016):
 - Impresión de prótesis con materiales metálicos, personalizadas al paciente. Se están haciendo prótesis de cabezas de fémur, faciales para reconstrucción de rostros, de huesos planos, para la reconstrucción de mandíbulas, etcétera.
 - Planificación quirúrgica. A través de los archivos médicos de pruebas diagnósticas (DICOM) se imprimen, por ejemplo, los huesos fracturados de un paciente. Así, el equipo de cirujanos puede estudiarlos antes de la intervención, adaptando las placas y tornillos a las piezas impresas. Cuando todo está resuelto, realizan la intervención y colocan al paciente las placas y tornillos montados sobre la impresión 3D, que coinciden exactamente con los que necesita el paciente. Se reduce el tiempo de quirófano, el riesgo de infección, el postoperatorio, etcétera.
 - Férulas a medida. Ante una dolencia (rotura, tendinitis, etc.) de un miembro, se escanea e imprime una férula termoplástica a medida del paciente, evitándose el yeso y sus inconvenientes (no se puede retirar para la rehabilitación, para ducharse, pica, pesa, etcétera).

- Modelos anatómicos complejos para su estudio ex vivo. Por ejemplo, se puede imprimir a través de un archivo DICOM un hígado con un tumor. El equipo médico lo estudia y deciden cómo actuar. Por otra parte, el modelo se puede mostrar al paciente y familia para restar parte del miedo a la incertidumbre de lo que padece.
- Bioimpresión. La meta de los distintos desarrollos biomédicos es bioimprimir con éxito un órgano humano completamente funcional. Ya están trabajando algunas impresoras con cultivos de células. Existen muchas expectativas al respecto, pero para poder imprimir siquiera algún tejido complejo funcional e implantarlo con éxito en personas, habrá que esperar. Se están destinando muchos fondos para desarrollar este tipo de tejidos. Más allá, la impresión de órganos que sustituyan a otros en un paciente, aún tardará en ser una realidad (César-Juárez *et al.*, 2018). No obstante, en 2016, una empresa del Centro de Investigación Ruso Skólkovo, consiguió imprimir y trasplantar una glándula tiroides, totalmente funcional, a un ratón (Novosti, 2016).
- Arquitectura. La impresión 3D se está utilizando para realizar tanto maquetas de viviendas como de elementos constructivos (Malé-Aleman, 2015). También se pueden probar estructuras y componentes para validarlas. De igual forma, se ha impreso algún puente peatonal, y alguna vivienda con impresoras 3D (Link, 2019). Sin embargo, todavía estamos lejos de que este tipo de construcciones sean competitivas.

FIGURA 9. Aplicaciones 3D (imágenes CC www.pixabay.com)



- Transporte. La fabricación aditiva dentro de este campo (aeroespacial, aviación, automoción, etc.) está creciendo a una velocidad sorprendente, debido a la posibilidad de fabricación de piezas con estructuras aligeradas y sometidas a frecuentes cambios de diseño y series cortas. Son cada vez más los fabricantes de aeronaves tanto militares como comerciales que tienen ya piezas impresas en sus aviones. Los fabricantes más importantes de vehículos montan en la actualidad con responsabilidad piezas mecánicas impresas en sus modelos. Ahora los prototipos tipo CONCEPT de las marcas de automóviles tienen por límite la propia imaginación de sus desarrolladores.
- La empresa Kepler, en 2018, consiguió lanzar un nanosatélite de comunicaciones al espacio (operando en una banda de frecuencia capaz de transportar grandes cantidades de datos a bajo coste) mediante la impresión 3D de buena parte de sus componentes, pasando del boceto inicial en una servilleta a un nanosatélite funcional en 365 días (Satelital-movil, 2019). Se está estudiando cómo incorporar una impresora 3D a las naves espaciales para poder fabricar *in situ* piezas que haya que sustituir por desgaste o ruptura, en lugar de llevar repuestos. Esto aligeraría considerablemente el peso de la aeronave y, por tanto, el coste del proyecto.
- En esa misma línea se plantea la logística de los repuestos de los vehículos automóviles. En vez de tener grandes almacenes de piezas de repuesto, distribuir pequeños centros de impresión de piezas, que podrían ser los propios talleres, para fabricar los repuestos necesarios abaratándose la logística tanto en espacio como en costes de transporte, con el consiguiente beneficio para el medio ambiente. Por último, en este campo, el grupo Michelin tiene como proyecto el MICHELIN VISION, para sustituir sus neumáticos, tal y como los conocemos hoy, por neumáticos impresos, que se adaptarán a la zona de circulación, al clima de la zona, a la forma de conducción, etcétera. (Michelin, 2017).
- Arte. Se trata de una herramienta capaz de dar rienda suelta a la imaginación de los artistas en los campos de la moda, la joyería, el regalo, la repostería y la restauración. En estos campos juega un papel muy relevante la personalización de los objetos. Se pueden imprimir cuadros en 3D para

