



Universidad de Valladolid



**ESCUELA DE INGENIERÍAS
INDUSTRIALES**

UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERIAS INDUSTRIALES

Grado en Ingeniería en Organización Industrial

**Puesta en servicio del laboratorio de impresión
3D del Grupo de Investigación INSISOC**

Autor:

Antón Heredero, Juan De

Tutor:

López Paredes, Adolfo

**Departamento de Organización de
Empresas y CIM.**

Valladolid, junio de 2018.

Resumen

El objeto del proyecto es la puesta en marcha de un Laboratorio de Impresión 3D situado en el Edificio UVAINNOVA, en las instalaciones del GIR INSISOC. En el marco del proyecto Lonja3D, financiado por la Junta de Castilla y León, el laboratorio dará soporte a la fase de pruebas del proyecto, que tendrá lugar durante 2019. El laboratorio de impresión 3D forma parte del proyecto del Laboratorio de Industria 4.0 de INSISOC, y además de dar soporte al referido proyecto, su finalidad última es constituirse en elemento central de actividades de transferencia tecnológica al tejido empresarial de la región.

Palabras clave: Impresión 3D, Industria 4.0, laboratorio, fabricación aditiva, 3D printing

Abstract

The aim of the project is the start-up of a 3D Printing Laboratory located in the UVAINNOVA Building, in the facilities of the CRG INSISOC. Within the framework of the Lonja3D Project, funded by the Castilla y León Regional Government, the laboratory will provide support to the testing phase of the project, which will take place over 2019. The 3D Printing Laboratory is part of the Industry 4.0 Laboratory Project of INSISOC, and besides giving support to the mentioned project, its ultimate purpose is to become a central element in technology transfer activities to the business fabric of the region.

Keywords: Impresión 3D, Industry 4.0, laboratory, additive manufacturing, 3D printing

Índices

Índice de contenidos

Índice de tablas.....	- 10 -
Índice de ilustraciones.....	- 11 -
1 INTRODUCCIÓN.....	- 15 -
1.1 Alcance y objetivos del proyecto.....	- 15 -
1.2 Justificación.....	- 16 -
1.3 Motivación.....	- 17 -
1.4 Organización de la memoria.....	- 18 -
2 INDUSTRIA 4.0 Y FABRICACIÓN ADITIVA.....	- 23 -
2.1 Economía digital.....	- 23 -
2.2 Industria 4.0.....	- 24 -
2.3 Impresión 3D.....	- 27 -
2.4 Tecnologías de impresión 3D.....	- 30 -
2.4.1 Material extrusion.....	- 31 -
2.4.2 Direct Energy Deposition.....	- 33 -
2.4.3 Vat Photopolymerization.....	- 35 -
2.4.4 Powder Bed Fusion.....	- 38 -
2.4.5 Material jetting.....	- 44 -
2.4.6 Binder Jetting.....	- 46 -
2.4.7 Sheet Lamination.....	- 48 -
2.5 Materiales en impresión 3D.....	- 51 -
2.5.1 Polímeros y composites.....	- 51 -
2.5.2 Metales y aleaciones.....	- 54 -
2.5.3 Cerámicas.....	- 56 -
2.5.4 Hormigón.....	- 56 -
2.5.5 Nuevos materiales.....	- 57 -
3 TECNOLOGÍA FDM.....	- 61 -
3.1 FDM o FFF.....	- 61 -
3.1.1 Características de las impresoras de FDM.....	- 62 -
3.1.2 Propiedades de impresión.....	- 64 -
3.1.3 Materiales en FDM.....	- 66 -
3.1.4 Ventajas y aplicaciones del FDM.....	- 66 -
3.2 Termoplásticos en FDM.....	- 67 -

3.2.1	Materiales de extrusión empleados en FDM	- 68 -
3.2.2	Estudio comparativo y configuraciones	- 75 -
4	REQUISITOS FÍSICOS	- 81 -
4.1	Equipos.....	- 81 -
4.1.1	Impresoras.....	- 81 -
4.1.2	Materiales de impresión.....	- 83 -
4.1.3	PCs, tarjetas de memoria y escáner	- 84 -
4.1.4	Herramientas y materiales de preparación.....	- 85 -
4.1.5	Estanterías	- 87 -
4.1.6	Mesas y sillas	- 88 -
4.2	Infraestructura	- 89 -
4.2.1	Local.....	- 89 -
4.2.2	Instalaciones	- 91 -
4.2.3	Layout	- 93 -
5	DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DE LAS IMPRESORAS	- 99 -
5.1	Características.....	- 99 -
5.2	Composición.....	- 103 -
5.2.1	Elementos estructurales.....	- 104 -
5.2.2	Elementos eléctricos	- 105 -
5.2.3	Elementos mecánicos.....	- 106 -
5.2.4	Elementos electrónicos	- 110 -
5.2.5	Piezas impresas.....	- 112 -
5.2.6	Extrusor.....	- 114 -
5.3	Montaje.....	- 115 -
5.3.1	Montaje mecánico.....	- 116 -
5.3.2	Montaje del hot-end, base de impresión, sensores y cables.....	- 120 -
5.3.3	Montaje eléctrico/electrónico.....	- 123 -
6	PUESTA EN OPERACIÓN DE LAS IMPRESORAS.....	- 131 -
6.1	Utilización básica de una impresora 3D de FDM	- 131 -
6.1.1	Software del proceso de impresión.....	- 131 -
6.1.2	Instalación del firmware y del software	- 135 -
6.1.3	Preparación de la impresora	- 137 -
6.1.4	Primera impresión de prueba y tareas post-impresión	- 140 -

6.2	Mantenimiento de las impresoras.....	- 145 -
6.2.1	Procedimientos de calibración	- 145 -
6.2.2	Operaciones de mantenimiento.....	- 148 -
7	COSTES Y EXPLOTACIÓN ECONÓMICA.....	- 153 -
7.1	Análisis de modelos de coste.....	- 153 -
7.1.1	Modelos de estimación de costes de producción.....	- 154 -
7.1.2	Desarrollo de un modelo de costes “ABC”	- 155 -
7.2	Desarrollo del modelo de costes	- 159 -
7.2.1	Desglose de los costes	- 159 -
7.2.2	Estimación de los factores de coste	- 164 -
7.2.3	Desarrollo matemático y fórmulas finales	- 168 -
8	CONCLUSIONES	- 173 -
8.1	Objetivos alcanzados	- 173 -
8.2	Trabajos futuros.....	- 176 -
9	ESTUDIO DE COSTES DEL PROYECTO	- 179 -
10	BIBLIOGRAFÍA	- 185 -

Índice de tablas

<i>Tabla 1: Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 31 -</i>
<i>Tabla 2: Configuraciones hardware de materiales en FDM. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 78 -</i>
<i>Tabla 3: Repuestos de los distintos tipos de componentes. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 82 -</i>
<i>Tabla 4: Distribución de las bobinas de filamento. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 83 -</i>
<i>Tabla 5: Dispositivos electrónicos auxiliares. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 85 -</i>
<i>Tabla 6: Herramientas existentes en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 86 -</i>
<i>Tabla 7: Materiales auxiliares en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 87 -</i>
<i>Tabla 8: Equipos de almacenamiento. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 87 -</i>
<i>Tabla 9: Relación de componentes estructurales. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 104 -</i>
<i>Tabla 10: Relación de componentes eléctricos. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 105 -</i>
<i>Tabla 11: Relación de componentes mecánicos. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 107 -</i>
<i>Tabla 12: Relación de componentes electrónicos. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 110 -</i>
<i>Tabla 13: Relación de piezas impresas. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 113 -</i>
<i>Tabla 14: Relación de componentes del extrusor. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 114 -</i>
<i>Tabla 15: Orden de conexionado. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 126 -</i>
<i>Tabla 16: Salarios por hora de los trabajadores. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 164 -</i>
<i>Tabla 17: Costes de las actividades del proceso de impresión. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 164 -</i>
<i>Tabla 18: Precios de los distintos materiales. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 165 -</i>
<i>Tabla 19: Costes de amortización de los equipos. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 166 -</i>
<i>Tabla 20: Lista de fallos de las DIMA LT y costes asociados. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 167 -</i>
<i>Tabla 21: Fallos habituales de impresión en FDM. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 167 -</i>
<i>Tabla 22: Variables del modelo de costes. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 169 -</i>
<i>Tabla 23: Costes de los recursos humanos del proyecto. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 180 -</i>
<i>Tabla 24: Costes de los materiales del proyecto. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 180 -</i>
<i>Tabla 25: Costes totales del proyecto. Fuente: Elaboración propia.</i>	<i>- 181 -</i>

Índice de ilustraciones

<i>Ilustración 1: Industria 4.0 y tecnologías contribuyentes. Fuente: PWC. Ref: [4]</i>	- 25 -
<i>Ilustración 2: Proceso de impresión 3D. Fuente: Inkjet Wholesale. Ref: [5]</i>	- 28 -
<i>Ilustración 3: Tecnología FDM. Fuente: Additively. Ref: [11]</i>	- 32 -
<i>Ilustración 4: Tecnología LENS. Fuente: 3DPrinting. Ref: [14]</i>	- 34 -
<i>Ilustración 5: Tecnología EBAM. Fuente: SCIAKY INC. Ref: [15]</i>	- 35 -
<i>Ilustración 6: Tecnología SLA. Fuente: Additively. Ref: [11]</i>	- 37 -
<i>Ilustración 7: Tecnología DLP. Fuente: DruckWege. Ref: [17]</i>	- 38 -
<i>Ilustración 8: Tecnología SLS. Fuente: Additively. Ref: [11]</i>	- 40 -
<i>Ilustración 9: Tecnología SLM. Fuente: Additively. Ref: [11]</i>	- 41 -
<i>Ilustración 10: Tecnología EBM. Fuente Additively. Ref: [11]</i>	- 42 -
<i>Ilustración 11: Proceso del MJF. Fuente: 3DVERSO. Ref: [21]</i>	- 43 -
<i>Ilustración 12: Tecnología MJ. Fuente: Adaptado de Additively. Ref: [11]</i>	- 45 -
<i>Ilustración 13: CIJ vs DOD. Fuente: IMI Europe. Ref: [22]</i>	- 46 -
<i>Ilustración 14: Tecnología BJ. Fuente: Additively. Ref: [11]</i>	- 48 -
<i>Ilustración 15: Tecnología LOM. Fuente: 3DP Lighting. Ref: [23]</i>	- 49 -
<i>Ilustración 16: Tecnología UC. Fuente: ResearchGate. Ref: [24]</i>	- 51 -
<i>Ilustración 17: Pieza de DuraForm PA (Nylon). Fuente: 3dHubs. Ref: [25]</i>	- 52 -
<i>Ilustración 18: Pieza de titanio para uso en aeronáutica. Fuente: Materialise. Ref: [27]</i>	- 55 -
<i>Ilustración 19: Pieza de vidrio impresa en 3D. Fuente: Digg. Ref: [30]</i>	- 58 -
<i>Ilustración 20: El proceso de impresión en FDM. Fuente: 3D Hubs. Ref: [31]</i>	- 62 -
<i>Ilustración 21: Impresora cartesiana vs impresora delta. Fuente: 3Dnatives. Ref: [32]</i>	- 63 -
<i>Ilustración 22: Efecto del warping en una pieza. Fuente: 3D Hubs. Ref: [31]</i>	- 64 -
<i>Ilustración 23: Pirámide de termoplásticos disponibles en FDM. Fuente: 3D Hubs. Ref: [31]</i>	- 66 -
<i>Ilustración 24: PLA properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]</i>	- 68 -
<i>Ilustración 25: ABS properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]</i>	- 69 -
<i>Ilustración 26: Nylon properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]</i>	- 70 -
<i>Ilustración 27: PC properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]</i>	- 71 -
<i>Ilustración 28: PET properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]</i>	- 72 -
<i>Ilustración 29: TPU properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]</i>	- 73 -
<i>Ilustración 30: Comparación de materiales de FDM. Fuente: 3dHubs. Ref: [34]</i>	- 77 -
<i>Ilustración 31: Impresoras del laboratorio en operación. Fuente: Elaboración propia</i>	- 82 -
<i>Ilustración 32: PC, monitores y tarjetas de memoria. Fuente: Elaboración propia</i>	- 84 -
<i>Ilustración 33: Cajonera de tornillería, gaveta grande y caja de herramientas. Fuente: Elaboración propia</i>	- 88 -
<i>Ilustración 34: Planta del laboratorio de impresión 3D. Fuente: Elaboración propia</i>	- 90 -
<i>Ilustración 35: Plano de INSISOC de medidas contra incendios. Fuente: Elaboración propia</i>	- 91 -
<i>Ilustración 36: Instalaciones en planta. Fuente: Elaboración propia</i>	- 92 -
<i>Ilustración 37: Sistema de extracción del laboratorio de impresión 3D. Fuente: Elaboración propia</i>	- 93 -
<i>Ilustración 38: Layout del laboratorio de impresión 3D. Fuente: Elaboración propia</i>	- 94 -
<i>Ilustración 39: Apariencia inicial del laboratorio. Fuente: Elaboración propia</i>	- 95 -
<i>Ilustración 40: Impresora DIMA LT. Fuente: DIMA 3D. Ref: [39]</i>	- 100 -
<i>Ilustración 41: Características de la Dima LT. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 101 -
<i>Ilustración 42: Partes de una DIMA LT. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 103 -
<i>Ilustración 43: Chasis principal y soporte de la base de impresión. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 105 -

<i>Ilustración 44: Fuente de alimentación y plancha calefactora. Fuente: BPMSat. Ref: [41].</i>	- 106 -
<i>Ilustración 45: Sistema piñon-cremallera. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 108 -
<i>Ilustración 46: Sistemas de guiado eje-rodamiento y husillo-tuerca trapezoidal. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 108 -
<i>Ilustración 47: Rodamientos radiales y tornillo moleteado. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 109 -
<i>Ilustración 48: Placa Arduino Mega 2560 y RAMPS. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 111 -
<i>Ilustración 49: Juego de motores Nema 17 de una impresora DIMA LT. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 111 -
<i>Ilustración 50: Piezas impresas de los ejes X e Y. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 114 -
<i>Ilustración 51: Hot-end E3D V6. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 115 -
<i>Ilustración 52: Carro, piezas laterales y guías del eje X. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 117 -
<i>Ilustración 53: Soporte unido al sistema de guiado y sistema de fijación de la correa. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 118 -
<i>Ilustración 54: Motor izquierdo del eje Z y fijación de la correa del eje X. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 119 -
<i>Ilustración 55: Fijación del apretador de filamento. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 119 -
<i>Ilustración 56: Elementos del hot-end. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 120 -
<i>Ilustración 57: Sistema de sujeción de la base de impresión. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 121 -
<i>Ilustración 58: Finales de carrera de los ejes X, Y, Z. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 122 -
<i>Ilustración 59: Conexiones de la fuente de alimentación. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 123 -
<i>Ilustración 60: Controlador con LCD, cable de bus y conector a RAMPS. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 124 -
<i>Ilustración 61: Colocación de los cubrecables. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 125 -
<i>Ilustración 62: Esquema general de conexiones de la DIMA LT. Fuente: BPMSat. Ref: [41].</i>	- 126 -
<i>Ilustración 63: Cadena de herramientas software en impresión 3D. Fuente: BPMSat. Ref: [41].</i>	- 131 -
<i>Ilustración 64: Fichero STL. Fuente: R3ALD. Ref: [42].</i>	- 132 -
<i>Ilustración 65: Laminación de un fichero de mallas. Fuente: BPMSat. Ref: [41].</i>	- 133 -
<i>Ilustración 66: Interfaz de Repetier-Host en la pestaña Slicer. Fuente: Elaboración propia.</i>	- 137 -
<i>Ilustración 67: Curva de Temperatura y menú de Control Manual de Repetier-Host. Fuente: Elaboración propia.</i>	- 140 -
<i>Ilustración 68: Pieza de ABS sometida a un baño en acetona. Fuente: StackExchange. Ref: [43].</i>	- 143 -
<i>Ilustración 69: Método de calibración de la base de impresión. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 147 -
<i>Ilustración 70: Operaciones de limpieza de la impresora. Fuente: BPMSat. Ref: [41]</i>	- 149 -
<i>Ilustración 71: Diagrama de flujo del modelo de trabajo. Fuente: Elaboración propia.</i>	- 156 -
<i>Ilustración 72: Modelos de proceso de impresión. Fuente: Elaboración propia.</i>	- 156 -
<i>Ilustración 73: Diagrama causa-efecto de los defectos de impresión. Fuente: Elaboración propia.</i>	- 168 -

Capítulo 1

Introducción

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Alcance y objetivos del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es poner en funcionamiento un laboratorio de impresión 3D en las instalaciones del Grupo de Investigación de la Universidad de Valladolid INSISOC. El laboratorio en operación tendrá una doble finalidad: llevar a cabo tareas de investigación y docencia, y permitir el desarrollo futuro del proyecto de investigación “Lonja3D”. El Lonja3D es un proyecto de financiación regional que desarrolla INSISOC en el contexto de su actividad de investigación en Industria 4.0.

En cuanto a la actividad investigadora y docente, el lanzamiento del laboratorio tendrá como objetivo profundizar los conocimientos sobre la metodología de impresión 3D. En el horizonte se situarán la transferencia de conocimiento y la difusión de la tecnología.

En el proyecto Lonja3D el grupo de investigación se plantea solventar el déficit que existe en el desarrollo del mercado de productos de impresión 3D. Para ello, necesita disponer de un laboratorio en marcha que le permita recrear un mercado de subastas en el que se facilite la organización y coordinación de ofertas colaborativas entre los clientes y los proveedores.

Los objetivos fundamentales que nos planteamos alcanzar en este proyecto son los siguientes:

- Poner en funcionamiento un laboratorio de impresión 3D que centre su actividad en la fabricación aditiva de piezas.
- Profundizar los conocimientos acerca de la tecnología de modelado por deposición fundida; conocer sus ventajas y sus limitaciones.
- Adquirir un conocimiento práctico en la utilización de las máquinas, los materiales y los equipos.
- Proponer un modelo de costes que permita cuantificar el coste económico asociado a la fabricación de un producto mediante impresión 3D.
- Conocer las distintas tecnologías y materiales empleados hasta la actualidad en fabricación aditiva y analizar las posibilidades que ofrecen.

Este proyecto comprende, por tanto, el lanzamiento y operación de un laboratorio de impresión 3D. Las tareas de lanzamiento nos permitirán familiarizarnos con los requisitos físicos, legales y de conocimiento necesarios para la explotación óptima de un establecimiento de este tipo. El proyecto pretende servir de referencia para otros particulares o grupos interesados en incorporar un departamento de fabricación aditiva en su organización. Asimismo, a lo largo del cuerpo del trabajo se expondrán los pasos necesarios para operar con la tecnología FDM y se recogerán las operaciones habituales de mantenimiento de las máquinas. En último lugar, el trabajo pretende desarrollar una

ecuación que permita cuantificar los costes involucrados en la impresión 3D de una pieza.

Por otro lado, con objeto de aportar el contexto necesario en la utilización de una metodología nueva, hemos hecho una revisión de los avances en fabricación aditiva desde su aparición. En el presente trabajo introducimos las tecnologías de impresión 3D más relevantes y analizamos los materiales de mayor aplicación.

1.2 Justificación

La Cuarta Revolución Industrial está produciendo en la actualidad un cambio en el paradigma social y económico. El cambio está siendo impulsado por las nuevas tecnologías que trae consigo esta revolución, y es el deber tanto de los ingenieros como del resto de profesionales del sector industrial ser conscientes de las posibilidades que se abren ante nosotros. No solo bastará con conocer el alcance teórico que puede ofrecer la integración de las distintas tecnologías en la estrategia de una organización; deberemos investigar y conocer las posibilidades y limitaciones de cada una y obtener el máximo partido de ellas.

Las reglas del mercado de bienes y servicios ya no son las que conocíamos tradicionalmente. La globalización del mercado y su digitalización hacen que todos los usuarios puedan acceder a gran cantidad de información al instante. Esto se traduce en la demanda de productos cada vez más personalizados y con tiempos de entrega cada vez más cortos. Por lo tanto, la industria debe considerar estas nuevas exigencias y adaptarse para ofrecer un servicio de calidad y no perder su competitividad. La fabricación aditiva se presenta como la tecnología idónea para solventar los nuevos requisitos y convertirlos en ventajas competitivas que permitan conseguir una diferenciación de la competencia.

La impresión 3D abre un abanico de posibilidades que afecta a la cadena de suministro en todos sus niveles. Esta tecnología permite un uso más eficiente de los recursos y una gran flexibilidad de los medios productivos, lo que se traduce en una reducción de los tiempos de espera y del stock de los productos. Los métodos de fabricación aditiva permiten crear geometrías complejas que resultan inaccesibles para los métodos tradicionales de fabricación, al tiempo que reducen las necesidades de utillaje y las operaciones de ensamblado.

El objetivo que da pie a nuestro trabajo no es otro que investigar las posibilidades de la tecnología de fabricación aditiva. La técnica de impresión 3D con la que nosotros trabajaremos es el modelado por deposición fundida (FDM); la técnica más extendida, económica y adaptada a las tareas de investigación. La puesta en marcha de un laboratorio de impresión 3D permite reproducir a pequeña escala la fabricación de una

industria. De este modo, el desarrollo de la actividad nos permitirá profundizar nuestro conocimiento acerca de los ámbitos operativo, administrativo y económico.

El fin último del laboratorio será acondicionar el local para el desarrollo del proyecto Lonja3D; un proyecto de investigación financiado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional. El laboratorio permitirá simular un mercado gestionado, “una lonja”, donde adquirir productos fabricados con impresión 3D empleando subastas combinatorias.

1.3 Motivación

La impresión 3D es la tecnología destinada a revolucionar los sistemas tradicionales de fabricación. La metodología de fabricación por la adición sucesiva de capas representa un cambio disruptivo en la industria que requiere de un análisis concienzudo para su explotación óptima. La evolución que está experimentando esta tecnología en la actualidad es vertiginosa y es importante estar actualizado sobre los nuevos procesos, materiales y soluciones que van apareciendo.

Desde el punto de vista de un ingeniero en organización industrial, las posibilidades de evolución de los sistemas productivos y logísticos crean un escenario muy interesante. La introducción de la impresión 3D en las industrias ha reportado ya mejoras sustanciales en los procesos productivos en cuanto a eficiencia y a flexibilidad. Igualmente, han aparecido nuevos negocios que centran su actividad en la impresión 3D de piezas. En este contexto, debemos evaluar la influencia de esta tecnología sobre todos y cada uno de los procesos de negocio de una organización.

Actualmente, el mercado de productos de impresión 3D no está suficiente ni adecuadamente desarrollado. Cuando un particular o una empresa está interesada en obtener un producto mediante impresión 3D debe buscar potenciales proveedores y seleccionar entre ellos, acudir a *marketplaces*, o recurrir a servicios de impresión 3D locales que pueden ser poco competitivos. Esta situación limita las posibilidades de obtener buenos precios, de realizar un comparativo entre las ofertas y limita el valor creado para el usuario final.

El proyecto se desarrolla en el seno del GIR INSISOC. En su ejercicio de investigación acerca de las tecnologías facilitadoras de la transformación digital de las empresas, el grupo ha decidido poner en marcha un laboratorio de fabricación aditiva para adquirir un valioso conocimiento de campo. La finalidad que persigue es constituirse en impulsor del desarrollo del mercado de impresión 3D en la región. Asimismo, el laboratorio permitirá disponer del espacio físico en el que desarrollar el proyecto Lonja3D, donde se evaluarán las limitaciones actuales de este mercado y se propondrán soluciones competitivas.

El desarrollo de un proyecto para el lanzamiento de un laboratorio de impresión 3D permite sentar una base para la ejecución de proyectos similares. En la actualidad, la aparición de nuevas tecnologías hace que sea una práctica cada vez más recurrente el lanzamiento de laboratorios de investigación. Este proyecto permitirá evaluar las necesidades, los requisitos legales y los conocimientos técnicos implicados en la puesta en operación de un laboratorio de fabricación aditiva.

El conocimiento adquirido en la explotación del laboratorio permitirá en un futuro desarrollar actividades docentes. La transferencia de conocimiento es uno de los pilares fundamentales que rigen la actividad investigadora universitaria. En este ámbito, el objetivo será participar en la difusión de la tecnología de impresión 3D, en concreto de la tecnología FDM, mediante la impartición de sesiones teórico-prácticas.

1.4 Organización de la memoria

La estructuración del trabajo se ha hecho en función de la temática tratada en los diferentes capítulos. La memoria se organiza en tres bloques diferenciados formados por un total de seis capítulos. En esta división quedan excluidos los apartados de introducción, conclusiones y estudio de costes del proyecto.

El primer bloque lo forman los capítulos 2 y 3, en los que se hace una revisión del estado del arte de la técnica de fabricación aditiva. En el primero de ellos analizamos las quince tecnologías más importantes en el panorama de la fabricación aditiva, clasificadas en siete grupos en función del proceso de fabricación utilizado. Además, el capítulo incluye una revisión de los materiales más destacados en las distintas tecnologías de fabricación aditiva. El segundo capítulo del bloque incluye un análisis detallado de la tecnología de modelado por deposición fundida (FDM). En él se evalúa tanto el proceso de fabricación como los materiales más utilizados en dicho proceso.

El segundo bloque está formado por los capítulos 3, 4 y 5. En este caso, el bloque se centra en la presentación de los requisitos que deberán permitir la puesta en marcha de un laboratorio de impresión 3D. El primer capítulo se centra en los requisitos físicos, tanto de equipos como de instalaciones. En el segundo se hace un análisis de los componentes y el proceso de montaje de las impresoras 3D con las que se operará en el laboratorio. Finalmente, en el tercero de los capítulos se exponen los pasos a seguir para fabricar una pieza mediante FDM y se indican las operaciones de preparación y mantenimiento de los equipos más representativas.

El tercer y último bloque está formado en exclusiva por el capítulo 7. Este capítulo incluye un estudio de las actividades implicadas en el proceso de impresión con FDM y de los costes asociados a ellas. Asimismo, se desarrolla una ecuación que permitirá cuantificar los costes de la fabricación de piezas mediante esta tecnología.

Los capítulos restantes son los de introducción, conclusiones y estudio de costes del proyecto. En el primero se expondrá la motivación del proyecto, el alcance de este y los objetivos perseguidos. En el capítulo de conclusiones se revisará la consecución de los objetivos marcados y se expondrán las lecciones aprendidas. Por último, se elaborará un estudio del coste económico del proyecto.

Capítulo 2
Industria 4.0 y fabricación
aditiva

2 INDUSTRIA 4.0 Y FABRICACIÓN ADITIVA

2.1 Economía digital

El término “Economía Digital” surge a raíz del nuevo paradigma socioeconómico que ha comenzado a establecerse en el mundo globalizado. El destacable aumento en la aplicación de técnicas y tecnologías provenientes del ámbito de la informática y las telecomunicaciones (sector TIC) ha provocado profundos cambios a nivel social, cultural y económico en la última década.

Este término fue introducido en el libro más vendido en 1995, “*Digital Economy: Promise and Peril in the Age of Networked Intelligence*” [1], escrito por Don Tapscott, en el que habla de las posibilidades que abre Internet a la creación de nuevos negocios. Una de las primeras definiciones que se tiene de este término aparece en el informe del Departamento de Comercio de Estados Unidos “*The emerging digital economy*”, de 1998. La definición de Economía Digital que se presenta establece que se trata de una nueva dimensión de la economía que se encuentra inmersa en un espacio inteligente que se compone de información, instrumentos de acceso y procesamiento de la información y capacidades de comunicación.

En este nuevo entorno cobrará especial importancia Internet, que va a ser el engranaje que permita el desarrollo de un sistema interconectado. Así, esta nueva economía va a provocar una modificación de los modelos productivos en aspectos como la localización, el tamaño, la estructura o las relaciones entre empresas. Al mismo tiempo, el desarrollo de las TICs ha dado paso al crecimiento de un mercado global formado por todos los bienes y servicios que dependen de forma crítica de las tecnologías digitales o lo son en sí mismas. [2]

Los principios que definen la economía digital y que hacen que se haya producido un cambio radical en la manera en la que personas y empresas interactúan en el mercado son los siguientes:

- Los usuarios son los que tienen el poder de decisión y pueden acceder a gran cantidad de información.
- La información se genera constantemente y de forma muy rápida.
- El espacio ya no está limitado, todos los entes están conectados.
- Los productos y servicios pueden estar disponibles para los usuarios en cualquier momento y lugar.

Gracias a estos principios, la economía digital genera a diario nuevos modelos de negocio y abre nuevas posibilidades de desarrollo. Los elementos que la caracterizan y que dan soporte a esta nueva realidad son los siguientes:

- El desarrollo permanente de Internet y de tecnologías asociadas de navegación y comunicación. La evolución de Internet permite estar continuamente creando nuevas soluciones a nuevas necesidades, además de crear un entorno global conectado que nos dota de grandes facilidades de interacción.
- Relaciones basadas en el comercio electrónico. En los últimos años se ha producido un crecimiento exponencial de las compras a través de medios digitales, ya sean móviles, tablets u ordenadores. Además, los productos y servicios que surgen tienden a tener un formato digital que facilita su difusión y desarrollo.
- Modelos de negocio en la economía digital. Gracias al desarrollo de este nuevo paradigma económico, han surgido gran cantidad de negocios que se caracterizan por la relación entre el proveedor y el consumidor hacia el que va dirigido. Algunos ejemplos son el B2C (Business to consumer), el B2B (Business to Business), el B2G (Business to Government) o el C2C (Consumer to Consumer).

Ante este nuevo paradigma, es importante comprender los pasos que se deben seguir en los distintos sectores profesionales. La velocidad con la que evoluciona la sociedad actual hace que el desarrollo de nuevas tecnologías y soluciones provoque profundos cambios en ámbitos como la industria, la educación y las relaciones humanas. En este ecosistema, debemos promover el avance hacia un mundo global y conectado de manera sostenible y adaptada a las necesidades individuales y colectivas.

2.2 Industria 4.0

La Industria 4.0 o Cuarta Revolución Industrial es un concepto que surge para hacer referencia a la introducción de las nuevas tecnologías digitales en la industria. Esta idea establece una conexión entre las tecnologías que dieron paso a la Tercera Revolución Industrial, como son la automatización de procesos y las nuevas tecnologías de producción, y las tecnologías propias de la era de la información, que se centran en el almacenamiento, procesamiento y transmisión masiva de datos. Estas tecnologías digitales permiten la hibridación entre el mundo físico (dispositivos, instalaciones, maquinaria) y el digital (sistemas), promoviendo una colaboración entre estos para crear una industria inteligente.

El reto de esta nueva tendencia es el de crear una producción industrial en la que todos los productos y máquinas estén interconectados. Así, no solamente los productos se verán afectados, sino que se avanzará hacia la interconexión de las cadenas de valor y de los modelos de negocio de las empresas. En consecuencia, van a aparecer nuevos modelos de negocio en los que las cadenas de valor aparezcan integradas y digitalizadas,

y en los que se haga una gestión individualizada del binomio producto-cliente gracias al desarrollo de productos personalizados y a las conexiones en tiempo real. Además, cobrará especial importancia el desarrollo de modelos empresariales digitales adaptados a las nuevas necesidades, y se convertirán en negocios críticos para el rendimiento de las compañías los servicios de valor añadido y las soluciones integradas digitales. [3]

La base sobre la que descansa esta revolución es la mayor disponibilidad y uso integrado de los datos relevantes a través de la conexión de todos los productos, recursos y empresas involucradas en la cadena de valor. Esto, junto con una transformación adecuada de los procesos y productos, debe permitir a las empresas mejorar sus niveles de rendimiento y, como fin último, generar valor para el cliente. En este proceso será crítico comprender los nuevos modelos de negocio existentes y adaptar la organización a estos, ya que se verá alterado el modo tradicional en el que una empresa pone a disposición de un cliente un producto o servicio.

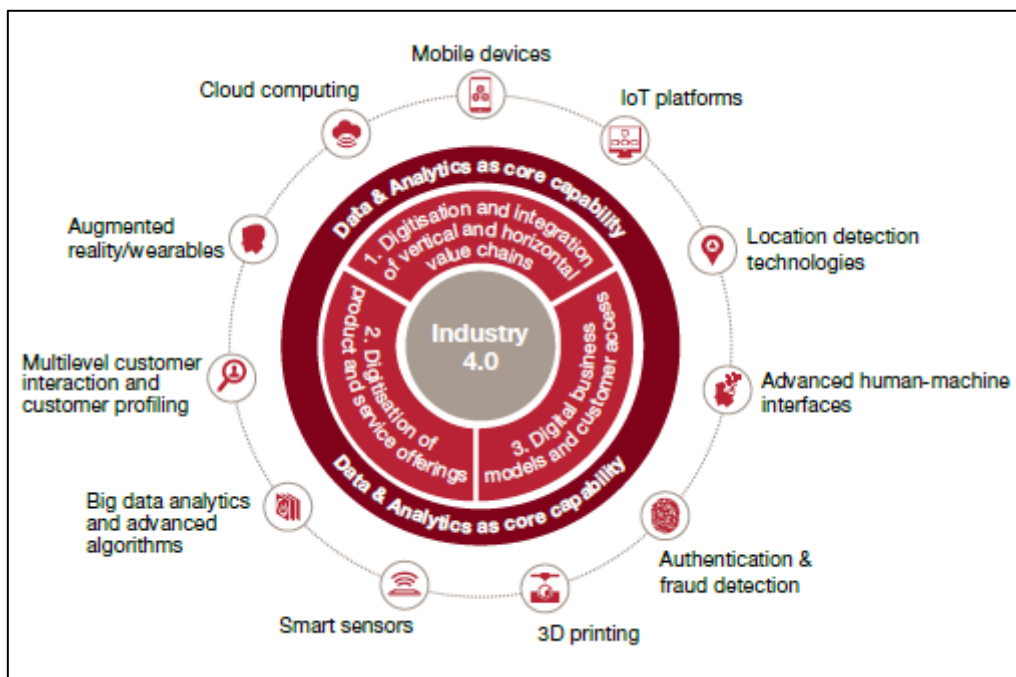


Ilustración 1: Industria 4.0 y tecnologías contribuyentes. Fuente: PWC. Ref: [4]

La transformación digital aparece para dar respuesta a las nuevas necesidades y barreras que surgen en los procesos productivos de las empresas. Se debe buscar la disminución del consumo de recursos y la maximización de la eficiencia de los procesos para lograr una mayor competitividad. Se debe dar respuesta a la demanda del mercado de una mayor flexibilidad y productividad, para lo que se deben combinar las propiedades de eficiencia y flexibilidad de los medios productivos. Una mayor y más rápida información permitirá, además, optimizar el uso de los recursos, personalizar los productos y reducir los plazos de entrega.

Las nuevas tecnologías que impulsan esta Cuarta Revolución Industrial y que serán las que faciliten la expansión de este nuevo panorama industrial pueden identificarse en nueve técnicas diferenciadas: [3]

- Fabricación aditiva: fabricación de un cuerpo sólido a partir de la deposición de capas sucesivas de material hasta configurar la figura y forma deseadas. La información se recoge en un archivo digital y se transmite a la máquina en el lenguaje adecuado para su elaboración. Supone una revolución en los sistemas y procesos de fabricación y presenta importantes aplicaciones en el ámbito industrial.
- Robótica colaborativa: robots que interactúan y colaboran con los humanos en un espacio de trabajo compartido, eliminando el vallado tradicional. Estos robots se caracterizan por ser ligeros, flexibles y fáciles de instalar, y además tienen un precio considerablemente menor al de los robots industriales tradicionales. Su aparición representa una nueva era en la automatización industrial porque permite la introducción de robots en sectores y procesos industriales en los que, hasta ahora, no había sido viable.
- Sistemas ciberfísicos: dispositivos que incorporan tecnologías informáticas y de comunicación y que los dotan de “inteligencia” para hacerlos más eficientes. Permiten la interacción con objetos físicos al tiempo que transmiten la información recogida al mundo virtual, pudiendo llegar a aprender y evolucionar. Estos sistemas pueden aparecer en múltiples sectores como los de la fabricación, salud, transporte, energía, ciudades inteligentes, etc. Permiten el desarrollo de una nueva generación de elementos interconectados.
- Cloud computing: tecnología que permite un acceso remoto a software, almacenamiento de archivos y procesamiento de datos por medio de internet. Aparece como un sustitutivo de la computadora personal o servidor local y permite hacer un uso flexible de los recursos, adaptándolo a las necesidades de cada periodo. La industria puede aprovecharse de esta infraestructura en cualquiera de sus ámbitos y procesos.
- Big Data: conjunto de técnicas innovadoras de tratamiento de grandes volúmenes de datos que tienen como objetivo extraer valor de los datos para apoyar la toma de decisiones. Engloba el almacenamiento de datos, su procesamiento y su análisis para extraer la información necesaria. Permite crear continuamente nuevas soluciones a nuevos problemas, por lo que la explotación inteligente de los datos industriales es el medio para lograr una mejor gestión de todos los recursos disponibles.

- Realidad aumentada: técnica que consiste en incorporar en tiempo real información virtual a la información física disponible. Permite incrementar la percepción que tenemos de un elemento y mejora la comunicación con el entorno, que se vuelve interactivo y digital. Esta técnica está siendo utilizada en campos como la educación, el ocio, el marketing o la arquitectura, así como la industria está explorando sus capacidades para optimizar los diferentes procesos.
- Visión artificial – Realidad virtual: la visión artificial permite que un ordenador sea capaz de detectar las características de una imagen mediante el reconocimiento de patrones y el aprendizaje sucesivo. La realidad virtual permite al usuario introducirse en un entorno completamente virtual, generado en tiempo real por un ordenador. Ambas tecnologías pueden tener multitud de aplicaciones en el ámbito industrial, y ya se han empezado a aplicar en sectores como el transporte, la medicina o la seguridad.
- Ciberseguridad: en un entorno digitalizado, el principal activo de una empresa es la información que posee, por lo que la ciberseguridad es una necesidad acuciante. La ciberseguridad es el conjunto de tecnologías y servicios que tratan de proteger a la organización ante cualquier ataque o pérdida de datos. Para ello, es necesario dotarla de sistemas robustos capaces de actuar antes, durante y después de cualquier riesgo o amenaza.

La adopción de estas tecnologías y su incorporación a los modelos de gestión, operación y comunicación de las compañías será el elemento conductor del desarrollo de la Industria 4.0. Es importante considerar las oportunidades que ofrecen tanto a nivel individual como en un entorno colectivo y adaptarlas de manera eficiente a las necesidades de cada organización. No se trata solo de generar una ventaja competitiva; en la actualidad, desarrollar una estructura organizacional actualizada en un mercado global y digitalizado es ya una cuestión de supervivencia.

2.3 Impresión 3D

En el ámbito de la Industria 4.0, la impresión 3D aparece como la tecnología destinada a replantear los sistemas de fabricación tradicionales. Se conoce como impresión 3D al proceso que permite materializar un objeto a partir de la información digital contenida en un archivo tridimensional mediante la adición sucesiva de capas de material. Para ello, se debe recurrir al uso de una cadena de herramientas de software tanto para el diseño de la pieza (*Computer Aided Design tools*), como para la adaptación del diseño y la comunicación con la impresora (*Computer Aided Manufacturing tools*).

El proceso de impresión 3D comienza con la obtención del modelo 3D de la pieza que se desee imprimir, para lo que tenemos dos posibilidades: el diseño de la pieza mediante un software CAD o bien la reconstrucción en formato digital mediante un escáner 3D. Una vez obtenido el archivo del diseño 3D del modelo a imprimir, el siguiente paso consiste en laminarlo; realizar un archivo de trayectorias que vaya definiendo los movimientos que deberá realizar la máquina para ir construyendo cada una de las capas. Este archivo, para cuya elaboración nos serviremos de una herramienta software de CAM conocida como laminador, estará escrito en lenguaje máquina (G-code), interpretable por cualquier máquina de control numérico. Finalmente, mediante otra herramienta software de CAM, realizaremos la comunicación con la impresora 3D para enviar a su procesador la información necesaria para la fabricación de la pieza. En este momento, la impresora ya estará en condiciones de ejecutar las órdenes correspondientes para la elaboración de las distintas capas del producto final.

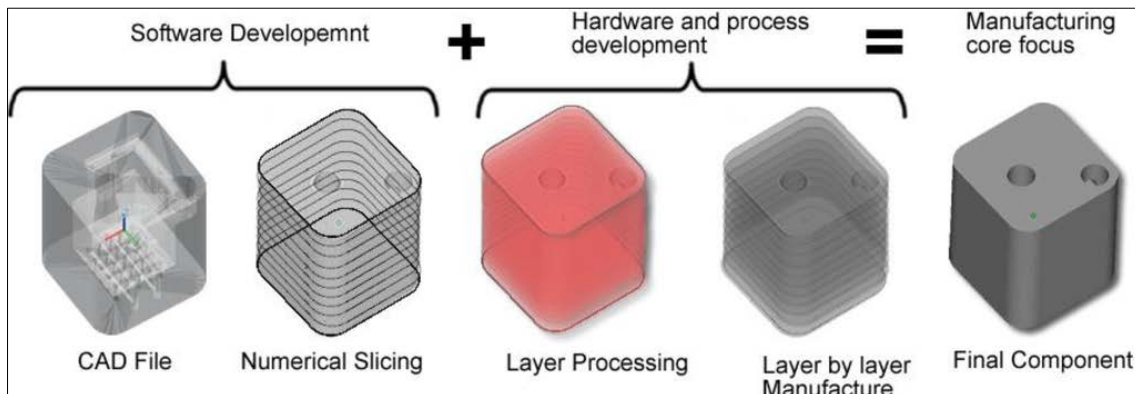


Ilustración 2: Proceso de impresión 3D. Fuente: Inkjet Wholesale. Ref: [5]

Lo que realmente diferencia a esta tecnología de otras tecnologías de fabricación que también realizan la comunicación con las máquinas de control numérico mediante un software de control radica en el hecho de que en este caso la pieza se va conformando mediante la agregación de capas sucesivas de material. Este es el motivo por el cual se conoce a la metodología de fabricación mediante impresión 3D como fabricación aditiva. El modo en el que estas capas se vayan depositando y la manera en la que el material utilizado adquiera su estado final dependerán de la tecnología empleada.