que puedan ser percibidos por personas ciegas. Además, se están reproduciendo y reconstruyendo esculturas, piezas singulares de construcciones históricas, entre otros.

- Educación/docente. La impresión 3D se emplea actualmente como herramienta formativa, permitiendo mostrar modelos anatómicos u objetos y piezas, así como desarrollar habilidades y capacidades. A su vez, permite trabajar la metodología de proyectos para resolver problemas concretos mediante objetos impresos diseñados por el alumnado.
- Consumo y ocio. Aquí entra el concepto de «hágalo usted mismo». Al existir en el mercado equipos de bajo precio y materiales asequibles, compatibles con estas máquinas, cualquier persona puede fabricarse las piezas para el uso que quiera, sea útil o no, por el mero hecho de diseñar, medir o crear un archivo de algo que pueda imprimir.
- Investigación. La impresión 3D también está representando una auténtica revolución, permitiendo la fabricación de prototipos a escala de laboratorio a velocidades inimaginables, agilizando desarrollos, procesos y ensayos. Son numerosos los ejemplos en el campo de la ingeniería, las energías, la aeronáutica, la investigación en nuevos materiales, etcétera.
- Industrial. Excluyendo los sectores de la automoción y la aeronáutica mencionados anteriormente, el sector industrial se está reconvirtiendo en todo lo referente a la fabricación de piezas y a las posibilidades de nuevos diseños de máquinas, tanto para las nuevas como para mejorar las que existen para que sean más eficientes, más económicas, requieran menos mantenimiento, sean más ligeras y un sinnúmero de posibilidades de mejora.

Se han mencionado las ventajas de la impresión 3D anteriormente, abarcando todo el ciclo de vida de la máquina desde su concepción, prototipado, fabricación, transporte, explotación, mantenimiento, hasta su retirada y reciclaje. En todas las fases antes mencionadas, la impresión 3D, a nivel de máquina, mejora el ciclo completo. Quizás sea en el sector industrial en el que más ha tardado en entrar en juego la industria 4.0, con la fabricación aditiva como tecnología habilitadora. Al margen de la resistencia al cambio que siempre existe cuando se revoluciona alguna faceta de la

actividad humana, está la limitación técnica existente en esta tecnología. Parte de la motivación de entrada de esta tecnología en el mundo actual es el cambio en los hábitos de consumo de la sociedad. El consumidor quiere cambiar de objetos de consumo rápido y a bajo coste. Esto lleva aparejado que las máquinas y útiles que se diseñan deban dar respuesta a estos requisitos. Las tiradas de producción se reducen y la personalización de los productos es ya un imperativo comercial.

Las pymes, un tipo de empresa de gran presencia en numerosos países, deben realizar inversiones importantes para completar su oferta de productos. Por una parte, los que no varían en cuanto al nivel de producción o a su calidad y alta precisión y, por otra, los que deben adaptarse a esas nuevas tendencias, viéndose obligados a invertir en nuevos equipos, en nuevo *software* y *hardware*, en formación de personal o incorporación de nuevos profesionales, en ubicación de las nuevas líneas de producción, etcétera. Todo ello supone un esfuerzo muy importante en un mercado global en el que la incertidumbre de las tendencias económicas no anima a ello. Esta problemática, que es conocida por todos, está haciendo que los gobiernos intenten impulsar la concienciación de la necesidad de incorporar la Industria 4.0 en el sector productivo. En España se está haciendo a través del gobierno central (MITYC, 2015) y desde las autonomías con dos líneas de ayuda, una en cuanto a formación y la otra con incentivos reembolsables y no reembolsables, casi siempre con fondos de la Unión Europea. Un factor que está impulsando la introducción de la fabricación aditiva es la propia competencia de las empresas fabricantes de máquinas y materiales aptos para imprimir, por una parte, ofreciendo formación e información general y específica y, por otra, haciendo que los precios de los equipos sean menos prohibitivos para las economías de las pymes.

Dejando al margen a las máquinas de prototipado con materiales no funcionales, que están muy democratizadas y que no necesitan incorporar personal nuevo a la empresa o se pueden subcontratar a empresa auxiliares, las impresoras 3D para producción de piezas funcionales de tiradas pequeñas, o incluso en la actualidad, de producciones medias, tienen, como se ha dicho, un coste elevado. Para muchas aplicaciones se están utilizando máquinas SLS con PA12. Las piezas realizadas con este mate-

rial, con esta tecnología, tienen propiedades mecánicas similares a algunos aluminios. Las impresoras para imprimir con metales, salvo raras excepciones en las pymes, se están empleando cuando el tamaño y el coste son pequeños. Por ejemplo, en el sector de la joyería o en la odontología para la fabricación de prótesis.

Una de las ventajas más importantes de la impresión 3D en el sector industrial, al margen de las ya mencionadas, es la facilidad para fabricar piezas imposibles para otras tecnologías. Por ejemplo, algunos sistemas mecánicos necesitan tres o más piezas para conformarse, debiendo diseñarse su sistema de sujeción, que puede necesitar juntas, tornillos, soldaduras, etcétera. Estas uniones, al margen del coste que tienen tanto en material como en mano de obra o equipos auxiliares, no dejan de ser puntos débiles que deben llevar, además, algún tipo de mantenimiento. Esto se elimina con la impresión 3D porque se puede construir la pieza completa de una sola vez, por muy compleja que sea la forma interiormente.

9. Caso de estudio: Proyecto de diseño e impresión de componentes 3D de máquina fresadora CNC

Anteriormente se ha hecho mención al imparable desarrollo que la impresión 3D está viendo actualmente, lo que le ha permitido convertirse en pilar fundamental de la denominada cuarta revolución industrial o Industria 4.0. Sus aplicaciones industriales son cada vez mayores, así como su incorporación en el ámbito investigador y docente (Grupo Garatu IT solutions, 2018). Con el objetivo de ayudar al lector a entender mejor cómo la incorporación de la impresión 3D puede cambiar la forma de hacer las cosas y permitir dar respuesta a necesidades particulares cada vez más crecientes, se describe a continuación, como caso de estudio, un proyecto desarrollado en la Escuela de Ingenierías Industriales de la Universidad de Extremadura, consistente en el diseño, dimensionamiento y construcción de una máquina fresadora de control numérico computarizado (CNC) para su instalación en un centro de crea-

ción y gestión de recursos escénicos a partir de piezas, en su mayoría, fabricadas gracias a la impresión 3D. Como todo proyecto técnico e industrial que se precie, inicialmente se marcaron una serie de objetivos, de entre los cuales se destacan:

- La viabilidad económica y replicabilidad:

Se pretendía desarrollar una máquina fresadora CNC ajustada a las necesidades concretas del cliente (tamaño, usos, aplicaciones) y además, con un coste competitivo. Para tal fin, fue necesario un diseño específico de las partes de la máquina, generando el máximo de partes imprimidas en 3D. Resultaba a su vez necesario incorporar de entre la distinta tipología de perfiles, un perfil simple para la estructura principal.