Las características de esta metodología de fabricación la diferencian claramente de los métodos de producción tradicionales, por lo que tendrá unas ventajas notables en comparación con ellos, así como ciertas desventajas debido a su naturaleza. Entre las ventajas de la impresión 3D que cabe destacar se encuentran las siguientes:

- Se eliminan prácticamente los desperdicios, puesto que únicamente se aporta el material estrictamente necesario para la fabricación de la pieza. Además, existe la posibilidad de reciclar aquellas piezas defectuosas o que hayan perdido su funcionalidad. [6]

- Se puede optimizar el material empleado mediante modificaciones en el diseño, de manera que se adapte exclusivamente a los requerimientos que se le van a exigir a la pieza. También, se posibilita la introducción de nuevos materiales en detrimento de los materiales tradicionales de fabricación, con lo que se consigue optimizar las prestaciones del producto a fabricar.
- Se reduce el número de operaciones de ensamblaje finales, de manera que aumenta la fiabilidad del producto resultante y se hace innecesario el uso de utillajes.
- Se facilita la creación de productos personalizados. Resulta muy sencillo modificar los parámetros del producto a fabricar en su diseño tridimensional, por lo que se ofertará al cliente una amplia variedad de posibilidades de personalización de este.
- Permite la fabricación de geometrías complejas con un alto grado de precisión, algo muy difícil de conseguir mediante métodos tradicionales. [7]

En cambio, entre las desventajas más acusadas de este método de producción podemos citar: [7]

- Las limitaciones de escala y tamaño. Las impresoras 3D solamente pueden imprimir unas pocas piezas a la vez y no elaborar una gran tirada simultánea. Por otro lado, el tamaño de las piezas a fabricar suele ser reducido, ya que está restringido al tamaño de la impresora empleada.
- Se imposibilita el acceso a las economías de escala. Dado que las piezas se imprimen individualmente o en pequeñas tiradas, esta tecnología no se puede beneficiar del ahorro que suponen las economías de escala.
- El coste de las impresoras 3D es muy elevado. El estado de desarrollo de la tecnología todavía no ha conseguido abaratar lo suficiente las máquinas para permitir un acceso global a ellas a nivel industrial.
- La necesidad de aplicar laboriosos post-procesados. El acabado y la calidad superficial de las piezas impresas en 3D no es comparable con el de otros métodos tradicionales. De este modo, se deben aplicar tratamientos para corregir posibles desperfectos o dotar a la pieza de una apariencia más vistosa.

Teniendo en cuenta, por tanto, las ventajas que ofrece este método de fabricación frente a los inconvenientes que debe solventar, podemos afirmar que esta tecnología fundamenta su importancia en la capacidad de adaptación al nuevo entorno industrial y económico. Por ello, las perspectivas de crecimiento que la rodean son muy

prometedoras y se espera que su acogida genere una profunda revolución de la cadena de suministro a todos los niveles. El principal obstáculo para el desarrollo de esta técnica durante los últimos años había sido la posesión de patentes de las diferentes tecnologías. Sin embargo, a medida que estas patentes han ido expirando se ha producido un importante desarrollo en este sector y el ritmo de crecimiento actual es vertiginoso.

Rapid prototyping (RP), rapid manufacturing (RM), layer manufacturing (LM), solid freeform fabrication (SFF) son los sinónimos con los que se suele hacer referencia a la fabricación aditiva. Lo que ha hecho popular desde su nacimiento a esta tecnología han sido las posibilidades que ofrece de generar fácilmente geometrías complejas, crear configuraciones arbitrarias y el uso eficiente del material. Hoy en día, la fabricación aditiva es una de las tecnologías que mayor desarrollo están teniendo tanto a nivel académico como industrial. El fácil acceso a dispositivos de fabricación aditiva comerciales confiere a esta tecnología una gran flexibilidad de los sistemas productivos, creando una especie de metodología de fabricación “bajo demanda” que reducirá drásticamente los tiempos de espera y de stock de los productos. Es una concepción totalmente distinta a la cadena de suministro tradicional – la cual está basada en la producción a gran escala – que da paso a un nuevo mercado de productos y servicios y que actualiza las técnicas de fabricación tradicionales. Es esto por lo que algunos autores consideran que la fabricación aditiva y sus tecnologías asociadas van a provocar un “renacimiento” de la fabricación industrial. [8]

2.4 Tecnologías de impresión 3D

La impresión 3D como técnica de fabricación nació a partir del desarrollo de la estereolitografía en 1986 por parte de Charles Hull. [7] Sin embargo, esta tecnología sería solamente el desencadenante de una serie de desarrollos en esta materia que darían lugar a nuevas tecnologías de fabricación aditiva. Hoy en día, los desarrollos son constantes y cada vez van apareciendo nuevas tecnologías y materiales que ofrecen nuevas posibilidades en los distintos campos de aplicación. El prototipado rápido, la capacidad para imprimir grandes estructuras, la reducción de defectos de impresión y la mejora de las propiedades mecánicas de las piezas fabricadas son algunos de los factores que han provocado la investigación de nuevas tecnologías y métodos. [8]

Aunque existen diversas formas de clasificar las tecnologías de fabricación aditiva, el método que establece el estándar internacional de fabricación aditiva, ASTM International, [9] hace una distinción según la técnica utilizada para depositar las capas de material, el material empleado y la manera en la que las capas se van uniendo unas a otras para conformar la pieza. [8] La tabla 1 ofrece una clasificación de las tecnologías

organizadas según los siete procesos de fabricación que considera el ASTM e incluye los materiales que se emplean mayoritariamente en cada una de ellas.

Tabla 1: Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva. Fuente: Elaboración propia.

Process categories	Technology	Materials
Vat photopolymerization	SLA	Plastic & Ceramic
	DLP	Plastic
	CDLP	Plastic
Material Extrusion	FDM	Plastic & Composite
Material Jetting	MJ	Plastic & Ceramic
	DOD	Wax
Binder Jetting	BJ	Gypsum, Sand & Metal
Powder bed fusion	SLS	Plastic & Ceramic
	DMLS / SLM	Metal
	EBM	Metal
	MJF	Plastic
Direct Energy Deposition	LENS	Metal
	EBAM	Metal
Sheet Lamination	LOM	Composite & Paper
	UC	Metal

La diferenciación de procesos hace una división en un total de siete categorías. A continuación, se realizará una revisión de cada uno de los siete procesos de fabricación aditiva y de las tecnologías más relevantes asociadas a ellos.

2.4.1 Material extrusion

El proceso de extrusión de material es el más conocido de los siete procesos de fabricación aditiva. Este método se caracteriza porque la deposición de las capas se realiza mediante la extrusión de material en un proceso continuo. El material que se emplea suele aparecer en forma de filamento y el más utilizado es el termoplástico, puesto que sus propiedades lo hacen idóneo para ser extruido.

Para realizar la extrusión del material, es necesario que las impresoras estén equipadas con un “hot-end”, que es un conjunto de elementos ensamblados al extrusor que permiten calentar el filamento a su paso por ellos. Gracias a este aporte calórico, el material alcanza un estado fluido y puede ser extruido para dar lugar a una capa. La pieza se forma a base de repetir este proceso tantas veces como capas la conformen. La unión entre capas se produce gracias al calor y la presión que ejerce el extrusor al depositar la capa siguiente, de manera que ambas capas se funden y solidifican. Este proceso es muy valorado en fabricación aditiva por su sencillez y porque las piezas están listas para ser usadas una vez que se ha completado la extrusión de todas las capas. [10]

La tecnología más conocida de extrusión de material es el modelado por deposición fundida (FDM), que es la tecnología que emplea habitualmente la comunidad de

aficionados a la impresión 3D – conocidos como “makers” – en sus impresoras domésticas.

Fused Deposition Modeling (FDM)

La técnica de Modelado por deposición fundida es la más extendida de entre las distintas tecnologías de impresión 3D, puesto que es la más accesible desde el punto de vista económico. Esta técnica recibe el nombre genérico de *Fused Filament Fabrication* (Fabricación mediante Filamento Fundido), ya que FDM es un nombre registrado por la compañía Stratasys Inc.

En este método, se emplea un filamento continuo de material, que suele ser un termoplástico, que se va depositando capa a capa a través de una boquilla. El material es calentado en la etapa previa a su llegada al extrusor hasta alcanzar un estado semilíquido, momento en el cual es extruido para formar una capa. Las propiedades termoplásticas de los polímeros empleados hacen que estos se solidifiquen a temperatura ambiente una vez que han sido depositados.

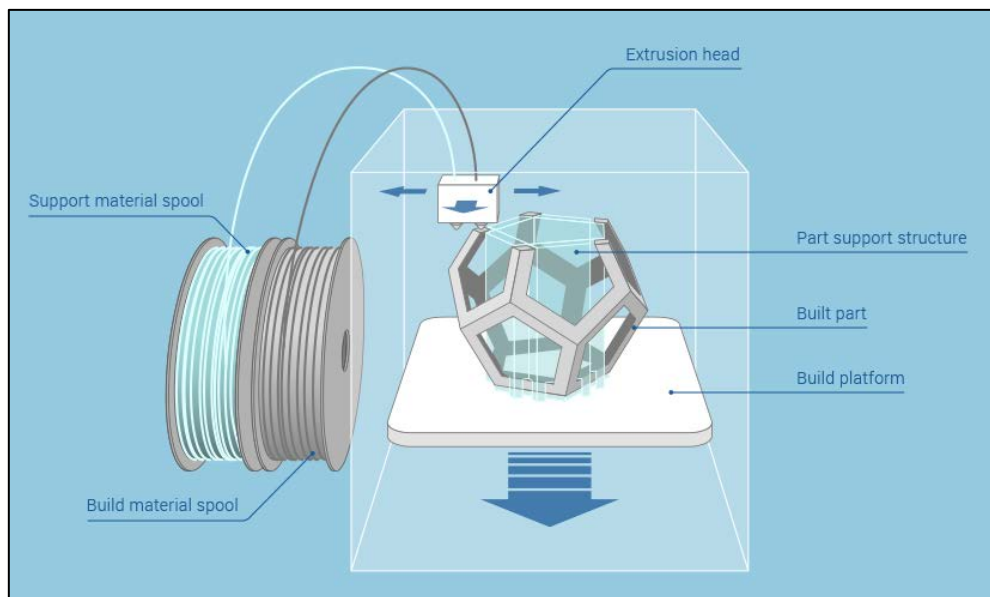


Ilustración 3: Tecnología FDM. Fuente: Additively. Ref: [11]

Existe diversidad de parámetros a configurar en esta metodología; la altura y el grosor de capa, el relleno de la pieza y la orientación del filamento serán las más importantes a la hora de determinar las propiedades mecánicas de la pieza resultante. Del mismo modo, será crítica también la elección del material a emplear debido a las características mecánicas que presente. Los materiales más utilizados en FDM son el PLA y el ABS, dos termoplásticos que dan lugar a gran cantidad de posibilidades de impresión debido a sus propiedades y que, además, no requieren de un gran desembolso económico.

Los principales beneficios que ofrece la tecnología FDM son el bajo coste de los equipos, la alta velocidad de impresión en comparación con otras técnicas y la simplicidad del

proceso de impresión. Por el contrario, las principales desventajas son las bajas propiedades mecánicas que se consiguen, la apariencia y acabado final de la pieza y la menor precisión dimensional que consigue alcanzar con respecto a otras tecnologías.

En la actualidad, se está investigando en el desarrollo de composites reforzados con fibras compatibles con esta tecnología, que permitirían mejorar las prestaciones mecánicas de las piezas obtenidas. Sin embargo, la orientación de la fibra y la formación de huecos en el propio composite son dos grandes desafíos en cuanto a la acogida de este nuevo material. [7]

2.4.2 Direct Energy Deposition

El método de deposición directa de energía (DED) también es conocido como *Laser Solid Forming* (LSF), *Directed Light Fabrication* (DLF) o *Direct Metal Deposition* (DMD). [7] Este método es utilizado principalmente para la fabricación de aleaciones de alto rendimiento; aleaciones que poseen una excelente resistencia mecánica, resistencia a la fluencia, a altas temperaturas, una gran estabilidad y una gran resistencia a la corrosión.

La metodología que emplea consiste en aplicar una fuente de energía sobre la pieza en tratamiento al tiempo que se deposita material (en polvo o en alambre) sobre su superficie, de manera que funda al tiempo que es depositado. El material solidifica muy rápidamente una vez que se deja de aplicar la fuente de energía. Esta energía suele ser aplicada por un láser o por un haz de electrones. [12] La orientación del canal de suministro del material a fundir y de la fuente dirigida de energía es variable, pudiendo ser coaxiales o ser aplicados con distintos ángulos.

Lo que diferencia a esta metodología de la de fusión en lecho de polvo es que en este caso no se emplea una cama de polvo y que el material es fundido antes de ser depositado. Esto hace que tenga gran aplicación como medio de reparación de piezas, a la hora de rellenar huecos o reajustar partes que hayan sido manufacturadas, pudiendo actuar como sustitutivo de la soldadura convencional. [7] Las máquinas que emplean esta tecnología, a diferencia de lo que ocurre en la técnica de FDM, tienen capacidad para desplazarse en 4 o 5 ejes; no será necesario que las superficies de aplicación sean planas.

Esta técnica se caracteriza principalmente por la alta velocidad a la que trabaja y la capacidad que tiene para actuar sobre largas superficies, lo que resulta útil para el tratamiento de tubos de distintas aleaciones. Sin embargo, la precisión obtenida no es excesivamente elevada y por ello la calidad superficial tampoco lo es. Otra limitación que presenta tiene que ver con las geometrías sobre las que puede actuar, que son reducidas en comparación con las que permiten otros métodos como los basados en lecho de polvo.

Las tecnologías basadas en DED se emplean para fabricar piezas metálicas con baja complejidad, así como para la reparación de componentes de gran tamaño. Además, permiten reducir notablemente el tiempo de fabricación y el coste, mientras que proporcionan excelentes propiedades mecánicas y un gran control sobre la microestructura y la composición de la pieza. Es por ello por lo que existe una importante aplicación para la reparación de turbinas y otros componentes de gran requerimiento mecánico. [7]

El desarrollo actual de las tecnologías de DED se encuentra inmerso en la fabricación de productos metálicos funcionales con geometrías complejas, en materiales tanto metálicos como aleaciones o composites de matriz metálica. El objetivo es cumplir los requerimientos mecánicos de industrias como la aeronáutica, la automoción, defensa y la industria biomédica, entre otras. [8]

Las tecnologías más destacadas que emplean el método de deposición por aplicación directa de energía son fundamentalmente dos: la creación de redes diseñadas por láser (LENS) y la fabricación aditiva por haz de electrones (EBAM).

Laser Engineered Net Shape (LENS)

La tecnología LENS, también conocida como *Laser Metal Deposition (LMD)*, emplea un láser como fuente de energía en el proceso de DED. El proceso consiste en hacer incidir el láser sobre una superficie al tiempo que se libera polvo metálico a través de una o varias boquillas. El láser crea una pequeña bañera de material fundido en el área de aplicación y sobre esta se aplica el polvo metálico, que es fundido y posteriormente solidifica para dar lugar a una nueva capa de material. Esta tecnología suele emplearse para construir capas sobre una placa metálica o para la reparación de componentes. [13]

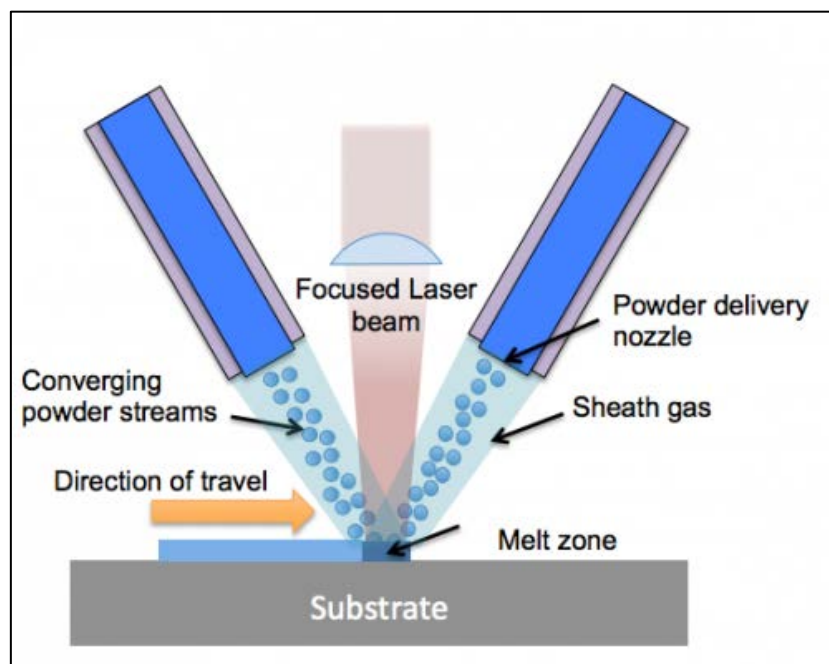


Ilustración 4: Tecnología LENS. Fuente: 3DPrinting. Ref: [14]

Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)

EBAM es la tecnología de DED que emplea como fuente de energía un haz de electrones. El proceso de fabricación es equivalente al de la tecnología LENS. La principal ventaja que ofrece esta tecnología es que consigue una gran eficiencia al aplicarse en vacío, por lo que la gran mayoría de la maquinaria que emplea esta técnica trabaja en cámaras de vacío. [13]

En esta tecnología de DED, el material metálico de fabricación puede emplearse tanto en forma de polvo como en forma de alambre. Por un lado, el polvo permite generar anchuras variables desde 0,1 mm hasta unos pocos milímetros, por lo que se obtendrá una gran precisión. Además, el calor que penetra en la superficie de aplicación es menor. Por otro lado, el alambre permite elaborar piezas de mayores dimensiones e imprimir a una mayor velocidad. [15]

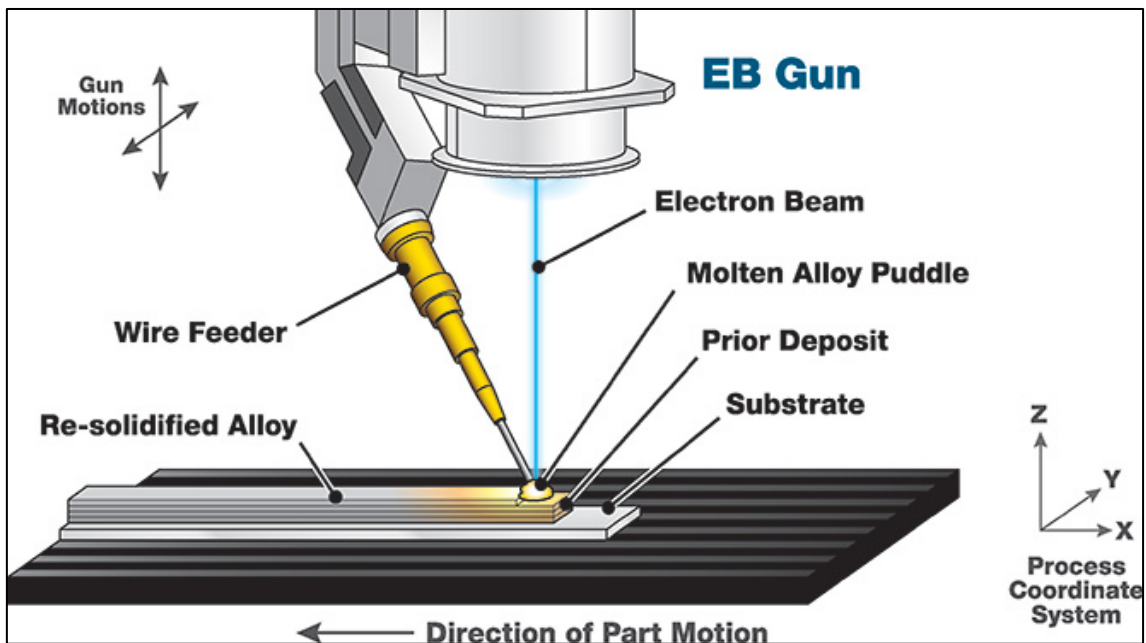


Ilustración 5: Tecnología EBAM. Fuente: SCIACY INC. Ref: [15]

2.4.3 Vat Photopolymerization

La fotopolimerización es un proceso de fabricación aditiva en el que un líquido fotopolimérico contenido en una cuba es curado gracias a la activación del proceso por la incidencia de algún tipo de radiación (rayos gamma, rayos x, haz de electrones, UV, etc). [10] A nivel molecular, el proceso consiste en la unión de las moléculas de un monómero (el material en estado líquido) para dar lugar a moléculas de mayor tamaño que formarán el sólido. El proceso de fotopolimerización es irreversible y no puede volver a obtenerse el líquido original una vez que ha completado el curado de este. Esto se debe a que los polímeros empleados en este proceso son termoplásticos, por lo que en caso de calentarlos se acabarían quemando en lugar de fundir. [16]

Las tecnologías basadas en fotopolimerización, especialmente la SLA, son muy versátiles y pueden ser empleadas cuando la precisión sea el principal requerimiento, siendo críticos la forma y el ajuste de las piezas. Además, es la tecnología de fabricación aditiva que genera un mejor acabado superficial. Esto la hace muy útil para fabricar piezas de joyería, moldes para inyección duraderos y otras piezas para aplicaciones médicas y dentales. [13] El coste de estas tecnologías, tanto de los equipos como de los materiales, hace que su desarrollo se restrinja al campo industrial.

Las tecnologías más extendidas que emplean el proceso de fotopolimerización son la estereolitografía (SLA), el procesado digital de luz (DLP) y el procesado digital de luz continuo (CDLP).

Stereolithography (SLA)

La estereolitografía es una tecnología de fabricación aditiva basada en el proceso de fotopolimerización. El proceso se compone de varias etapas:

- I. La plataforma sobre la que se va a imprimir se sumerge en el tanque que contiene el líquido fotopolimérico, y se coloca a una profundidad de una capa (según el grosor de capa que se haya determinado).
- II. Se hace incidir el rayo (normalmente de luz ultravioleta o haz de electrones) sobre la superficie del tanque, en el que va trazando el camino especificado. A medida que incide la radiación, el material va solidificando según la geometría deseada. Para dirigir el láser se utiliza un sistema de espejos.
- III. Cuando se termina de imprimir una capa, la plataforma se desplaza hacia abajo una distancia equivalente al grosor de una capa. Se barre la pieza mediante una hoja que deja una nueva capa de resina líquida en la superficie del tanque.
- IV. Después de la impresión, la pieza no está completamente curada y requerirá de un post-procesado mediante luz ultravioleta si se quieren obtener altas propiedades mecánicas y térmicas.

Esta tecnología hace necesario el uso de estructuras de soporte por el hecho de imprimirse sobre una cubeta de material líquido, por lo que una vez finalizado el proceso de impresión será necesario retirar el material de soporte innecesario. Para ello, el método más recurrido consiste en sumergir la pieza en un disolvente que no afecte al polímero curado.

La SLA es la tecnología más apropiada para la impresión de piezas con importantes requerimientos de calidad superficial o de precisión desde el punto de vista de la balanza calidad-coste. Esta tecnología permite ahorrar tiempo en el proceso de impresión de geometrías que requieren de una gran precisión, especialmente cuando se necesita imprimir una serie de prototipos o un patrón de molde. Además, las piezas que se producen tienen un acabado final liso que facilita procesos posteriores tales como el pulido o el pintado. [7]

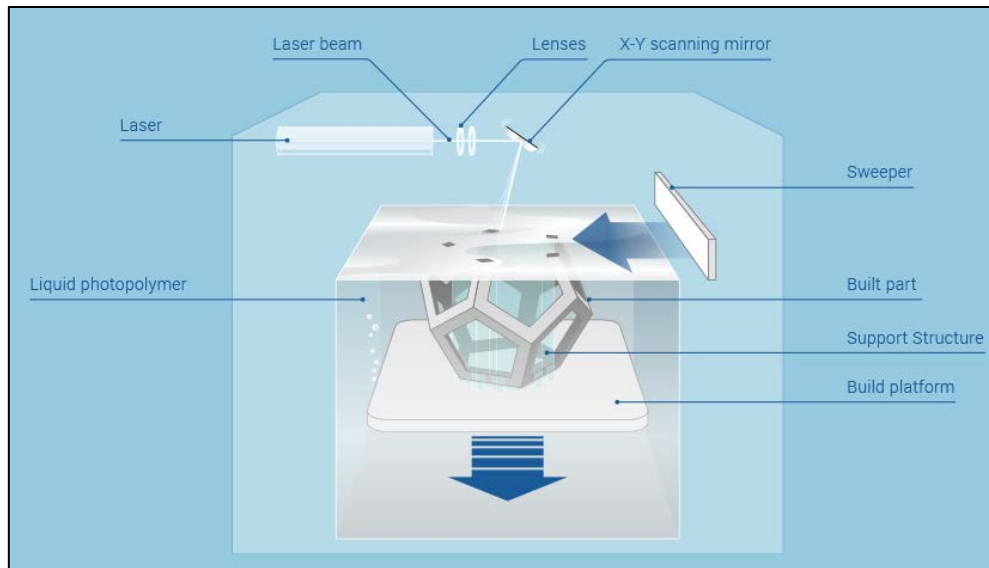


Ilustración 6: Tecnología SLA. Fuente: Additively. Ref: [11]

La principal ventaja que ofrece la SLA frente a otras tecnologías de fotopolimerización es la gran precisión con la que elabora las piezas, puesto que la construcción se realiza punto a punto y no capa a capa. En cambio, la principal desventaja es la lentitud del proceso y el gran coste económico de los equipos de láser que emplea, frente al de los proyectores de luz.

Direct Light Processing (DLP)

La tecnología DLP sigue un procedimiento completamente análogo al de la SLA, con la diferencia de que en este caso en lugar de un láser se emplea un proyector de luz, que servirá para activar el proceso de fotopolimerización. En el DLP, en lugar de ir trazando la geometría en cada capa como ocurría en la SLA, se proyecta una imagen sobre la superficie de la resina con la geometría deseada, de modo que se solidifica la capa completa de una sola vez. Dado que el proyector es una pantalla digital, la imagen de la geometría de cada capa se forma mediante píxeles cuadrados, de manera que la capa estará formada por pequeños cubos llamados “voxels”. [13] El proyector incide sobre toda la superficie de la resina contenida en el tanque y fragmenta la luz mediante espejos móviles según la orientación de los píxeles.

En esta tecnología, lo habitual es que el rayo de luz se haga incidir desde la parte inferior hacia la cubeta. Esto hace que la plataforma del eje Z que da soporte a la impresión se vaya desplazando hacia arriba cada vez que se haya imprimido una capa, para colocar la resina necesaria para imprimir la siguiente.

La metodología DLP permite alcanzar mayores velocidades de impresión que la SLA para la impresión de ciertas piezas, puesto que cada capa se forma de una sola vez y no realizando el recorrido punto a punto con el láser.

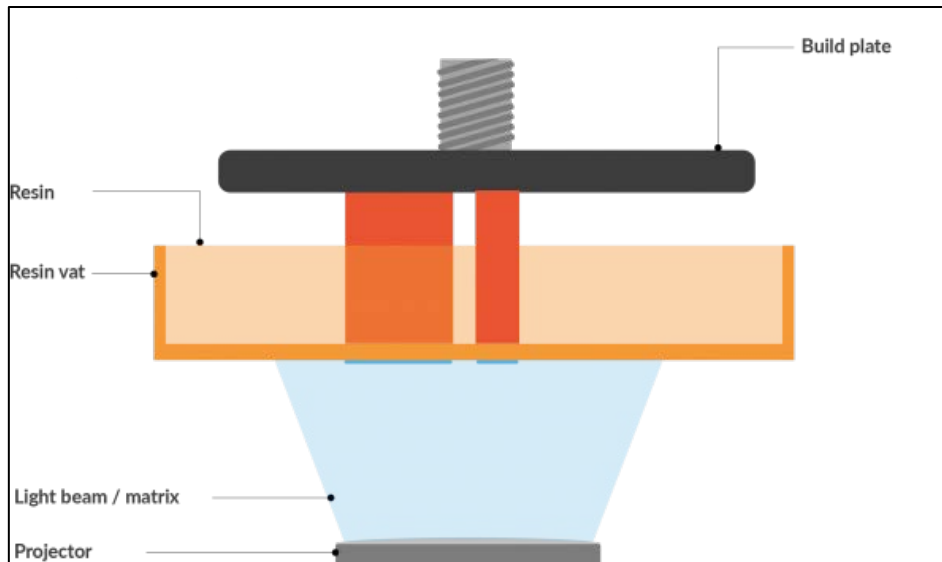


Ilustración 7: Tecnología DLP. Fuente: DruckWege. Ref: [17]

Continuous Direct Light Processing (CDLP)

También se conoce a esta tecnología con el nombre de *Continuous Liquid Interface Production (CDLP)*, nombre en propiedad originalmente de la empresa EiPi Systems y ahora de la empresa Carbon, que posee la patente de esta tecnología. El procedimiento que sigue es exactamente el mismo que la DLP; sin embargo, en este caso la plataforma de impresión (eje Z) se desplaza hacia arriba en un movimiento continuo y no en la anchura de la capa siguiente con movimientos discontinuos como ocurría con la DLP y la SLA.

En esta tecnología, las imágenes se van proyectando en secuencia sobre la superficie del tanque. En este caso, se emplea una capa transparente de oxígeno permeable entre la resina y la superficie de proyección que hace que se genere una fina capa de resina sin curar. Esta pequeña capa se conoce como “zona muerta” y es la que permite que se vaya realizando el curado selectivo de la resina de manera continua. [18]

Las ventajas principales del CDLP con respecto a otras tecnologías de fotopolimerización es la alta eficiencia y la velocidad con las que trabaja, así como la alta cohesión entre capas. Debido a sus características, la CDLP permite la elaboración de componentes finales y de prototipos sin la necesidad de tener apenas capas visibles, al tiempo que se asegura un acabado final impecable. Por ello, esta tecnología se ha hecho muy popular en campos como la medicina, la electrónica y la automoción. [13]

2.4.4 Powder Bed Fusion

Las tecnologías basadas en el proceso de fusión en lecho de polvo (PBF) utilizan una fuente de energía para sinterizar las partículas de polvo contenidas en una cubeta. Aunque este polvo puede ser de diferentes materiales, los métodos de sinterizado se

emplean fundamentalmente para fabricar piezas en metal y, en menor medida, en materiales poliméricos.

La mayoría de las tecnologías de PBF utilizan mecanismos para ir depositando y extendiendo nuevas capas de polvo sobre las que hacer incidir el haz. De este modo, una vez terminada la impresión hay que retirar la pieza de la cama de polvo en la que ha quedado inmersa. Las principales diferencias entre las distintas tecnologías de PBF son la fuente de energía que utilizan y el material de los polvos. [13]

Las piezas fabricadas mediante PBF, tanto en plástico como en metal, tienen unas notables propiedades mecánicas; son rígidas y duras. Esto permite que se les pueda aplicar una gran variedad de post-procesados, de modo que se obtenga un buen acabado superficial. Es por esto por lo que tienen una gran aplicación en la elaboración de productos finales.

Las limitaciones más citadas de esta metodología son la rugosidad de la superficie de las piezas impresas y la porosidad interna que presentan, especialmente cuando el material empleado es polimérico. Esto se debe a que el sinterizado o fusión se realiza sobre material en estado sólido (no ocurre así en la fusión de materiales en estado líquido de las técnicas de fotopolimerización), así como las dificultades derivadas de trabajar con polvo como material de impresión. [13]

Las principales tecnologías basadas en la fusión en lecho de polvo son el sinterizado selectivo por láser (SLS), la sinterización por láser de metal (DMLS), la fusión selectiva por láser (SLM), la fusión por haz de electrones (EBM) y la combinación de fusión con inyección (MJF).

Selective Laser Sintering (SLS)

El SLS es una tecnología de PBF que emplea un rayo láser para sinterizar un polímero o un composite de matriz metálica inicialmente en estado de polvo e ir construyendo la pieza capa a capa. El proceso de sinterizado consiste en compactar el polvo y calentarlo hasta una temperatura ligeramente inferior a la de fusión, de manera que las capas se vayan uniendo entre sí para formar una estructura cohesionada.

El proceso de impresión consta de diversos pasos: [19]

- I. Se coloca el polvo en el lecho sobre el que se va a imprimir la pieza y se calienta hasta una temperatura elevada.
- II. Con el rodillo (o un elemento análogo) se realiza un barrido para situar una fina capa de polvo sobre la plataforma de impresión, que servirá de soporte.
- III. Se activa el láser y comienza a realizar la trayectoria sobre la superficie de polvo, de manera que la pieza va solidificando en la geometría programada gracias al proceso de sinterizado.

- IV. Una vez terminada la capa, la plataforma de impresión se desplaza hacia abajo una altura de una capa y el rodillo extiende una nueva capa de polvo que queda lista para una nueva aplicación del láser.

Este proceso se repite tantas ocasiones como capas requiera la pieza. El resultado es una pieza inmersa en el contenedor de polvo. Tras esperar el tiempo necesario para que se enfríe lo suficiente, se procederá a retirar la pieza del contenedor. Para limpiar el polvo adherido a la misma, lo habitual es emplear un sistema de aire comprimido. Mientras que el polvo no sinterizado será recogido para reutilizarse, la pieza obtenida ya estará preparada para el post-procesado.

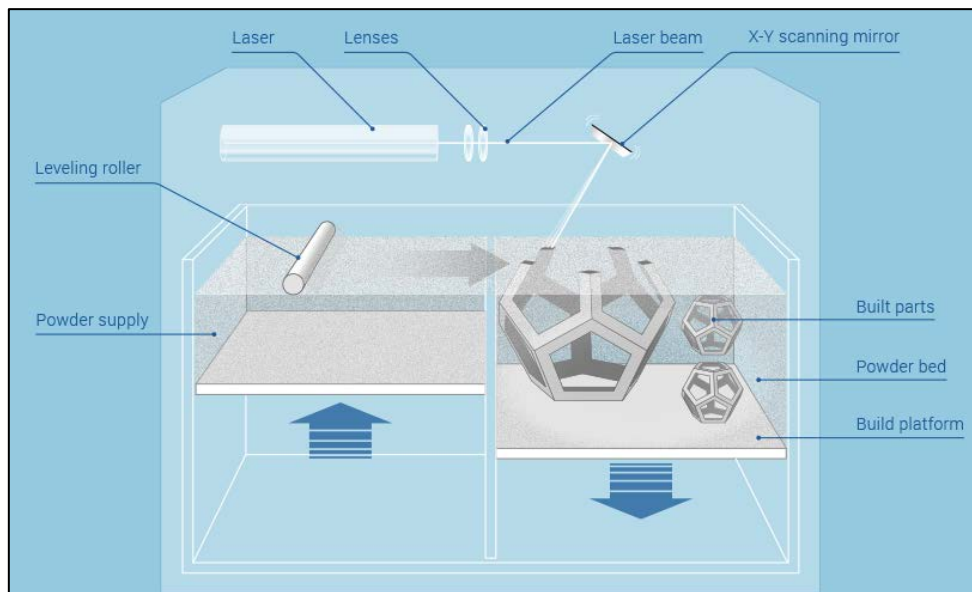


Ilustración 8: Tecnología SLS. Fuente: Additively. Ref: [11]

La ventaja más destacada de la tecnología de SLS es que las piezas fabricadas no requieren del uso de soportes, lo que ofrece una amplia libertad para el diseño y favorece la elaboración de geometrías complejas. Por el contrario, el factor negativo de la tecnología SLS está relacionado con la porosidad obtenida en las piezas por el hecho de trabajar con materiales poliméricos.

Selective Laser Melting (SLM) & Direct Metal Laser Sintering (DMLS)

Tanto el SLM como el DLMS producen piezas mediante la misma metodología que el SLS. La diferencia entre ellos radica en que en el caso del SLM y el DMLS el material con el que se trabaja es metálico y no polimérico.

Por un lado tenemos la tecnología del SLM, en la que se produce una fusión completa del polvo metálico, creando una pequeña piscina de material fundido en la que el metal es consolidado antes de enfriarse. Por otro lado, en el DMLS lo que se realiza es un sinterizado, al igual que en el SLS, aunque en este caso el tamaño de las partículas con las que se trabaja es de hasta 20 micras frente a las 100 micras de las partículas empleadas en SLS.

En cuanto al DMLS, el hecho de emplear metal como material de fabricación permite obtener piezas con una densidad de hasta el 95%, frente al 70% que podría llegar a conseguirse con la técnica de SLS. Además, el nivel de detalle obtenido mediante DMLS es considerablemente superior, lo que permite geometrías más complejas y piezas más compactas. La tecnología DMLS tiene una destacada aplicación para la elaboración de prototipos funcionales, pero también se ha desarrollado notablemente en implantes médicos y componentes aeroespaciales.

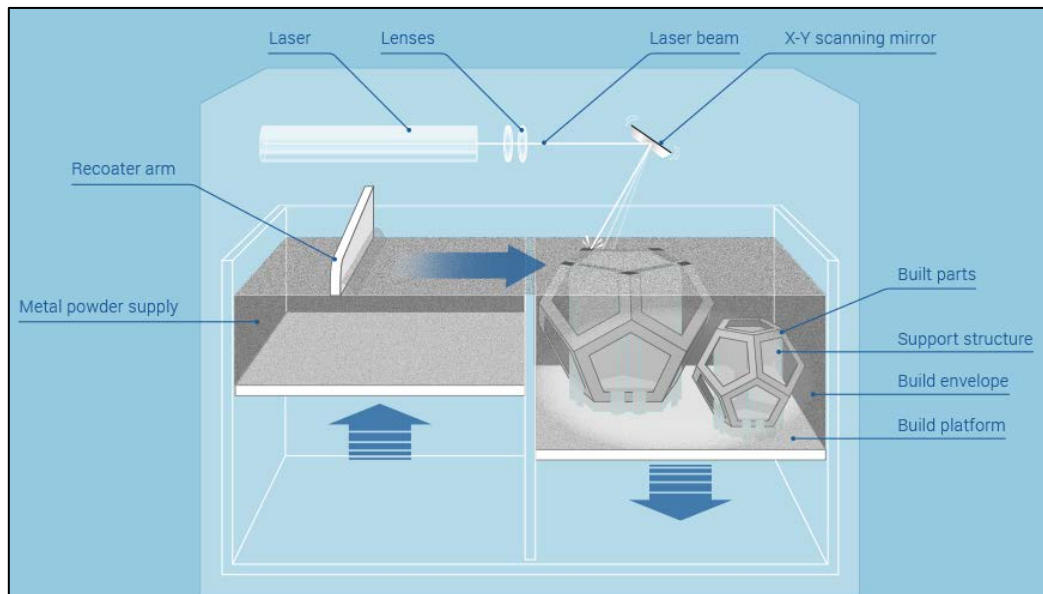


Ilustración 9: Tecnología SLM. Fuente: Additively. Ref: [11]

Por su parte, el SLM elabora piezas en una cámara con gas inerte en su interior. El proceso de fusión que emplea permite el uso de materiales como el acero, la aleación cobalto-cromo, el titanio y el aluminio. Esta técnica está especialmente orientada a piezas que deben soportar altas temperaturas y tensiones. [10]

La principal desventaja que presentan estas dos tecnologías frente al SLS es que requieren de estructuras de soporte para compensar las altas tensiones residuales generadas durante el proceso de fabricación. Esto permitirá prevenir la aparición de fenómenos indeseables como el *warping* o la distorsión de la pieza.

Electron Beam Melting (EBM)

La metodología empleada en el EBM sigue el mismo procedimiento que en el caso del SLS, aunque ahora la fuente de energía utilizada es un haz de electrones. Al igual que en el SLM, en el EBM se produce una fusión completa del material y no un sinterizado. Esta tecnología trabaja con materiales metálicos, especialmente con titanio y aleaciones como el cobalto-cromo.

Para la fabricación mediante EBM es necesario que los materiales se encuentren en una cámara de vacío. Esto hará que los resultados no se vean afectados por las condiciones

ambientales, especialmente por el fenómeno indeseado de la oxidación. Mediante la incidencia del haz sobre la superficie se va trazando la geometría, logrando una solidificación muy precisa del polvo. Este sistema de haz de electrones genera menos tensiones residuales, lo cual supone menos distorsión de las piezas y menor necesidad de soportes y anclajes, además de reducir las operaciones de post-procesado.

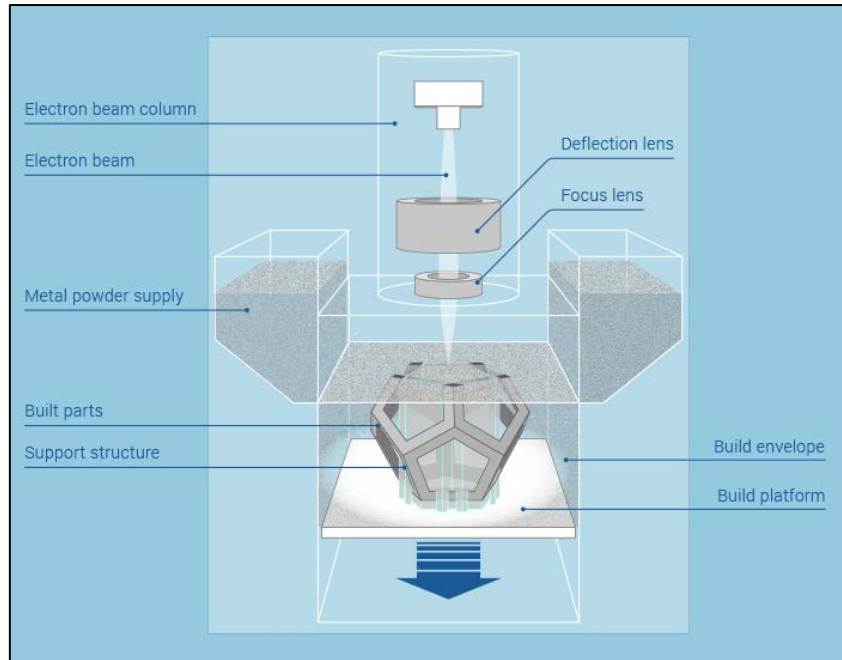


Ilustración 10: Tecnología EBM. Fuente Additively. Ref: [11]

La ventaja fundamental del EBM es la velocidad a la que imprime en comparación con otros métodos de fusión en lecho de polvo, pudiendo llegar a ser la impresión hasta cinco veces más rápida. Así mismo, en el EBM la energía requerida para desarrollar el proceso es considerablemente menor que en el resto de tecnologías de PBF. La razón reside en que la absorción de la luz incidente por las partículas asciende hasta el 95%, una cifra muy superior a la de los métodos de sinterizado láser. [10]

El EBM es, por tanto, ideal para aplicaciones donde la alta resistencia a esfuerzos y temperaturas sea requerida. En concreto, permite la obtención de piezas con alta resistencia a la flexión, por lo que tiene un amplio campo de desarrollo en medicina en la fabricación de prótesis. También está extendido su uso en automoción y aviación, puesto que permite obtener piezas muy resistentes y muy ligeras al mismo tiempo.

Multi Jet Fusion (MJF)

Esta tecnología es fundamentalmente una combinación de las tecnologías de SLS y MJ, puesto que se trata de una tecnología basada en lecho de polvo que no utiliza láser. Esta combinación permite potenciar las características de cada una de las dos tecnologías de fabricación, de manera que se consigue una fabricación mucho más rápida que en el resto de tecnologías de PBF. Es una tecnología desarrollada por la compañía Hewlett-

Packard (HP) en 2014. Utiliza una poliamida como material de fabricación, que se encontrará en estado de polvo contenido en una cuba. [20]

El proceso, cuyos pasos aparecen representados en la figura 11, consiste en desplazar un carro con extrusores de inyección por goteo sobre la superficie. Los extrusores van lanzando gotas del agente fusor (gotas negras) en la geometría determinada para ser fabricada y gotas del agente de detalle (gotas azules) en el contorno de la pieza. Sobre el mismo carro va incorporada una serie de lámparas que emiten luz infrarroja y que inciden sobre la superficie de la pieza justo después de la deposición de los agentes. Una vez obtenida la capa, se hace pasar un rodillo que deposita una nueva capa para iniciar nuevamente el proceso.

La pieza se conforma gracias a la fusión selectiva del polvo de la poliamida en las zonas en las que ha sido depositado el agente fusor, una vez que este recibe la radiación y se produce el sinterizado. Además, el agente de detalle que se deposita en los contornos, al ser un inhibidor del proceso de sinterizado, permitirá obtener una mejor resolución y acabado de la pieza, ya que se asegurará de que solamente solidifique la geometría estipulada.

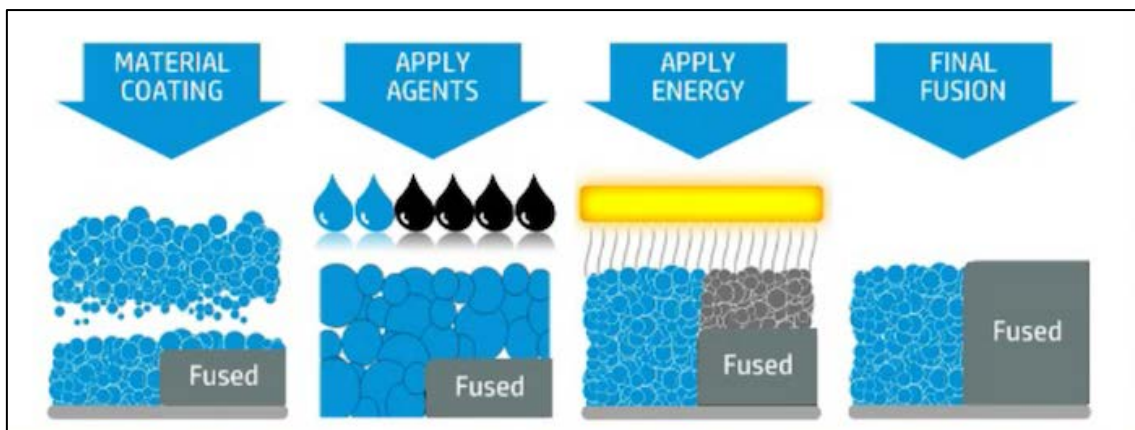


Ilustración 11: Proceso del MJF. Fuente: 3DVERSO. Ref: [21]

El desarrollo de esta tecnología ha supuesto una revolución en el sector de la impresión 3D por la gran velocidad y precisión que permite obtener. Se estima que la rapidez de impresión con esta tecnología es hasta diez veces superior a la de las mejores impresoras actuales. En cuanto a la precisión, el MJF permite lograr capas muy finas de entre 80 y 50 micras, lo que permite obtener piezas de alta densidad y baja porosidad. Asimismo, con esta tecnología se obtienen piezas con superficies notablemente lisas, así como piezas funcionales que requieren un acabado mínimo tras el proceso de impresión. Por tanto, las piezas obtenidas con MJF tienen mejores características y se imprimen en menos tiempo que las fabricadas mediante sinterizado laser. [20]

Las propiedades de la tecnología MJF la hacen ideal para fabricar prototipos funcionales y pequeñas series de piezas finales, debido a que suelen requerir tiempos de entrega reducidos. Por ello, esta tecnología se presenta como una alternativa rentable al molde

de inyección para series de componentes pequeños, y tiene gran aplicación para la producción de volúmenes reducidos de piezas complejas para uso final.

2.4.5 Material jetting

Este proceso se conoce como inyección de material, puesto que está basado en la deposición por lanzamiento controlado de material sobre una superficie. Al mismo tiempo que es depositado, este material recibe una radiación que hace que se cure o se endurezca. Por tanto, los materiales empleados serán aquellos que puedan experimentar este proceso de curado, entre los que encontraremos fotopolímeros y ceras o derivados de ellas.

Esta metodología se caracteriza por la posibilidad de fabricar con distintos materiales al mismo tiempo. Esto permite elaborar piezas complejas empleando estructuras de soporte en materiales diferentes que sean solubles en un componente inerte para el material de la pieza, lo que facilitará en gran medida el post-procesado de retirada de material.

El método de inyección de material es ideal para fabricar prototipos realistas, puesto que ofrece un excelente nivel de detalle, gran precisión y un liso acabado superficial. Este proceso permite fabricar en distintos colores y materiales al mismo tiempo, ajustándolos a las propiedades deseadas de rigidez, transparencia, acabado, etc. Su uso también está extendido en el ámbito industrial para la elaboración de moldes muy precisos, que serán empleados en otros procesos como la fabricación a la cera perdida.

Las tecnologías más desarrolladas que emplean este procedimiento como base de su método de fabricación son la inyección de material (MJ) y el Drop-On-Demand (DOD).

Material Jetting (MJ)

Esta tecnología es la más extendida dentro de los procesos de inyección de material. De hecho, el nombre que recibe la tecnología es el mismo que el del proceso; *Material Jetting* (MJ), aunque también puede ser reconocida por el término *Continuous Inkjet* (CIJ) debido al método de inyección que emplea. Sin embargo, es posible encontrar el término *Photopolymer Jetting* para el caso concreto del uso de materiales fotopoliméricos.

El proceso empleado en el MJ consiste en proyectar sobre una superficie un chorro de material fotosensible en estado líquido al mismo tiempo que se hace incidir sobre ella una fuente de luz, típicamente luz ultravioleta. De este modo, de manera similar a lo que ocurre en el proceso de fotopolimerización de la SLA, el material que es depositado solidifica y forma una nueva capa de la pieza.

Este proceso comienza con el calentamiento de la resina o material a emplear hasta una temperatura de entre 30 y 60 grados centígrados, para obtener la viscosidad necesaria.

En segundo lugar, el cabezal de la impresora se desplaza por la superficie depositando material según la geometría programada, al tiempo que se hace incidir el rayo de luz. Finalmente, una vez obtenida la capa, la plataforma de impresión se desplaza hacia abajo en una altura equivalente a una nueva capa y se repite el proceso.

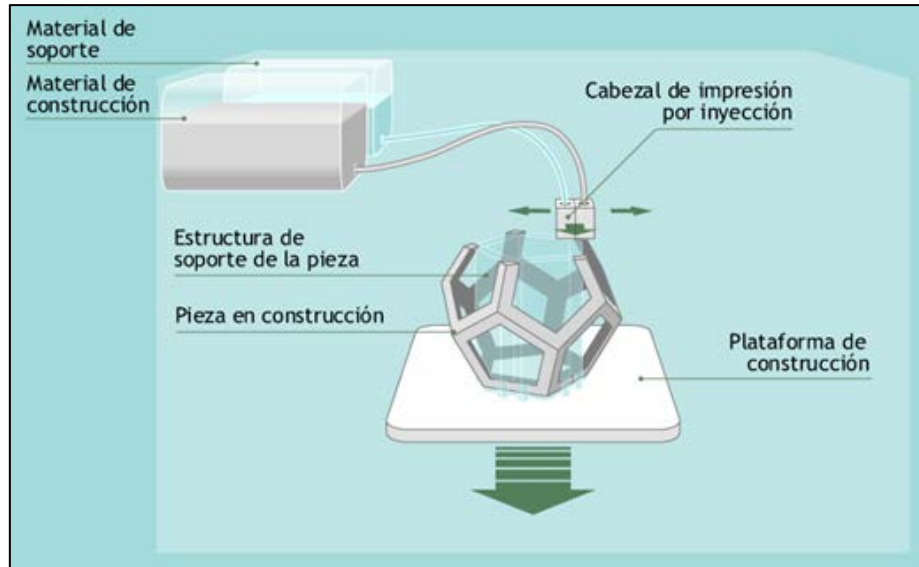


Ilustración 12: Tecnología MJ. Fuente: Adaptado de Additively. Ref: [11]

Una funcionalidad muy destacada del MJ es que permite cambiar el material de extrusión con la impresión en marcha. De este modo, se pueden obtener piezas con distintos materiales en cada una de sus alturas, ajustando dichos materiales a las propiedades que se requieran para cada parte de la pieza. Además, resulta muy sencillo elaborar piezas con distintos materiales por la naturaleza del proceso, ya que basta con añadir un nuevo cabezal de extrusión, por lo que la fabricación multi-material será una práctica muy recurrida.

Las impresoras de MJ pueden fabricar piezas con una altura de capa de apenas 10 micras. Esto, al contrario de lo que ocurría con la SLA, hace innecesario un curado final de la pieza en la mayoría de los casos. Además, esto permite obtener una precisión dimensional muy elevada que, junto con el acabado suave y liso de la superficie, suponen las principales ventajas de esta tecnología. Por otro lado, la desventaja más destacada del MJ es la fragilidad que caracteriza las piezas obtenidas, que suelen tener bajas propiedades mecánicas. [10]

La aplicación fundamental que tiene esta tecnología abarca importantes campos como el sector aeronáutico, el médico, el dental, el de productos de consumo, el de automoción, etc. Los usos más relevantes del MJ se concentran en el desarrollo de producto, los prototipos visuales y la elaboración de moldes.

Drop-On-Demand (DOD)

La tecnología DOD se caracteriza por el uso de dos cabezales para inyectar sendos chorros: uno para la deposición del material de fabricación (una resina o cera fotosensible) y otro para un material de soporte que será soluble en cierto componente y por el que el material de fabricación no se verá afectado.

Alternativamente a la deposición en línea del MJ, en este caso el material se deposita punto a punto a lo largo de la sección que se haya determinado. Difiere también del MJ en el uso de un elemento que barre la superficie depositada en cada capa antes de comenzar con la capa siguiente, de manera que se asegura la planitud de la nueva capa.

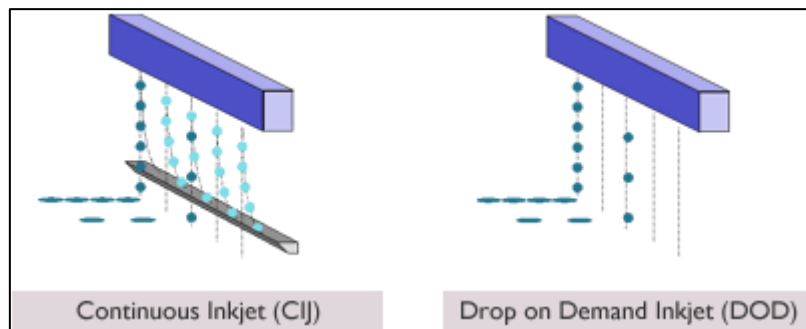


Ilustración 13: CIJ vs DOD. Fuente: IMI Europe. Ref: [22]

La deposición gota a gota del DOD permite obtener una elevada precisión en el posicionamiento, un gasto mínimo, un tamaño reducido de la gota y una amplia variedad de materiales para ser utilizados. Esta tecnología se emplea fundamentalmente para la fabricación de moldes que serán empleados en procesos de fabricación a la cera perdida y otras aplicaciones similares.

2.4.6 Binder Jetting

La inyección de aglutinante es una metodología de fabricación aditiva basada en impresión por chorro similar a la inyección de material, pero en la que el material se inyecta sobre un lecho de polvo. Se podría definir como una mezcla de las técnicas de MJ y de PBF.

En el BJ se pulveriza un líquido sobre un material de soporte en polvo, generalmente de tipo cerámico (yesos, arenas) y ciertos metales (aluminio, acero inoxidable), que se encuentra inmerso en un recipiente. El líquido que se inyecta es un material que solidifica en contacto con el ambiente y/o el material de soporte, de manera que ambos materiales – aglutinante y sustrato – se mezclan y solidifican para formar cada una de las capas de la pieza. Los aglutinantes que se emplean habitualmente son resinas plásticas, polímeros, ceras, epoxy, etc.

Esta tecnología permite modificar el líquido inyectado con la impresión en curso, de manera que se podrá imprimir una misma pieza en distintos colores. Para dotar de

coloración a la pieza, basta con colocar un cartucho auxiliar junto al cabezal de extrusión, que añade tinta sobre el aglutinante y el polvo.

Los procesos de BJ tienen importantes aplicaciones en la industria. Por un lado, aquellos con polvo cerámico se utilizan para obtener piezas con motivos estéticos como modelos arquitectónicos o embalajes, entre otros, así como para la elaboración de moldes de fundición. Por otro lado, las piezas obtenidas por inyección de aglutinante sobre polvo metálico suelen emplearse como componentes funcionales, ya que resultan más económicos que los obtenidos con técnicas de sinterizado láser, aunque sus propiedades mecánicas son inferiores.

La tecnología de impresión 3D que se basa en este proceso recibe el mismo nombre: inyección de aglutinante (BJ).

Binder Jetting (BJ)

Esta tecnología aparece en ocasiones referida como *Powder Bed and Inkjet Head (PBIH)*, aunque se suele emplear el nombre de *Binder Jetting* de manera genérica para el proceso y la tecnología.

El procedimiento de fabricación empleado consta de una serie de pasos:

- I. En primer lugar, un rodillo extiende una capa del material en polvo sobre la plataforma de impresión.
- II. A continuación, el carro con el cabezal de extrusión se desplaza según la trayectoria programada y va depositando las gotas del agente aglutinante selectivamente, de manera que se este se adhiere a las partículas de polvo. En el caso de emplear tinta para la coloración, es en este momento cuando se deposita.
- III. Cuando la capa ha sido completada, la plataforma se desplaza hacia abajo una altura equivalente a una capa y el rodillo extiende una nueva capa de material sobre la plataforma. El proceso se repite hasta que la pieza se ha completado.
- IV. Tras la impresión, la pieza queda encapsulada en el polvo y se deja para que se cure y adquiera la fuerza necesaria. Finalmente, la pieza es retirada y el polvo adherido se elimina mediante aire a presión.

En función del material, algunas piezas pueden ser sometidas a procesos de post-procesado que les permitan mejorar sus propiedades mecánicas o su acabado. En el caso de las piezas metálicas, es habitual que se sometan a un sinterizado o a una infiltración de un material con baja temperatura de fusión (típicamente bronce). A las piezas impresas a color se les suele aplicar una capa de pintura acrílica para ensalzar su apariencia.

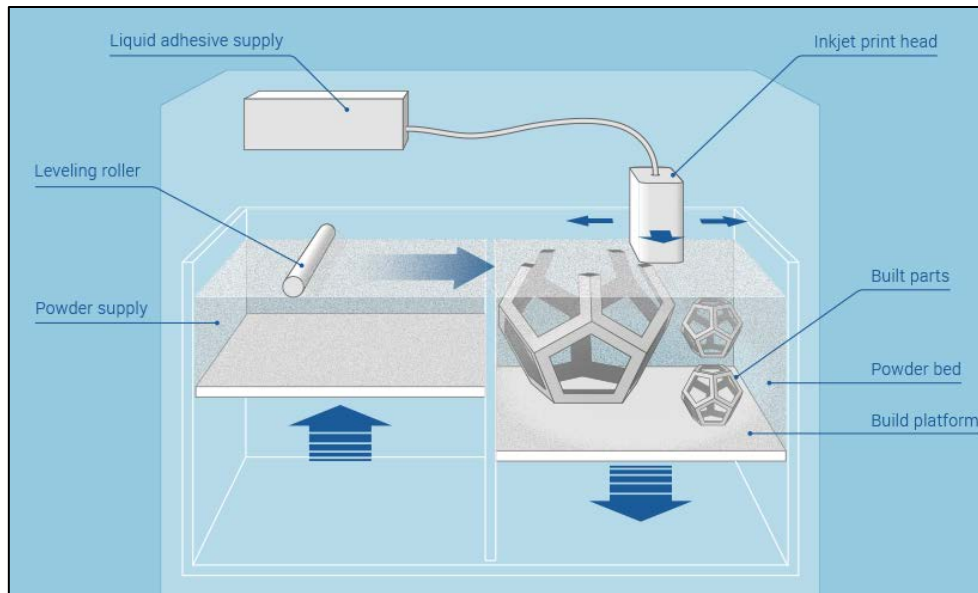


Ilustración 14: Tecnología BJ. Fuente: Additively. Ref: [11]

El BJ permite fabricar grandes piezas, así como geometrías complejas, puesto que no está afectada por fenómenos térmicos como el *warping*. Esto, junto con el reducido coste que supone comparado con tecnologías como el MJ y las de PBF, lo hacen ideal para la fabricación de lotes de tamaño medio-bajo. Sin embargo, las limitaciones que presenta esta tecnología derivan de las bajas propiedades mecánicas que se obtienen debido a la alta porosidad.

2.4.7 Sheet Lamination

La laminación de hojas es una metodología de fabricación aditiva en la que el material de fabricación está formado por láminas sobre las que se realizan transformaciones para obtener la pieza final.

El proceso consiste en ir colocando láminas sobre la plataforma de impresión que son recortadas según la forma de la pieza mediante cuchillas o con la acción de un láser. Los materiales de impresión que se emplean habitualmente son: papel, plástico y metal. Las láminas son suministradas por un rollo, que se va accionando para depositar cada nueva capa. Sin embargo, existe una tecnología en la que se imprimen láminas en tamaños estandarizados (A3, A4) que posteriormente son plegadas y adheridas para formar la pieza laminada.

Las ventajas más mencionadas de esta metodología son que no necesita de altas temperaturas ni de cámaras de vacío para su operación y que la tecnología es asequible desde la perspectiva económica. Por el contrario, el principal inconveniente recae sobre la necesidad de aplicar post-procesados para retirar la pieza y para conseguir funcionalidades mecánicas y estéticas.

Las dos tecnologías que emplean el procedimiento de laminación de hojas son la fabricación mediante laminado de objetos (LOM) y la consolidación por ultrasonidos (UC).

Laminated Object Manufacturing (LOM)

La tecnología LOM es la tecnología de SL más extendida en el mercado de la fabricación aditiva. Esta tecnología se emplea principalmente para obtener piezas a color con una alta calidad dimensional, impresas en papel o plástico fundamentalmente, aunque también en composites.

El proceso de fabricación de LOM se puede estructurar en diversas etapas:

- I. Se desplaza el material de impresión sobre la plataforma de impresión mediante el accionamiento de un rollo alimentador. La hoja recibe material adhesivo sobre su superficie al abandonar el rollo.
- II. Se eleva mínimamente la plataforma y se desplaza un rodillo caliente sobre la hoja para adherirla y compactarla con la hoja anterior.
- III. El láser o la cuchilla corta la lámina por el perímetro establecido.
- IV. El láser o la cuchilla traza la geometría establecida sobre la superficie de la lámina.
- V. La plataforma se desplaza hacia abajo una altura equivalente al grosor de la lámina y el rodillo se acciona para desplazar una nueva lámina sobre la superficie, eliminando el restante de la lámina anterior.
- VI. El proceso se repite hasta obtener la pieza final.

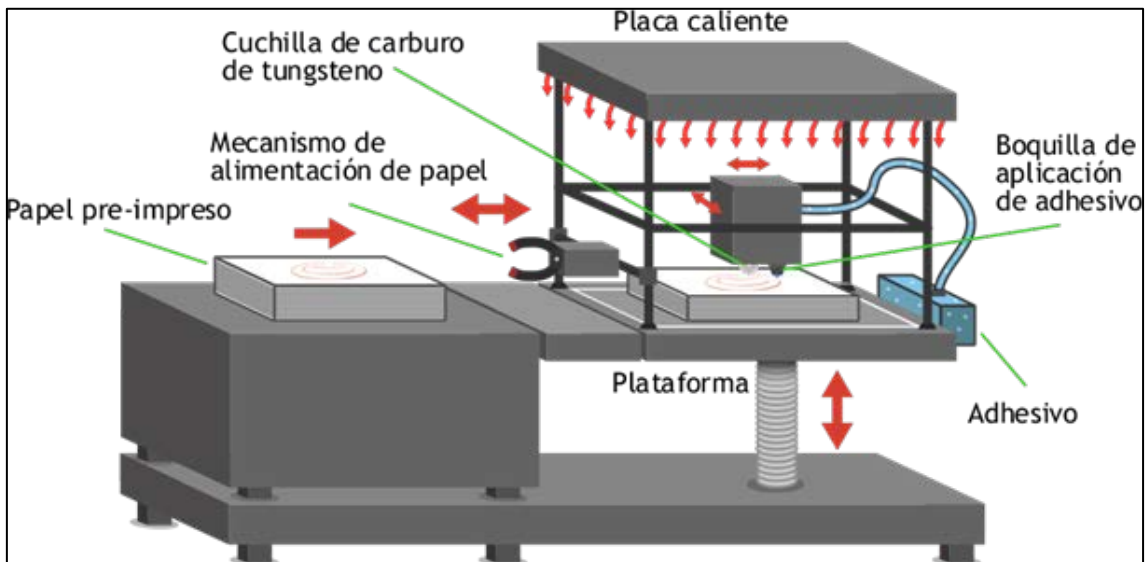


Ilustración 15: Tecnología LOM. Fuente: 3DP Lighting. Ref: [23]

Esta tecnología no requiere del uso de soportes, puesto que el material que no sea empleado para conformar la pieza deberá ser retirado una vez que el proceso de fabricación se haya completado. Así, una vez se extrae el conjunto de láminas

compactadas, deberán aplicarse tratamientos mecánicos para retirar el sobrante. También, especialmente en los casos en los que se empleen metales como material de impresión, se podrá someter a la pieza a algún proceso de mecanizado. [7]

Puesto que la tecnología LOM no conlleva ninguna reacción química ni el proceso se desarrolla en cámaras de vacío o sometido a altas temperaturas, es mucho más sencillo producir objetos de gran tamaño. También ofrece gran facilidad para emplear distintos materiales en la elaboración de una misma pieza y una rapidez de impresión notablemente elevada. En cuanto a los inconvenientes de la LOM, la precisión que se obtiene con esta tecnología es bastante inferior a la que ofrecen los métodos de fotopolimerización o los basados en lecho de polvo, por lo que no resulta conveniente para la fabricación de geometrías complejas o de prototipos funcionales.

Una de las aplicaciones para las que la LOM ha tenido mayor evolución son la creación de modelos a escala y prototipos, para testear tanto el diseño como la forma. Otras son la producción de piezas con menor nivel de detalle o la fabricación de moldes para procesos de fabricación tradicional.

Ultrasonic Consolidation (UC)

La tecnología de UC es una técnica de fabricación aditiva basada en la soldadura ultrasónica de láminas metálicas. En ella se combina el procedimiento de deposición sucesiva de láminas de material con la tecnología tradicional de mecanizado mediante una fresadora CNC.

El proceso de fabricación mediante UC es el siguiente:

- I. Se deposita una lámina de metal sobre la superficie de impresión.
- II. Se hace pasar un rodillo llamado “*sonotrode*” que emplea vibraciones de alta frecuencia (típicamente 20.000 Hz) que permite soldar la lámina en estado sólido con los sustratos anteriores.
- III. Una vez soldada la lámina, la fresadora CNC elimina el material establecido según la geometría del fichero CAD, dando así forma a la pieza.
- IV. Se deposita una nueva lámina metálica y se repite el proceso.

La tecnología de UC permite emplear combinaciones de materiales metálicos para la elaboración de una pieza. Estos materiales podrán tener o no características similares, de manera que esta tecnología permite soldar en sólido metales con distintos puntos de fusión como el aluminio y el cobre. Además, permite actuar sobre ciertas combinaciones de metales y materiales cerámicos.

Una de las principales ventajas de esta tecnología es que permite geometrías internas inaccesibles, creando una estructura metálica que las embeba. Esto permite una aplicación importante para la elaboración de piezas con cables o componentes

electrónicos en su interior, ya que la tecnología opera a temperatura ambiente y por ello la electrónica no se vería afectada.

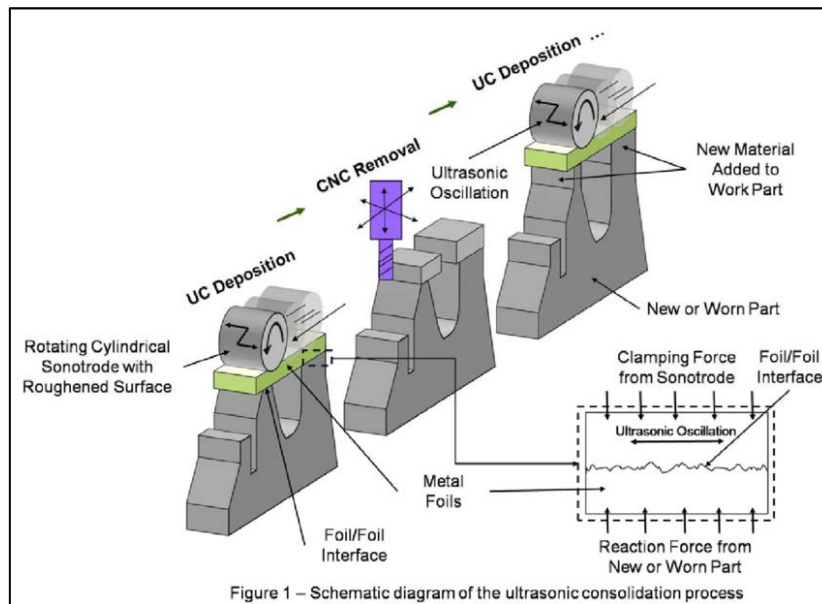


Ilustración 16: Tecnología UC. Fuente: ResearchGate. Ref: [24]

2.5 Materiales en impresión 3D

La fabricación aditiva abarca una gran variedad de tecnologías de fabricación, cada una orientada a trabajar con uno o varios tipos de material. Por ello, existe una gran diversidad de materiales que pueden ser empleados para elaborar productos capa a capa. Estos materiales se elegirán en función de las características que se desee obtener en el producto resultante.

Si bien es cierto que plásticos y metales se erigen como los materiales más extendidos entre las tecnologías de impresión 3D, cada vez son más las aplicaciones para las que resultan interesantes materiales de tipo cerámico, composites, biomateriales, hormigón y otros que están en constante desarrollo.

2.5.1 Polímeros y composites

Los polímeros son los materiales de fabricación aditiva por excelencia. Esta categoría se debe fundamentalmente a que son los materiales que se emplean en la tecnología de FDM, la más conocida y utilizada por su accesibilidad económica. Además, la diversidad que ofrecen y la facilidad de adaptación a los distintos procesos de fabricación aditiva los colocan en una posición muy favorable con respecto al resto de materiales.

Los polímeros en impresión 3D aparecen principalmente en la forma de filamentos, monómeros reactivos, resinas o polvo. Algunos de los beneficios que ofrece el uso de

polímeros en impresión 3D son que permiten obtener geometrías complejas con alto nivel de detalle y que los costes de fabricación son considerablemente inferiores a los de los métodos tradicionales de fabricación, como el moldeo o la extrusión. Por otro lado, el principal inconveniente es que generalmente ofrecen unas propiedades mecánicas inferiores a las de otros materiales, por lo que su uso más extendido se restringe al prototipado.

Existe un amplio conocimiento de algunos tipos de polímeros como los termoplásticos o las resinas fotosensibles, que son materiales empleados en metodologías de extrusión y de fotopolimerización. Sin embargo, la tendencia actual en ingeniería de materiales se centra en la investigación de composites con propiedades cada vez más favorables para su uso en fabricación aditiva.

Termoplásticos

Los materiales termoplásticos son aquellos que una vez conformados por temperatura pueden ser calentados de nuevo a la temperatura de fusión y recuperar el estado fluido tantas veces como se desee. Estos materiales son empleados fundamentalmente en la tecnología de fabricación aditiva conocida como FDM o FFF, aunque también aparecen en SLS y en otras tecnologías con menor frecuencia.

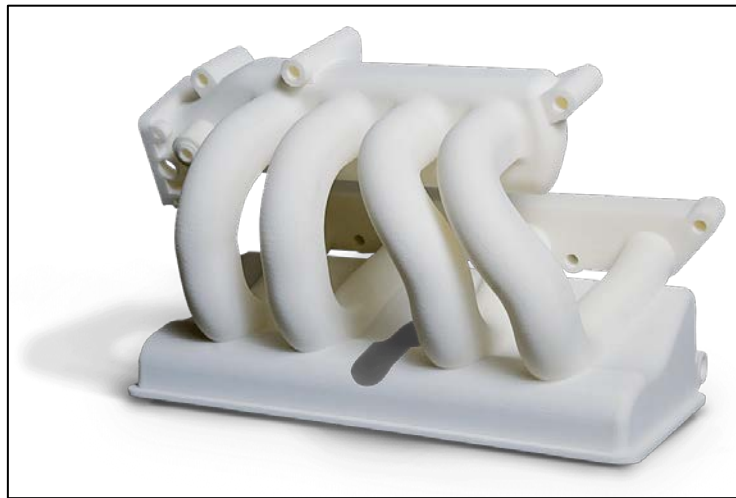


Ilustración 17: Pieza de DuraForm PA (Nylon). Fuente: 3dHubs. Ref: [25]

Los materiales termoplásticos más extendidos para impresión 3D son el PLA y el ABS, pero existe una gran variedad de termoplásticos que puede ser adoptado por este tipo de tecnologías. Entre ellos encontramos las poliamidas, el HIPS, el PC, el PVA, el PET y los materiales TPU como los más destacados. Cada tipo de termoplástico tendrá unas propiedades mecánicas, químicas y estéticas que lo harán más adecuado para ciertas finalidades. Además, las características de la impresión (temperatura de extrusión, refrigeración, adherencia a la base, velocidad, etc.) deberán ser adaptadas a cada termoplástico para optimizar el proceso de fabricación.

Resinas

Las resinas más conocidas y utilizadas en el ámbito de la fabricación aditiva son las resinas fotosensibles. Estos materiales inician la polimerización cuando reciben cierta radiación en las tecnologías de fotopolimerización, como la SLA o el DLP. De acuerdo con la encuesta anual realizada por Wohlers Associates, cerca del 50% del mercado de impresión 3D en los sectores industriales se atribuye a prototipos generados mediante fotopolímeros. [7] Sin embargo, las propiedades mecánicas y térmicas de los fotopolímeros tienen amplio rango de mejora. Por ejemplo, la estructura molecular y el alineamiento de estos polímeros impresos en 3D dependen del gradiente de la radiación UV y de la intensidad de esta.

La precisión y la finura de las capas son la principal oferta de los sistemas basados en fotopolimerización. Además, investigaciones en las que se emplean nuevas resinas han logrado mejorar la resistencia mecánica y el comportamiento térmico de estos materiales.

Composites

Los composites son, desde una perspectiva general, una mezcla de materiales que forman un nuevo material con propiedades mejoradas. La ingeniería de materiales trabaja constantemente en el desarrollo de nuevos composites para dar respuesta a las distintas necesidades que van apareciendo en la industria. En cuanto a la fabricación aditiva, esta investigación se ha visto impulsada por la necesidad de desarrollar materiales que, por un lado, fueran compatibles con las distintas tecnologías y que, por otro, tuvieran las propiedades deseadas.

El desarrollo de los composites de matriz polimérica surge para dar respuesta a las limitaciones que presentan los polímeros en fabricación aditiva: las bajas propiedades mecánicas y la funcionalidad estructural. Con ánimo de solventar esta situación se comenzaron a desarrollar composites imprimibles en los que la matriz está reforzada con partículas, fibras o nanomateriales, muchos de los cuales han dado resultados satisfactorios. También está experimentando un crecimiento notable el uso de biocomposites en fabricación aditiva. En este caso, los refuerzos son fibras naturales que derivan de plantas o de celulosa y dan lugar a composites ecológicos biodegradables cuyas principales aplicaciones se encuentran en el campo de la biomedicina, la ingeniería de tejidos o la industria dental. [26]

Los composites reforzados con partículas son muy apreciados por su bajo coste y la facilidad de combinarlos con las matrices poliméricas tanto en estado de polvo como en estado líquido. Algunos materiales que se emplean como partículas son el hierro, el cobre, el nylon, la alúmina, y algunos elastómeros. Estos composites reforzados con partículas permiten imprimir componentes estructurales finales y, además, solventan

algunos problemas de impresión como la distorsión de la pieza por la expansión térmica del polímero, en el caso de la FDM.

Los polímeros reforzados con fibras aparecen principalmente en la tecnología FDM. Los materiales de las fibras habituales son el vidrio, el carbono, el ABS, el nylon y resinas como la epoxy. El uso de fibras para reforzar la matriz polimérica permite reducir en gran medida la porosidad de la pieza resultante, mejorando considerablemente sus propiedades mecánicas. Hasta el momento, la proporción máxima de fibras que ha probado ser válida para permitir una extrusión adecuada del filamento es del 40%.

Los nanocomposites o composites reforzados con nanomateriales acaparan el interés investigador en este ámbito en la actualidad. La adición de estos materiales está permitiendo la obtención de composites de alto rendimiento funcional. Algunos nanomateriales que han sido probados en composites poliméricos son el grafeno, el carbono, el grafito, el poliestireno y el ABS. Una consideración importante a la hora de elaborar estos materiales es que las nanopartículas deben estar distribuidas de manera homogénea en la matriz para obtener los resultados deseados en la pieza impresa.

2.5.2 Metales y aleaciones

La fabricación aditiva con metales se está asentando en la industria y las perspectivas de crecimiento que la rodean son esperanzadoras. Si bien es cierto que esta metodología es considerablemente cara y se centra en la fabricación de pequeños objetos, permite obtener piezas con geometrías inaccesibles para los métodos tradicionales de fabricación, lo que la hace muy atractiva para el sector industrial.

La impresión 3D en metal se ha empleado de manera predominante para investigación, prototipado y aplicaciones avanzadas en la industria aeronáutica. De hecho, según el informe de Wohlers Associates 2017, el sector aeronáutico representa en la actualidad el 18,2% del total del mercado de fabricación aditiva. [7] También se ha extendido su uso en el sector biomédico, en defensa y en la industria de automoción.

Las tecnologías que emplean metal como material de fabricación son principalmente las basadas en lecho de polvo y las de deposición directa de energía. Estas tecnologías permiten obtener piezas con una gran precisión y que, por estar fabricadas en metal, tendrán unas propiedades mecánicas excelentes. La metodología de impresión en metal permite, además, desarrollar componentes multifuncionales para proporcionar soluciones a problemas estructurales y de aislamiento al mismo tiempo.

De entre los metales que se usan habitualmente en fabricación aditiva, el titanio y sus aleaciones, las aleaciones de acero, algunas aleaciones de aluminio, aleaciones de níquel y ciertas aleaciones de base cobalto y magnesio han sido optimizados para ser utilizados por este nuevo método de fabricación. En particular, el titanio y sus aleaciones, en

concreto la Ti6Al4V, son materiales de alto rendimiento que se emplean habitualmente para aplicaciones comerciales en sectores como el aeronáutico y el biomédico. [10]

Los aceros, como el acero inoxidable austenítico, el acero martensítico envejecido, el acero inoxidable endurecido y el acero para herramientas están ampliamente extendidos en fabricación aditiva. Estos materiales pueden ser empleados tanto para aplicaciones genéricas como para aquellas que exijan una alta resistencia mecánica y un buen comportamiento en entornos hostiles, como pueden ser herramientas y moldes.

Solamente algunas aleaciones de aluminio se pueden encontrar en fabricación aditiva en la actualidad. Esto se debe a que las aleaciones de titanio presentan una mayor sencillez de uso y un menor coste, y a que la gran reflectividad del aluminio dificulta la impresión con láser. Sin embargo, el aluminio presenta una gran conductividad térmica, lo cual reduce la tensión interna y permite una fabricación más rápida.

En general, las piezas metálicas densas elaboradas mediante fabricación aditiva presentan características comparables, si no superiores, a las de las piezas elaboradas mediante procesos tradicionales. Para obtener un buen resultado es necesario hacer un control adecuado de la porosidad y la microestructura. La porosidad es el principal defecto en la propagación de grietas, lo cual puede controlarse variando el volumen de energía aplicado y la calidad del material empleado. Bajas cantidades de energía provocan la formación de huecos irregulares en la pieza, mientras que una aplicación excesiva de energía deriva en la generación de poros esféricos.

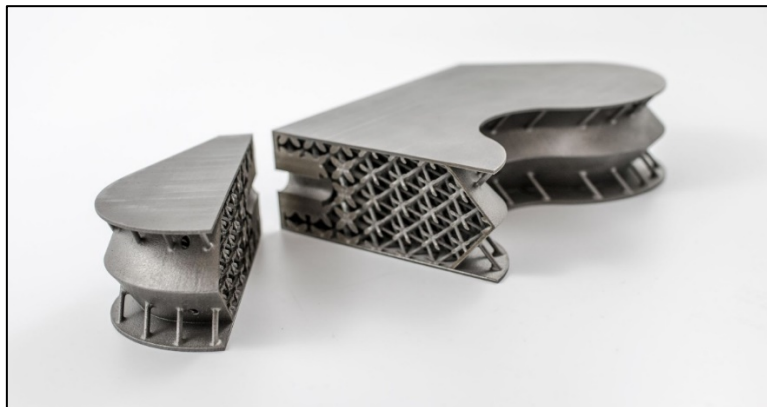


Ilustración 18: Pieza de titanio para uso en aeronáutica. Fuente: Materialise. Ref: [27]

Los metales obtenidos mediante fabricación aditiva presentan microestructuras más finas que las de las piezas convencionales y, por ello, tienen mayor límite elástico y resistencia a esfuerzos. Sin embargo, su microestructura es anisotrópica y está determinada por la dirección de fabricación. Esta propiedad es habitual que se transfiera a la pieza final, de manera que presente mayor resistencia a tensión en la dirección de impresión. También pueden provocar una disminución de la resistencia a fatiga los posibles defectos internos de la pieza y una adhesión entre capas insuficiente.

Recientes investigaciones en materiales metálicos para fabricación aditiva están ampliando el rango de materiales disponibles. En particular, los estudios más avanzados se centran en la implementación de aleaciones de alta entropía, aleaciones magnéticas, aleaciones de alta resistencia, metales con funcionalidad graduable según el volumen y composites metálicos.

2.5.3 Cerámicas

Los materiales cerámicos solamente son aptos para su uso en algunas de las tecnologías de fabricación aditiva, como es el caso del SLS, la SLA, el MJ y también el FDM para ciertos tipos de cerámicas. Esta metodología ha permitido el desarrollo de materiales ultraligeros que son adaptados para diferentes aplicaciones, siendo el desarrollo de prótesis la más extendida.

La fabricación aditiva se ha convertido en un método esencial para la elaboración de materiales cerámicos avanzados de aplicación en el desarrollo de componentes con biomateriales o en la industria de tejidos para la elaboración de matrices para huesos y dientes. Aunque ofrece la ventaja de poder fabricar con una gran precisión, la apariencia superficial de las capas y el limitado rango de materiales disponibles son los principales inconvenientes de la fabricación aditiva de cerámicas.

Una de las ventajas más destacadas derivadas del uso de cerámicas en fabricación aditiva es la posibilidad de controlar la porosidad del material empleado gracias al desarrollo de materiales adaptados, como es el caso de los composites. En consecuencia, se pueden mejorar las propiedades mecánicas de las piezas; la resistencia a flexión, la fragilidad y la estabilidad dimensional. En general, la fabricación de materiales cerámicos mediante impresión 3D ha permitido ahorrar costes y tiempo con respecto a su fabricación por métodos tradicionales. [7]

2.5.4 Hormigón

El hormigón es el material fabricado por el hombre más usado; aparece en la construcción y en proyectos de infraestructuras en todo el mundo. La entrada de la impresión 3D en la industria de la construcción ha sido lenta, pero ventajas como la personalización masiva, la ausencia de encofrados y la automatización auguran un gran futuro a esta nueva metodología de fabricación en el sector.

La extrusión es el principal método empleado para la fabricación aditiva de hormigón, aunque también se ha explorado su uso en los métodos basados en lecho de polvo. El tipo de hormigón que puede ser empleado en impresión 3D es muy variable y la selección deberá adaptarse tanto al proceso de extrusión empleado como a las características deseadas en la pieza final. En cualquier caso, algunos de los desafíos que tiene que solucionar la fabricación aditiva de hormigón son la apariencia superficial de

capas, las propiedades anisotrópicas del material y la adhesión entre capas. A pesar de estas dificultades, la libertad de diseño y la oportunidad de fabricar estructuras complejas y ligeras son factores prometedores para la expansión de esta tecnología. [7]

2.5.5 Nuevos materiales

Resulta relevante destacar el importante papel que ya están teniendo y que se espera que tengan en un futuro los nuevos materiales que se están introduciendo en el campo de la impresión 3D. Estos nuevos materiales suelen ser denominados materiales avanzados, y se desarrollan para fines y aplicaciones específicos. Para su desarrollo se debe realizar una investigación interdisciplinar que permita ajustar las propiedades de los materiales a los requisitos para que puedan ser empleados en fabricación aditiva. Algunos de los materiales que podemos destacar por los avances realizados y sus perspectivas de evolución son los materiales electrónicos, los biomateriales y el vidrio.