En el proceso de diseño se utilizó *hardware* y *software* libre para su funcionamiento. En concreto, Arduino con CNC shield, controlado mediante GRBL y Universal G-Code Sender. El empleo de este tipo de plataformas no solo permitió reducir el coste del proyecto, sino que, además, permitió contar con el respaldo de una gran comunidad.

- Aplicación:

Como se ha indicado anteriormente, la máquina se ha desarrollado para su instalación en una empresa concreta, en la que se utilizará como herramienta de trabajo para la creación de elementos de escenografía, atrezzo y otros útiles de ámbito escénico.

- La funcionalidad de la máquina:

El uso principal de la máquina es el fresado de madera y de todo tipo de planchas delgadas de aluminio.

- El aprendizaje del alumnado:

Dado que el proyecto se realizó en el ámbito universitario, en concreto en la Escuela de Ingenierías industriales de la Universidad de Extremadura, no podemos obviar el objetivo formativo. El desarrollo de este proyecto ha permitido la adquisición de competencias específicas en el manejo avanzado de *software* de diseño 3D, así como un conocimiento en profun-

didad del universo *maker* mediante el aprendizaje del *firmware* GRBL y de Universal G-Code Sender (Morales, 2017b).

9.1 Desarrollo

Para la construcción de estas máquinas existen multitud de diseños estructurales, de mecanismos de desplazamiento para los ejes y de los carros sobre los que se desliza la estructura, de configuraciones de electrónica, de *software*, etcétera. Resulta por tanto, necesario, un estudio previo de las alternativas existentes, cuya selección condicionaría el diseño y la usabilidad de la máquina.

La máquina finalmente diseñada debía permitir un cambio fácil de herramienta, de forma que se le pudiesen acoplar herramientas multifunción, tipo dremel, que permitan cortar, perfilar, pulir, así como fresar.

9.2 Diseño e impresión 3D

Una vez realizada la selección de los componentes comerciales, el paso siguiente fue el diseño de las piezas que ensamblarían dichos componentes y que dieron la forma final a la máquina CNC.

Todas las piezas que se diseñaron fueron dimensionadas para ser impresas en 3D. Las impresoras con la que se contaba para la realización del proyecto eran una Anycubic i3 Mega (figura 10), que cuenta con un volumen de impresión de 210x210x205 mm, una impresora Lion 3D y una fabricada por componentes, ambas con un volumen de impresión similar. Finalmente solo se utilizó la Anycubic i3, dotando, por tanto, a todas las piezas fabricadas la misma calidad de impresión (Pérez, 2019).

El material con el que se imprimieron las piezas diseñadas fue el PLA (poliácido láctico), que cuenta con unas propiedades bastante semejantes a las del PETG (Polietilentereftalato Glicol Modificado) pero con la gran ventaja de ser biodegradable, al no emplear en su producción derivados del petróleo. El PLA se genera por polimerización del ácido láctico procedente de la fermentación de azúcares derivados de vegetales.

Con objeto de dar robustez se imprimieron todas las piezas con un relleno del 50% y con un espesor mínimo de 10 mm. Con carácter general, se apli-

có una tolerancia de 0,2 mm para taladros y agujeros, salvo para los huecos donde encajan los perfiles cuadrados de aluminio. En este caso, las pruebas previas justificaron una tolerancia finalmente adoptada de 0,4 mm.

La primera versión del ensamblaje de la máquina CNC, como se muestra en la figura 11, permite hacerse una idea de la función que desempeña cada pieza. Cabe destacar que el modelado 3D de esta máquina constó de más de 50 piezas diferentes, la mayoría de ellas diseñadas para ser impresas en 3D.