En cuanto a la impresión de materiales electrónicos, se han desarrollado numerosas investigaciones en los últimos años en las que se ha logrado fabricar mediante impresión 3D dispositivos electrónicos funcionales tales como antenas, condensadores, resistencias e inductores sin ningún tipo de post-procesado. Existen investigaciones que han desarrollado un método para imprimir resistencias sobre un sustrato plástico, alcanzando gran valor de resistencia y una alta repetibilidad gracias al uso de un polímero conductor. Existe también un importante desarrollo de este tipo de materiales para la elaboración de robots. En esta técnica se elimina la gran cantidad de pasos que requieren en su fabricación mediante métodos tradicionales, en los que era necesario elaborar las estructuras y los componentes electrónicos por separado. Con el desarrollo de la impresión 3D, podrán fabricarse robots con componentes electrónicos incorporados gracias a técnicas de fabricación de multi-material embebido (EMB3D) empleando además materiales adaptables a las funcionalidades deseadas. [28]

Recientes investigaciones en materiales biocompatibles han permitido la impresión 3D de tejidos vivos funcionales, que pueden ser empleados en el campo de la medicina regenerativa y evaluar su alcance en el trasplante de órganos. Desde una perspectiva general, los biomateriales disponibles en la actualidad son limitados; en su mayoría polímeros naturales y polímeros sintéticos biocompatibles como copolímeros de doble bloque, alginato de sodio, quitosano y polímeros de base acrílica. Recientemente se han llegado a imprimir tejidos a escala humana con buena estabilidad mecánica mediante una impresora integrada de tejido-órgano (ITOP). Así mismo, se han imprimido recreaciones de estructuras microfisiológicas que funcionan como tejidos naturales “*in vitro*” y que pueden permitir reemplazar los estudios tradicionales sobre animales en la investigación biomédica. [28]

La impresión en vidrio ha supuesto también una revolución en el sector de la fabricación aditiva. A finales del 2015, un grupo de investigadores del MIT Media Lab desarrollaron

una técnica de impresión 3D capaz de imprimir vidrio fundido en lo que fue la primera vez que se imprime vidrio transparente mediante un proceso de impresión 3D. [29] Para ello, ensamblaron una máquina de fabricación aditiva capaz de extruir vidrio fundido y elaboraron un proceso similar al de la técnica de FDM. Con este descubrimiento se espera que la impresión de vidrio pueda ser empleada para el desarrollo de componentes arquitectónicos, incluso fachadas completas, haciendo una optimización de la aerodinámica y la absorción de energía solar, así como la exploración de nuevas posibilidades geométricas.

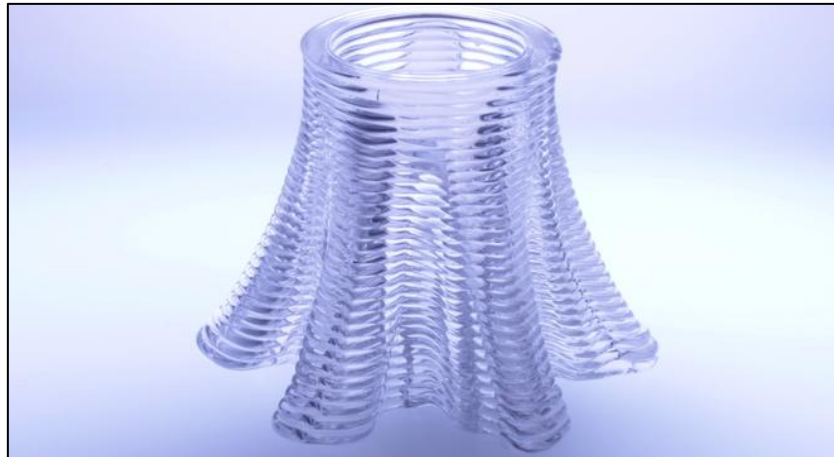


Ilustración 19: Pieza de vidrio impresa en 3D. Fuente: Digg. Ref: [30]

Capítulo 3

Tecnología FDM

3 TECNOLOGÍA FDM

3.1 FDM o FFF

La tecnología que vamos a emplear en las impresoras que pondremos en funcionamiento en el laboratorio es la de modelado por deposición fundida (FDM). Se trata de la tecnología que más acogida ha tenido en el mercado gracias al menor coste de sus dispositivos y a su facilidad de uso. Si bien es cierto que se han desarrollado impresoras que admiten la extrusión de materiales como ceras, cerámicas, composites y hormigón, en este capítulo nos centraremos en la fabricación en materiales termoplásticos.

La tecnología FDM fue inventada y patentada en 1989 por Scott Crump, quien fundó la compañía Stratasys Inc. junto con su mujer. [10] Una vez que expiró la patente de Crump, la difusión de la tecnología FDM se vio impulsada por el desarrollo de impresoras FDM de bajo coste. Esto hizo que poco a poco fuera apareciendo una comunidad de aficionados a la impresión 3D que adquirirían impresoras para elaborar en sus casas sus propios diseños, los cuales compartían en la red. Esta comunidad, conocida con el nombre DIY (*Do It Yourself*), ha dado un gran impulso a la difusión de la tecnología de FDM y de la fabricación aditiva en general. Además, en el año 2005 apareció el proyecto *RepRap*, cuyo objetivo era el de desarrollar una máquina de FDM similar a la de Stratasys pero con énfasis en la libre disponibilidad de toda la información, el abaratamiento de costes y la autorreplicabilidad de la máquina. [10]

La tecnología FDM es un proceso de fabricación aditiva que pertenece a la familia de los métodos de extrusión de material. En FDM, el objeto se construye mediante la deposición selectiva de capas de material fundido. Los materiales empleados son termoplásticos en forma de filamento. El proceso de elaboración de una pieza mediante FDM consta de tres pasos:

- I. En primer lugar, se carga una bobina de filamento termoplástico, que puede ir colocada sobre la impresora sin ningún tipo de fijación. Una vez que el extrusor ha alcanzado la temperatura adecuada, el filamento se desplaza hasta el cabezal del extrusor, donde funde hasta alcanzar la fluidez deseada.
- II. A continuación, el material fundido es extruido en finos hilos y se deposita capa a capa según la trayectoria diseñada, donde se enfría y solidifica. En ocasiones, el enfriamiento del material se puede acelerar con el uso de un ventilador incorporado en el cabezal del extrusor.
- III. Para rellenar el área delimitada, se requiere de diversas pasadas del extrusor según el patrón introducido. Una vez que la capa se ha completado, la plataforma de extrusión se desplaza hacia abajo (o el extrusor se desplaza hacia arriba) y se comienza la extrusión de una nueva capa. El proceso se repite hasta haber completado la pieza.

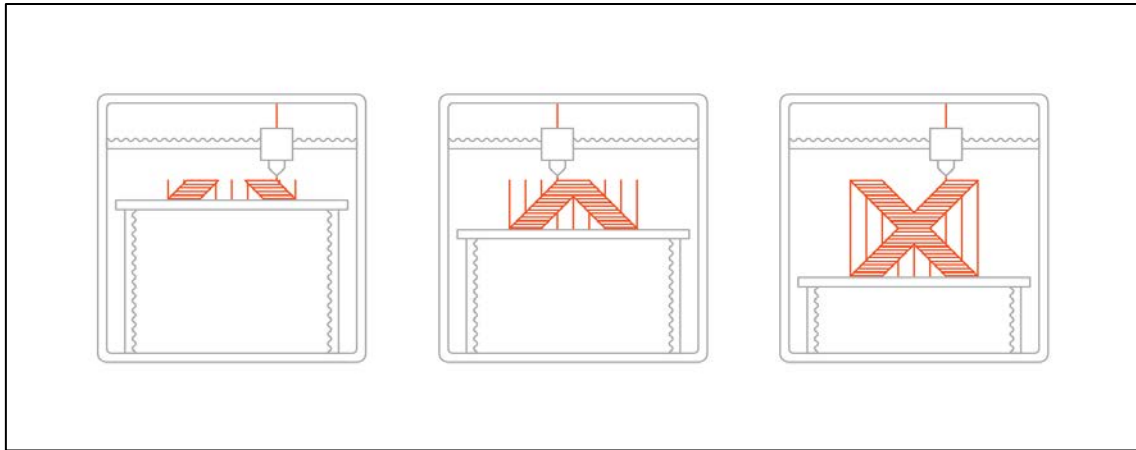


Ilustración 20: El proceso de impresión en FDM. Fuente: 3D Hubs. Ref: [31]

3.1.1 Características de las impresoras de FDM

Para llevar a cabo el accionamiento del filamento que alimenta el extrusor y el movimiento del cabezal de extrusión y de la plataforma de impresión, las impresoras de FDM cuentan con un sistema de motores y engranajes que transfieren el movimiento. Los motores suelen ser de tipo paso a paso tanto unipolares como bipolares. Por otro lado, las impresoras pueden contar con uno o varios cabezales de extrusión. Estos cabezales tienen un tamaño de orificio estandarizado que puede variar desde los 0,3 hasta los 0,6 milímetros según la máquina o el fabricante, mientras que los tamaños estándar para el diámetro del filamento son 1,75 y 3 milímetros. También dependerá del tipo de impresora la incorporación de una cama calefactada para favorecer la adhesión de las piezas a la superficie.

Las impresoras que utilizan esta tecnología tienen capacidad para moverse a lo largo de tres ejes (X,Y,Z). Existen diferentes configuraciones en función del sistema de ejes que utilicen, destacando especialmente las de tipo cartesiano, tipo delta y tipo polar. Cada una de estas configuraciones proporciona unas ciertas características relativas a la velocidad de impresión, la definición obtenida, la capacidad de movimiento y la fiabilidad. Analizamos las dos configuraciones más extendidas en el sector de la impresión 3D con FDM:

- Cartesianas: estas impresoras se desplazan según el sistema de coordenadas cartesiano. El movimiento se traduce en tres ejes ortogonales (X,Y,Z), donde el origen puede variar en función de la máquina. En estas impresoras, tanto el extrusor como la cama de impresión pueden desplazarse y existen diferentes configuraciones para dotar a cada uno de movimiento en determinados ejes. La configuración más habitual es la (X, Z Head / Y Bed), es decir, el cabezal puede desplazarse según los ejes X y Z mientras que la cama lo hace a lo largo del eje Y.

- Delta: el sistema de desplazamiento de estas impresoras está basado en el robot delta. En general, cuentan con una cama circular que se mantiene siempre fija, lo que otorga mayor precisión. El cabezal se monta sobre el actuador, que es la pieza que se une mediante rótulas a los extremos de tres brazos articulados que se deslizan sobre unas guías verticales dispuestas en una configuración triangular (ver figura 21). Dependiendo de la altura de cada brazo se consigue el posicionamiento del extrusor. Esta configuración se identifica como (X, Y, Z Head), ya que es el extrusor el que se desliza por todo el espacio disponible.

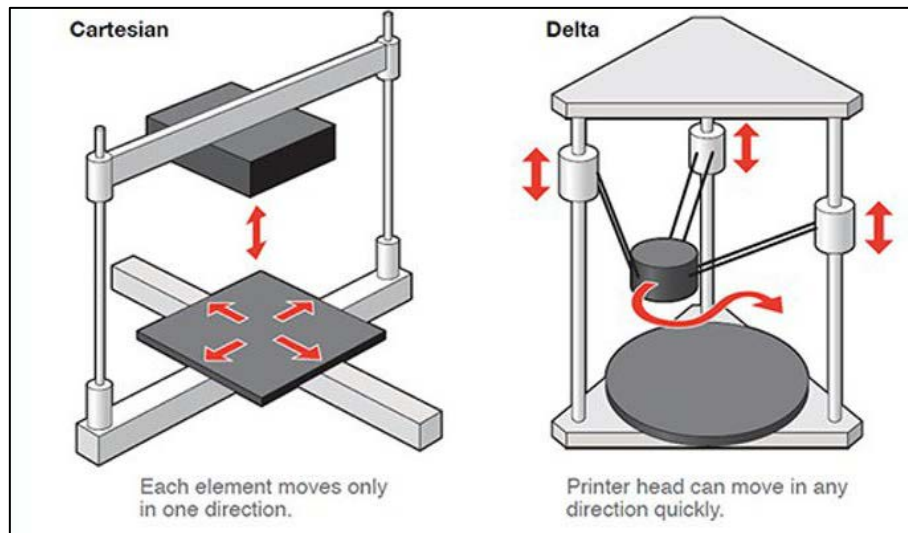


Ilustración 21: Impresora cartesiana vs impresora delta. Fuente: 3Dnatives. Ref: [32]

Las impresoras cartesianas resultan más sencillas en su elaboración y control; sin embargo, deben desplazar un conjunto de elementos en sus ejes. Esto supone el movimiento de masas importantes que puede dar lugar a fuerzas inerciales considerables. En consecuencia, es más complejo lograr una alta velocidad y aceleración en el proceso de impresión, y puede tener afectación sobre la pieza la aparición de vibraciones. Esta problemática se resuelve mediante las impresoras delta, en las que la única masa en movimiento es el cabezal de extrusión. Así, se podrá imprimir con mayor velocidad, aceleración y fiabilidad a cambio de una mayor complejidad de preparación y uso de la impresora y de un desembolso económico superior.

El tamaño de fabricación disponible de las impresoras FDM habituales es de 200 x 200 x 200 milímetros, aunque para máquinas industriales puede alcanzar el metro cúbico. La definición que alcanzan las impresoras FDM se determina en función de la altura de capa empleada, que suele variar desde las 50 hasta las 400 micras. Cuanto menor sea la altura de capa, mejores serán el acabado superficial y la precisión de las curvas del objeto. Sin embargo, la velocidad de impresión se verá reducida.

3.1.2 Propiedades de impresión

A la hora de fabricar una pieza mediante FDM, debemos poner el foco en los parámetros que van a determinar el que una pieza sea completada con éxito. Las principales propiedades de impresión con FDM serán la adherencia de la pieza a la superficie y la adhesión entre las capas del material, aunque se deberán seguir buenas prácticas en el uso de estructuras de soporte y en la selección del tipo de relleno.

Adherencia a la superficie y adhesión entre capas

Una buena adhesión entre capas es fundamental para una pieza fabricada con FDM. Cuando el termoplástico fundido es extruido a través de la boquilla, es presionado contra la capa anterior. Esto hace que, debido a la alta temperatura y a la presión ejercida, la superficie de la capa anterior se funda parcialmente y de este modo se produzca la unión entre capas. Hay que tener en cuenta que la fuerza con que se unen unas capas con otras será siempre inferior a la fuerza base del material. Por este motivo, es muy importante tener esto en mente a la hora de orientar una pieza para que sea impresa, ya que el esfuerzo que soportará en su dirección vertical (la del eje Z) será notablemente inferior a la soportada en el plano horizontal (plano XY). Esta propiedad del material se conoce como anisotropía; las propiedades no son las mismas en todas las direcciones.

La adherencia a la superficie de impresión es una de las propiedades que presenta mayor variación en función del material utilizado. Además, se trata de un factor crítico a la hora de obtener una pieza satisfactoria, ya que numerosos defectos de fabricación ocurren por una unión incorrecta del material a la base. Por ello, es importante conocer las características de los materiales de trabajo y adecuar los parámetros de la impresora para su extrusión.

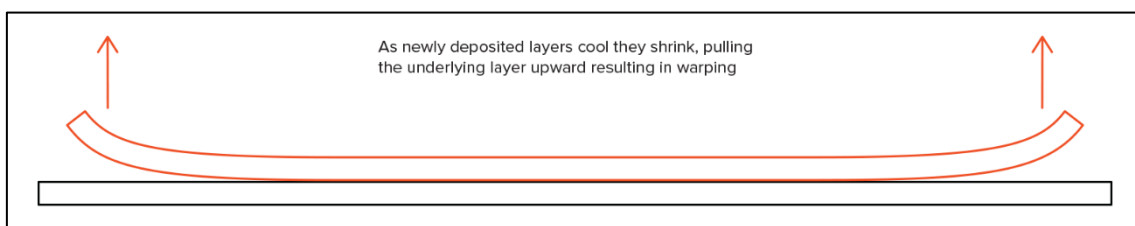


Ilustración 22: Efecto del warping en una pieza. Fuente: 3D Hubs. Ref: [31]

Un fenómeno indeseable relacionado con la adherencia a la superficie que aparece con frecuencia es el “*warping*”. Cuando el material extruido se enfría durante la solidificación tiende a contraerse. Dado que diferentes secciones de la pieza se enfrían a diferentes ritmos, su contracción se produce a diferentes velocidades. Este enfriamiento heterogéneo da lugar a la aparición de tensiones internas que empujan a las capas inferiores hacia arriba causando el *warping*, como se puede apreciar en figura 22. Para prevenir este fenómeno se emplean técnicas como el uso de una cama calefactada y el uso de materiales adhesivos. Además, se pueden hacer ciertas

consideraciones sobre el diseño para reducir el riesgo de *warping*; por ejemplo, minimizar el área de contacto de la pieza con la superficie de impresión o seleccionar un material que tenga una mejor adherencia a la superficie.

Tipo de relleno y diseño de soportes

Las piezas de FDM normalmente no se imprimen completamente sólidas para, de este modo, ahorrar material y tiempo. En su lugar, el perímetro suele trazarse realizando varias pasadas, lo que se conoce como escudo, y el interior se completa con una estructura de menor densidad llamada relleno. Tanto el relleno como el escudo afectan de manera notable a la resistencia de la pieza. Por lo tanto, deben considerarse las características deseadas en la pieza final y adaptar estos parámetros en consecuencia. Situándonos en los extremos, una pieza elaborada con un 0% de relleno estaría formada únicamente por su perímetro, mientras que una pieza con un relleno del 100% sería un objeto macizo comparable a los fabricados mediante técnicas tradicionales. Las impresoras FDM de escritorio suelen utilizar por defecto un relleno del 25% y un escudo de un 1 milímetro de grosor, que de manera general permiten imprimir una pieza con una resistencia aceptable a una buena velocidad.

Las limitaciones de la tecnología FDM a la hora de imprimir piezas con voladizos, puentes o paredes con ángulos hacia el exterior muy pronunciados hacen necesario el uso de estructuras de soporte. Estas son zonas en las que no existe material en la capa inferior que sustente el material de la nueva capa, por lo que en ausencia de soportes el plástico caería por gravedad y la pieza no se completaría de manera adecuada. Los soportes, que en principio se imprimen como una parte más de la pieza, se diseñan y añaden durante la etapa de preparación de la pieza. Existen programas de diseño asistido por ordenador (programas CAD) especializados en el diseño de soportes. En cualquier caso, el propio usuario puede incluirlos directamente en el diseño del modelo. Los criterios básicos para el diseño de unos buenos soportes son los siguientes:

- Deben permitir elaborar la pieza colocando el menor número posible de soportes.
- Deben emplear la menor cantidad de material posible.
- Deben procurar que la superficie de unión con la pieza original sea la menor posible.

Sin embargo, es importante notar que el uso de soportes generalmente se traduce en una calidad superficial inferior en la zona de contacto con la pieza. Además, es necesario un post-procesado para retirar el material. Existe la posibilidad de emplear un material de soporte distinto al material de fabricación. Esto resulta muy útil cuando el material de soporte es soluble en un compuesto que no afecta al material de fabricación, sin embargo, esta solución requiere que la impresora cuente con un segundo extrusor.

3.1.3 Materiales en FDM

Una de las principales fortalezas de la tecnología FDM es la gran variedad de materiales termoplásticos que puede procesar. Estos materiales pueden variar desde los de uso común sin grandes requerimientos (como el PLA o el ABS) hasta materiales de ingeniería (como el PA, los TPU y el PETG) y los termoplásticos de alto rendimiento (como el PEEK y el PEI). Como regla general, cuanto mejores son las propiedades mecánicas del termoplástico, mayores serán la temperatura de extrusión y el coste económico.

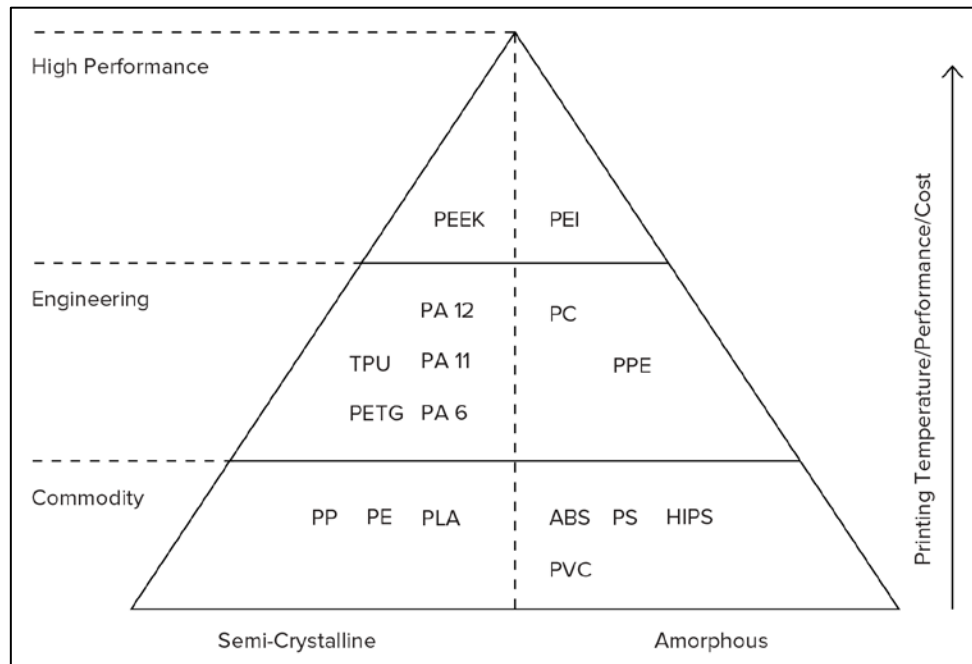


Ilustración 23: Pirámide de termoplásticos disponibles en FDM. Fuente: 3D Hubs. Ref: [31]

Puesto que la tecnología FDM trabaja con materiales termoplásticos, las propiedades de los materiales de fabricación se transmitirán a la pieza elaborada. Por ello, el material empleado será el que determine en su mayor medida las propiedades mecánicas y la precisión de la pieza impresa, así como su precio. Además, es necesario adaptar la configuración de los distintos elementos físicos de la impresora a cada tipo de material, para asegurar la correcta extrusión, deposición y adhesión de las capas. Las características de los materiales más extendidos en impresión 3D mediante FDM y sus configuraciones correspondientes se detallarán más adelante en la sección 3.2 (*Termoplásticos en FDM*).

3.1.4 Ventajas y aplicaciones del FDM

La tecnología FDM se ha extendido por su accesibilidad y su facilidad de uso, pero también por otras características que la hacen deseable frente al resto de tecnologías de fabricación aditiva existentes. La impresión en FDM es la manera más efectiva en cuanto a costes de producir piezas termoplásticas personalizadas, muy útiles para elaborar prototipos. Además, existe una gran variedad de materiales termoplásticos

compatible con esta tecnología, que pueden servir tanto para el prototipado como para ciertas aplicaciones funcionales. Así mismo, los tiempos de entrega en FDM son bastante cortos debido a la gran disponibilidad de la tecnología, lo que agiliza en gran medida el proceso de fabricación y distribución.

Por el contrario, es necesario considerar las desventajas que presenta el uso del FDM. En comparación con el resto de tecnologías, la precisión dimensional que se obtiene con FDM es una de las más bajas, por lo que su uso no es recomendable para la elaboración de geometrías con detalles intrincados. Otro inconveniente que conlleva es el acabado superficial de las piezas, puesto que se hace inevitable que presenten la apariencia de haber sido diseñadas por capas y será necesario aplicar post-procesados para pulirlas. [33] La principal desventaja que presenta esta tecnología, sin embargo, es la anisotropía inherente al proceso de deposición capa a capa y que hace que las propiedades mecánicas en el eje vertical sean muy bajas.

Esta tecnología se deberá elegir, por tanto, cuando se pretenda priorizar el tiempo, la disponibilidad y el coste frente al nivel de detalle y la resistencia mecánica. Debido a las propiedades asociadas a esta tecnología, las piezas obtenidas serán duraderas y tendrán una gran estabilidad. Las aplicaciones para las que resulta ideal la FDM son la producción de un bajo volumen de piezas finales complejas, el desarrollo de prototipos para testear la forma y la funcionalidad y la elaboración de prototipos finales en el material de fabricación.

La tecnología FDM se ha popularizado en diversos sectores industriales, donde ha apoyado tanto al desarrollo del producto como al prototipado y a los procesos de fabricación. [33] Ha sido acogida por importantes empresas de automoción como BMW, Hyundai o Lamborghini y se ha extendido en la industria de bienes de consumo, en compañías como Black and Decker, Dial o Nestlé. Estos componentes termoplásticos también han servido a la industria alimentaria y médica, donde se ha extendido su uso en la fabricación de paquetes y envases.

3.2 Termoplásticos en FDM

Puesto que la tecnología FDM es la más extendida en el panorama de la fabricación aditiva y es, además, la que va a ser utilizada en el laboratorio que pondremos en marcha en este proyecto, resulta relevante analizar las características de los distintos materiales termoplásticos que podrán ser empleados. En primer lugar, se introducirán los materiales que se emplean habitualmente en esta tecnología y posteriormente se realizará un estudio comparativo entre ellos. Por último, se detallarán los requisitos de configuración de los componentes hardware adecuados para la impresión de cada material.

3.2.1 Materiales de extrusión empleados en FDM

PLA

El poliláctico, ácido poliláctico o PLA es un polímero termoplástico formado por moléculas de ácido láctico. Se obtiene a partir de almidón de productos vegetales (almidón de maíz, yuca o caña de azúcar) y es, por tanto, biodegradable. Es un material fácilmente degradable en agua y óxido de carbono, por lo que no es recomendable su uso para objetos que vayan a ser colocados en espacios exteriores.

El PLA presenta diversas ventajas que lo convierten en el polímero más sencillo de utilizar y que lo hacen preferible al ABS. En primer lugar, el PLA no libera humos en su fusión como sí ocurre con el ABS. Además, es más duro que el ABS, aunque también más frágil. Durante su enfriamiento presenta cierta flexibilidad durante un breve lapso, lo cual puede resultar útil, especialmente para grandes piezas. Por último, no presenta el fenómeno del “*warping*” con la facilidad con la que aparece en las piezas impresas en ABS.

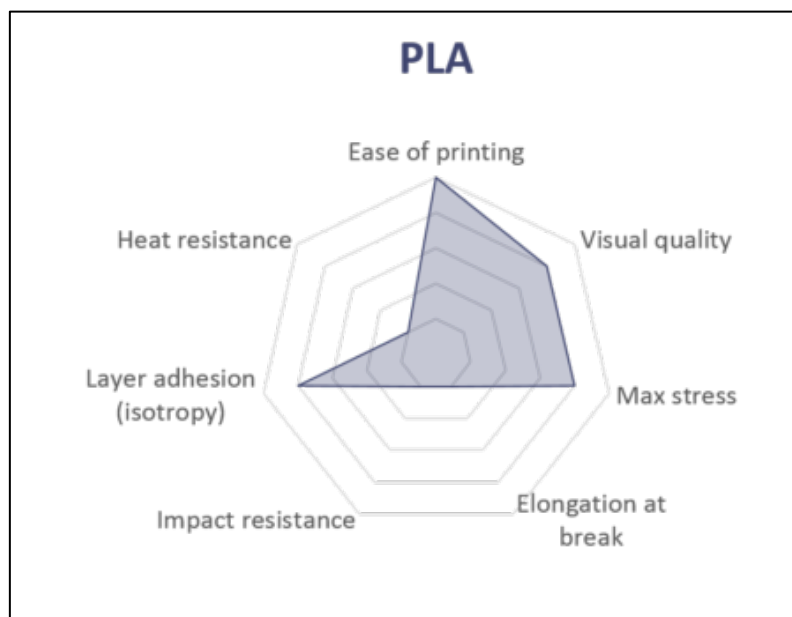


Ilustración 24: PLA properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]

Estas propiedades hacen que el PLA se haya extendido en el sector alimentario, debido a su ausencia de toxicidad, lo que lo hace ideal para la fabricación de envases y recipientes en contacto con los alimentos. Además, es muy aconsejable su uso para la elaboración de utensilios y juguetes sujetos al contacto con la piel.

ABS

El acrilonitrilo butadieno estireno, conocido comúnmente como ABS, es un termoplástico amorfo muy utilizado por sus buenas propiedades mecánicas: ofrece una gran dureza y resistencia a golpes. En cuanto a su composición, los bloques de

acrilonitrilo proporcionan rigidez y dureza, los de butadieno proporcionan tenacidad a cualquier temperatura y los de estireno aportan resistencia mecánica. Estas propiedades individuales crean una sinergia en la composición del ABS, que típicamente es 50% estireno y el otro 50% dividido entre butadieno y acrilonitrilo. La variación en su composición permite modificar sus propiedades, lo que ha permitido además el desarrollo de otros termoplásticos como el PVA y los PC, entre otros.

La propiedad más reconocida del ABS es su comportamiento frente a la temperatura. Este material resulta muy estable térmicamente, retarda la inflamación y tiene una gran resistencia a la temperatura. Esta propiedad, junto con la gran resistencia a impactos y la estabilidad dimensional que ofrece, hace que sea preferido al PLA cuando se requiera alta resistencia a la temperatura y alto grado de rigidez. La gran desventaja que presenta el ABS, sin embargo, es la poca adherencia a la base que tiene, de manera que es necesario prevenir el fenómeno del “*warping*” especialmente en piezas de gran tamaño. Además, su resistencia al ambiente exterior, tanto a humedad como a elementos químicos, no es elevada.

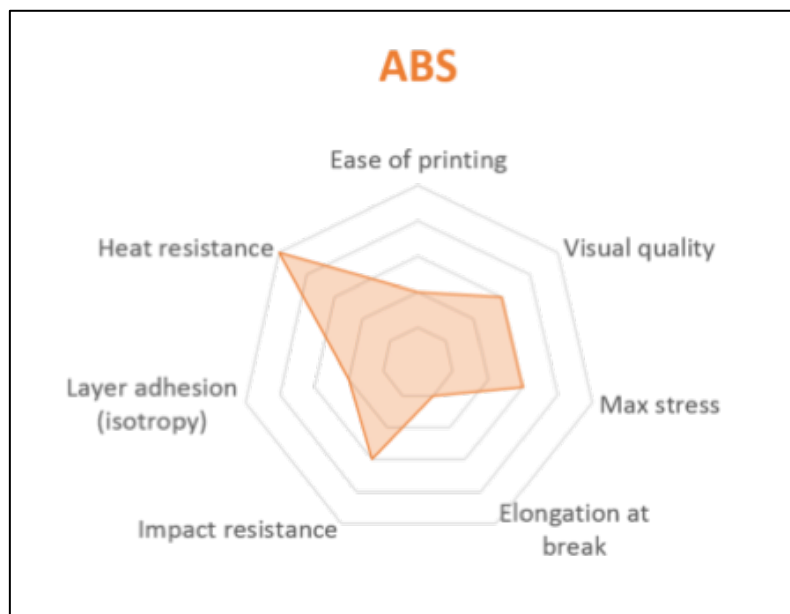


Ilustración 25: ABS properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]

Aunque su procesamiento es más complejo que el de otros plásticos comunes como las poliolefinas, sus propiedades han favorecido que su uso esté muy extendido en sectores industriales. Destaca su aplicación en automoción para la elaboración tanto de partes de la carrocería como de guarnecidos interiores y en la fabricación de componentes electrónicos, carcasas y objetos de uso doméstico.

Nylon y poliamidas

El nylon o nailon es un polímero artificial que pertenece al grupo de las poliamidas. Este polímero fue inicialmente fabricado por la empresa DuPont, quien conservó la patente

de su descubridor, Wallace Hume Carothers, tras la muerte de este. Concretamente, nylon es el nombre comercial (marca registrada) que DuPont dio a su poliamida.

Las poliamidas se caracterizan por la flexibilidad y las buenas propiedades mecánicas que poseen. Al contrario de lo que ocurre con el ABS y el PLA, las poliamidas (PA) presentan menor fragilidad. Destacan su resistencia a impacto y a tensión, además de su resistencia al desgaste. Sin embargo, puesto que se trata de un termoplástico semicristalino, tiene una gran tendencia a contraerse una vez que se enfría. Es por esto por lo que presentará grandes problemas en relación a su adherencia a la base, siendo mayor su tendencia al “*warping*” que la del ABS.

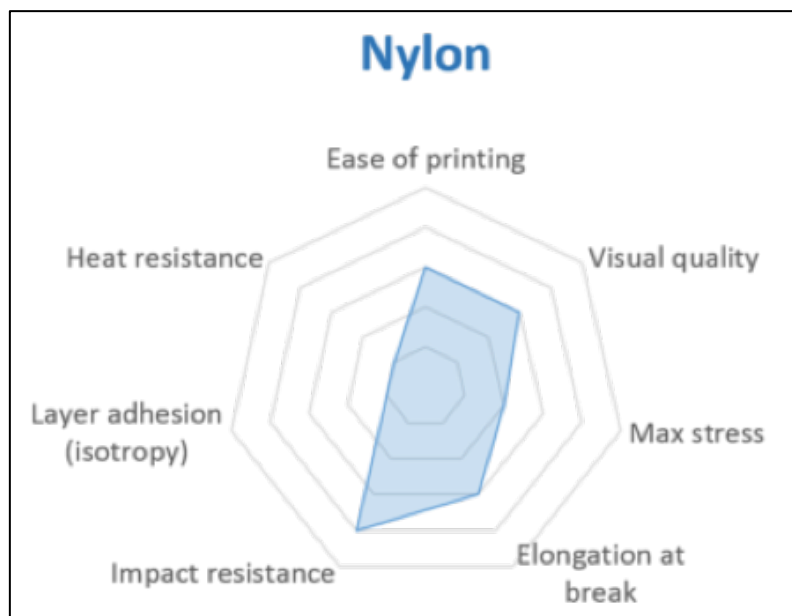


Ilustración 26: Nylon properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]

El nylon, y las poliamidas en general, suelen presentarse en dos formas: fibras o bloques sólidos. Mientras que las fibras se utilizan principalmente en la industria textil, la industria de ingeniería se aprovecha de las ventajas que ofrece el nylon sólido para la fabricación de piezas sujetas a un nivel de estrés medio-bajo (tornillos, engranajes).

En fabricación 3D, se emplean distintos tipos de poliamidas, entre las que destaca principalmente el Nylon 618. Las principales aplicaciones en fabricación aditiva de este polímero se restringen al sector industrial, siendo frecuente su uso para la elaboración de piezas de máquinas, herramientas, bisagras y otros elementos sometidos a altos esfuerzos mecánicos.

PC

El policarbonato se forma por una polimerización por condensación que resulta en una molécula formada por un átomo de carbono unido a tres átomos de oxígeno. Este polímero es conocido por su enorme resistencia a impacto y su transparencia.

Las propiedades que hacen deseable al PC son su resistencia a la radiación ultravioleta, su buena fluidez, su gran resistencia a impacto y a fatiga y su capacidad para mantener las propiedades mecánicas cuando es expuesto a altas temperaturas durante un largo periodo de tiempo.

Los inconvenientes más notables de este polímero son la tendencia a sufrir “*warping*”, que es significativamente superior a la del PLA, y su carácter higroscópico; tiende a absorber la humedad. Esta característica debe ser controlada durante el proceso de impresión para evitar resultados indeseables, así como su tendencia a fluir.

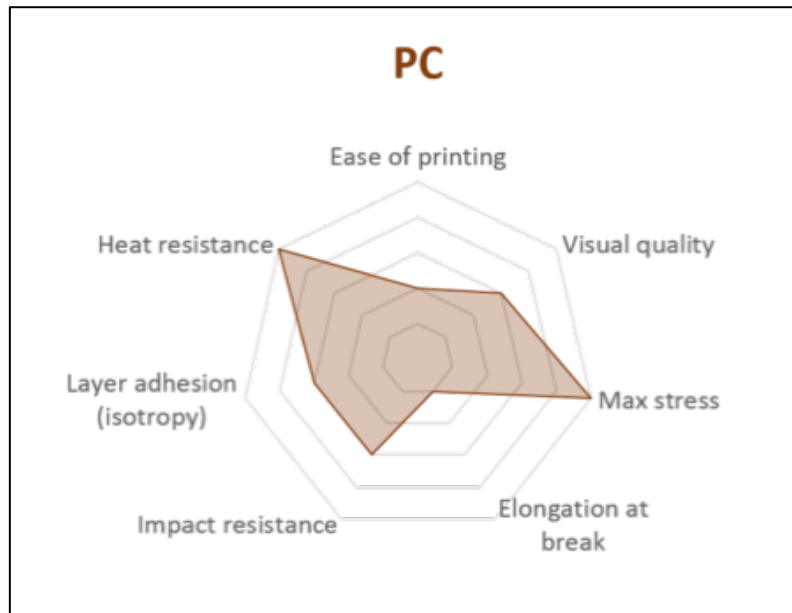


Ilustración 27: PC properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]

El PC está por tanto pensado para la elaboración de piezas que deban soportar ambientes hostiles. Entre sus aplicaciones destacan su uso en la elaboración de componentes electrónicos y en los sectores eléctrico, médico y de automoción. Además, la transparencia que presenta hace que se utilice para la fabricación de ventanas blindadas, lentes de alta resistencia, discos compactos, etc.

PET o PETG

El PET, en castellano tereftalato de polietileno, es un copolímero transparente con muy buena resistencia química y apto para uso alimentario. Es el polímero más utilizado en el mundo: aparece en botellas, envases, fibras textiles, etc.

En impresión 3D se emplea una variante del PET; el PETG, en la que este polímero ha sido modificado con glicol. Esta variante induce un cambio en la estructura química del polímero que lo hace más transparente, menos frágil y más fácil de procesar que el PET. Gracias a estas mejoras y a la versatilidad que ofrece, el PETG se ha convertido en uno de los materiales más extendidos en fabricación aditiva.

Las propiedades que han provocado la difusión del PETG en el sector de la impresión 3D son su facilidad de uso, la notable resistencia al impacto, la resistencia al agua, la suave superficie de las piezas y que es fácilmente reciclable. También, no desprende olores durante su extrusión a diferencia de otros termoplásticos como el ABS, y es más resistente a la temperatura que el PLA. En cuanto a los inconvenientes del PETG como material de fabricación aditiva se pueden citar la formación de hilos en la superficie y la dificultad para elaborar voladizos, así como la poca elongación a rotura que ofrece.

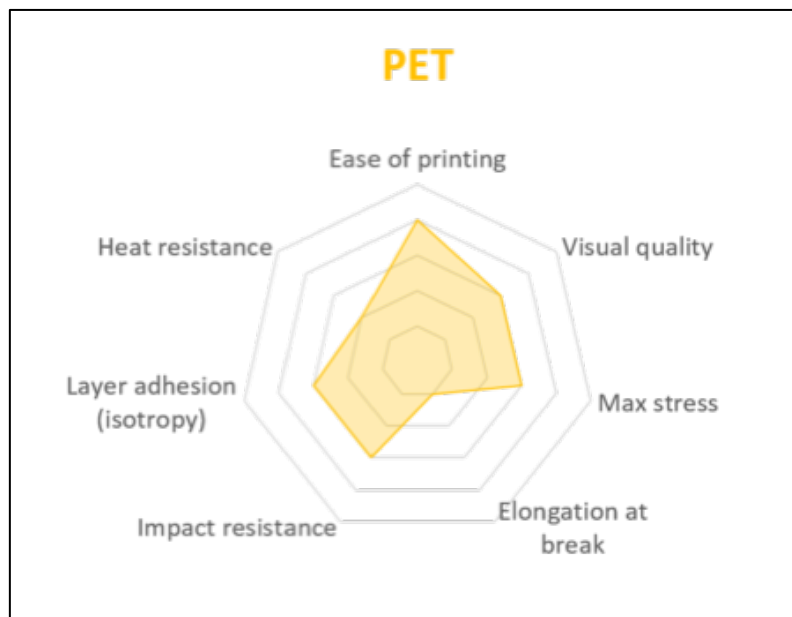


Ilustración 28: PET properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]

El PETG combina por tanto las mejores características de los dos termoplásticos de impresión 3D por excelencia: el PLA y el ABS. Las aplicaciones para las que resulta ventajoso son aquellas que requieran buenas resistencias térmica y a impacto, exposición a condiciones desfavorables y transparencia.

TPE o TPU

Los filamentos flexibles empleados en impresión 3D están hechos de elastómeros termoplásticos (TPE), que son una combinación de plástico duro y caucho. Como su propio nombre indica, estos materiales son elásticos en su naturaleza y pueden ser doblados y estirados, recuperando su estado inicial una vez que cesa el esfuerzo.

Existen numerosos tipos de TPE, como los copoliésteres y algunas poliamidas, aunque es el termoplástico de poliuretano (TPU) el más común entre los filamentos de impresión 3D en la búsqueda de la flexibilidad. Este tipo de filamentos se conocen también por sus nombres comerciales, como Filaflex o Ninjaflex, que tienen unas composiciones determinadas por sus fabricantes.

Las propiedades de este tipo de materiales es que son muy blandos, flexibles y elásticos. Por ello, absorben muy bien las vibraciones, tienen una resistencia al impacto excelente

y una esperanza de vida elevada. Por el contrario, el factor negativo que presentan fundamentalmente es su dificultad para ser extruidos, ya que actúan como muelles en el interior de los extrusores, lo que limita la velocidad de impresión.

Las aplicaciones para las que será recomendable el uso de los TPU serán aquellas en las que la elasticidad sea primordial, puesto que es una característica única que ofrece entre los diferentes tipos de termoplásticos de uso habitual.

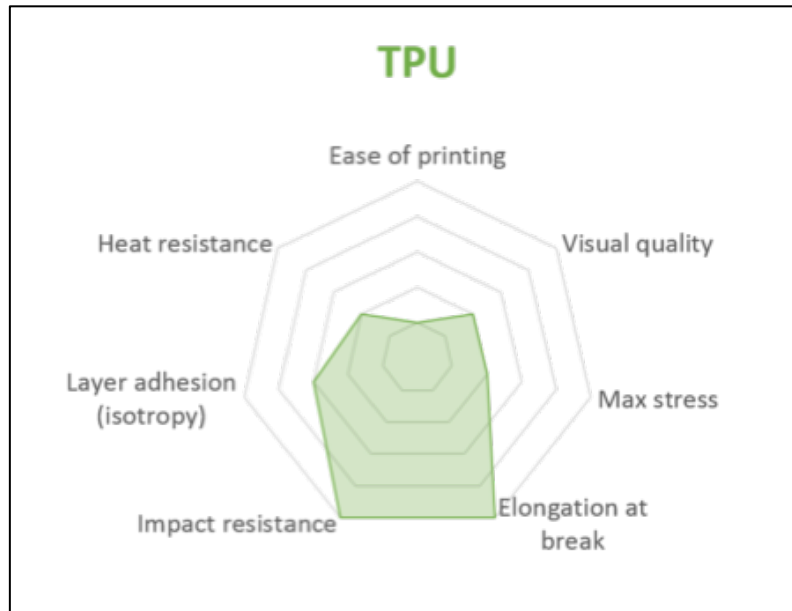


Ilustración 29: TPU properties. Fuente: 3D Hubs. Ref: [34]

PP

El polipropileno es un material semirrígido y muy ligero que se emplea habitualmente en aplicaciones de empaquetado y almacenaje. Tiene una estructura semicristalina, lo que lo diferencia de la mayoría de los plásticos empleados en FDM y en la actualidad se está extendiendo su uso en el campo de la fabricación aditiva.

Este material introduce ventajas considerables sobre los plásticos tradicionales de FDM, puesto que combina unas notables propiedades mecánicas con una alta resistencia química. Se trata de un material duro y con gran resistencia a fatiga; características que lo hacen ideal para aplicaciones con un esfuerzo medio como pueden ser correas, bisagras, sujeciones, etc. También, presenta una buena resistencia térmica, cierta elasticidad y permite obtener piezas con una superficie lisa y vistosa. Sin embargo, la dificultad de impresión que presenta ha sido tradicionalmente el elemento disuasorio sobre su uso. Su estructura semicristalina hace que su enfriamiento y solidificación potencien la aparición del fenómeno del "warping", ya que ofrece escasa adhesión a la cama y a diversos productos adhesivos.

Las propiedades del polipropileno hacen que su uso se haya extendido en diferentes industrias. La resistencia química que ofrece este material hace que sea muy apreciado

como contenedor en la industria médica, ya que no contamina a las sustancias que contiene. En la industria de la automoción el polipropileno se emplea para la elaboración de piezas que deban soportar golpes sin romperse, como ocurre con los parachoques. La industria de envasados es la que más se beneficia de este material, puesto que permite elaborar envases y empaquetados duraderos a un coste menor. [35]

HIPS

El poliestireno de alto impacto o, por sus siglas en inglés, HIPS, es un polímero modificado con aditivos (fundamentalmente hidrocarburos y alquenos) para mejorar sus propiedades mecánicas, ya que el poliestireno es frágil por sí mismo.

Las propiedades del HIPS son muy similares a las del ABS, por lo que resulta ideal para fabricar piezas que deban soportar cargas y esfuerzos mecánicos. Además, es resistente al agua, su coste económico no es elevado, es sencillo de pintar y es uno de los termoplásticos más ligeros. En cuanto a los inconvenientes que presenta destaca su poca adherencia a la base, la necesidad de imprimir a temperatura elevada y la necesidad de emplear un ventilador de capa.

La principal utilidad del HIPS es que es soluble en una sustancia llamada limoneno que no afecta al ABS. Por este motivo, el HIPS está enormemente extendido como material de soporte, especialmente para su impresión junto con el ABS ya que comparten características. Sin embargo, la impresión directa con HIPS es también muy frecuente y recurrida.

El HIPS es compatible con las FDA (*Food and Drugs Applications*), lo que lo hace apto para su uso en aplicaciones alimenticias y farmacéuticas. Así mismo, al igual que el ABS, este material está extendido en la industria del automóvil y en la fabricación de componentes electrónicos y objetos de uso doméstico.

PVA

El alcohol de polivinilo es un polímero que se obtiene tratando con un catalizador alcalino una disolución en alcohol de otro polímero: el acetato de polivinilo, que a su vez se obtiene a través de la polimerización del acetato de vinilo. Este polímero es de forma natural amarillento e inodoro.

El PVA es un polímero suave y biodegradable altamente sensible a la humedad. De hecho, este polímero se disuelve en contacto con el agua, por lo que su aplicación fundamental será la de actuar como material de soporte para la elaboración de piezas complejas. En este caso, deberá analizarse previamente su adherencia al resto de termoplásticos para asegurar una correcta fijación.

Las principales desventajas que presenta este polímero son su inflamabilidad y su elevado coste. Además, por sus propiedades es propenso a obstruir el extrusor si no se

controla adecuadamente la temperatura, y su afectación por la humedad hace que sea necesario emplear cámaras aisladas para extruirlo.

Aunque su aplicación fundamental es la de actuar como material de soporte, el PVA también puede ser utilizado para elaborar prototipos gracias a la sencillez de uso que tiene.

Nuevos termoplásticos

Recientemente se han desarrollado nuevos polímeros con propiedades mejoradas que ya se están introduciendo en las tecnologías de fabricación aditiva. Algunos de estos polímeros que se emplean ya en FDM son: [10]

- PVDF: el fluoruro de polivinilideno es un fluoropolímero termoplástico altamente inerte que se obtiene por polimerización del difluoruro de vinilideno. Este material se caracteriza por una excelente resistencia a la fatiga y a la radiación, una excelente estabilidad térmica (con un rango de funcionamiento entre -20 °C y 130°C) y un alta constante dieléctrica. Además, gracias a su estabilidad química, se utiliza habitualmente como aislante y protector en aplicaciones químicas.
- PEEK: el poliéter éter cetona es un termoplástico semicristalino de alto rendimiento que presenta una alta resistencia y rigidez, así como una gran ductilidad. Por estas razones, este material puede reemplazar al aluminio y al acero en aplicaciones estructurales, ofreciendo una reducción considerable de peso y de ciclos de fabricación. Así mismo, el PEEK es resistente químicamente a entornos hostiles y ofrece una gran durabilidad y, además, la posibilidad de ser esterilizado para su uso en aplicaciones médicas y alimentarias.
- PEI: la polietilenimina es un polímero amorfo de alto rendimiento que posee excelentes propiedades térmicas, una excepcional estabilidad dimensional y una buena resistencia química. También, el PEI tiene una consistente resistividad superficial, alta resistencia y módulo y una constante dieléctrica estable. En general, presenta características similares a las del PEEK salvo su menor resistencia a impacto, temperatura de operación y coste.

3.2.2 Estudio comparativo y configuraciones

En primer lugar, haremos un análisis comparativo de los distintos materiales en función de los parámetros más importantes a tener en cuenta a la hora de seleccionar un material en concreto. Para ello, se tomará como referencia el estudio realizado por Optimatter [36], en el que los parámetros se evalúan según una gradación del 1 (menor)

al 5 (mayor) en una escala relativa. Los parámetros que se evaluarán serán los siguientes:

- Facilidad de impresión: se consideran criterios como la adherencia a la base, la velocidad máxima de impresión, la frecuencia de impresiones fallidas, la facilidad de suministro del material, etc.
- Calidad superficial: se evalúa la apariencia del objeto mediante el uso de un modelo común de impresión con medidas predeterminadas.
- Tensión máxima: la máxima tensión que soporta el objeto antes de romperse cuando se va depositando peso lentamente sobre este.
- Elongación a rotura: la máxima longitud a la que se puede estirar el objeto sin que se rompa.
- Resistencia a impacto: la energía que se necesita para romper el objeto mediante un único impacto.
- Adherencia entre capas: lo buena que es la adherencia entre capas, lo cual está relacionado con la isotropía del material (mismas propiedades en todas las direcciones). A mayor isotropía, mejor adherencia.
- Resistencia térmica: la máxima temperatura que puede soportar el objeto antes de reblandecerse y deformarse.

Los resultados obtenidos en el estudio se indican en la figura 30. Este análisis permite evaluar el desempeño de cada tipo de material en función de cada variable al tiempo que ofrece una comparación visual entre los principales materiales de fabricación mediante FDM.

Han quedado excluidos del estudio el PP, el HIPS y el PVA. Este hecho se debe a que el polipropileno es un material de nueva aplicación y no se encuentra todavía asentado en el sector de fabricación aditiva, a que el HIPS tiene propiedades muy similares a las del ABS y a que el PVA se emplea fundamentalmente como material de soporte. En cualquier caso, las propiedades de impresión que ofrece el PP son de poca facilidad de impresión y baja adherencia entre capas; mientras que presenta excelentes propiedades mecánicas y químicas.

Una vez determinado el tipo de material que será más apto para las características buscadas en la pieza final, se deben considerar las configuraciones necesarias de los elementos hardware de la impresora para la correcta extrusión del material. Estas consideraciones son muy importantes, puesto que la incorrecta configuración de la impresora para un determinado tipo de material no solamente puede arruinar la pieza, sino que también puede tener consecuencias indeseables sobre los componentes de la impresora.

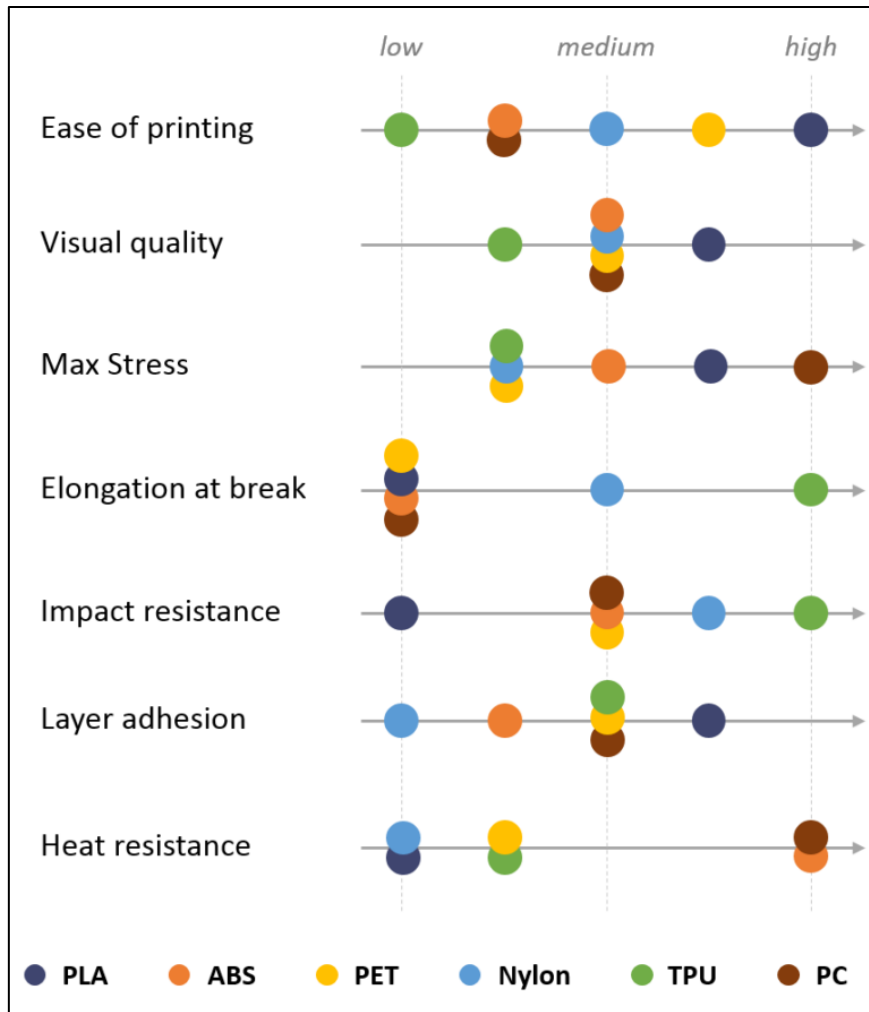


Ilustración 30: Comparación de materiales de FDM. Fuente: 3dHubs. Ref: [34]

Los cuatro elementos sobre los que vamos a realizar consideraciones en cuanto a la preparación del hardware de la impresora son los siguientes:

- Cama: se indicará el rango de temperaturas recomendado, la necesidad de incluir una cama calefactada y la necesidad de extruir en una cámara aislada.
- Extrusor: se indicará el rango de temperaturas de extrusión recomendado.
- Superficie de impresión: se indicará la necesidad de aplicar spray fijador o de emplear algún tipo de adhesivo.
- Ventilador de capa: se indicará la necesidad de hacer uso de un ventilador de manera continua o solo para las secciones más críticas.

Las indicaciones incluidas en la tabla 2 permitirán optimizar la impresión de cada tipo de material atendiendo a sus características. Esto favorecerá la obtención de una pieza con las propiedades deseadas, asegurando una correcta adherencia a la base, adherencia entre capas, robustez y acabado superficial.

Tabla 2: Configuraciones hardware para cada material en FDM. Fuente: Elaboración propia.

	PLA	ABS	Nylon	PC	PET
Temperatura de extrusión (°C)	190 - 220	220 - 250	220 - 270	260 - 310	230 - 250
Temperatura de la cama (°C)	45 - 60	85 - 110	70 - 90	80 - 120	75 - 90
Cama calefactada	Opcional	Requerida	Requerida	Requerida	Requerida
Superficie de impresión y adhesivos recomendados	Cinta de pintor, Barra de pegamento, Base de vidrio, PEI	Cinta Kapton, Espray Dimafix	Barra de pegamento, PEI, Espray Dimafix	PEI, Espray Dimafix, Barra de pegamento	Barra de pegamento, Cinta de pintor
Espray fijador	Recomendable	Obligatorio	Obligatorio	Obligatorio	Recomendable
Ventilador de capa	Ventilación continua	Solo en puentes y perfiles muy estrechos	Solo en puentes y perfiles muy estrechos	Solo en puentes y perfiles muy estrechos	Ventilación continua
Cámara aislada	No requerida	Recomendable	Recomendable	Requerida	No requerida

	TPU	HIPS	PVA	PP
Temperatura de extrusión (°C)	225 - 245	230 - 245	185 - 200	220 - 250
Temperatura de la cama (°C)	45 - 60	100 - 115	45 - 60	85 - 100
Cama calefactada	Opcional	Requerida	Opcional	Requerida
Superficie de impresión y adhesivos recomendados	PEI, Cinta de pintor	Base de vidrio, Barra de pegamento, Cinta Kapton, Espray Dimafix	PEI, Cinta de pintor	Cinta de embalar, Lámina de polipropileno
Espray fijador	Opcional	Recomendable	Obligatorio	Obligatorio
Ventilador de capa	Solo en puentes y perfiles muy estrechos	Solo en puentes y perfiles muy estrechos	Solo en puentes y perfiles muy estrechos	Solo en puentes y perfiles muy estrechos
Cámara aislada	No requerida	Recomendable	No requerida	Recomendable

Capítulo 4

Requisitos físicos

4 REQUISITOS FÍSICOS

La puesta en marcha de un laboratorio de impresión 3D tiene una serie de requerimientos físicos que deben permitir el desarrollo de la actividad. Estas exigencias conciernen tanto al espacio físico en el que se desea ubicar el laboratorio como al acondicionamiento de este mediante una serie de instalaciones y de equipos.

A la hora de planificar el proyecto de lanzamiento de un laboratorio de impresión 3D, es importante tener en cuenta que las necesidades de equipos y elementos físicos serán las que determinen las infraestructuras adecuadas para la actividad. Si bien es cierto que en nuestro proyecto las exigencias en cuanto a infraestructuras no serán demasiado elevadas, sí que debemos organizar cuidadosamente los diferentes dispositivos que serán de uso obligado, así como aquellos que nos darán soporte para el desarrollo de la actividad. Una vez que los hayamos determinado, identificaremos el alojamiento y las instalaciones necesarios que permitirán su puesta en marcha y estableceremos la distribución más favorable para la actividad.

4.1 Equipos

Un laboratorio de impresión 3D deberá estar dotado de una serie de equipos a través de los cuales puedan llevarse a cabo las tareas de impresión de piezas, pero también de otros dispositivos que faciliten esta labor para una ejecución óptima. En primer lugar, podemos pensar que será indispensable contar con impresoras 3D, materiales de fabricación, herramientas y ordenadores. Sin embargo, es necesario considerar también otros equipos, tales como estanterías, mesas, sillas, materiales auxiliares, etc. que apoyen el desarrollo de la actividad y nos permitan operar de una manera más eficiente.

En esta sección indicaremos y justificaremos la necesidad de los equipos con los que nosotros trabajaremos en el laboratorio y que servirán de referencia para una actividad de este tipo. Además, haremos un pequeño inventario de los distintos componentes e indicaremos sus características y su funcionalidad.

4.1.1 Impresoras

Los elementos básicos de un laboratorio de impresión 3D, y así ocurre con el nuestro, son las impresoras. Contaremos con un total de nueve impresoras del modelo DIMA LT operativas, fabricadas por la empresa DIMA 3D S.L. Estas impresoras, que utilizan la tecnología de modelado por deposición fundida para operar, nos van a permitir elaborar distintas piezas y modelos en diferentes materiales. Los componentes y la configuración de las impresoras se detallarán más adelante en el capítulo 5 (*Documentación técnica de las impresoras*).

Con objeto de mantener operativas las impresoras, es necesario disponer de una serie de piezas de repuesto que nos permitan hacer la sustitución de componentes en caso de fallo o avería. Las impresoras DIMA LT se han desarrollado a partir de un modelo reproducible del proyecto *RepRap* y su fabricante nos indica en la documentación técnica del producto los componentes que lo forman. Puesto que las impresoras cuentan con diversos elementos mecánicos, eléctricos y electrónicos, nos hemos asegurado de adquirir los recambios necesarios de todos los elementos que componen una impresora.

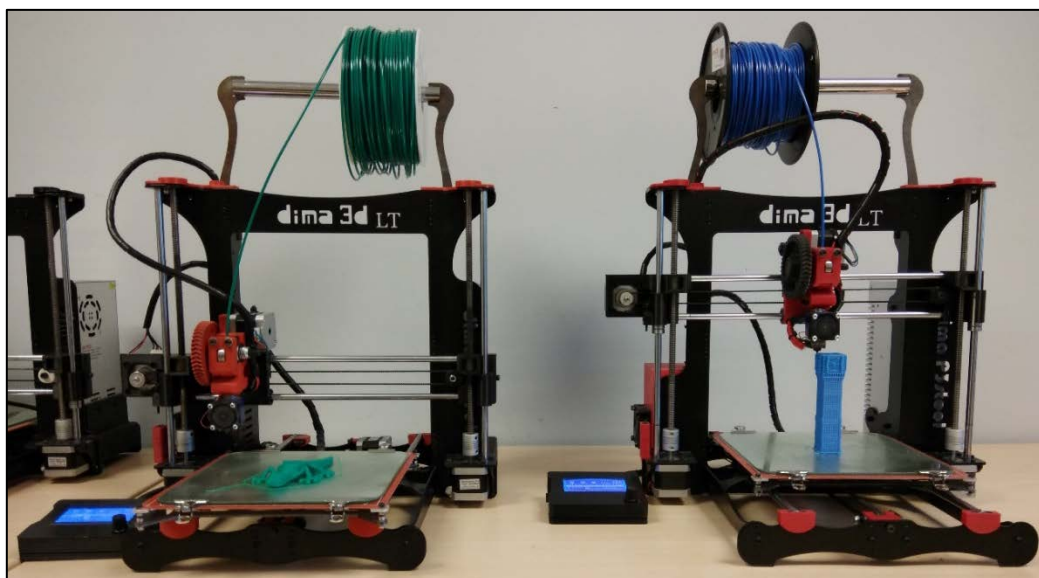


Ilustración 31: Impresoras del laboratorio en operación. Fuente: Elaboración propia.

La relación de todos los componentes – y sus cantidades – de la DIMA LT clasificados según su tipología la encontramos en una serie de tablas en el capítulo 5 (*Documentación técnica de las impresoras*). En la siguiente tabla indicamos las referencias de las tablas que contienen la lista de componentes de cada tipo y el número de juegos de los que dispondremos de cada uno. Un juego completo corresponderá a todos los elementos citados en las tablas referidas y en las cantidades que en ellas se indican.

Tabla 3: Repuestos de los distintos tipos de componentes. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de componentes	Tabla	Nº de juegos
Estructurales	9	3
Eléctricos	10	9
Mecánicos	11	10
Electrónicos	12	15
Piezas impresas	13	3
Extrusor	14	5

A la hora de determinar las necesidades de componentes de repuesto hemos empleado dos criterios fundamentales: la frecuencia con la que suelen averiarse los componentes de un determinado tipo y el número de impresoras con el que contamos. Por lo tanto, de los equipos electrónicos hemos adquirido un mayor número de piezas puesto que tienden a presentar fallos o comportamientos inusuales con cierta frecuencia, en especial los motores. En el otro extremo se encuentran los componentes estructurales, que al ser piezas metálicas y estar ensambladas en un chasis rígido resulta muy poco frecuente advertir una avería o rotura.

Además, parte de los componentes de las impresoras están fabricados en termoplásticos utilizando las propias impresoras para elaborarlos. El aprovisionamiento de estas piezas será diferente al del resto de componentes puesto que podemos reproducirlas con nuestras propias impresoras. Inicialmente contaremos con tres juegos completos de piezas impresas, pero dispondremos de los archivos geométricos de todas ellas para reproducirlas en un futuro.

4.1.2 Materiales de impresión

Los materiales de impresión de los que dispondremos serán todos ellos termoplásticos. Estos materiales se adquieren en forma de filamento y vienen dispuestos en bobinas para facilitar su acoplamiento a las impresoras. Puesto que entre las impresoras operativas contamos con algunas cuyo hot-end admite filamento de 1.75 mm y otras que admiten filamento de 3 mm, deberemos contar con bobinas de filamento de ambas secciones.

Los termoplásticos con los que vamos a trabajar son ABS, PLA, HIPS, filamentos elastoméricos (Filaflex y Ninjaflex) y filamentos de madera (Laywoo-d3). La cantidad de cada uno, sin embargo, no será proporcional. El total de bobinas con el que contaremos en la puesta en marcha del laboratorio será de 110, repartidos de la manera indicada en la tabla 4.

Tabla 4: Distribución de las bobinas de filamento. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de filamento	Sección (mm)	Nº de bobinas
PLA	3	35
	1,75	10
ABS	3	25
	1,75	10
HIPS	3	8
	1,75	2
Filaflex y Ninjaflex	3	10
	1,75	5
Laywoo-d3	3	5
	1,75	0

El motivo de hacer una distribución desigual de los distintos tipos de material de impresión responde a diversas justificaciones. En primer lugar debemos considerar el coste del filamento, dado que varía notablemente en función del material. En segundo lugar tendremos en cuenta la facilidad de impresión, ya que como sabemos las características de cada tipo de material lo hacen más o menos favorable para el proceso de extrusión. En tercer y último lugar, debemos hacer un análisis previo de las necesidades derivadas de la actividad que vamos a poner en marcha en el laboratorio. En nuestro caso, la labor que vamos a desarrollar tiene una finalidad investigadora y docente, por lo que no necesitaremos gran cantidad de materiales avanzados o con altas prestaciones.

4.1.3 PCs, tarjetas de memoria y escáner

Será necesario disponer de al menos un PC que nos permita preparar las piezas para que puedan ser impresas. En nuestro caso haremos uso de dos ordenadores de mesa en los que instalaremos el software necesario para trabajar. Cada ordenador contará con dos monitores que permitirán una visualización cómoda y organizada. El software de impresión 3D nos permitirá partir de un fichero geométrico, bien de un diseño propio o de un diseño descargado de un repositorio, transformarlo a lenguaje de máquina y almacenar esa información en la tarjeta de memoria, que será la que dé la orden a la impresora para que elabore una pieza. Este último paso no es estrictamente necesario, puesto que la pieza podría mandarse imprimir directamente desde el ordenador y establecer la conexión con la impresora a través de un cable USB. Sin embargo, este será nuestro modo de trabajar ya que lo consideramos más eficiente.

El ordenador nos servirá, además, para almacenar los ficheros con las piezas de repuesto de la impresora y para recopilar la información necesaria en el desarrollo de la actividad. Podremos necesitar, por ejemplo, informarnos acerca de las configuraciones de impresión más adecuadas para cada tipo de material y para el nivel de detalle deseado, o buscar información relativa a fallos y comportamientos anómalos de las máquinas.

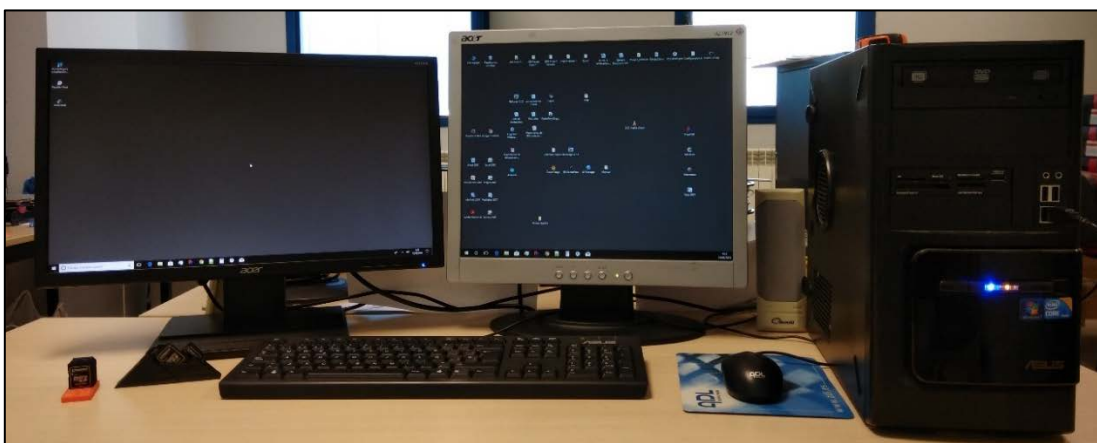


Ilustración 32: PC, monitores y tarjetas de memoria. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, deberemos contar con una serie de tarjetas de almacenamiento en las que almacenaremos los modelos que queramos imprimir. Estas tarjetas se introducen en el controlador con LCD, que va conectado a la electrónica de la impresora, y nos permitirán lanzar la orden de imprimir cualquiera de los modelos que estén almacenados en ellas. Las tarjetas compatibles con el dispositivo LCD pueden ser de tipo SD o Micro SD con adaptador. Nosotros contaremos con tarjetas de los dos tipos: siete tarjetas Micro SD con adaptador de SD y cuatro tarjetas SD. Se recomienda contar con, al menos, una tarjeta por cada impresora operativa para poder tener trabajando a todas las impresoras a la vez sin hacer uso de la conexión USB al ordenador.

Los ordenadores de escritorio con los que trabajaremos serán un modelo ASUS PC BM5675, mientras que los dos pares de monitores que conectaremos a estos son los modelos Acer AL112s y Acer V226HQL. Las tarjetas de memoria, por su parte, serán todas de la casa Kingston Technology Corporation.

Tabla 5: Dispositivos electrónicos auxiliares. Fuente: Elaboración propia.

Dispositivo	Cantidad
PC	1
Monitor	2
Tarjeta SD	4
Tarjeta MicroSD con adaptador	7
Cable USB (A-B)	1
Escáner 3D	1

En la tabla 5 observamos la relación de dispositivos electrónicos que posibilitan la conexión de la etapa de software con la etapa de hardware del proceso de impresión 3D, a excepción del escáner. Todos los elementos mencionados en la tabla son necesarios. Sin embargo, las cantidades son las que nosotros hemos estimado adecuadas a nuestro laboratorio, pero pueden variar notablemente en función del modelo de actividad que queramos implantar.

En el laboratorio contaremos además con un escáner 3D que nos permitirá obtener el archivo geométrico de cualquier objeto físico para su posterior impresión. Se trata de un modelo Sense 3D de la compañía 3D Systems, que ofrece todas las capacidades requeridas para el digitalizado de un elemento real. Este componente nos ofrecerá una nueva forma de obtener el archivo tridimensional de partida del proceso de impresión, dotando de mayor versatilidad al laboratorio.

4.1.4 Herramientas y materiales de preparación

En el proceso de preparación, mantenimiento y reparación de las impresoras van a tener un papel importante las herramientas y materiales que utilicemos. Puesto que conocemos los detalles técnicos de los distintos componentes de las impresoras,

debemos adquirir las herramientas que nos permitan operar con ellos. Estas herramientas permitirán realizar el ajuste inicial de los tornillos, tuercas y demás componentes de fijación antes de poner en operación las impresoras; permitirán realizar la calibración de los elementos móviles de la máquina y de la electrónica, y posibilitarán el desmontaje y montaje de la máquina para hacer la sustitución de componentes. Algunos de estos materiales podrán emplearse en tareas de post-procesado de las piezas impresas.

En nuestro laboratorio contaremos con una serie de juegos de herramientas y equipos auxiliares, que se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 6: Herramientas existentes en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

Grupo	Material	Cantidad
Llaves	Llaves Allen	5 juegos
	Llaves fijas para tornillos de métrica 3 y 8	2 de cada
	Llave inglesa	2
Destornilladores	Destornillador pequeño de estrella	4
	Destornillador plano	4
Alicates	Alicate de puntas	2
	Alicate de corte	3
Atornillador y martillo	Atornillador eléctrico	1
	Martillo de fibra	1
Lima y polímetro	Lima redonda	6
	Polímetro	1
Materiales de corte	Cúteres de varios tamaños	5
	Tijeras	1

Una vez que las máquinas estén listas para comenzar las tareas de impresión, debemos considerar el uso de los materiales que nos permitirán, por un lado, apoyar al proceso de impresión y, por otro, hacer un correcto mantenimiento de las máquinas. Aquí encontramos adhesivos, aceites lubricantes y materiales para la limpieza tanto de la superficie de impresión como del resto de elementos de la impresora.

Los materiales adhesivos van a permitir una correcta adherencia de las piezas a la cama de impresión, evitando fenómenos indeseables como el *warping* o el propio despegue de la pieza durante su fabricación. Para ello, se recomienda hacer uso de espráis fijadores. Los materiales con los que trabajaremos nosotros aparecen indicados en la tabla 7.

Por otro lado, debemos considerar las operaciones de mantenimiento que es necesario realizar sobre las impresoras. Será necesario hacer una limpieza periódica de la cama de impresión para retirar los restos de adhesivo y de filamento que se haya podido quedar pegado. También será importante limpiar el resto de elementos con cierta frecuencia

para prevenir la aparición de averías y asegurar la correcta ejecución de la impresión. Prestaremos especial atención a elementos sensibles como los ventiladores, las barras cromadas, los husillos y los tornillos moleteados. En la sección 6.1.3 (*Preparación de la impresora*) detallaremos las operaciones de calibración y de mantenimiento que debemos realizar sobre las impresoras. Los materiales de los que dispondremos en nuestro laboratorio para esta serie de operaciones, excluyendo las herramientas que ya han sido consideradas, aparecen listados en la tabla 7.

Tabla 7: Materiales auxiliares en el laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

Grupo	Materiales	Cantidad
Adhesivos	Laca comercial	2
	Espray Dimafix	4
	Cinta Kapton	1
Mantenimiento	Espátulas	9
	Grasa de litio	2
	Toallitas (bolsa)	1
	Papel de cocina (rollo)	1
	Cuchillas afiladas (paquete)	1
Calibración	Hojas de papel (paquete)	1
	Regla o cinta métrica	1

4.1.5 Estanterías

Debido a la gran cantidad de materiales que se debe almacenar para asegurar el correcto funcionamiento del laboratorio, es una buena práctica la adquisición de estanterías y cajoneras que nos permitan organizarlos. Las estanterías servirán para alojar al conjunto de materiales y equipos auxiliares, mientras que las cajoneras permitirán hacer una clasificación de estos. Será de gran utilidad, también, disponer de un carro para transportar los objetos más pesados.

Tabla 8: Equipos de almacenamiento. Fuente: Elaboración propia.

Material	Dimensiones ¹ (mm)	Cantidad
Estantería repuestos	1900 x 1130 x 800	1
Estantería bobinas	1700 x 1260 x 600	1
Cajonera de tornillería	190 x 358 x 175	9
Gaveta grande	158 x 197 x 290	8
Gaveta pequeña	130 x 148 x 210	11
Caja de herramientas	130 x 165 x 310	6
Carro de plataforma	860 x 900 x 600	1

¹ Las dimensiones se indican según el formato [altura x anchura x profundidad].

En nuestro laboratorio contaremos con una estantería con gavetas para las piezas, una estantería con baldas para las bobinas, una cajonera con gavetas para la tornillería, una serie de cajas de herramientas y un carro de plataforma. Las dimensiones y cantidades de cada uno de estos equipos los tenemos detallados en la tabla 8.

Con objeto de hacer una clasificación intuitiva y organizada, hemos considerado hacer una separación entre componentes de las impresoras, materiales de impresión y herramientas y materiales de preparación. Los componentes de las impresoras los dividiremos, a su vez, según se trate de elementos mecánicos, electrónicos o eléctricos. Estos componentes irán alojados en la estantería – a excepción de la tornillería y ciertos elementos mecánicos – ocupando las gavetas correspondientes de acuerdo con la clasificación establecida. Por otro lado, la cajonera para la tornillería se colocará sobre una mesa en la que también estarán situadas las cajas de herramientas. Por su parte, las gavetas con los materiales de preparación irán alojadas en su propia mesa. El motivo de reservar dos mesas para estos equipos es que se trata de objetos de uso frecuente, por lo que es más cómodo acceder a ellos de esta manera.



Ilustración 33: Cajonera de tornillería, gaveta grande y caja de herramientas. Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, se reservará una estantería completa para el almacenaje de las bobinas de filamento. Las bobinas se organizarán en función del termoplástico que contengan y de la sección del filamento. Estos materiales, puesto que ocupan un gran espacio y deben ser repuestos tras varias horas de impresión, deberán tener un fácil acceso y una distribución adecuada.

4.1.6 Mesas y sillas

Para la colocación de cada uno de los equipos con los que trabajaremos podemos pensar en diferentes soluciones. En nuestro caso, hemos considerado el uso de varias mesas que puedan colocarse de la manera más conveniente para el desempeño de la actividad. Esto nos permitirá reorganizar la distribución si en un futuro lo estimamos oportuno.

En nuestro laboratorio contamos con un total de nueve mesas y nueve sillas. Las mesas tendrán unas dimensiones de 72 x 140 x 70 mm (altura x anchura x profundidad), mientras que las sillas tendrán un asiento de 43 x 39 mm y una altura total del respaldo de 77 mm.

Las mesas sirven de soporte al ordenador y los monitores, las impresoras, la cajonera de tornillería y el resto de los equipos. También, reservaremos una mesa para depositar las piezas que vayamos imprimiendo y otra para alojar los materiales de preparación y mantenimiento de las impresoras. Dejaremos una mesa libre a la que trasladaremos las impresoras averiadas para poder manipularlas más cómodamente en el proceso de reparación. Las sillas cumplen con la función de aportar comodidad y favorecer el correcto desarrollo de todas las actividades derivadas de la explotación del laboratorio.

4.2 Infraestructura

Una vez que ya hemos identificado los equipos que nos permitirán desarrollar la actividad del laboratorio, estamos en disposición de destinar un alojamiento adecuado a dicha actividad y dotarlo de las instalaciones correspondientes. Los requisitos que deberá cumplir un laboratorio de fabricación aditiva que emplea la tecnología de modelado por deposición fundida no son muy elevados; bastará con un local lo suficientemente espacioso para dar cabida a los equipos ya mencionados y que permita una distribución propicia de estos.

En este capítulo vamos a hacer una revisión de las características que tendrá nuestro local, mencionando los requisitos que debe cumplir. Analizaremos también las instalaciones que deberá incluir para poder albergar una actividad de este tipo. Por último, concluiremos indicando la distribución que hemos seleccionado para desarrollar la actividad, pero que podrá ser transformada y adaptada a las nuevas necesidades que puedan ir surgiendo.

4.2.1 Local

El local en el que desarrollaremos la actividad debe cumplir una serie de requisitos relacionados con la superficie y las condiciones de trabajo. Para establecer las características que debe tener nuestro local, deberemos considerar las condiciones generales de los centros de trabajo que incluye la Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo [37] (aprobada por la Orden de 9 de marzo de 1971).

El local que hemos seleccionado se encuentra en el Campus Miguel Delibes de la Universidad de Valladolid (Valladolid), en el Edificio UVAINNOVA. En concreto, se localiza en las dependencias del Grupo de Investigación Reconocido "INSISOC", situadas en la segunda planta del edificio. Estas dependencias cumplen con los requisitos de la Ordenanza de presentar una construcción segura y firme capaz de soportar las cargas de los equipos y trabajadores.

Las dimensiones del local deben ajustarse a las siguientes condiciones: [37]

- Tres metros de altura desde el piso al techo.
- Dos metros cuadrados de superficie por cada trabajador.
- Diez metros cúbicos por cada trabajador.

Para el cálculo de la superficie y volumen no se tendrán en cuenta los espacios ocupados por máquinas, aparatos, instalaciones y materiales. Las dimensiones de la planta de nuestro local las podemos observar en la figura 34. La superficie total con la que contamos es de $36,1873 \text{ m}^2$, a la que debemos restar la superficie ocupada por las nueve mesas, las nueve sillas y las estanterías. Una vez realizado el cálculo, el dato de superficie disponible es de $25,2573 \text{ m}^2$. En cuanto al volumen, inicialmente contamos con un volumen total de $108,5619 \text{ m}^3$ y, tras realizar el cálculo pertinente, el volumen libre del local asciende a $98,2637 \text{ m}^3$.

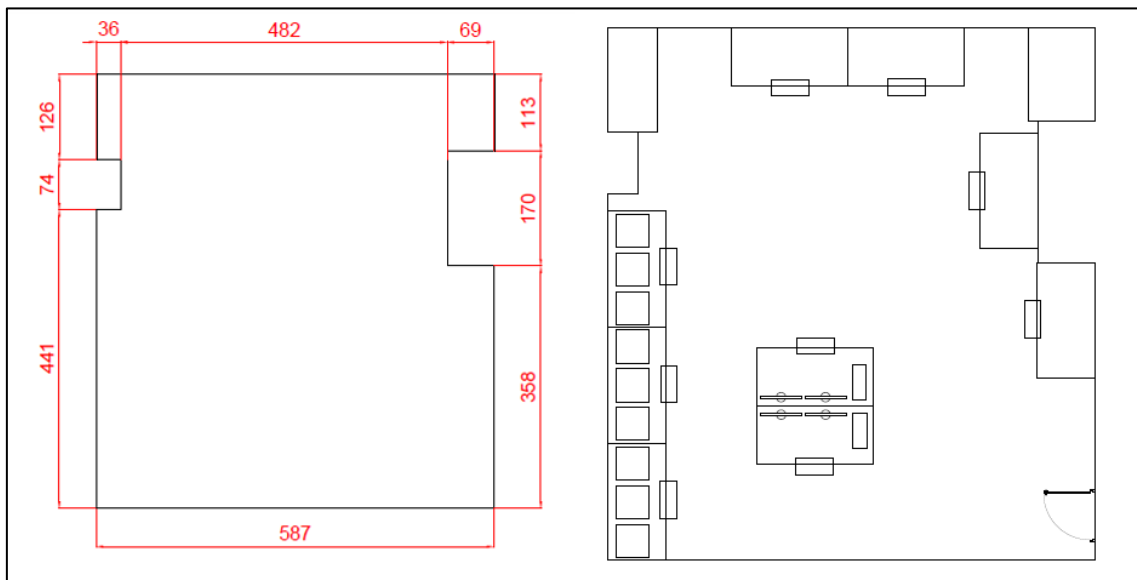


Ilustración 34: Planta del laboratorio de impresión 3D. Fuente: Elaboración propia.

La actividad desarrollada en nuestro laboratorio estará desempeñada por un total de dos trabajadores: un ingeniero y un técnico. Por lo tanto, las condiciones de la ordenanza relativas a volumen y superficie se cumplen sobradamente, puesto que existen más de dos metros cuadrados y más de diez metros cúbicos para cada trabajador. Además, existirá la posibilidad de ampliar el número de trabajadores en un futuro.

La iluminación del local será de tipo artificial, pues se encuentra situado en un ala interior del edificio. Esta iluminación se realizará a través de luminarias incorporadas en la estructura del techo. La iluminación será fija, por lo que no se producirán oscilaciones, y la distribución de las luminarias impide cualquier tipo de deslumbramiento. Además, la intensidad lumínica del establecimiento se encuentra dentro del intervalo que establece la Ordenanza [37] para el tipo de actividad que se realiza.

En cuanto a la ventilación, el local dispondrá de dos ventanas que permitirán el acceso de aire limpio en una cantidad superior a los 30 metros cúbicos por hora, según se establece en la Ordenanza. [37] Asimismo, contará con una instalación energética que permitirá mantener la temperatura de la estancia a un valor aceptable – no inferior a 15 grados – a través de dos radiadores regulables.

El reglamento establece también una normativa contra incendios que deberá cumplir nuestro local. En la Ordenanza se establece que “ningún puesto de trabajo fijo distará más de 25 metros de una puerta o ventana que pueda ser utilizada para la salida en caso de peligro”. [37] En el caso de las dependencias de INSISOC, en las que se incluye nuestro laboratorio, el recorrido desde el punto más alejado del laboratorio hasta la salida al pasillo es de 12,3 metros. Una vez en el pasillo, el resto de reglamentación contra incendios forma parte del diseño general del edificio. La Ordenanza establece también la necesidad de colocar medios de prevención y extinción de incendios en los sitios con mayor riesgo de incendio. En este caso, contaremos con un extintor portátil en el propio local del laboratorio.

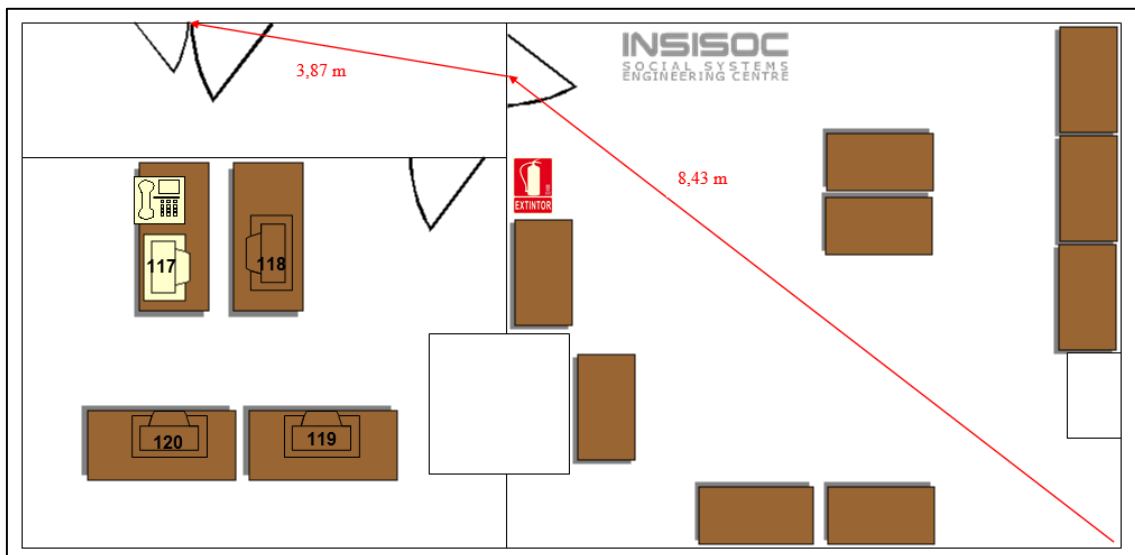


Ilustración 35: Plano de INSISOC de medidas contra incendios. Fuente: Elaboración propia.

4.2.2 Instalaciones

Las instalaciones mínimas que deberá incorporar un laboratorio en el que se desarrolla una actividad de este tipo son tres: instalación eléctrica, instalación de red informática e instalación de sistema de extracción.