De entre las distintas piezas diseñadas, la más grande fue la pared exterior del carro eje Y, como se muestra en la figura 12. Mientras, en la parte superior de la pieza, se observan cuatro orificios cuadrados para cuatro perfiles de aluminio. La razón de haber tenido que poner cuatro radica en el momento que genera la herramienta hacia delante, cuyo efecto es un intento de girar la estructura. Al disponer cuatro perfiles, además de aumentar su robustez, se consiguió compensar el citado momento con los perfiles superiores e inferiores.

FIGURA 10. Impresora Anycubic i3 Mega



FIGURA 11. Ensamblaje inicial de la máquina CNC

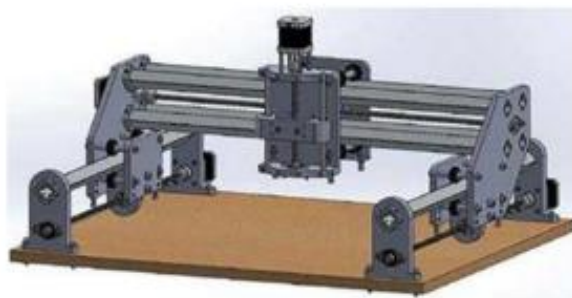
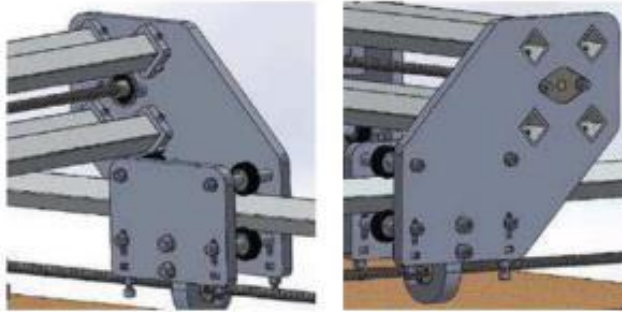


FIGURA 12. Pared exterior carro eje Y con rodamiento en montaje



Otra característica del diseño pieza a pieza, con el objetivo de resolver el mismo problema de tendencia al giro, fue el de formar un ángulo de 45 grados entre la parte superior e inferior hacia el lado contrario en el que se situará la máquina, provocando así un momento en sentido opuesto al que provocará la herramienta y además acercando su proyección vertical al centro del carro del eje Y.

Esta pieza, junto con su homóloga con rodamiento, son las más grandes de la máquina. Todas las piezas diseñadas sufrieron lo que se denomina «ciclo del diseño», es decir, al menos un replanteamiento de su boceto, de forma que partiendo del inicial se llevó a cabo el modelado del mismo en 3D, su posterior impresión, el rediseño y una nueva impresión. En este tipo de proyectos la inclusión de mejoras se puede prolongar casi todo lo que se quiera, siendo necesario fijar unos plazos, así como unos objetivos en materia de calidad y funcionalidad muy claros desde el inicio. El ensamblaje final de la máquina modelada se muestra en la figura 13.

Tras la fase de modelado y rediseño de las distintas piezas, estas se fueron imprimiendo, posibilitando la ejecución real de la máquina. Los resultados han sido muy satisfactorios, alcanzándose en los plazos establecidos el desarrollo de una máquina adaptada a los requerimientos funcionales determinados inicialmente. Con la ayuda de la impresión 3D se han fabricado piezas únicas, sin necesidad de moldes o grandes tiradas, posibilitando la fabricación de la máquina CNC completa, cuya imagen se puede ver en la figura 14.