La instalación eléctrica resulta fundamental para el desempeño de la actividad, puesto que las impresoras y los ordenadores requieren de una alimentación eléctrica para funcionar. Además, permite disponer de una iluminación artificial adecuada a través de luces de techo y, en el caso de que fuera recurrente, lámparas móviles. Dado que

nuestro local se localiza en el interior de un edificio, esta instalación se integra en la instalación eléctrica general de este.

En el laboratorio contamos con un total de ocho tomas de corriente distribuidas por pares en cuatro puntos como aparece indicado en la figura 36. Sin embargo, y puesto que necesitamos electricidad al menos para las impresoras y los ordenadores, incorporaremos en cada toma una regleta con seis conectores. Las regletas estarán unidas a la parte inferior de las mesas, de manera que el conexionado sea tal que permita una localización favorable de los cables para evitar accidentes.

La instalación de red se hace necesaria por el uso de los ordenadores. Si bien es cierto que para la operación directa de las impresoras no resulta imprescindible la conexión a internet, sí que es necesaria esta conexión para la descarga del software necesario para el proceso de impresión 3D. Además, disponer de acceso a internet resulta útil para la descarga de modelos de repositorios online, para buscar información acerca de la explotación adecuada de las impresoras o para la compra de componentes y equipos.

Dado que disponemos de dos equipos informáticos que pueden hacer uso de la conexión a internet, deberemos contar con al menos dos salidas de red. En nuestro laboratorio contamos con un total de ocho tomas de red distribuidas en cuatro puntos a lo largo de la sala, con la disposición indicada en la figura 36. Esta instalación, al igual que ocurre con la instalación eléctrica, se encuentra integrada en la instalación de red del edificio.

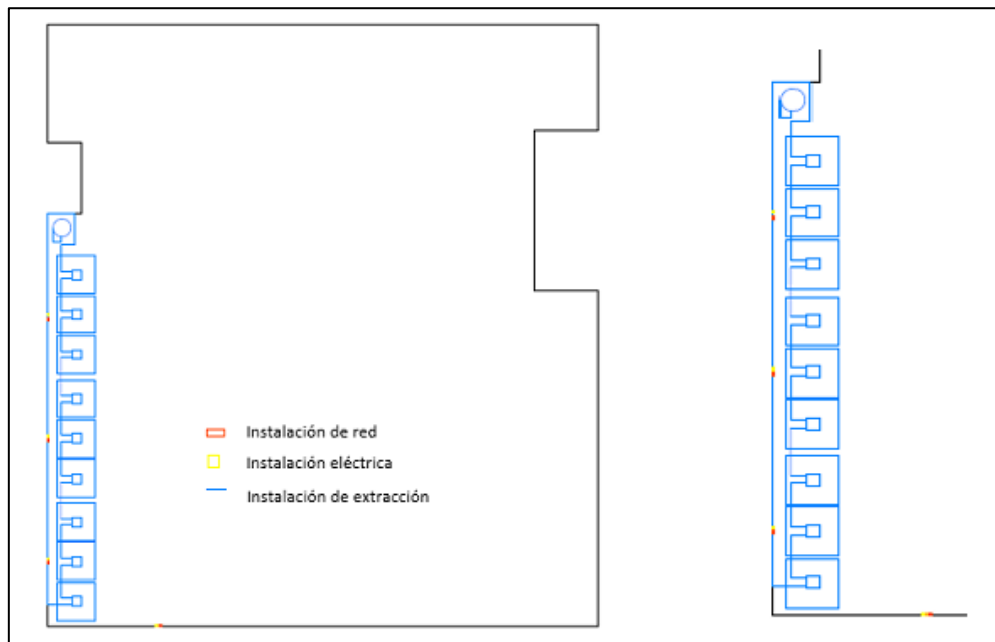


Ilustración 36: Instalaciones en planta. Fuente: Elaboración propia.

La necesidad de instalar un sistema de extracción deriva de la naturaleza de la tecnología de fabricación aditiva que se emplea; el modelado por deposición fundida. En este proceso, el material termoplástico es calentado hasta su temperatura de fusión antes de ser extruido. A esas temperaturas, los materiales pueden vaporizarse y condensar en

partículas minúsculas o emitir gases dañinos. De hecho, algunos de los materiales con los que trabajaremos como el ABS, el Nylon o el HIPS suspenden los tests de seguridad química, por lo que los gases que emiten se consideran tóxicos.

La Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo establece que las emanaciones de polvo, fibras, humos, gases, vapores o neblinas, desprendidos en locales de trabajo, serán extraídos, en lo posible, en su lugar de origen. [37] Si bien es cierto que algunas impresoras 3D operan en cámaras de vacío o incorporan sus propios sistemas de extracción, los modelos con los que nosotros trabajamos no disponen de ninguno de estos sistemas. Por ello, será un requisito la instalación de un sistema de extracción que permita evacuar los gases emitidos durante la impresión.

La instalación que implantaremos en nuestro laboratorio consistirá en una serie de rejillas comunicadas mediante un conducto hasta un extractor, el cual tiene comunicación con el exterior. Las rejillas estarán situadas una sobre cada impresora – suponiendo un total de nueve – y los humos generados durante la impresión subirán por estos conductos gracias a la acción del extractor, que finalmente los enviará al exterior. Los conductos estarán fijados a la pared, de manera que se libere el mayor espacio útil posible. Podemos observar el esquema del sistema de extracción en la figura 37.

El extractor es un ventilador de tipo turbina centrífuga con caudal de hasta 1000 m³/h y una velocidad del motor de 1000 rpm. Las dimensiones de elemento son 393 de altura x 308 de anchura x 306 de profundidad (mm). Las rejillas de extracción son rejillas convencionales con unas dimensiones de 40 x 40 mm, y están unidas a un conducto vertical de 45 mm de alto.

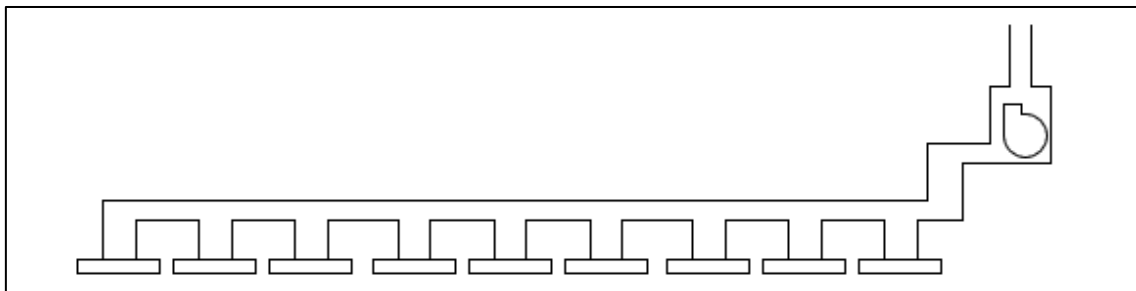


Ilustración 37: Sistema de extracción del laboratorio de impresión 3D. Fuente: Elaboración propia.

4.2.3 Layout

La adquisición de los equipos necesarios y el acondicionamiento de un local adaptado a la actividad no son suficientes para asegurar el funcionamiento óptimo del laboratorio. En este punto, es muy importante analizar cuál es la distribución que mejor se va a adaptar a nuestras necesidades en el proceso de explotación del laboratorio. Algunos requisitos importantes que hemos tenido en cuenta son: el acceso de los equipos a las

tomas de corriente, el desplazamiento fluido por el espacio de trabajo, el contacto visual directo con las impresoras y la minimización de los desplazamientos.

La distribución que nosotros hemos seleccionado para el laboratorio es la que podemos apreciar en la figura 38. Como se puede observar, hemos decidido basar el layout en la geometría de la planta del local, teniendo en cuenta la necesidad de las conexiones eléctricas y de red, y la instalación de extractores. Además, hemos estimado oportuno liberar el mayor espacio posible en el centro de la estancia para permitir un movimiento cómodo por toda la superficie.

Hemos colocado las impresoras en la pared oeste del laboratorio y las hemos decidido agrupar para facilitar la instalación del sistema de extracción y para concentrar la actividad en un mismo lugar. Esto, además, nos permite mantener un contacto visual directo con las impresoras, que resultará fundamental para advertir posibles anomalías durante el proceso de fabricación. Las nueve impresoras irán colocadas de manera homogénea en tres de las mesas; tres en cada mesa.

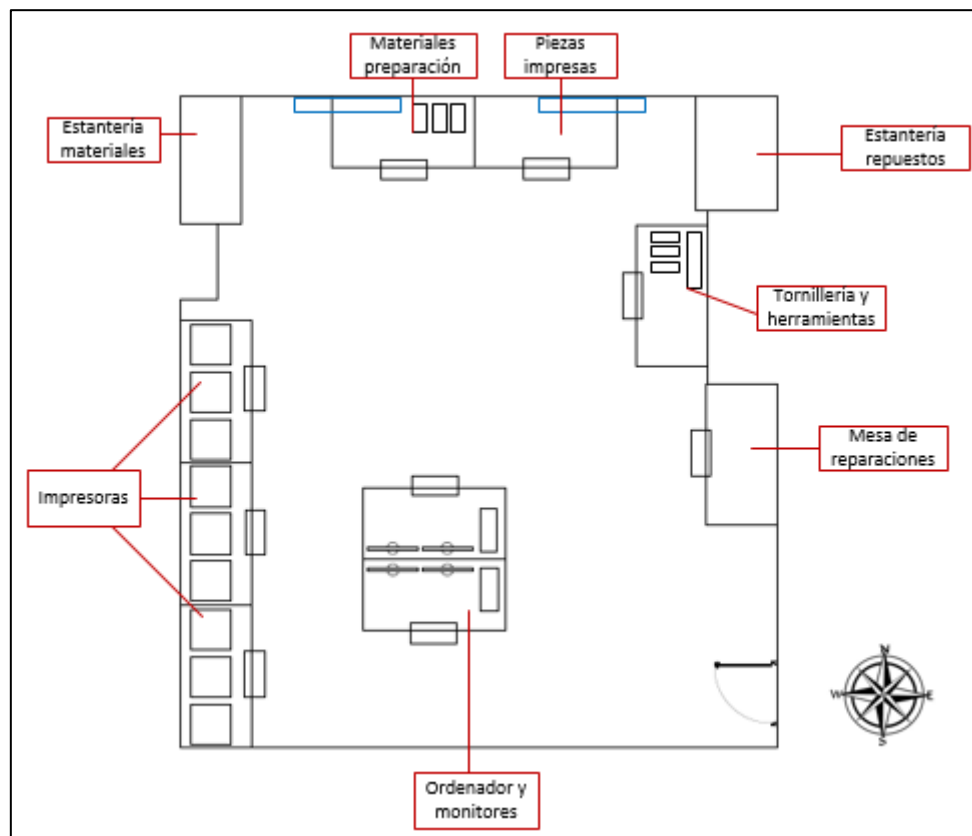


Ilustración 38: Layout del laboratorio de impresión 3D. Fuente: Elaboración propia.

Junto a la pared situada al norte del local irán situadas las estanterías de las que disponemos y dos de las mesas. El hecho de colocar las estanterías en cada una de las esquinas atiende a razones de aprovechamiento del espacio que resta entre los salientes de ambas paredes laterales y la pared septentrional. Puesto que el cambio de filamento es una tarea más frecuente que el montaje de repuestos, almacenaremos las bobinas

en la estantería más próxima a las impresoras. Las mesas, por su parte, tendrán finalidades definidas: en una colocaremos los materiales de preparación de las impresoras y del proceso de impresión en sus gavetas correspondientes, mientras que utilizaremos la otra para depositar las piezas que hayamos fabricado. Esto último nos permitirá examinar las piezas elaboradas y aplicar tratamientos de post-procesado.

En el ala este del laboratorio colocaremos otras dos mesas, que también tendrán sus propias funcionalidades. Una de ellas nos servirá para situar las cajas de herramientas y la cajonera de tornillería, compuesta por varios cajones que a su vez contienen pequeñas gavetas donde se introducen los materiales. Localizaremos aquí también el escáner 3D del que disponemos. La segunda mesa estará inicialmente liberada de equipos y la destinaremos para trasladar las impresoras que requieran de la revisión y/o sustitución de alguno de sus elementos por avería o comportamiento anómalo.

Las dos mesas restantes irán colocadas en el centro-este de la sala. Su función será la de alojar los dos PCs junto con los cuatro monitores de los que disponemos. Estas mesas deberán tener cierta proximidad a las que albergan a las impresoras, puesto que en caso de realizar la conexión directa impresora-PC a través del cable USB nos encontraremos con una limitación espacial.

Tras la primera distribución de los equipos del laboratorio, la apariencia que presenta el local se aprecia en la figura 39. En este momento restaría por acometer la instalación del sistema de extracción y el aprovisionamiento de las estanterías.



Ilustración 39: Apariencia inicial del laboratorio. Fuente: Elaboración propia.

Capítulo 5

Documentación técnica de las impresoras

5 DOCUMENTACIÓN TÉCNICA DE LAS IMPRESORAS

Las impresoras con las que vamos a trabajar en nuestro laboratorio de impresión 3D están elaboradas por la empresa vallisoletana de servicios de fabricación aditiva DIMA 3D S.L. De entre los productos que ofrece, el modelo con el trabajaremos es el DIMA LT; una impresora de escritorio dirigida a profesionales, particulares y pequeñas empresas.

En este capítulo vamos a tratar las características particulares de una impresora de este tipo, centrándonos en sus propiedades de impresión. También, haremos una revisión de sus componentes y de su proceso de montaje. La información expuesta en este capítulo nos debe colocar en la posición idónea para el desarrollo de la actividad del laboratorio, que no es otra que la operación de las impresoras 3D. Un profundo conocimiento de la máquina con la que trabajamos nos ayudará a comprender su comportamiento, con lo que podremos optimizar su uso y detectar posibles anomalías en su funcionamiento.

5.1 Características

La impresora DIMA LT es una evolución del modelo Prusa i3 Steel, o simplemente P3Steel, un modelo de arquitectura abierta cuyas características y montaje están difundidos por la plataforma RepRap y pueden encontrarse en su propia web. La P3Steel es un modelo desarrollado en 2013, y se trata de una remezcla de la versión que Twelvepro, una empresa especializada en fabricación aditiva, ha hecho del anterior modelo Prusa i3 de código abierto. [38] La principal característica que añade la P3Steel es que el chasis está configurado completamente en acero, lo que hace más robusta a la estructura y posibilita el uso de materiales con parámetros de impresión más críticos. Además, se eliminan las oscilaciones de modelos anteriores con el chasis más ligero, los soportes son más resistentes y se elimina la necesidad de un gran número de piezas impresas.

La DIMA LT incorpora a su vez notables mejoras sobre el modelo P3Steel inspirados a partir de otros diseños de arquitectura abierta del mercado. Se han añadido piezas exclusivas que han sido específicamente concebidas para otorgar tanto una mayor facilidad de montaje como una serie de funcionalidades adicionales. El objetivo de la DIMA LT es ofrecer una mayor calidad final de acabado y ampliar la variedad de materiales que pueden ser utilizados para el proceso de impresión. [39]



Ilustración 40: Impresora DIMA LT. Fuente: DIMA 3D. Ref: [39]

Mejoras de la Dima LT

La principal funcionalidad de la DIMA LT es que está pensada bajo la premisa *plug and play* (“enchufar y usar”). Esto significa que no hace falta nivelar los ejes cada vez que se imprima, como ocurre en modelos más básicos. Para ello, incorpora un sistema de tuercas autoblocantes en la plataforma de fabricación que sustituye al sistema más habitual de tornillos y muelles. [40] En este caso, será suficiente con realizar una primera nivelación tras su montaje actuando sobre las tuercas que, por su carácter autoblocante, no deberían volver a variar su posición. Esto facilita y agiliza enormemente el proceso de impresión.

Otro elemento característico de la DIMA LT es la incorporación de un sistema de husillos y tuercas trapezoidales como elemento de posicionamiento del eje Z. Este sistema permite una precisión bastante mayor que la conseguida mediante las varillas roscadas habituales en otros modelos. De hecho, el empleo de husillos es el método más habitual de posicionar elementos móviles en máquinas de control numérico que requieran de una alta fiabilidad y precisión. El sistema de desplazamiento vertical se ayuda, además, de un sistema lineal de guiado mediante barras lisas cromadas y rectificadas de alta calidad, que también está presente en los otros dos ejes.

Algunos componentes que cabe destacar de esta impresora son el fusor que incorpora de serie, el E3D v6, posiblemente el fusor tipo “*all metal*” – completamente metálico – más aclamado del mercado. También, incorpora una plancha calefactora de silicona adherida a una plataforma de aluminio sobre la que se fija el vidrio. Con ello, se permite

calentar la superficie de impresión con los beneficios que eso supone para el proceso de impresión.

Características y parámetros

La DIMA LT incorpora una fuente de alimentación que proporciona una tensión de hasta 12 voltios y una potencia máxima de 360 vatios. Las dimensiones externas de la máquina son de 40 x 40 x 50 centímetros, mientras que el volumen de impresión teórico alcanza los 20 x 20 x 20 cm. Este volumen se verá ligeramente reducido en la práctica puesto que la cama de impresión de la DIMA LT tiene los bordes redondeados. Podemos observar las características principales de la DIMA LT en la figura 41.

En cuanto a la electrónica, la impresora está controlada por una RAMPS sobre una placa Arduino y posee un controlador con pantalla LCD que dispone de un lector de tarjetas SD, aunque también incorpora una entrada USB para la comunicación directa con un ordenador. Para el movimiento de los ejes y del extrusor emplea un total de cinco motores Nema 17 de la empresa Wantai, que tienen un par de 4 kg·cm. Tanto la electrónica como la fuente de alimentación disponen de elementos protectores elaborados en plástico. La caja de la electrónica está equipada, además, con un ventilador para extraer el calor generado en su interior y prevenir así fallos y averías.

El hot-end está diseñado para admitir filamento de 3 milímetros, aunque algunos modelos de la DIMA LT emplean tubos conductores que permiten el uso de filamento de 1,75 mm. La boquilla del extrusor tiene un tamaño de 0,4 milímetros. Incorpora un sistema de cambio rápido de filamento y además dispone de un sistema de soporte de bobinas de filamento que se acopla al chasis. La temperatura máxima que puede alcanzar el extrusor asciende hasta 400 °C. La cama calefactada, por su parte, alcanza una temperatura máxima de 135 °C.

Tensión AC	110V/220V 50/60 Hz
Tensión DC de funcionamiento	12 V
Potencia máxima de consumo	360 W
Dimensiones externas	40 x 40 x 50 cm
Volumen de impresión	20 x 20 x 20 cm
Comunicación	USB, microSD Card
Archivos	STL, OBJ, AMF
Altura de capa	50-300 µm
Base calefactada	Sí
Plásticos de impresión	PLA, ABS, ABS PC, PE1100, PP, PVA, Nylon, otros composites

Ilustración 41: Características de la Dima LT. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

La resolución máxima a la que puede imprimir con garantías esta impresora es de 50 micras. Se trata de un elevado grado de precisión que logra alcanzar gracias al sistema

de husillos del eje Z. Por el contrario, la resolución mínima que ofrece es de 0,3 milímetros de grosor de capa, puesto que está limitado por la anchura de la boquilla del extrusor.

El volumen de impresión que ofrece una máquina de impresión 3D es uno de los parámetros de mayor consideración. Este volumen está condicionado por el sistema de ejes que emplea la impresora, al igual que ocurre con el resto de modelos de impresoras 3D.

Sistema de ejes

La Dima LT funciona como una máquina CNC de ejes cartesianos, es decir, una máquina capaz de mover una herramienta desplazándola linealmente en cualquiera de los tres ejes cartesianos X, Y, Z. La herramienta, en este caso, es el extrusor de la impresora. La configuración de la máquina corresponde a la conocida como (*X, Z head, Y bed*), puesto que el extrusor (*head*) puede desplazarse a lo largo de los ejes X y Z, mientras que la base de impresión (*bed*) se desplaza en el eje Y.

Cada uno de los conjuntos de piezas que se encargan de proporcionar el movimiento en un eje cartesiano determinado lo identificaremos utilizando precisamente el nombre de ese eje. Así, nuestra máquina cuenta con un Eje X, un Eje Y y un Eje Z.

El Eje X es el conjunto que se encarga de la transmisión del movimiento izquierda-derecha del carro del eje X, que es la pieza que va a soportar la herramienta de trabajo; el extrusor. El movimiento se realiza gracias a la fuerza ejercida por un motor y la transmisión mediante un sistema de polea-correa dentadas. Para el deslizamiento se utiliza un sistema de guiado mediante barras y rodamientos lineales.

El Eje Y se encarga de dotar de movimiento al otro componente móvil de la impresora; la cama de impresión. Al igual que el Eje X, utiliza un sistema de polea-correa para transmitir la fuerza generada por un motor y el deslizamiento se realiza mediante guías.

El Eje Z es el conjunto encargado de variar la altura del extrusor. En el caso de la DIMA LT, se desplaza todo el carro del eje X a lo largo del eje vertical. El sistema de movimiento que se emplea en este caso se basa en la utilización de husillos y tuercas trapezoidales. Estos husillos, situados uno a cada lado del eje X, reciben la fuerza de giro de sendos motores. El movimiento de ascenso-descenso se produce porque las tuercas tienen impedido el giro, por lo que se genera un empuje en la dirección vertical que hace que el carro se desplace. Para ayudar al desplazamiento se emplea un sistema de guiado mediante barras y rodamientos lineales igual al de los ejes X e Y.

5.2 Composición

Las impresoras DIMA LT emplean la tecnología de modelado por deposición fundida para la fabricación de objetos. Una impresora 3D que trabaja con esta tecnología tiene dos componentes básicos: el extrusor, que es el elemento que funde y deposita el material, y la base de impresión, que es la superficie plana en la que se apoya la pieza en construcción. El resto de elementos, como los motores, sistemas de transmisión, electrónica, sensores, etc. trabajan de forma coordinada para que el movimiento del cabezal del extrusor, la plataforma de impresión y el flujo de material generen la pieza deseada.

A un alto nivel, los componentes que forman la DIMA LT, y que podrían extrapolarse para la construcción de cualquier impresora de FDM, son siete: estructura de acero, soporte para bobinas de filamento, eje X, eje Y, eje Z, cama de impresión – calefactada o no – y extrusor.

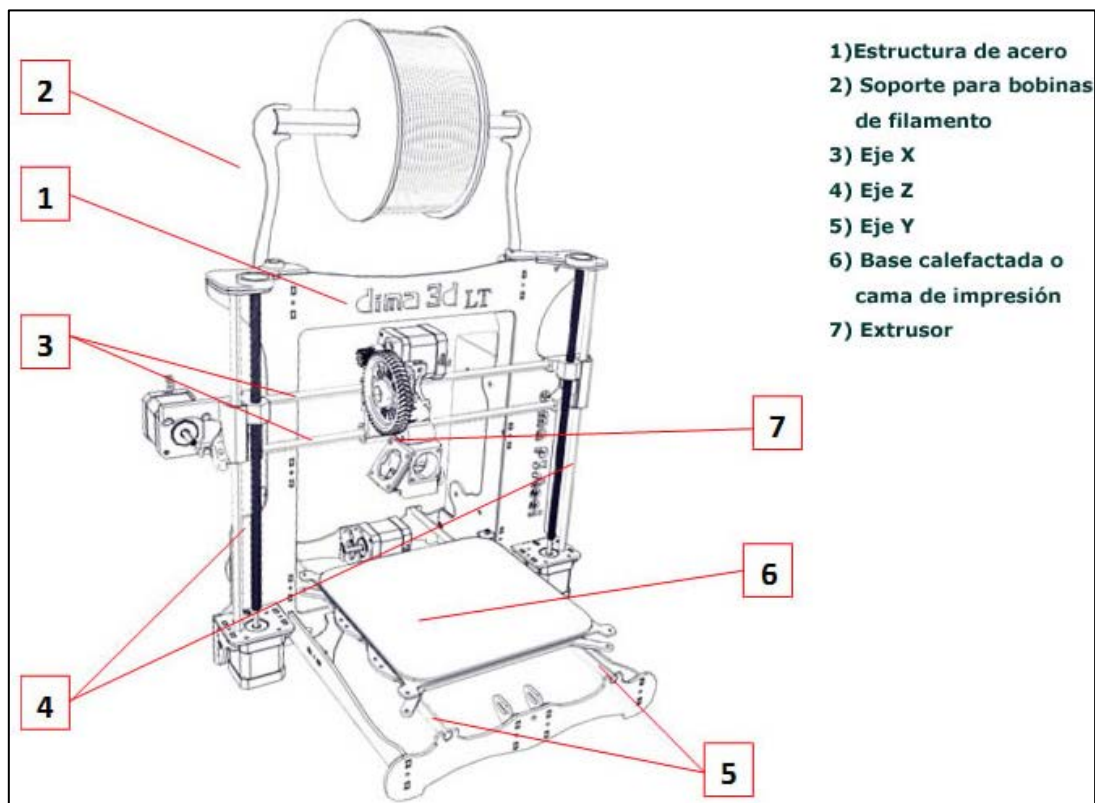


Ilustración 42: Partes de una DIMA LT. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Para analizar de manera detallada cada uno de los distintos componentes, haremos una división en elementos estructurales, mecánicos, eléctricos y electrónicos; y haremos una revisión exclusiva del extrusor y de las piezas impresas que incorpora nuestra impresora.

5.2.1 Elementos estructurales

Los componentes de la impresora se van a montar sobre una serie de elementos estructurales que, además de proporcionar soporte físico, deben aportar estabilidad y rigidez al conjunto de la impresora. Los materiales que se han empleado para elaborar estos elementos son el acero y el aluminio. Estos materiales son propios de modelos más profesionales y robustos, en los que se elaboran piezas específicas mediante corte láser. Las piezas estructurales que forman la DIMA LT son el chasis principal, el soporte de la base de impresión y la base de impresión, y los soportes para las bobinas de filamento. Estas piezas se forman, a su vez, de varios componentes que presentamos en la tabla 9.

Tabla 9: Relación de componentes estructurales. Fuente: Elaboración propia.

Piezas estructurales	Cantidad
Marco principal	1
Marco lateral derecho	1
Marco lateral izquierdo	1
Marco delantero	1
Marco trasero	1
Escuadra interior	2
Pieza tensor Y	2
Pieza motor Y	1
Soporte motor Z	2
Escuadra lateral motor Z	2
Soporte bobina	2
Soporte base de impresión	1
Base de aluminio	1

El chasis principal es el conjunto de elementos que otorgan soporte y rigidez a los elementos de los ejes X y Z. El chasis de la DIMA LT consta de varias piezas individuales de acero cortadas por láser que encajan unas con otros y que están apretadas mediante tornillos y tuercas. Se compone de un marco principal, dos marcos laterales y una serie de piezas que, por un lado, permiten la correcta alineación del ensamblaje – actúan como escuadras – y, por otro, actúan como soporte para los motores de los tres ejes. Esta estructura está pintada para evitar la corrosión del metal.

La estructura de la base de impresión va a constar de varios elementos. Por una parte, el soporte de la base de impresión, que es una pieza de acero que sirve para vincular la base de impresión con el sistema de transmisión y de guías del eje Y. Más en concreto, esta pieza se ancla a los rodamientos del eje Y. Sobre este soporte se coloca la base de impresión. La base de impresión es una plancha de aluminio que permite instalar en su parte inferior una placa calefactora. El aluminio permite una transmisión óptima de la

temperatura. Esta base de impresión se fija al soporte mediante tornillos y contratueras en un sistema que permite la nivelación de la cama de impresión.



Ilustración 43: Chasis principal y soporte de la base de impresión. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Finalmente, sobre la base de impresión va colocada una superficie de vidrio sobre la que se deposita el material. Aunque no es un requisito, el uso de estas superficies permite mejorar las características de impresión, ya que proporciona un mejor agarre de las piezas y una mayor calidad superficial. La placa de vidrio se fija a la base mediante pinzas de oficina, aunque este agarre puede modificarse y emplear en su lugar cinta Kapton adhesiva, tornillos u otros sistemas de fijación.

5.2.2 Elementos eléctricos

Los elementos eléctricos de una impresora 3D son aquellos que permiten realizar la conexión a la red eléctrica y proporcionar alimentación a los motores que mueven los ejes de la máquina, a los ventiladores, a los equipos calefactores del extrusor y de la cama de impresión, y a los equipos electrónicos de control. Los tres elementos eléctricos que forman parte de la DIMA LT son la fuente de alimentación, el conector de corriente junto con su cable de conexión y la plancha calefactora.

Tabla 10: Relación de componentes eléctricos. Fuente: Elaboración propia.

Componentes eléctricos	Cantidad
Fuente de alimentación 12 V	1
Conector AC	1
Cable de alimentación	1
Plancha calentadora	1

La fuente de alimentación es el dispositivo que convierte la corriente alterna (CA) procedente de la red eléctrica en energía continua (CC) de varios niveles de voltaje, siendo el mayor de ellos de 12 voltios. Sus conexiones constan de las entradas de CA y

una serie de salidas de CC identificadas según su nivel de voltaje. Los elementos alimentados se conectarán a una u otra salida según el voltaje de trabajo que requieran.

La conexión de la impresora a la red eléctrica no es directa. La DIMA LT incorpora un conector análogo al empleado en un PC, que actúa como dispositivo de seguridad y permite seguir manteniendo la estandarización de la conexión. Este conector incluye un interruptor de encendido/apagado para que no sea necesaria la desconexión directa del cable de corriente. Además, este elemento incluye también un fusible para proteger a los componentes eléctricos y electrónicos ante picos de corriente superiores a los valores máximos de trabajo de la máquina, ya que podrían deteriorarlos o estropearlos.

La plancha calefactora que incorpora la DIMA LT para posibilitar la utilización de ciertos plásticos es un dispositivo eléctrico que se basa en el uso de resistencias. En el caso de la placa de esta impresora, las resistencias van incorporadas y dispone de las fijaciones y los cableados de conexionado eléctrico necesarios. Este elemento requiere de un alto amperaje para operar, motivo por el cual se recurre al uso de un relé para que aporte ese incremento de corriente. El relé irá directamente conectado a una de las salidas de la fuente de alimentación, aunque su control se realizará a través de la RAMPS.



Ilustración 44: Fuente de alimentación y plancha calefactora. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

5.2.3 Elementos mecánicos

El grupo de los elementos mecánicos engloba a aquellos elementos implicados en la transmisión de la fuerza necesaria para mover las distintas partes móviles de la impresora. La generación de la fuerza será responsabilidad de los motores, que describiremos en detalle en el apartado de los elementos electrónicos, mientras que para la transmisión de las fuerzas se hace uso de una serie de componentes incluidos en la tabla 11. En este listado incluiremos también algunos componentes que nos son intrínsecamente mecánicos pero que complementan al resto de elementos de este tipo.

Tabla 11: Relación de componentes mecánicos. Fuente: Elaboración propia.

Piezas mecánicas	Tipo	Cantidad
Barras lisas	375 mm	2
	371 mm	2
	320 mm	2
Husillos	300 mm	2
Tuercas trapezoidales	-	2
Acopladores	-	2
Correa	GT2 80 cm	1
	GT2 65 cm	1
Polea	GT2 20 dientes	2
Rodamientos lineales	LM8UU	12
Rodamientos radiales	605zz	4
	608zz	6
Tornillo moleteado	-	1
Bridas	-	15
Cubrecables	70 cm	1
	25 cm	2
Pinzas de sujeción	-	4
Espejo base de impresión	-	1

El sistema de transmisión que utilizan los motores de los ejes X e Y emplea poleas y correas para transformar el par de rotación suministrado por el motor paso a paso en un movimiento lineal. Este mecanismo, conocido como de piñón-cremallera, permite desplazar los ejes linealmente (ver figura 46). La polea dentada es la actúa como piñón ya que va directamente conexas con el eje del motor. Por su parte, la correa dentada hace las veces de cremallera puesto que va encajada en la polea y permite transmitir el movimiento en la dirección determinada por el sentido de giro del motor. Para cerrar el sistema, se emplea como elemento conductor del movimiento un rodamiento radial, que va colocado al otro lado del eje, sobre el que desliza la correa.

Las poleas dentadas que se emplean en ambos ejes son del mismo tipo. Su unión con el eje del motor se realiza mediante tornillos prisioneros. Las correas, en cambio, tienen un tamaño para cada eje. El encaje de las correas debe ser tal que no exista ningún tipo de holgura entre estas y el resto de elementos del mecanismo. Para realizar este encaje, cada eje tiene unas piezas impresas específicas con ese objetivo. Además, cada eje incorpora una pieza destinada a regular la tensión de las correas para asegurar la correcta transmisión del movimiento. Esta operación se detalla en la sección 6.2.1 (*Procedimientos de calibración*).

Con el fin de disminuir el efecto del rozamiento entre las distintas partes móviles de la impresora, se emplea un sistema de guiado en los tres ejes basado en el uso de barras lisas y rodamientos. Este sistema es muy habitual en los modelos tipo Prusa i3. El sistema

de “guiado por eje-rodamiento” está constituido por una barra de acero de alta calidad dimensional y superficial sobre la que deslizan varios rodamientos lineales. Los rodamientos se unen solidariamente al elemento que es necesario desplazar – en este caso el extrusor y la plataforma de impresión – mientras que las barras están fijadas al chasis. En cada eje se colocan dos barras paralelas para obligar a que el desplazamiento se produzca siempre en el mismo plano y no se produzcan giros laterales en torno al eje axial.

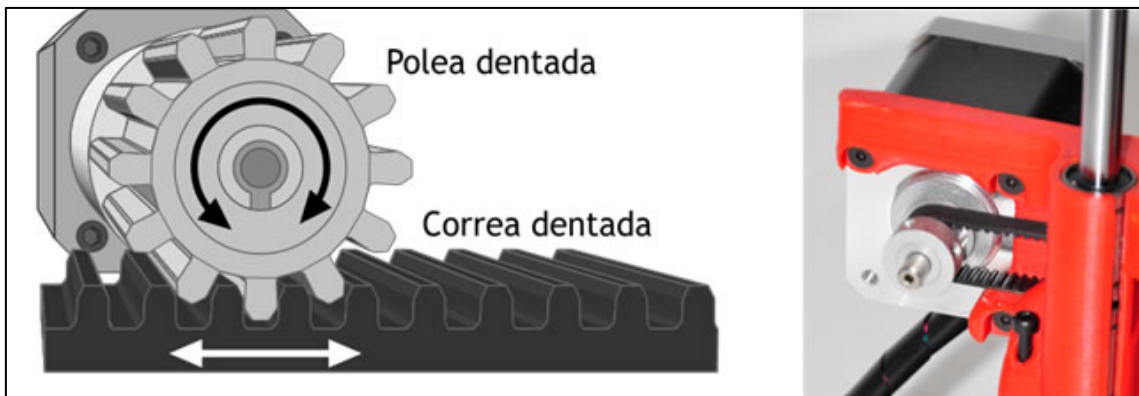


Ilustración 45: Sistema piñon-cremallera. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Los husillos se usan habitualmente en el campo de la máquina herramienta para implementar sistemas de transmisión que deban soportar grandes cargas y esfuerzos dinámicos. En las impresoras 3D tipo Prusa i3 este sistema se emplea para implementar el sistema de desplazamiento vertical del eje Z. Los husillos y tuercas que emplea la DIMA LT son de tipo trapezoidal. La tuerca se une solidariamente al elemento que va a ser desplazado – el carro del extrusor – mientras que el husillo está acoplado al motor. De manera análoga se coloca el sistema de guiado por eje-rodamiento del eje Z paralelamente a los husillos, como podemos ver en la figura 46. Al realizar el husillo un giro axial se produce un empuje lineal sobre la tuerca en la dirección vertical, ya que su giro está impedido. Este sistema permite un posicionamiento sencillo y muy preciso, aunque el coste es superior al de los sistemas que usan correas dentadas.

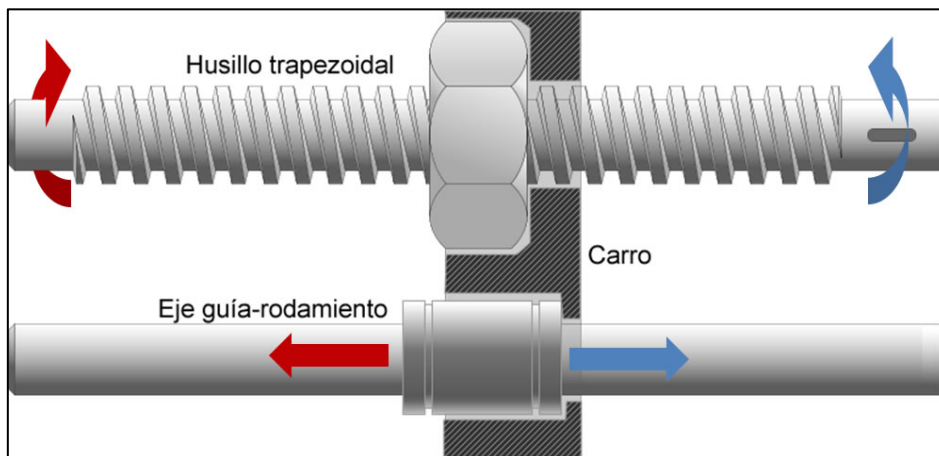


Ilustración 46: Sistemas de guiado eje-rodamiento y husillo-tuerca trapezoidal. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Los rodamientos radiales aparecen en la estructura de la máquina con la función de eliminar las fricciones entre ciertos elementos móviles. Los rodamientos de este tipo están diseñados para soportar esfuerzos en cualquier dirección normal a su eje central. Así, permiten suavizar el giro de los elementos rotatorios manteniendo la alineación de su eje y facilitar el deslizamiento lineal de ciertos elementos al apoyarse en su cara exterior. En la DIMA LT, la primera función la realizan estos rodamientos en el extremo superior de los husillos del eje Z, donde mantienen la verticalidad del husillo y favorecen su giro. La segunda función se presenta en los rodamientos conductores del movimiento de la correa o los que presionan al filamento en su deslizamiento hacia el extrusor. En ambos casos, los rodamientos se fijan por su parte interior mientras que en la parte exterior pueden girar libremente, eliminando así la fricción.

La función principal de los acopladores es unir al husillo y al motor de manera que ambos giren solidariamente. Sin embargo, una segunda función que realizan es la de absorber las imprecisiones derivadas de la falta de alineamiento entre el motor y el husillo. Aunque en teoría los ejes de ambos elementos deberían estar alineados, en la práctica existen pequeñas desviaciones. Para corregirlo, los acopladores presentan una parte laminada que les permite deformarse de forma controlada y reducir el estrés causado por las desviaciones. Esto permite prevenir averías e incluso roturas de los componentes.

El tornillo moleteado es un tornillo parcialmente roscado y con una zona dentada en su mitad. Va incrustado en el eje del engranaje principal – en el cuerpo del extrusor – y su función es la de arrastrar al filamento a través del hot-end gracias a su zona dentada. Los dientes del tornillo se clavan en el filamento y gracias al giro de este y a la presión ejercida por un rodamiento radial contrapuesto, el filamento es empujado hasta la boquilla de extrusión.

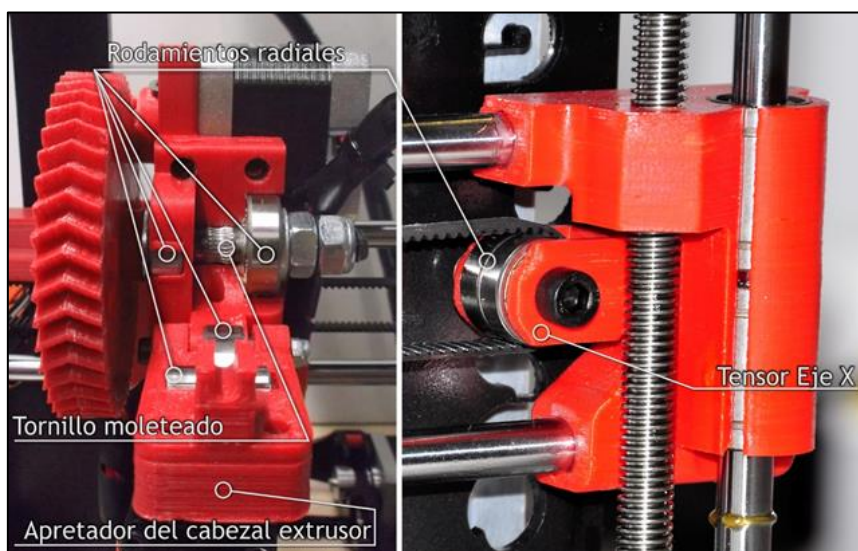


Ilustración 47: Rodamientos radiales y tornillo moleteado. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Las bridas y los cubrecables en la DIMA LT sirven para agrupar los cables de manera organizada y recogida, y los protegen del resto de elementos. El espejo de la base de impresión es la superficie sobre la que va a depositarse la pieza y las pinzas de sujeción sirven para fijarlo al soporte de la base de impresión.

5.2.4 Elementos electrónicos

Los elementos electrónicos son los encargados de gestionar y controlar el funcionamiento de los equipos eléctricos a partir de las órdenes de control que reciben. Estas órdenes proceden del G-code que le envía el ordenador a la impresora, que ha sido generado por el software en el proceso de laminación. La evolución de este proceso de control depende de las señales de estado que recibe la placa controladora por parte de los sensores que incorpora la máquina (térmicos y finales de carrera). Los conjuntos electrónicos de la impresora son los motores, el sistema de control, los ventiladores y los equipos calefactores. En la tabla 12 observamos en detalle la relación de todos los dispositivos de tipo electrónico.

Tabla 12: Relación de componentes electrónicos. Fuente: Elaboración propia.

Componentes electrónicos	Cantidad
Placa Arduino Mega 2560	1
Placa RAMPS	1
Drivers de potencia	4
Motores NEMA 17	5
Finales de carrera	3
Relé	1
Cable USB	9
Hot-end E3D v6	1
Ventilador para la electrónica	1

En una máquina de CNC, el microcontrolador es el encargado de hacer que la impresora ejecute los diferentes movimientos mecánicos mediante señales eléctricas. En la DIMA LT – al igual que en la gran mayoría de las impresoras 3D – este microcontrolador está incorporado en una placa Arduino. Esta placa electrónica está orientada a la creación de proyectos de hardware libre y su función es la de traducir las órdenes de control que recibe. En función de las órdenes de control recibidas, el microcontrolador genera señales digitales en sus puertos de salida que permiten controlar los distintos componentes electrónicos (motores, actuadores, etc.). Del mismo modo, el microcontrolador recibe señales digitales o analógicas procedentes de los distintos sensores, las cuales procesa e interpreta, y actúa en consecuencia.



Ilustración 48: Placa Arduino Mega 2560 y RAMPS. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Una placa Arduino presenta ciertas limitaciones para su aplicación en el control de una impresora 3D: su rango de voltaje de trabajo oscila entre 3V y 5V, y no tiene opciones de conexionado específicas para los dispositivos de la impresora (es una placa genérica). Para superar estos inconvenientes se desarrollan “*shields*”, que son placas electrónicas que se conectan sobre la Arduino y la dotan de opciones más específicas. En el área de las impresoras 3D RepRap se ha desarrollado un *shield* conocido como RAMPS (*RepRap Arduino Mega Pololu Shield*), que permite trabajar con voltajes mayores y añadir expansiones. La DIMA LT incorpora este *shield* y utiliza estos voltajes mayores para el control de los motores y del relé de la cama calefactada, y se aprovecha de las expansiones para incorporar un lector de tarjetas SD, una pantalla LCD y una botonera de control.

La RAMPS carece de controladores propios, pero permite instalar una serie de drivers. Los drivers son pequeños controladores concebidos específicamente para el control de motores paso a paso. La función de los drivers es recibir las órdenes desde la placa Arduino y transformarlas en señales con la forma y el voltaje adecuados para enviarlas a los motores.



Ilustración 49: Juego de motores Nema 17 de una impresora DIMA LT. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Los motores que se emplean de manera general en impresión 3D son los de tipo paso a paso bipolares. Estos motores se pueden controlar directamente a partir de la señal eléctrica que reciben sin necesidad de una electrónica adicional, lo cual facilita en gran medida este proceso. Además, permiten grandes velocidades de giro y un

posicionamiento muy preciso. El movimiento de estos motores se realiza debido al cambio de polaridad que sufren las bobinas que tienen en su interior al recibir una señal eléctrica. Este movimiento se realiza por pasos, siendo un motor más preciso cuanto menor sea el ángulo de cada paso que es capaz de realizar. La DIMA LT incorpora un total de 5 motores: uno en el eje X, uno en el eje Y, uno en el extrusor y dos en el eje Z.

Algunas partes de la impresora requieren de un voltaje o potencia mayor que el que puede suministrar la electrónica de la máquina directamente, como es el caso de la cama calefactada. Para dar solución a este problema, la DIMA LT incorpora un relé de hasta 10A. El relé va conectado directamente a la fuente de alimentación, pero su control se realiza desde la electrónica. Cuando recibe la señal correspondiente, abre el circuito que contiene en su interior y genera una corriente mayor que permite que la cama calefactada se caliente.

En cuanto a los sensores que incorpora la DIMA LT, que son los sensores habituales de una Prusa i3, encontramos los sensores de movimiento y los de temperatura. Para detectar cuándo cada uno de los ejes ha alcanzado su desplazamiento máximo, se incorporan tres finales de carrera – uno en cada eje – que al ser accionados envían esa información a la placa. Por otro lado, para controlar la temperatura del extrusor y de la cama de impresión se colocan sendos termistores. Estos dispositivos están compuestos por materiales que varían su resistencia eléctrica de forma muy acusada al variar la temperatura. Así, al detectar la placa una variación de la señal analógica del circuito que forma el termistor, esta puede conocer la temperatura a la que se encuentra el elemento.

El hot-end que incluye la DIMA LT es un modelo “*all metal*” del tipo E3D V6. Este componente, cuya función es la de calentar y extruir el filamento, está formado por una serie de elementos que analizaremos en detalle en la sección 5.2.6 (*Extrusor*).

5.2.5 Piezas impresas

Algunas piezas mecánicas, estructurales y ornamentales que componen la impresora necesitan de un diseño específico y, por sus características y su funcionalidad, pueden ser fabricadas por la propia impresora. Esto abarata notablemente los costes de fabricación y reparación, y posibilita la escalabilidad de la máquina. Las piezas que deban presentar buenas propiedades mecánicas estarán impresas en ABS, mientras que para las fundamentalmente decorativas bastará con utilizar PLA. El conjunto de piezas impresas que incorpora la DIMA LT se presenta en la tabla 13, en la que se hace una división según el conjunto funcional al que pertenezcan.

Tabla 13: Relación de piezas impresas. Fuente: Elaboración propia.

Piezas impresas		Cantidad
Eje X	Carro del Eje X	1
	Pieza lateral izquierda	1
	Pieza lateral derecha	1
	Tensor de la correa del Eje X	1
Eje Y	Cubrebarras del Eje Y	3
	Pieza final de carrera del Eje Y	1
	Tensor de la correa del Eje Y	1
	Piezas de sujeción de la correa	4
Eje Z	Tapa superior izquierda	1
	Tapa superior derecha	1
	Pieza final de carrera del Eje Z	1
Extrusor	Cuerpo del extrusor	1
	Apretador de filamento	1
	Engranaje grande	1
	Engranaje pequeño	1
Electricidad	Tapa de la fuente de alimentación	1
Electrónica	Caja para la electrónica	1

El eje X consta de cuatro piezas impresas. Las dos piezas laterales se encargan de acoplar las barras lisas del eje X y de alojar las tuercas trapezoidales de los husillos del eje Z. La pieza lateral izquierda, además, destina un soporte para albergar al sensor final de carrera del eje Z. La tercera pieza es el tensor de la correa del eje X y se acopla mediante un sistema tornillo-tuerca a la pieza lateral derecha. La última pieza corresponde al soporte del extrusor; esta pieza aloja los rodamientos lineales del eje X y permite encajar la correa de este.

El eje Y consta de nueve piezas impresas. Cuatro de estas piezas soportan las barras lisas del eje Y, siendo una de ellas la que alberga el final de carrera de este eje. Otra de las piezas es el tensor de la correa del eje Y, mientras que las cuatro restantes corresponden al sistema de sujeción de la correa que se ha diseñado para la DIMA LT.

Las piezas impresas que forman parte del eje Z son tres. Dos de ellas son las tapas superiores – izquierda y derecha – cuya función es la de alojar los rodamientos circulares donde encajarán los husillos y, también, hacer de tope para las barras lisas del eje Z. La pieza restante es la que incorpora en su interior el sensor final de carrera del eje Z.

El extrusor incluye un total de cuatro piezas impresas en su estructura. El cuerpo del extrusor es la pieza más grande y la que da soporte al resto de elementos. También está impreso el apretador de filamento, que se encajará mediante tornillos al cuerpo del extrusor. Los otros dos componentes impresos del extrusor son los engranajes que participan en el proceso de arrastre de filamento.

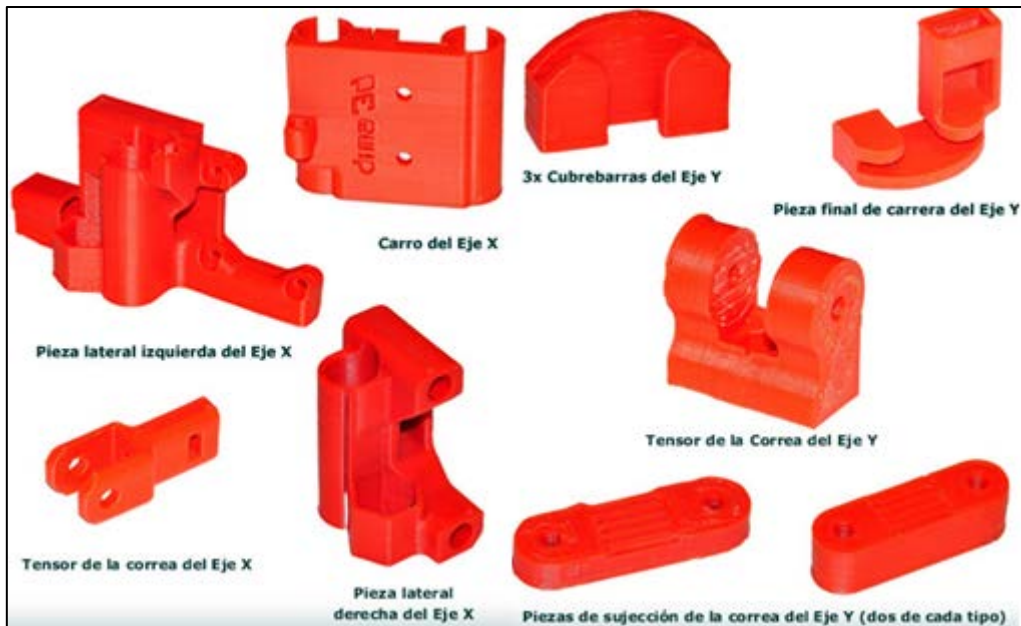


Ilustración 50: Piezas impresas de los ejes X e Y. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Por último, la DIMA LT incluye una tapa plástica para proteger las conexiones de la fuente de alimentación y una caja para cubrir toda la electrónica que servirá tanto para protegerla como para tenerla recogida.

5.2.6 Extrusor

El extrusor o hot-end es el conjunto de elementos mecánicos y electrónicos que permiten que el filamento se caliente hasta la temperatura de extrusión para poder llevar a cabo la fabricación de piezas. Es determinante que cada una de las piezas que lo componen tenga un comportamiento térmico adecuado para asegurar el correcto funcionamiento del conjunto. En el caso de la DIMA LT, el hot-end que se incorpora es del tipo E3D V6; un extrusor muy versátil y extendido. Los elementos que forman el extrusor son los seis que aparecen listados en la tabla 14.

Tabla 14: Relación de componentes del extrusor. Fuente: Elaboración propia.

Extrusor	Cantidad
Difusor	1
Nozzle	1
Heater block	1
Heatbreak	1
Ventilador del hot-end	1
Cartucho calefactor	1

El difusor o disipador de calor, elaborado en aluminio, se encuentra en la parte superior del extrusor y se encarga de eliminar el calor residual que procede desde la parte inferior de este para evitar que el filamento se funda antes de llegar a la boquilla de extrusión.

El calor se elimina gracias a las aletas del disipador, pero es habitual incorporar además un ventilador que contribuya con su flujo de aire a enfriar el filamento y mantener su estado sólido. El ventilador se incrusta en el difusor gracias a un soporte.

El *nozzle* o boquilla de extrusión se encuentra en la parte más inferior del extrusor. Es el elemento a través del cual se deposita el material fundido. Esta pieza suele estar hecha de latón y tiene un orificio calibrado – en el caso de la DIMA LT de 0,4 mm – por el que sale el material. El *nozzle* va roscado y puede cambiarse para posibilitar el uso de boquillas de distintos tamaños.

La boquilla de extrusión se inserta en un bloque de aluminio llamado *heater block*. Este elemento aloja a su vez el cartucho calefactor y el termistor que permite controlar la temperatura. El cartucho calefactor es el elemento calentador que va a permitir incrementar la temperatura del termoplástico para que pueda ser extruido. Se utiliza una resistencia de tipo cerámico que puede alcanzar hasta 400 °C y requiere de una potencia importante (del orden de 40W).

El *heatbreak* es el elemento intermedio que separa el *heater block* del disipador. Se trata de un tubo de acero con muescas roscadas cuya función es la de romper la transferencia de calor desde el bloque hacia los elementos superiores para evitar que el filamento funda antes de tiempo.

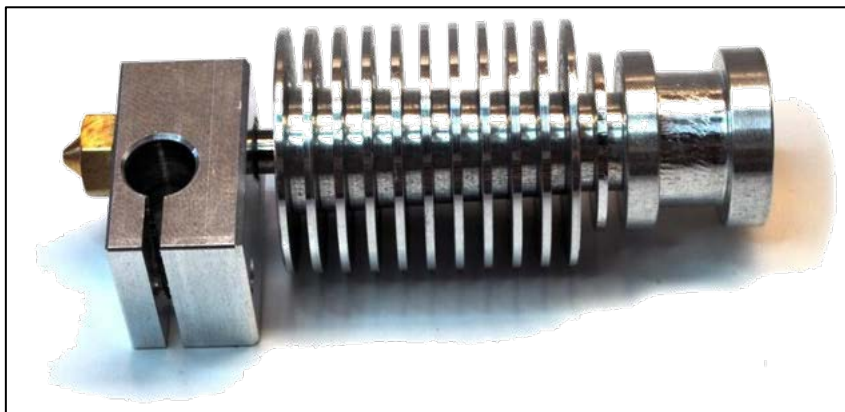


Ilustración 51: Hot-end E3D V6. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

5.3 Montaje

Las máquinas con las que vamos a operar en el laboratorio tienen cierta complejidad a nivel mecánico y electrónico, por lo que conocer su proceso de montaje nos va a permitir adquirir un profundo conocimiento sobre ellas. Esto nos puede resultar muy útil en las tareas de mantenimiento de las impresoras y para la reparación de los componentes que fallen. Además, conocer los distintos componentes y las funciones que realiza cada uno puede ayudarnos a identificar las averías que puedan surgir en el transcurso de la actividad.

En este capítulo trataremos el montaje de la impresora DIMA LT partiendo de la estructura metálica ya ensamblada y pintada. En primer lugar, haremos una revisión del montaje mecánico de los componentes, siguiendo el orden que nos facilite el trabajo en mayor medida. A continuación, nos centraremos en el montaje del hot-end y de los elementos calefactores, sensores y cables que incorpora la impresora. Por último, pasaremos a revisar el montaje de la electrónica y los dispositivos de alimentación en el orden correspondiente, con lo que el montaje de la máquina quedaría completo.

5.3.1 Montaje mecánico

Aunque la máquina puede comenzar a montarse de manera indiferente por cualquiera de sus tres ejes, el orden que sigamos podría facilitarnos operaciones futuras para las que necesitemos componentes ya ensamblados. Por ello, el orden que vamos a seguir en esta explicación es el que consideramos más ventajoso para el proceso de montaje: eje X, eje Y, eje Z y, por último, los elementos mecánicos del extrusor.

Eje X

El montaje del eje X incluye los elementos que van a permitir que la herramienta de la impresora se desplace a lo largo de dicho eje. Sin embargo, puesto que la función del eje Z es elevar el carro del eje X, algunas piezas montadas en este momento corresponderán al conjunto formado por ambos ejes.

Comenzaremos por la preparación del carro del eje X. En el interior de esta pieza impresa se deben insertar cuatro rodamientos lineales que permitirán el deslizamiento suave y sin holguras del carro por las guías. Asimismo, introducimos un rodamiento lineal en cada una de las dos piezas laterales del eje X. En este caso, los rodamientos se insertan en vertical, y servirán para que el carro se desplace por el eje Z. En sendas piezas laterales insertaremos también las tuercas trapezoidales que hacen juego con los husillos en el sistema de posicionamiento del eje Z que ya hemos descrito.

Una vez que tenemos preparado el carro y las piezas laterales del eje X, procedemos a su ensamblaje a través de las barras cromadas que hacen de guías en el sistema de guiado por eje-rodamiento. Hacemos pasar las barras por el interior de los rodamientos incrustados en el carro y las insertamos por ambos extremos en los orificios que tienen destinadas las piezas laterales para ello. De este modo, ya tenemos instalado el carro del eje X en sus guías como vemos en la figura 52.

Ahora realizamos el montaje de la pieza que actúa como tensor de la correa del eje X. Para montarla, debemos introducir un rodamiento circular en su interior y fijarlo mediante un tornillo y una tuerca autoblocante. Posteriormente, la insertamos en la pieza lateral derecha del carro gracias a un tornillo que apretaremos hasta lograr la presión necesaria.

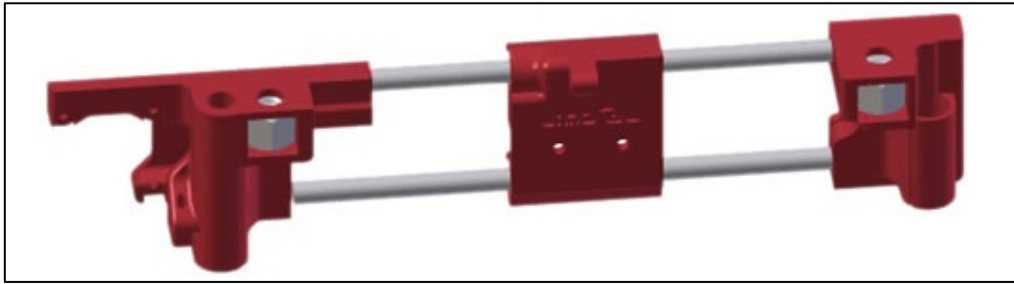


Ilustración 52: Carro, piezas laterales y guías del eje X. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Por último, debemos colocar el motor del eje X en el soporte que proporciona para ello la pieza lateral izquierda, a la que lo fijaremos mediante cuatro tornillos. Además, insertamos en el eje del motor la polea que deberá transmitir el giro a la correa y lo fijamos mediante dos tornillos prisioneros. En la pieza lateral izquierda debemos introducir también el tornillo que permitirá calibrar el eje Z, ya que es el que acciona el final de carrera de este.

Eje Y

El montaje del eje Y es independiente del de los otros dos ejes, pues en este caso el elemento que se debe desplazar es la base de impresión. No obstante, su montaje es análogo al del eje X puesto que deberemos montar las barras y el soporte de la cama, la pieza tensora de la correa, el motor y, finalmente, la propia correa.

En primer lugar, debemos colocar las barras en la estructura metálica de la impresora. Antes de su colocación, habrá que introducir dos rodamientos lineales en cada una, que servirán para desplazar la base. Para insertarlas existen unas muescas en el soporte de la base de impresión que permiten su encaje en ambos extremos. Además, colocaremos unos cubrebarras para asegurar su fijación, incorporando a uno de ellos un orificio para el alojamiento del sensor final de carrera del eje Y. En este momento podemos colocar ya el soporte de la base de impresión, que encaja por su diseño en los rodamientos, y lo unimos a ellos mediante bridas.

El siguiente paso es colocar la pieza tensor del eje Y. Esta pieza se inserta en el alojamiento que la estructura tiene diseñada para ello y se introducen en su interior dos rodamientos lineales, que forman parte del sistema de transmisión de la correa. Al otro lado del eje se coloca el resto de elementos del sistema transmisor: el motor del eje Y y la polea incrustada en su eje. Para ello, el motor dispone igualmente de un alojamiento en la estructura metálica, al que se unirá mediante tornillos.

Para completar el montaje del eje Y de manera que se permita ya el desplazamiento del soporte de la base de impresión, solo resta por colocar la correa. El procedimiento es el siguiente: hacemos pasar la correa por el rodamiento en un extremo y, por el otro, la encajamos en los dientes de la polea. Ahora, mediante el juego de piezas impresas que

se proporciona, fijamos la correa a la cara inferior del soporte de la base de impresión, asegurando que se encuentre estirada.

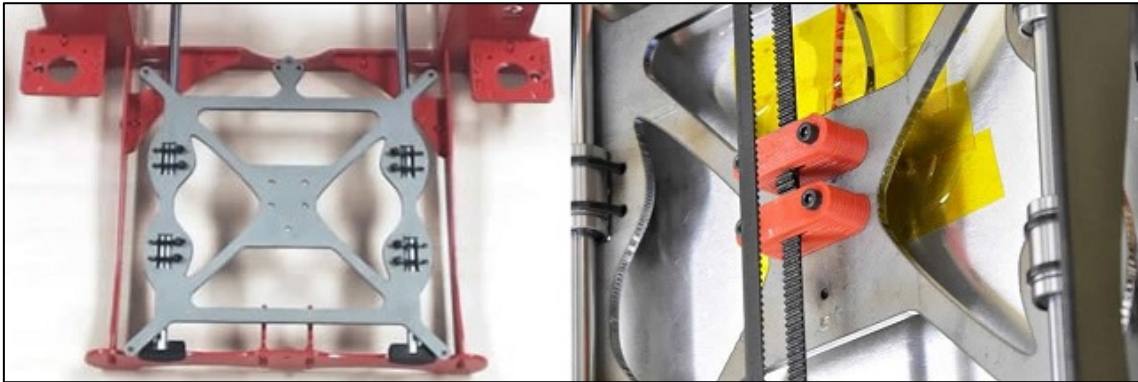


Ilustración 53: Soporte unido al sistema de guiado y sistema de fijación de la correa. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Eje Z

El conjunto de piezas que conforman el eje Z tiene como función dotar de desplazamiento al extrusor en sentido vertical, esto es, a lo largo de dicho eje. El montaje del eje Z incluye la colocación de los motores y del soporte del final de carrera, el montaje de las barras y los husillos, y en última instancia, la colocación de la correa del eje X para completar el sistema.

El eje Z es el único que consta de dos motores, que irán colocados en sendos soportes situados a cada uno de los lados de la estructura metálica. Los deberemos fijar mediante tornillos, colocando los cables orientados hacia la zona que alojará a la electrónica. En el soporte del motor izquierdo instalaremos, además, la pieza que contenga al sensor final de carrera del eje Z.

En este momento, estamos ya en disposición de colocar los elementos del sistema de posicionamiento y guiado del eje Z. Lo primero será incorporar los acopladores a los husillos a través de los tornillos prisioneros. A continuación, se hacen pasar los husillos por la estructura ensamblada del carro del eje X y, finalmente, se insertan en los rodamientos lineales colocados en las tapas superiores de la estructura metálica. Estas tapas será necesario fijarlas con tornillos a la propia estructura. Hacemos un procedimiento análogo para introducir las barras por los orificios del carro del eje X e insertarlas en las tapas superiores. Por último, encajamos los acopladores en los ejes de los motores por medio de tornillos prisioneros, de manera que husillos y motores giren solidariamente.

El último paso consiste en el montaje de la correa del eje X puesto que, con la colocación del resto de elementos de los ejes X y Z, permitirá ya el desplazamiento del extrusor a lo largo del eje X. Para su colocación, es necesario hacerla pasar por el rodamiento en un extremo y por la polea dentada en el otro e insertarlo en las ranuras de la pieza del carro del eje X. Con este paso, quedaría completado el montaje de los tres ejes.

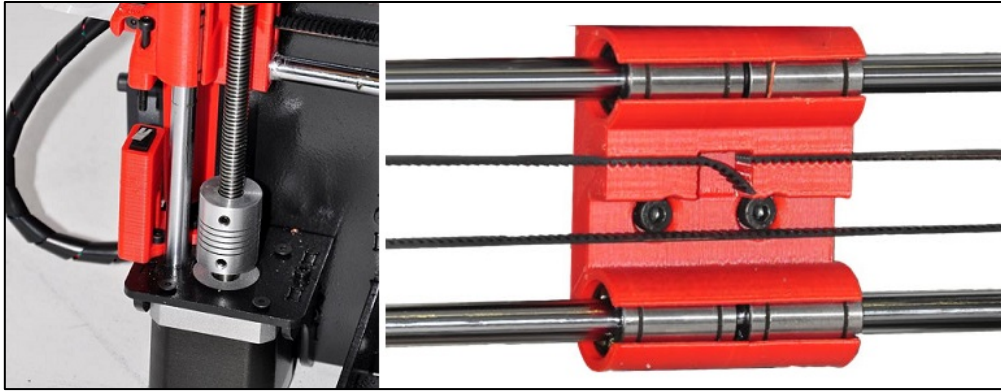


Ilustración 54: Motor izquierdo del eje Z y fijación de la correa del eje X. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Extrusor

El extrusor es la herramienta de la impresora que va a ser posicionada de manera relativa a la base por los tres ejes de la máquina. Aunque el término “extrusor” también se extiende al hot-end o mecanismo de extrusión propiamente dicho, en este apartado vamos a describir el montaje de los elementos estructurales que forman el cuerpo del extrusor y del sistema de alimentación de filamento. Será sobre estos elementos donde se acople posteriormente el hot-end.

El cuerpo del extrusor es una única pieza impresa que debe alojar tanto al motor como al resto de elementos encargados de hacer llegar el filamento a la boquilla de extrusión. Esta pieza se inserta en la pieza del carro del eje X a través de dos tornillos y sus respectivas tuercas. Además, se introduce un nuevo tornillo en la propia pieza cuerpo del extrusor para darle consistencia.

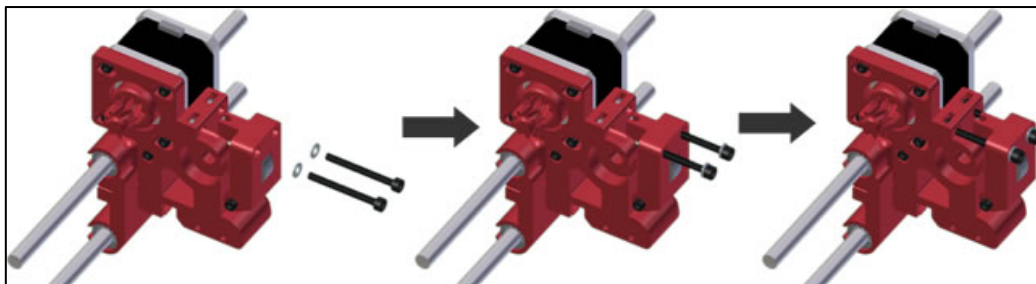


Ilustración 55: Fijación del apretador de filamento. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Pasamos ahora al montaje del sistema de alimentación de filamento del extrusor. Este proceso se divide en tres acciones separadas que concluirán con el ensamblaje completo. En primer lugar, debemos colocar el motor en el soporte que incluye el cuerpo del extrusor. Lo siguiente será insertar el rodamiento pequeño en su eje y anclarlo a través de un tornillo prisionero. Por otro lado, en el apretador de filamento insertamos un rodamiento circular. Por tercer y último lugar, insertamos el tornillo moleteado en el eje del engranaje grande y lo hacemos pasar por dos rodamientos que colocamos en los alojamientos del cuerpo del extrusor destinados a ello. En este momento, fijamos el apretador de filamento al cuerpo del extrusor mediante dos

tornillos. El único paso restante será atornillar la parte superior del apretador de filamento en la pieza cuerpo del extrusor, con lo que el sistema estaría listo para ejercer su función.

5.3.2 Montaje del hot-end, base de impresión, sensores y cables

En esta sección vamos a tratar el montaje de componentes que no son meramente estructurales ni electrónicos. Los conjuntos que se incluyen en esta clasificación son el hot-end del extrusor, la base calefactada de impresión y los finales de carrera de los tres ejes. Se trata, además, de elementos más delicados y con gran responsabilidad sobre el correcto funcionamiento de la máquina.

Hot-end

El hot-end es el elemento metálico del extrusor que va a calentar el termoplástico hasta la temperatura óptima para que pueda ser depositado a través de la boquilla con fluidez. El conjunto de elementos que lo forman se debe ir ensamblando de manera ordenada para garantizar su funcionamiento idóneo. En la figura 56 podemos observar los distintos componentes estructurales del hot-end con la distribución aproximada que tendrán.

El primer paso para ensamblar el hot-end es insertar el *nozzle* en la cara inferior del *heaterblock*, el cual roscaremos hasta dejar una ligera separación entre ambos. El siguiente paso es insertar también a rosca el *heatbreak* en la cara superior del *heaterblock*. En este caso lo roscaremos hasta hacer tope. Con el *heatbreak* ya colocado, ahora acoplamos el *heatsink* o disipador a este roscándolo hasta el final.

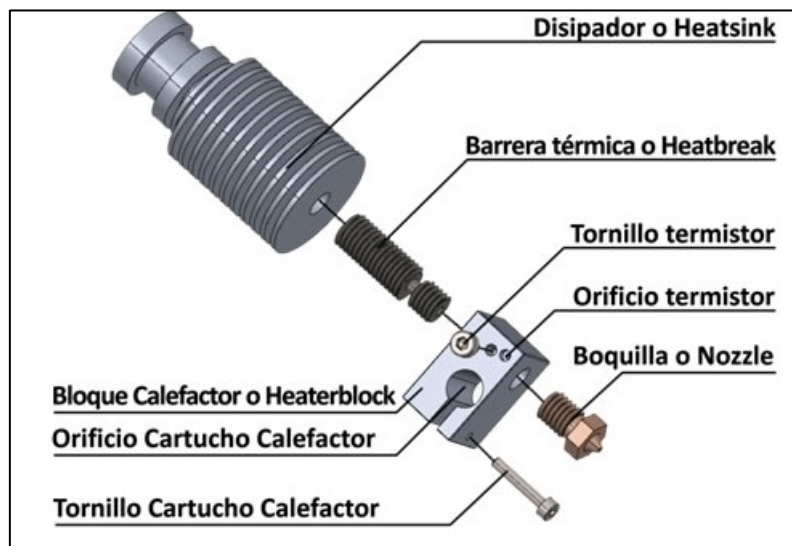


Ilustración 56: Elementos del hot-end. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Con este conjunto ya montado, es el momento de introducir el termistor por el orificio que el *heatbreak* tiene destinado para ello. Asegurándonos de que el termistor hace

contacto con el bloque calefactor, lo fijamos a este a para evitar que se pierda el contacto. Utilizaremos para ello un tornillo y una arandela. De manera similar, introducimos en el *heaterblock* el cartucho calefactor y lo fijamos mediante la inserción de un tornillo en un orificio contiguo al del cartucho.

Una vez que tenemos los dispositivos térmicos incorporados, resta por acoplar el ventilador al disipador. Primero debemos unir el ventilador a su propio soporte mediante cuatro tornillos. Después, encajamos aplicando una pequeña presión el soporte en el lateral del disipador. Con esto, queda completa la estructura del hot-end y ya podemos insertarla en el cuerpo del extrusor. Para ello, nos serviremos de dos tornillos que, tras pasar por sendos orificios del cuerpo del extrusor, se incrustan en los laterales del cabezal del *heatsink*.

Base de impresión

Como ya sabemos, la DIMA LT incorpora una base calefactada o cama caliente (*heat bed*) que le permite trabajar con materiales de difícil adhesión y con propensión al *warping*. Hasta ahora, tenemos montado el soporte de la base de impresión sobre la estructura de la impresora. Los elementos en los que nos centraremos ahora son los que formarán la propia cama y serán responsables de la generación y transmisión del calor.

Comenzaremos instalando el termistor de la cama. Tomamos el cable por el termistor e introducimos la bola en el orificio que incorpora la base de aluminio. Para fijar el cable a la base y evitar así que se mueva el termistor, lo adherimos mediante cinta Kapton a la parte inferior de esta. Este tipo de cinta será capaz de resistir las elevadas temperaturas que se alcanzarán en la zona. Una vez que el termistor ha sido instalado, colocamos la base de aluminio sobre el soporte.

La plancha calefactora irá colocada sobre la base de aluminio y será el elemento con el que haga contacto el termistor. Mediante cuatro juegos de un tornillo y tres tuercas autoblocantes fijaremos el conjunto plancha calefactora y base de aluminio al soporte de la base que ya teníamos instalado. El roscado de las tuercas permitirá nivelar la altura de la base de impresión, por lo que formará parte de las operaciones de calibrado de la impresora.

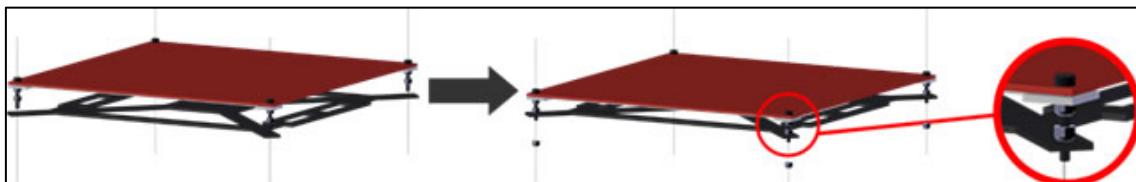


Ilustración 57: Sistema de sujeción de la base de impresión. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Por último, debemos colocar en la cara superior de la plancha calefactora la superficie sobre la cual van a depositarse las capas de las piezas. La DIMA LT incluye un espejo de cristal, aunque esta superficie puede sustituirse en el futuro. Nos serviremos de cuatro

pinzas metálicas de alta presión para fijar el vidrio al resto de la base; colocaremos dos en cada lateral opuesto. Este sistema nos permitirá retirar con rapidez la superficie de impresión para su limpieza o sustitución.

Finales de carrera

Los finales de carrera son elementos que pertenecen a la parte de la sensórica, puesto que se trata de sensores de contacto que se activan cuando un elemento físico los alcanza. La DIMA LT incorpora este sistema en los tres ejes para limitar el desplazamiento del cabezal y de la base de impresión. En este caso, el orden en el que los coloquemos no tendrá ningún efecto sobre el resto del montaje.

El final de carrera del eje Z debe insertarse en la pieza impresa situada junto a la barra cromada izquierda del sistema de guiado del propio eje Z. A esta pieza la hemos referido anteriormente como soporte del final de carrera del eje Z. A la hora de colocar el propio sensor, debemos asegurarnos de que la parte más elevada de la patilla queda orientada hacia la parte delante de la máquina.

En el eje Y, el soporte del final de carrera va incorporado en el cubrebarras trasero izquierdo. Insertamos el sensor y procuramos que la parte elevada de la patilla se oriente hacia la propia barra. Por último, el final de carrera del eje X se inserta directamente en la pieza lateral izquierda del eje X, que en su diseño ya incorpora un orificio destinado a tal fin. En este caso, al igual que ocurría con el sensor del eje Z, la patilla debe orientar su parte superior hacia la zona delantera de la máquina.

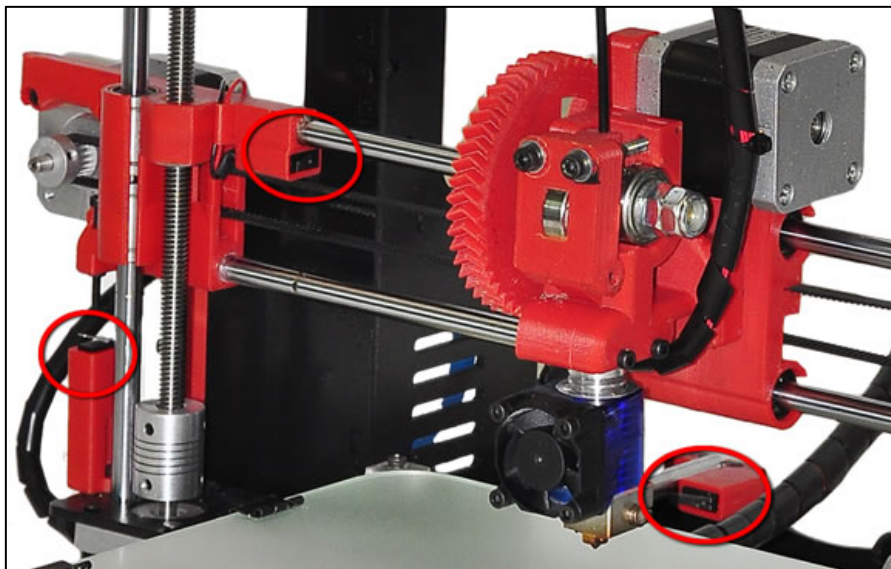


Ilustración 58: Finales de carrera de los ejes X, Y, Z. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

5.3.3 Montaje eléctrico/electrónico

En esta tercera división del montaje de la impresora DIMA LT trataremos la colocación de los elementos eléctricos y electrónicos, y su integración con el resto de los componentes de la máquina. Además, introduciremos el sistema de conexionado de los distintos componentes a las placas electrónicas y a la fuente de alimentación. La división que hacemos en la explicación es cronológica y, al mismo tiempo, agrupamos los componentes que tendrán relación directa en el funcionamiento de la impresora.

Sistema de alimentación eléctrica

Comenzaremos por el montaje y conexión de los componentes que proporcionan la alimentación eléctrica necesaria para el funcionamiento de la máquina. Este conjunto deberá incluir un conector de corriente y una fuente de alimentación que, posteriormente, será conexionada a los elementos que requieran de una potencia eléctrica para operar.

El conector de corriente que incorpora nuestra impresora incluye un fusible de protección. El primer paso será, por tanto, introducir el fusible en el portafusibles y este en el cuerpo del conector. Atornillamos la pieza a la estructura metálica y la instalación quedaría completa. Por otro lado, para la instalación de la fuente de alimentación en la estructura de la máquina bastará con anclarla mediante tres tornillos. El alojamiento previsto para este elemento es el hueco que existe en el lateral derecho de la parte trasera de la impresora. Una vez que esté instalada, debemos asegurarnos de seleccionar bien el voltaje con el trabajaremos – en nuestro caso 220V – y que la calibración de los voltajes de salida de la fuente está bien ajustada. Para ello, debemos girar un pequeño tornillo situado junto a luz testigo de encendido/apagado de la fuente.

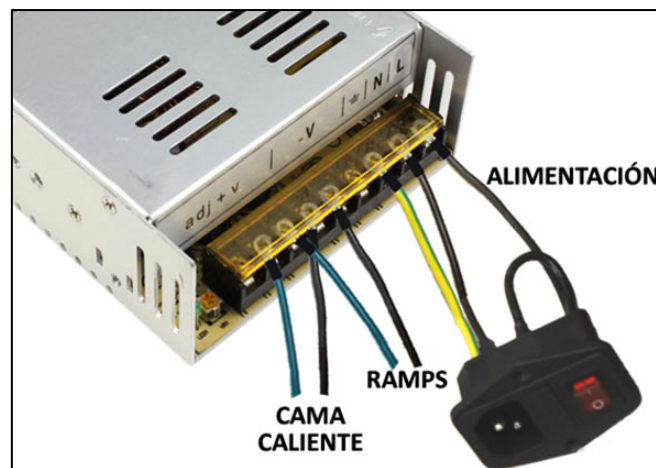


Ilustración 59: Conexiones de la fuente de alimentación. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Habiendo instalado ya la fuente alimentación en la estructura de la impresora, y asegurándonos de que está desconectada de la corriente, procedemos a realizar los conexiones. Comenzamos por las conexiones de la alimentación de entrada (CA): en

la letra L (*live*) irá el cable de fase, en la letra N (*neutral*) irá el cable de neutro y en el símbolo de tierra se conectará el cable de masa o tierra. Estos tres cables procederán del conector de corriente. En la zona de la regleta de los conexiones de salida, instalaremos los dos pares de cables que sirven para cerrar el circuito de alimentación de la cama caliente y de la RAMPS. Cada par de cables tendrá una conexión en la salida negativa y la otra en la positiva.

Placas electrónicas y LCD

Damos paso a la instalación de las placas electrónicas, los elementos más importantes de este tipo y hacia los que habrá que dirigir la mayor parte del cableado de la máquina. Como ya sabemos, la DIMA LT se sirve de una placa Arduino y del *shield* RAMPS para realizar el control electrónico. Además, gracias a una de las extensiones de la RAMPS, incorpora un controlador con pantalla LCD.

EL montaje del conjunto Arduino + RAMPS es bastante sencillo. Comenzaremos conectando ambas placas insertando los pines de la cara inferior de la RAMPS en los conectores de la cara superior de la Arduino. En el siguiente paso, introducimos los drivers en los conectores correspondientes de la RAMPS. Ahora, hacemos pasar tres tornillos por tres orificios coincidentes en ambas placas en sentido RAMPS a Arduino. Tras introducir unas arandelas hechas en ABS para separar las placas de la estructura metálica, insertamos los tornillos en el lateral trasero izquierdo de la estructura de la impresora y los roscamos. Ya tenemos las placas incorporadas al conjunto estructural de la máquina.

Puesto que nuestra impresora incorpora un controlador con pantalla LCD para facilitar las tareas de preparación y control, procedemos a su instalación. En primer lugar, fijamos la placa del controlador, que incluye la pantalla LCD, a las tapas posterior y anterior respectivamente mediante el uso de tornillos. Con el conjunto ya montado, conectamos los cables bus de comunicación a los conectores de la parte trasera de la placa. Por último, para insertar los otros extremos del cable de bus a la electrónica, insertamos primero en la RAMPS una extensión pensada para ello. Finalmente, conectamos los cables de bus a la RAMPS y la instalación quedaría completa.



Ilustración 60: Controlador con LCD, cable de bus y conector a RAMPS. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Cableado y conexiones

En este momento, ya tenemos instalados todos los elementos electrónicos de la máquina. Por lo tanto, es momento de organizar el cableado y de realizar las conexiones correspondientes. Para dirigir los cables desde los dispositivos hasta la electrónica de control y hacia la fuente de alimentación, y los cables que van directamente de uno a otro, nos serviremos de un total de cuatro cubrecables.

Puesto que disponemos de cuatro cubrecables para organizar los numerosos cables que forman parte de nuestra impresora, realizamos cuatro grandes grupos en función de los elementos de origen mayoritario de los cables. Estos cuatro grupos corresponden al extrusor, la cama caliente, el eje X y la RAMPS. Podemos ver su disposición en la figura 61.

Deberemos ser cuidadosos en la agrupación y orientación de los cables. La estructura metálica de la impresora dispone de una serie de orificios pensados para dar paso al cableado. Procuraremos siempre emplear estos orificios para que los cables no estorben a los elementos móviles y puedan afectar al proceso de impresión. Además, dispondremos de una serie de bridas que nos servirán bien para agrupar los cables dentro del cubrecables o bien para fijarlos a la estructura en las zonas más delicadas.

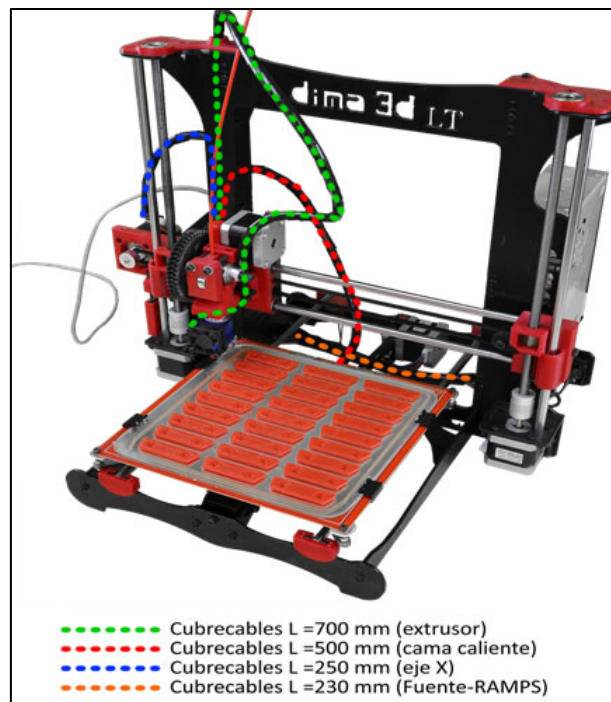


Ilustración 61: Colocación de los cubrecables. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Una vez que tenemos todos los cables agrupados y orientados hacia la zona de las placas electrónicas, solo resta realizar las conexiones. Para ello, disponemos de un esquema general de conexiones en el que se indica la conexión de todos los elementos electrónicos. Este esquema, que podemos ver en la ilustración 62, incluye las conexiones tanto a la placa RAMPS como a la fuente de alimentación.