FIGURA 13. Ensamblaje final de la máquina CNC

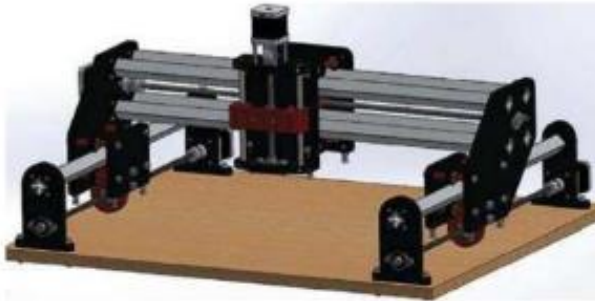


FIGURA 14. Fotografía de la máquina CNC trabajando sobre plancha de madera (Pérez, 2019)



10. Prospectiva. El futuro de la impresión 3D

Sin lugar a dudas, el presente de la impresión 3D ya permite su aplicación en multitud de sectores y ámbitos, y no solamente a nivel industrial como hemos comentado, también en el ámbito sanitario, en el transporte, en el docente y por supuesto a nivel científico e investigador. Además, actualmente y como fruto de su abaratamiento, ya se encuentra en hogares para satisfacer necesidades cotidianas, o simplemente como pasatiempo. Pero esto parece ser solamente la punta del iceberg. La impresión 3D está ya revolucionando la fabricación de muchos productos, procesos y servicios, cambiando la forma de

trabajar de muchos sectores. Además de seguir su imparable consolidación como tecnología omnipresente. Probablemente en un futuro cercano no llegaremos a tener una impresora 3D en cada casa, pero sí podamos encontrar una cada pocos hogares. Una gran parte de las grandes empresas las usarán y muchas pequeñas también.

Lo que sí que no genera discusión, en lo que concierne al futuro de la impresión 3D, es el papel central que jugará en breve en la industria del mantenimiento y de la reparación (Vicente, 2018). Se terminó el almacenar piezas de repuesto para realizar reparaciones rápidas, hoy día ya es posible reducir el *stock* de piezas y el espacio de almacenaje al mínimo, gracias a la digitalización y a la fabricación aditiva, siendo necesario únicamente el archivo digital de la pieza que se quiere reponer y una impresora 3D con capacidad para imprimir en el material necesario.

El desarrollo cada vez de más materiales para poder ser empleados en impresión por medio de fabricación aditiva (además de los termoplásticos más usados), como aleaciones de acero inoxidable, titanio, o aluminio, permite ampliar el rango de los materiales que se pueden emplear como repuestos. Son numerosas las empresas que emplean impresoras 3D de metal, usando tecnologías llamadas Direct Metal Printing o Direct Metal Laser Sintering, entre otras, para construir piezas a partir de archivos de diseño 3D y un láser de alta precisión, que se emplea para solidificar el polvo del metal (Materialise, 2019).

Que la impresión 3D no es algo pasajero se constata también al ver las importantes inversiones que países como EE. UU. y China están llevando a cabo, invirtiendo en el desarrollo de centros de innovación en impresión 3D (TJ McCue, 2015). Para alcanzar todo el potencial ha de fomentarse la investigación y la creatividad. A nivel institucional, por medio de ayudas, o de incentivos financieros y fiscales a las empresas e instituciones educativas y científicas, ya que es necesario seguir investigando para ampliar las aplicaciones, así como para mejorar la robustez, la velocidad, la productividad y el grado de desarrollo de esta tecnología. Actualmente son muchos los desarrollos en proceso. Algunos de los más interesantes han sido enumerados por Gian-Lluís Ribechini Creus (Ribechini, 2019):

- La NASA pretende que los astronautas se impriman la comida en el espacio, gracias al desarrollo de una impresora que lo permita.

- En Japón ya imprimen caras para colocarlas en muñecas. Una evolución no descartable en un futuro sería la impresión de una cara utilizando piel generada a partir de células madre, destinadas a la reconstrucción facial en personas que han sufrido accidentes o cáncer de piel.
- En Europa, la Agencia Espacial Europea se plantea construir una estación lunar, utilizando la impresión 3D sin tener que trasladar materiales desde la Tierra, sino que utilizarían como materia prima las rocas lunares.
- En un ámbito más lúdico, en las pasarelas de moda ya han empezado a desfilan modelos con trajes impresos en 3D.
- En un futuro se podría llegar a la situación de que nos escaneen tridimensionalmente, y ese archivo quedase grabado en una tarjeta, con nuestro historial clínico. Así, cuando se nos estropeará una muela por una caries, el odontólogo imprimiría una réplica idéntica a la natural. Esto sería aplicable a fracturas de huesos o enfermedades que inutilicen órganos, como el hígado o el riñón.

En lo que concierne a la salud y la seguridad en el trabajo, todavía son pocos los estudios relativos a los efectos de la impresión 3D. Los materiales empleados, filamentos plásticos en muchos casos, pueden ocasionar riesgos químicos derivados de los polímeros y de los aditivos volátiles empleados en su fabricación. En el caso de la impresión con polvos, también existen riesgos, especialmente si esos polvos contienen nanopartículas, así como el riesgo de explosión derivado de la utilización de los mismos. En base a lo expuesto, urge la necesidad de desarrollar estudios concretos sobre la evaluación del riesgo para los trabajadores y/o usuarios en general, con el fin de desarrollar protocolos, sistemas y normas de protección. También se hace necesaria la puesta en marcha de cursos de formación en materia de seguridad, para todos aquellos que trabajan y/o usan impresoras 3D.

De igual forma, en lo concerniente a la protección de la propiedad intelectual de los autores, se presenta una situación muy parecida a la protección de derechos en el sector de la música y el cine. El sector de la impresión 3D deberá buscar soluciones sobre la protección de la propiedad intelectual. Una normativa de protección ampliamente compartida permitirá incluso superar la preocupación de que la tecnología relativa a la impresión 3D solo la

controlan unas pocas organizaciones, restringiendo así la competencia y la identificación de nuevas aplicaciones. Esto ralentiza la innovación y hace que los costes sigan siendo elevados (Maestre, 2018).

En cualquier caso, paralelamente a los intereses de las grandes corporaciones por la protección de sus tecnologías, está la propia competencia entre ellas para desarrollar otras tecnologías, que permitan fabricar elementos con las mismas especificaciones que sus competidores. El campo está tan abierto que es difícil presagiar si existirá o no un «monopolio» productivo en alguna tecnología de fabricación aditiva, que haga que alguna empresa ejerza un predominio claro en el mercado. También es necesario mencionar las comunidades de internautas que comparten conocimientos, haciendo que se democratice el uso y mantenimiento de muchas impresoras del mercado, en especial para el prototipado con la tecnología FDM. Un rol muy importante, a su vez, que están empezando a desempeñar los FABLAB, existiendo comunidades de estos que comparten conocimiento, no solo en la fabricación aditiva, sino también en otras tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0.

11. Certificación de la impresión 3D

En base a todo lo expuesto, cada día se hace más necesaria una gestión de la calidad de lo impreso en 3D, una certificación de productos, así como una regulación en aspectos de responsabilidad por productos defectuosos. En este sentido, la legislación vigente en España (común en la mayoría de los países con legislación en esta materia) establece que la responsabilidad afecta a quienes impriman en 3D, en el marco de una actividad empresarial, y deja fuera a quienes no lo hacen (Fernández Burgueño, 2014). Las empresas predominantes del sector, conscientes de la diferenciación que ofrece la apuesta decidida por la calidad, han optado por ella y ya es frecuente ver en sus web y portafolios de servicios los logotipos y textos que hacen referencia a implantaciones y certificaciones en materia de calidad de procesos, de gestión y de seguridad de la información (Unión Europea, 2015). En cualquier caso, las cuestiones jurídicas de la impresión 3D, y en particular sus normativas y certificación, representan una limitación por resolver.

En el año 2015, el dictamen del Comité Económico y Social Europeo (CESE) sobre *Vivir mañana. La impresión en 3D: una herramienta para reformar la economía europea* (European Commission, 2015), ya establecía que todos los elementos de la tecnología de fabricación aditiva, como los materiales y los equipos, deben cumplir ciertos requisitos y certificarse para garantizar que es posible fabricar piezas de calidad reproducible. La ausencia de normas hace que, al principio, sea difícil fabricar piezas de calidad. El desarrollo de normas relativas a la fabricación aditiva para el reconocimiento y la certificación resulta complejo, a causa de las numerosas transformaciones de las máquinas, de los materiales y de los procesos, así como por la ausencia de una base central de datos relativos a la fabricación aditiva, o una autoridad en tales materias. Para seguir usando esta tecnología será necesaria la elaboración de normas que permitan una certificación más eficaz y rentable de los materiales, procesos y productos.

En la misma línea, el citado dictamen del CESE identificaba la necesidad de que el marco regulador nacional y europeo no haya logrado seguir el rápido ritmo de cambio en la fabricación aditiva, por lo que se necesita una reglamentación específica para abordar principalmente las normas y la certificación, así como los derechos de propiedad intelectual, la protección de los consumidores, la salud y la seguridad en el trabajo y el medio ambiente. El proceso de reglamentación, por lo que respecta a la impresión 3D, debe basarse en una investigación científica interdisciplinaria, que estudie el impacto de esta tecnología y en la que participen todas las partes interesadas. Los mercados profesionales solicitan y exigen certificados. Por ese motivo, los obstáculos hoy en día, al uso generalizado de la fabricación aditiva son tanto de carácter técnico como legislativo.

12. Conclusiones

- La impresión 3D es una de las tecnologías facilitadoras esenciales y pilar de la Industria 4.0.
- Es ya pieza angular de la innovación de productos.

- A día de hoy, sus límites, para muchas aplicaciones, están en los límites de la imaginación.
- Dentro de las aplicaciones futuras se destaca el sector del mantenimiento y las reparaciones, así como la bioimpresión.
- Se identifica como necesaria, para facilitar aún más su uso generalizado, el desarrollo de normativa y certificación en la materia.
- Uno de los atractivos es que aborda todo el proceso de innovación, desde el concepto, el diseño, la componente informática, la robótica y la producción de un objeto o producto físico final. Esto la convierte en tecnología idónea como método de formación efectivo en los distintos niveles educativos.
- La fabricación aditiva en los próximos años no podrá sustituir, en muchas aplicaciones, a los sistemas tradicionales de fabricación (arranque de viruta, soplado, moldeo, etc.).
- Uno de los retos que tiene ahora la fabricación aditiva es la generación de nuevos materiales imprimibles.
- Aún están por explorar nuevos sectores y posibilidades de la impresión 3D, quizás por falta de formación de profesionales en este tipo de tecnología y por su incipiente desarrollo a nivel industrial.
- Se está observando que la ralentización de la implantación de la fabricación aditiva en el sector productivo se debe a distintos factores, entre estos, la resistencia al cambio del empresariado, y las inversiones que deben hacerse en capital humano y equipos en un entorno económico incierto.
- Se están creando expectativas en la sociedad en torno a la impresión 3D que no son realistas. Estamos muy lejos de imprimir órganos implantables en personas. Por el propio funcionamiento de la sociedad de consumo, es poco probable que las familias, agrupaciones de personas con intereses comunes, micropymes, etc., se incorporen directamente a la fabricación aditiva. Este tipo de colectivos y empresas subcontratarán estos servicios a empresas especializadas, que no tienen por qué ser grandes empresas.

- Un factor muy importante, que inquieta, como cualquier cambio global, es el impacto sobre el empleo de la implantación de las tecnologías de la Industria 4.0 y los cambios que ello conlleva. Es evidente que las empresas deben formar a su personal para adaptarlo a las distintas tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 que se vayan a implantar en cada empresa.
- Se generarán profesiones que no existen actualmente, y sin lugar a duda, desaparecerán oficios en los próximos años. Es difícil aventurar si el balance de puestos de trabajos, como consecuencia de este nuevo paradigma de la Industria 4.0, será positivo, lo que es cierto, es que cambiará la forma de trabajo actual, facilitándose la igualdad, la conciliación familiar, la flexibilidad de los horarios de trabajo y, por tanto, afectará al ocio, al sistema educativo, etcétera.