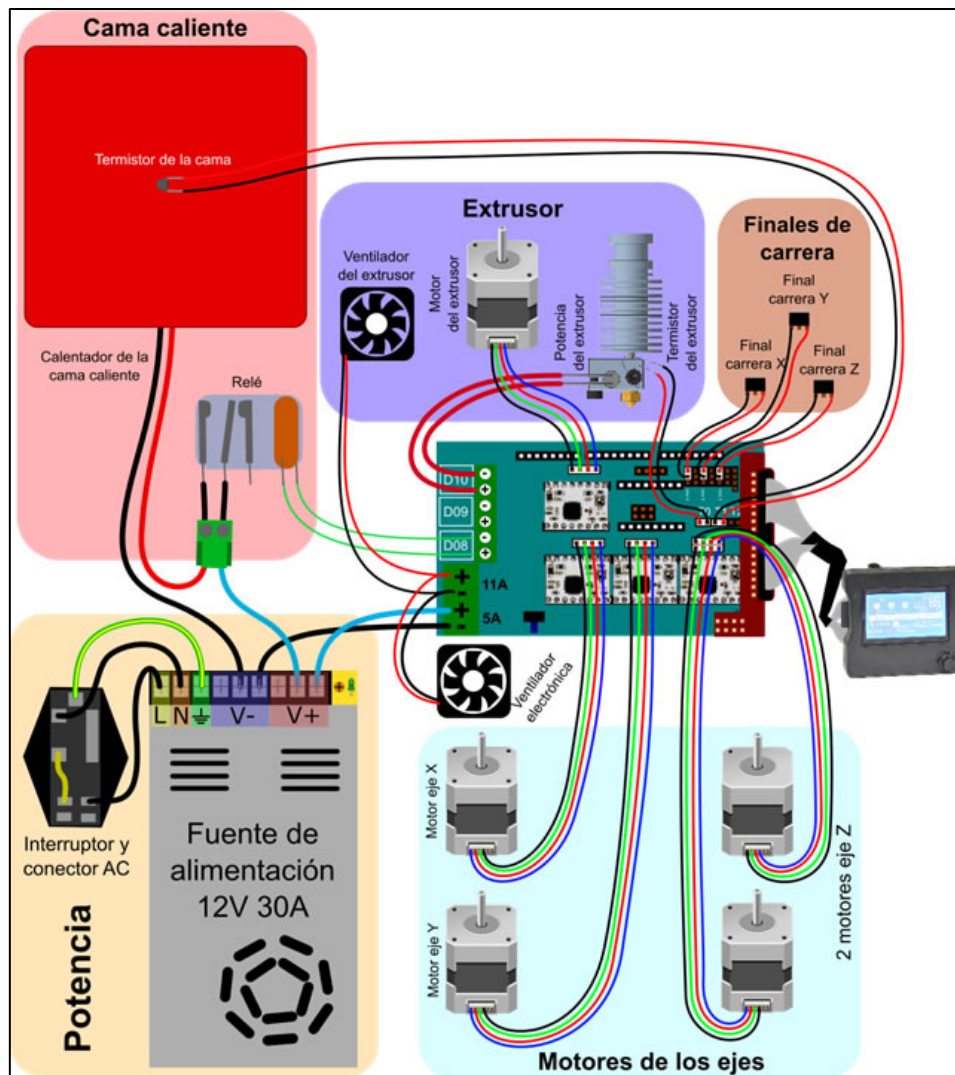


Ilustración 62: Esquema general de conexiones de la DIMA LT. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

El orden en el que se deberán conectar progresivamente todos los elementos es el que se indica en la tabla 15. A la hora de conectar ciertos elementos como los motores y los ventiladores puede que una colocación errónea de los pines haga que la polaridad esté invertida. Este hecho se detectará rápidamente, puesto que estos elementos comenzarán a girar en el sentido inverso al esperado.

Tabla 15: Orden de conexionado. Fuente: Elaboración propia.

Orden	Conexión
1	Cartucho calefactor
2	Motor del extrusor
3	Motor del eje X
4	Cama caliente
5	Sensor final de carrera del eje Y
6	Termistor de la cama caliente
7	Sensor final de carrera del eje Z
8	Motor derecho del eje Z
9	Conexión del controlador LCD a la RAMPS

Cajas protectoras

Con vistas a proteger las conexiones, los cables y el resto de elementos eléctricos y electrónicos, vamos a servirnos de una caja y una tapa protectoras. Estas piezas están impresas, por lo que su diseño se adapta bien al resto de la estructura. Su montaje es realmente sencillo y pueden ser de gran ayuda para evitar fallos y averías durante el proceso de fabricación.

Para la parte de la electrónica utilizaremos una caja protectora. Esta caja incorpora en su interior un orificio por el que debemos pasar el cable de bus del controlador con LCD. Previamente a su montaje, incorporamos un ventilador a su cara externa, que servirá para refrigerar los componentes electrónicos. Para fijarlo a la estructura, nos servimos de dos tornillos y sus respectivas tuercas que insertaremos tras haber colocado adecuadamente todos los dispositivos y cables en el interior de la caja.

En el caso de la fuente de alimentación, el elemento que utilizamos para mejorar la seguridad de las conexiones es una tapa de plástico que cubrirá la regleta de la fuente. Para fijarla, utilizamos dos tornillos que roscaremos a una ranura que posee la propia fuente. Con su colocación, quedaría concluido el montaje de las partes eléctrica y electrónica.

Soporte de filamento y conexión

Las últimas acciones que deberemos realizar para completar el montaje de la impresora e iniciar su puesta en marcha son la colocación del soporte para las bobinas de filamento y el conexionado.

El soporte para bobinas que incorpora la DIMA LT consta de un cilindro que actúa de soporte y dos piezas metálicas que encajan en la propia estructura metálica de la impresora. El procedimiento consiste en colocar una de estas piezas en la estructura, introducir la bobina de filamento en el cilindro soporte, enganchar el cilindro por un extremo a la pieza ya colocada y por otro a la pieza libre y, finalmente, colocar la segunda pieza. El sistema estaría ya listo para permitir el giro de la bobina en el proceso de extrusión.

El conexionado restante incluye tanto la conexión a la corriente como la conexión al ordenador para proceder a la configuración del software de trabajo. Para la conexión a la corriente simplemente necesitaremos un cable de alimentación con conector IEC C13 en un extremo y el conector correspondiente a la toma de corriente con la que trabajemos en el otro. Por su parte, la conexión a la impresora se realiza mediante un cable USB. Este cable tendrá un conector tipo USB-B en el extremo que conecta con la impresora y un conector tipo USB-A en el extremo que se insertará en el PC.

Capítulo 6

Puesta en operación de las impresoras

6 PUESTA EN OPERACIÓN DE LAS IMPRESORAS

6.1 Utilización básica de una impresora 3D de FDM

La actividad que vamos a desarrollar en nuestro laboratorio es la fabricación de piezas mediante el proceso de impresión 3D. Para poder llevar a cabo la impresión de piezas en una impresora 3D es necesario realizar una serie de acciones. En este capítulo analizaremos cada uno de los pasos que se deben seguir desde la configuración inicial de la impresora hasta la ejecución de la propia impresión y las operaciones de post-procesado de las piezas.

La explicación que realizamos en este capítulo es genérica y puede extenderse a cualquier impresora 3D que emplee la tecnología FDM, aunque nosotros nos centraremos en el modelo de impresora con el que trabajaremos; la DIMA LT. Antes de adentrarnos en el primer paso del proceso, la instalación del firmware y del software de impresión, explicaremos en qué consiste cada uno de estos conceptos y analizaremos el papel que juegan en el proceso de impresión.

6.1.1 Software del proceso de impresión

La impresión 3D es la elaboración de un material capa a capa a partir de la información contenida en un fichero tridimensional. Para llevar a cabo este proceso, se debe hacer uso de una cadena de herramientas de software que permiten desde el diseño de la pieza hasta la comunicación con la máquina para lanzar la orden de ejecución. En este proceso debemos diferenciar dos grupos de herramientas software: las herramientas de diseño asistido por ordenador (*CAD tools*) y las herramientas de fabricación asistida por ordenador (*CAM tools*). Una vez que se ha comunicado a la impresora la orden de imprimir una pieza, entra en juego el firmware de la máquina, que será el que haga la interpretación de los comandos de movimiento programados y los transforme en órdenes para los elementos mecánicos.

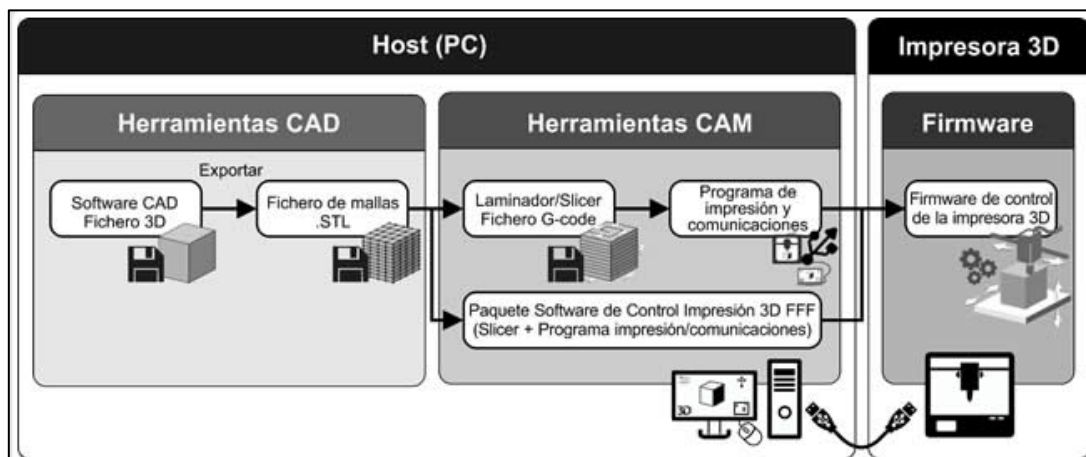


Ilustración 63: Cadena de herramientas software en impresión 3D. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Herramientas CAD

Las herramientas CAD engloban al conjunto de herramientas que permiten elaborar un diseño tridimensional de una pieza, adecuar el diseño para su impresión en 3D y exportarlo en un formato adecuado para que pueda ser procesado por las herramientas CAM. Sin embargo, el diseño de la pieza no debe ser necesariamente elaborado por el propio usuario, motivo por el que no resulta imprescindible la instalación de estos programas para la impresión 3D de una pieza. La obtención de un modelo 3D de partida puede realizarse de las siguientes maneras: accediendo a repositorios online para descargar el diseño, escaneando un objeto real para obtener el archivo digital o creando el modelo desde cero mediante un programa de diseño gráfico.

El fichero geométrico del diseño debe ser exportado en forma de un fichero de mallas para que pueda ser procesado por el software CAM. El formato más habitual es el STL (*Standard Triangulation Language*), puesto que es el formato de entrada más extendido para las herramientas CAM. Un fichero de mallas contiene un conjunto de puntos que define el contorno de un sólido y la unión de estos puntos forma un mallado, que en la mayoría de los casos es triangular. La mayor densidad de la malla supondrá una mayor definición de la pieza. Para que el archivo STL sea válido para la fabricación deberá ser estanco, es decir, que sea una única malla cerrada; y todos los triángulos deberán tener la normal de la superficie hacia afuera, ya que de no ser así provocaría un conflicto a la hora de ser laminado.



Ilustración 64: Fichero STL. Fuente: R3ALD. Ref: [42]

Las herramientas CAD permiten reparar archivos de malla que estén dañados. Algunos de los defectos más habituales de las mallas son la falta de triángulos, la presencia de triángulos invertidos o la existencia de triángulos que se cortan. Un archivo con defectos generará errores en el proceso de laminación, por lo que debe comprobarse su correcta concepción. El programa más habitual que ofrece la posibilidad de detectar errores de malla y repararlos es *Netfabb*, del paquete Autodesk. También existen programas que permiten adecuar el archivo geométrico para su impresión. Estos programas permiten

crear soportes manuales o automáticos que hagan que la pieza se elabore optimizando su forma y su acabado. El programa más extendido de este tipo es el *Meshmixer*, también de Autodesk. Una tercera posibilidad que ofrecen los programas CAD de apoyo a la fabricación aditiva es la simplificación del mallado de un diseño, lo que permite eliminar información redundante y hace que el archivo sea más ligero y fácil de procesar. El *Meshlab* es el programa de este tipo por excelencia y es de software libre.

Herramientas CAM

Las herramientas CAM van a ser las responsables de transformar el fichero de mallas a un lenguaje interpretable por el firmware de la impresora, el G-code, y de realizar la comunicación con la impresora y controlar el proceso de impresión. La transformación del archivo STL a un fichero G-code se conoce como laminación, por lo que a los programas que realizan esta acción se les refiere como software de laminación (*slicers*), mientras que a los encargados de monitorizar el proceso de impresión se les llama software de control (*host*). Puesto que ambas acciones se pueden complementar, se han desarrollado programas que implementan las dos funcionalidades. En este caso, un solo paquete de software permitiría realizar todo el proceso que recae sobre las herramientas CAM, como podemos apreciar en la figura 37.

Los programas de laminación o *slicers* son los encargados de generar la información necesaria para que la máquina fabrique la pieza físicamente. Estos programas transforman el diseño CAD en formato STL a un lenguaje interpretable por las máquinas de control numérico llamado G-code. El proceso de laminado consiste en ir dividiendo la malla en capas al tiempo que se van generando las trayectorias que deberá seguir la herramienta – en este caso el extrusor – para crear físicamente el objeto. A partir de las trayectorias calculadas, el programa genera los comandos con las instrucciones necesarias para que la máquina elabore cada una de esas capas. Estos comandos permiten a la máquina realizar desplazamientos, leer los valores de los sensores, modificar los parámetros, etc.

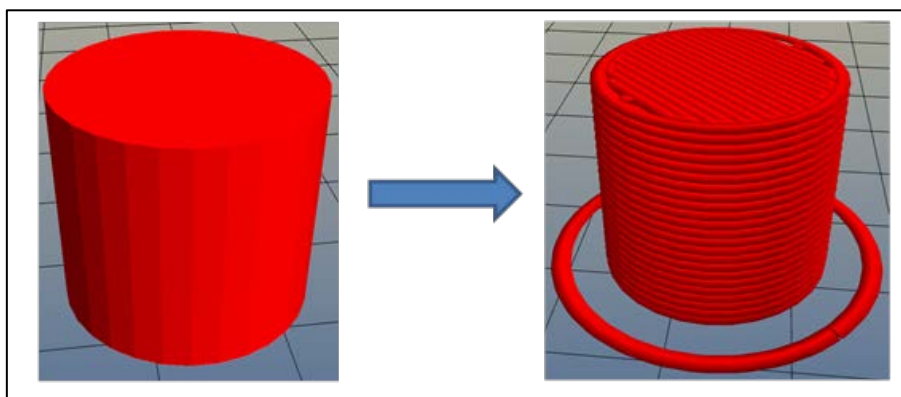


Ilustración 65: Laminación de un fichero de mallas. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

El usuario puede configurar las características de la laminación en los programas *slicer*, de manera que se pueden ajustar los parámetros para cada pieza en función de los resultados buscados. Estos programas habitualmente nos indican el tiempo estimado que tardará en realizarse la pieza y la cantidad de filamento que va a ser necesaria. Los *slicers* más extendidos en impresión 3D en la actualidad son *Slic3r* y *CuraEngine*, que son de software libre, y *KISSlicer*, que es un programa de pago aunque dispone de una versión gratuita con menores prestaciones.

Los programas de control o *host* son aquellos que permiten dar la orden de fabricación de una pieza y gestionar en tiempo real dicho proceso. Una vez que la impresora ha comenzado la elaboración de un objeto, desde el *host* podemos observar la evolución de los valores de los distintos sensores; típicamente la temperatura del extrusor – y de la cama, en caso de que sea calefactada –, la velocidad del extrusor, el flujo de material y la velocidad del ventilador. Además, se pueden enviar comandos en lenguaje G-code para modificar el comportamiento de la máquina en tiempo real.

Aunque existen programas específicos que realizan las funciones de control en exclusiva – como es el caso de *Pronterface* – lo habitual es que los programas *host* integren a los programas *slicer*. De este modo, en un mismo entorno de trabajo se puede realizar la laminación del modelo y, a continuación, el lanzamiento de la orden de impresión y el seguimiento y control del proceso de manufactura. Los programas *host* más conocidos y utilizados en el sector de la fabricación aditiva son *Repetier-Host* y *Cura*, de descarga libre, y *MatterControl*, de software libre bajo licencia BSD.

Firmware

El firmware es un programa que es ejecutado por el microcontrolador de la placa electrónica de la impresora 3D. Básicamente, se trata de un programa que traduce los comandos genéricos de alto nivel contenidos en el lenguaje máquina (G-code) a un conjunto de instrucciones de menor nivel que pueden ser comprendidas por el microcontrolador de la placa. A partir de las instrucciones recibidas por la placa, junto con las señales de control, de estado y de realimentación que le llegan desde los dispositivos de la impresora, el microcontrolador debe gestionar el correcto funcionamiento de los distintos elementos de la máquina al tiempo que se ejecutan las acciones contenidas en el G-code.

La traducción que se realiza de las órdenes de G-code recibidas varía notablemente según el microcontrolador de la placa. Es por ello por lo que el firmware que se deberá instalar estará condicionado por el tipo de placa, existiendo un firmware específico para cada modelo de placa. No instalar el firmware adecuado puede derivar en un funcionamiento deficiente de la máquina, en el no aprovechamiento de las prestaciones de esta o, incluso, en una avería.

Aunque lo habitual es que las impresoras 3D que se adquieren ya montadas incluyan la instalación del firmware, en el caso de los kits premontados este paso deberá ser el primero en realizarse en vistas a iniciar la fabricación de piezas. Existen varias posibilidades para seleccionar un firmware, especialmente en el caso de kits. Deberemos elegir el que mejor se adapte a las características de la impresora. Algunos de los firmwares más conocidos son *Sprinter*, *Marlin*, *Teacup* o *Repetier-Firmware*, aunque hay muchos otros.

6.1.2 Instalación del firmware y del software

En el proceso de utilización de una impresora 3D el primer paso que debemos realizar es la instalación y la configuración de las herramientas informáticas con las que vamos a tener que trabajar. Para ello, debemos seleccionar los programas que más se adecúen tanto a nuestros equipos como a nuestras necesidades, puesto que las posibilidades que ofrecen pueden variar considerablemente de unos a otros. En primer lugar, trataremos la instalación del firmware y posteriormente nos centraremos en los paquetes de software.

Instalación del firmware

Las impresoras DIMA LT utilizan una placa electrónica compatible con *Arduino*, que es una placa con un microcontrolador y un entorno de desarrollo hardware libre. Estas placas están diseñadas para facilitar la implementación de la electrónica de control en proyectos multidisciplinares, por lo que se adapta bien al caso de las impresoras 3D de FDM. La placa dispone de una memoria ROM en la que se debe instalar un firmware determinado en función del uso que se le vaya a dar. En el caso de las impresoras DIMA LT, el firmware que se ha seleccionado ha sido *Marlin*, que es un *fork* del firmware *Sprinter*.

El proceso de instalación del firmware en una impresora consta de varios pasos. En primer lugar, es necesario descargar el entorno de desarrollo adecuado a la placa para poder escribir un firmware en la memoria de esta. En el caso de la placa *Arduino*, el entorno de desarrollo se denomina *Arduino IDE*. Este software nos permitirá cargar, editar y escribir una versión de firmware en la memoria de la placa *Arduino* que conectemos al PC. Adicionalmente, el *IDE* debe instalar una serie de drivers de *Arduino* que permitan que el PC se comunique con la electrónica de la impresora. Para la descarga del *Arduino IDE* basta con acudir a la página oficial de *Arduino* (<https://www.arduino.cc/>), donde se encuentra este paquete. Una vez aceptadas las condiciones, debemos seleccionar el paquete completo y ejecutar la instalación.

En segundo lugar, con el *IDE* ya instalado, es el momento de escribir el firmware en la placa *Arduino*. Para ello, acudimos al *IDE* y abrimos un archivo con la extensión “.ino” (*Marlin.ino*). Una vez abierto el fichero, se debe conectar el PC con la placa electrónica

de la impresora a través de un cable USB. Tras la conexión física, debemos ir al menú Herramientas, Puerto Serial del *Arduino IDE* y ahí seleccionar el puerto de comunicaciones adecuado. Para cargar el firmware es necesario especificar la placa con la que estamos trabajando. Para ello, acudimos al menú Herramientas, en el apartado Tarjeta, y seleccionamos la placa correspondiente – en este caso *Arduino Mega 2560* –. Con esto ya tendríamos configurado el firmware en la impresora y ya se podría realizar la comunicación con ella desde el PC.

Instalación del software

El paquete de software que necesita una impresora 3D para operar corresponde a las herramientas CAM que hemos visto en el apartado anterior. Las herramientas CAD quedan excluidas de esta explicación porque, como ya hemos visto, los archivos en formato STL pueden adquirirse directamente desde repositorios online. Las herramientas CAM incluyen un software de laminación, encargado de generar las capas en las que se elaborará una pieza y las órdenes de la máquina para realizar esas capas, y un software de control, que permitirá la comunicación con la impresora y la monitorización de su funcionamiento.

Como sabemos, estos dos tipos de programas suelen integrarse para permitir un control conjunto de todo el proceso de impresión. Para la explotación de la actividad de nuestro laboratorio utilizaremos *Repetier-Host*; uno de los softwares de control y laminación integrados más extendidos. La descarga de este programa es gratuita y solamente deberemos acceder a la página oficial de *Repetier* (<https://www.repetier.com/>) y seleccionar el paquete adecuado al sistema operativo de nuestro PC. En el caso de Windows – sistema operativo que incorporan nuestros PCs – bastará con abrir el archivo ejecutable y seleccionar el idioma deseado. En el proceso de instalación deberemos seleccionar también el programa laminador que integrará *Repetier-Host*. En nuestro caso, seleccionaremos el software *Slic3r*.

Una vez que la instalación se ha completado es el momento de realizar las configuraciones del software asociadas a la impresora con la que vamos a trabajar. Accedemos para ello a la opción Configurar Impresora y completamos los apartados de los distintos campos que aparecen teniendo en cuenta las características de nuestra máquina. Los campos que debemos configurar son: Conexión, Impresora, Extrusor, Dimensiones Impresión, Scripts y Avanzado. Para la configuración de la conexión de la impresora debemos tener en cuenta que el *baudrate* con el que trabaja la DIMA LT es de 115200 baudios. Los parámetros del extrusor deberemos modificarlos si en un futuro cambiamos la boquilla de extrusión o el extrusor al completo.

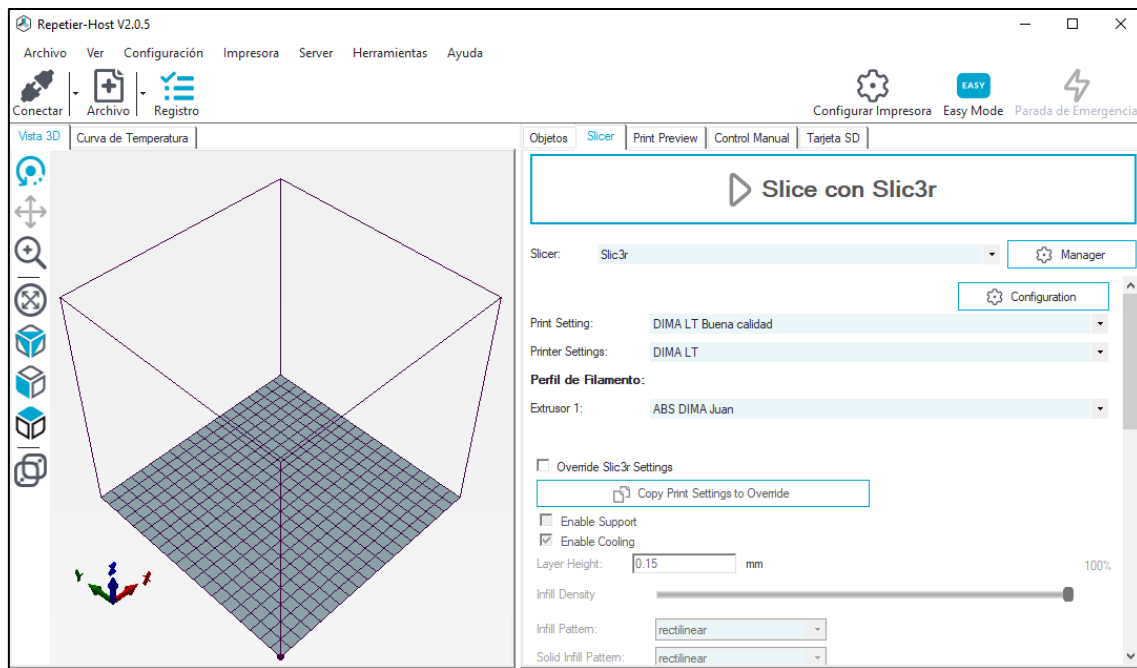


Ilustración 66: Interfaz de Repetier-Host en la pestaña Slicer. Fuente: Elaboración propia.

En este momento ya estamos en condiciones de preparar una pieza para que sea impresa por la máquina y de enviarle la orden de ejecución de dicha impresión. Sin embargo, las características con las que la pieza será impresa pueden modificarse en las configuraciones que incluye el programa laminador – *Slic3r* – desde la interfaz que ofrece el propio *Repetier-Host* (ver figura 66). Para acceder a la configuración del laminador, seleccionamos la pestaña Slicer del menú de la derecha y pinchamos en el icono Configuración. Se nos abrirá una pestaña propia del programa *Slic3r* y en ella podremos modificar los parámetros de impresión asociados a la impresora (*Printer Settings*), al filamento utilizado (*Filament Settings*) y a las características de impresión (*Print Settings*). Es habitual que el fabricante de la impresora incluya en el paquete de software de la impresora perfiles predefinidos para los tres tipos de configuración.

6.1.3 Preparación de la impresora

El proceso físico de elaboración de una pieza capa a capa a través de la extrusión de material requiere de dos acciones previas: la preparación del material de fabricación y la puesta en marcha de la impresora. Una vez que el filamento esté listo para extruirse y que la impresora esté acondicionada para comenzar la extrusión, ya podremos iniciar la fabricación de la pieza a través de la deposición sucesiva de capas.

Carga y cambio de filamento

Las impresoras 3D de FDM utilizan filamentos de plástico para la fabricación de piezas. Estos filamentos tienen tres tamaños de sección estandarizados: uno menor de 1,75 milímetros y otros dos mayores de 2,85 o 3 milímetros según el fabricante. En función

del tamaño de filamento utilizado, el hot-end estará adaptado para su arrastre y extrusión. El sistema de alimentación del filamento al extrusor depende de cada modelo de impresora, aunque en el caso de las DIMA LT – y como ocurre en la mayoría de las impresoras – se realiza por la parte superior y dispone de un elemento apretador.

El proceso de carga de filamento en la DIMA LT consta de varios pasos:

- I. Aflojado del apretador: afloje de los tornillos que cierran el apretador de filamento para tener acceso al filamento insertado actualmente y que deseamos reemplazar.
- II. Colocación del filamento nuevo en el soporte: en la parte superior de la impresora, desmontamos uno de los soportes, introducimos en el tubo una nueva bobina de plástico con el filamento orientado hacia abajo y montamos nuevamente el soporte.
- III. Inserción del filamento y extrusión manual: calentamos el hot-end hasta la temperatura de extrusión del plástico con el que estemos trabajando e insertamos el filamento por el orificio del extrusor. Ahora empujamos el filamento hasta que llegue a la boquilla del extrusor y observamos que se extruye material.
- IV. Apretado de los tornillos: recolocamos el apretador con sus dos tornillos. Estos tornillos permiten regular la presión del apriete del filamento contra el tornillo moleteado, por lo que deberemos asegurarnos de que la presión es la suficiente para que el material sea arrastrado sin deslizamiento.
- V. Prueba de extrusión desde el software: con el hot-end aún caliente, debemos enviar la orden para que se extruyan unos centímetros de filamento y comprobar que este fluye con normalidad. Para ello, podremos emplear tanto el software desde el ordenador como las opciones de la LCD, según sea la comunicación con la impresora.

Si lo que queremos es llevar a cabo un cambio de filamento, debemos incluir dos nuevos pasos en el proceso anteriormente descrito:

- En primer lugar, previamente al aflojado del apretador debemos calentar el hot-end a la temperatura de extrusión del termoplástico insertado.
- Tras el aflojado del apretador y asegurándonos de que el hot-end está a la temperatura de extrusión correcta, extraemos el filamento insertado tirando enérgicamente de él hacia arriba.

En el caso del cambio de filamento, debemos prestar especial atención si el nuevo material que queremos incorporar es distinto del que estaba insertado previamente. Si es el caso, deberemos calentar el hot-end a la temperatura de extrusión mayor de entre las de los dos materiales, puesto que de no ser así podrían tener lugar bloqueos en el extrusor por la presencia de restos de plástico sólidos.

Puesta en marcha de la impresora

Como medidas previas a la impresión de una pieza por parte de las impresoras, debemos realizar una serie de comprobaciones iniciales para asegurarnos de que la máquina se encuentra en las condiciones adecuadas. El primer paso es conectar la impresora a la alimentación eléctrica y realizar la conexión con el PC a través de un cable USB. En este momento, nos servimos del software de control – en este caso *Repetier-Host* – para realizar las comprobaciones iniciales. Nos centraremos en dos acciones: el control manual del movimiento de los ejes y el control de temperaturas. Estas acciones pueden desempeñarse también desde el controlador con LCD de la impresora. Sin embargo, puesto que no todas las impresoras incorporan este controlador, haremos la explicación para la conexión con el ordenador con objeto de que pueda adaptarse a cualquier máquina. En caso de realizar la puesta en marcha desde la LCD de la impresora DIMA LT, las opciones que describiremos a continuación están programadas en la pestaña “Control” incluida en el menú principal.

Antes de comenzar a imprimir, es aconsejable verificar que todos los ejes de la impresora se mueven de forma fluida y que el extrusor produce un flujo de filamento correcto. También debemos asegurarnos de que los ejes se posicionan adecuadamente cuando seleccionamos la opción de “*homing*”, que es la posición (0,0,0) configurada para el posicionamiento en reposo del extrusor. Para ello, podemos acudir a las opciones de la pestaña “Control Manual” de *Repetier-Host* y pulsar los botones de desplazamiento de los ejes y de extrusión. Una vez que se ha verificado que los ejes se desplazan correctamente en todas las direcciones, pasamos a comprobar el control manual de temperaturas.

El control de temperaturas de las impresoras es muy importante debido a las elevadas temperaturas que pueden alcanzar algunos elementos de la máquina. Por ello, no solo nos va a permitir asegurar la extrusión adecuada del material, sino que también nos hará conocer la temperatura en todo momento para tomar las precauciones pertinentes. En las DIMA LT, puesto que incorporan una cama calefactada, el control de temperaturas lo realizaremos sobre el extrusor y sobre la cama de impresión.

La interfaz del software *Repetier-Host* nos permite configurar las temperaturas de trabajo y monitorizar en tiempo real las temperaturas de los elementos calefactados. Para comprobar el correcto funcionamiento de los elementos calefactores, enviamos la señal de aumentar la temperatura e introducimos valores representativos del proceso de impresión. En la ventana de “Curva de Temperatura” de *Repetier-Host* podemos observar la evolución de la temperatura del extrusor y de la cama. Estas curvas, una vez seleccionadas las temperaturas instantáneas, deben evolucionar con mayor o menor velocidad hasta situarse en un entorno próximo al de las temperaturas de trabajo. Posteriormente, enviamos la orden de que vuelvan a la temperatura ambiente y observamos que la evolución es igualmente normal.

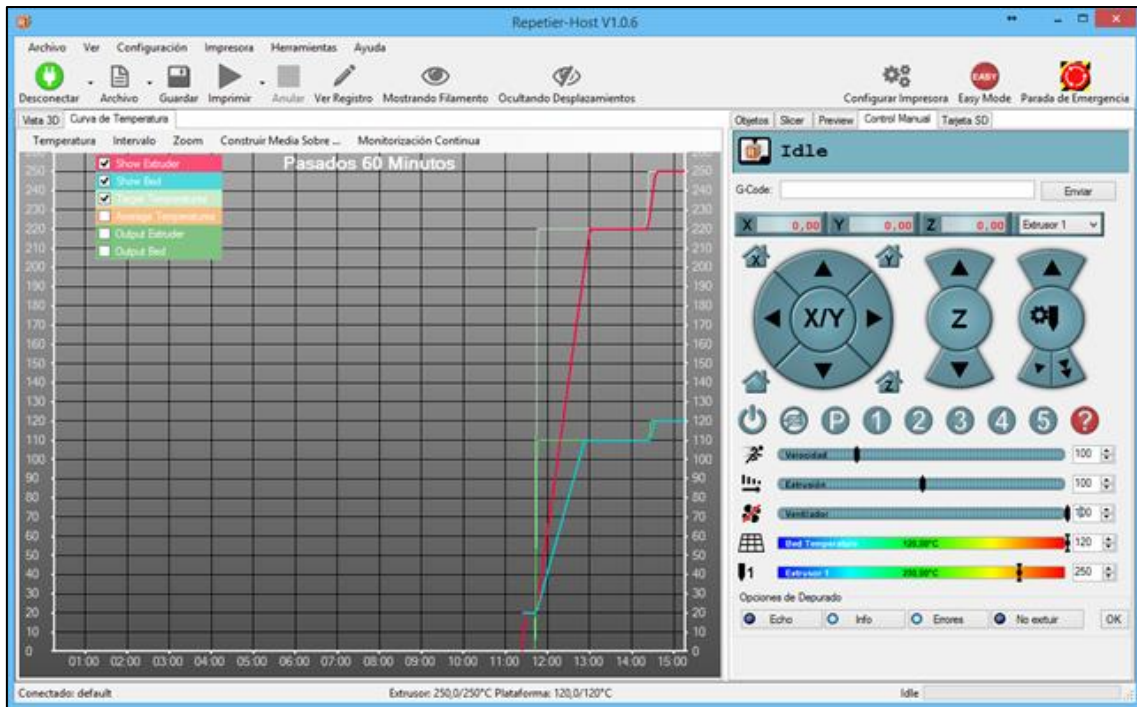


Ilustración 67: Curva de Temperatura y menú de Control Manual de Repetier-Host. Fuente: Elaboración propia.

6.1.4 Primera impresión de prueba y tareas post-impresión

Una vez que la impresora ya está preparada, con el filamento cargado y las comprobaciones iniciales realizadas, es hora de lanzar una primera impresión. Para ello, es una buena práctica realizar una primera impresión de prueba utilizando los ajustes predefinidos por el fabricante de la impresora y analizar los resultados obtenidos. La pieza resultante no siempre estará optimizada para su función, por lo que deberemos considerar la ejecución de algunos tratamientos post-impresión que permitan mejorar sus propiedades. En esta sección explicaremos los pasos necesarios para lanzar la impresión de una pieza y revisaremos los tratamientos de post-procesado más comunes.

Lanzamiento de la impresión

Con objeto de enviar a la impresora la orden de que comience a elaborar una pieza, se deben haber realizado los pasos relativos a la carga del modelo 3D en el software de control y a la laminación del modelo utilizando perfiles preconfigurados. Los perfiles de laminación que incluye el fabricante de las DIMA LT en su paquete de software se encuentran en el programa *Slic3r*. Estos perfiles se dividen en tres grupos: los parámetros de impresión, los parámetros de la impresora y los parámetros del filamento. Para el primer grupo se incluyen tres posibilidades: “DIMA LT normal”, “DIMA LT Calidad Media” y “DIMA LT Calidad Alta”; para el segundo encontramos la configuración “DIMA LT” y para el tercero nos ofrecen una configuración para cada uno de los materiales más habituales: “PLA DIMA”, “ABS DIMA”, etc.

Con la laminación del modelo ya realizada empleando los perfiles mencionados, es el momento de iniciar el proceso de impresión. Como ya sabemos, el control del proceso puede realizarse bien desde el software del PC o bien desde las opciones de la LCD. En la explicación nos centraremos en el monitoreo desde el PC, que será análogo al que requiere el uso del controlador con pantalla LCD.

El primer paso que debemos realizar es la aplicación de algún tipo de adhesivo sobre la cama de impresión para asegurar la correcta fijación de la pieza. En nuestro caso, emplearemos laca comercial para los materiales con menores problemas de adhesión y el spray fijador Dimafix para aquellos con mayores dificultades en la fijación a la base de impresión. La aplicación de estos productos debe realizarse con la cama aún fría. Ahora ya podemos lanzar la orden para que tanto la cama como el extrusor se calienten hasta la temperatura de trabajo. Una vez que observamos que han alcanzado los valores introducidos, pinchamos desde *Repetier-Host* sobre la opción “Imprimir trabajo”. De este modo, el programa envía el G-code a la impresora y en condiciones normales debería comenzar el proceso de impresión.

Durante la impresión, pueden monitorizarse los diferentes parámetros relacionados con el proceso. En el caso de realizar la comunicación desde el PC, será necesario que este se mantenga conectado a la impresora mediante el cable USB. Si durante la impresión se detecta algún problema, la interfaz de *Repetier-Host* incluye las opciones de “Pausar impresión” y “Anular impresión”. Solamente en el primer caso podrá reanudarse el proceso de impresión. Esta opción se utiliza para remediar un problema reversible realizando algún tipo de operación de mantenimiento sobre la máquina, tras lo cual se ordena reanudar la impresión.

Tareas post-impresión

Una vez que se ha completado la impresión de una pieza puede resultar necesario o interesante aplicar sobre ella una serie de operaciones post-impresión. Esto dependerá principalmente de cuatro factores: la tecnología de impresión utilizada, el material empleado, las características geométricas de la pieza y la manera en la que se ha procesado el modelo para su impresión. Puede ocurrir también que la pieza haya sido impresa en varias partes y sea necesario ensamblarla, bien por unión mecánica o bien mediante el uso de adhesivos.

Hay que tener presente que las operaciones de post-procesado pueden resultar dañinas para las piezas. Para reducir este riesgo es necesario analizar previamente los procesos de tratamiento y seguir las recomendaciones de los fabricantes. Cada tecnología presenta una serie de operaciones que pueden resultar ineludibles, además de otras opcionales que permiten mejorar las características de la pieza fabricada. En los siguientes apartados haremos una revisión de las tareas de post-procesado más habituales para la tecnología FDM.

Retirada de la pieza de la base de impresión

Aunque parezca algo trivial, si el proceso de retirada de la pieza de la base no se realiza adecuadamente, este puede provocar la aparición de defectos en la pieza. En ocasiones nos encontraremos con que la pieza ha quedado fuertemente adherida a la superficie y presenta resistencia a ser despegada. Por lo general, bastará con emplear espátulas o cuchillas que permitan separar la pieza de la base, en un movimiento que deberá ser enérgico pero evitando clavar la herramienta en el cuerpo de la pieza.

En algunas piezas con geometrías delicadas en su base o cuya adhesión entre capas no haya sido la adecuada existirá un alto riesgo de que las capas inferiores se queden adheridas a la base si la retirada no se realiza correctamente. Por ello, es necesario conocer las características y recomendaciones sobre el material empleado para imprimir, así como las del producto adhesivo que se utilice para mejorar la fijación a la base. Además, en caso de que la impresora incorpore cama calefactada, deberemos asegurarnos de que esta ha alcanzado la temperatura adecuada para poder retirar la pieza.

Eliminación del material de soporte

La tecnología FDM presenta una limitación a la hora de imprimir piezas que presenten voladizos, puentes o paredes con ángulos extremos. Por ello, como hemos explicado en la sección 3.1.2 (*Propiedades de impresión*), algunas piezas deberán ser diseñadas con una estructura de soporte para permitir su fabricación exitosa. Una vez que la pieza ha sido obtenida, procederemos a la retirada del material de soporte.

Para la operación de retirada del material de soporte contemplaremos dos posibilidades en función del material de soporte utilizado.

- Si el soporte ha sido elaborado con el mismo material que la pieza, la retirada se realizará manualmente o mediante algún útil, como una cuchilla o un alicate, que permita cortar y eliminar las rebabas de material que puedan quedar en la pieza. Esta operación deberá realizarse cuidadosamente ya que existe una elevada probabilidad de provocar defectos sobre la propia pieza.
- La segunda opción será contemplada cuando los soportes se fabriquen con un material distinto al del resto de la pieza. Esta posibilidad solo se contemplará para impresoras con dos o más cabezales de extrusión. En este caso, el material específico de los soportes suele ser de tipo hidrosoluble, como por ejemplo el PVA. Así, bastará con introducir la pieza impresa en agua caliente para que el material de los soportes se disuelva y obtengamos la pieza final. Este proceso será análogo para el caso de uso de un material de soporte que no sea hidrosoluble pero sí pueda eliminarse mediante la inmersión en otro tipo de disolvente.

Tratamientos superficiales

Las piezas pueden someterse a tratamientos superficiales para mejorar su acabado. Existe infinidad de tratamientos de este tipo, por lo que nosotros revisaremos algunos de los más extendidos. Hablaremos a continuación de cuatro procesos: el lijado de piezas, el pintado o lacado, el baño químico y el recubrimiento con un barniz o resina.

El proceso más sencillo e inmediato que solemos aplicar para la eliminación de rebabas y para el suavizado de acabados excesivamente ásperos es el lijado o limado manual. Este proceso puede realizarse utilizando lija en papel, limas de diferentes tipos, decapadores, cuchillas, etc. El lijado no permite mejorar notablemente el acabado superficial de una pieza pero resulta muy útil para la eliminación de defectos groseros.

Si el material de la pieza elaborada no se ajusta a los colores finales deseados, se puede someter a la pieza a un proceso de pintado/lacado. En principio, las pinturas de tipo acrílico no deberían presentar problemas en su aplicación sobre materiales como el ABS o el PLA. En cualquier caso debemos comprobar las especificaciones del producto que deseemos aplicar, puesto que en caso de actuar como disolvente podría infligir daños irreparables sobre la pieza. Es posible que para poder aplicar la pintura adecuadamente debamos someter previamente a la pieza a un tratamiento de lijado o pulido.

Un tratamiento que ha resultado ofrecer buenos resultados en la mejora del acabado superficial de una pieza es el baño químico. En concreto, el uso de un fluido volátil como la acetona sobre piezas impresas en ABS permite obtener piezas con acabados superficiales muy finos. [33] El procedimiento consiste en introducir la pieza en un recipiente cerrado donde se evapora acetona por calentamiento, procurando siempre que el objeto no entre en contacto con el líquido. Tras un tiempo de exposición, la pieza se retira y se aprecia una superficie suave, brillante y sin la apariencia de capas. La contrapartida de este proceso es que se sacrifica parte de la definición superficial de la pieza. Por ello, deberemos evitar un tiempo de exposición demasiado elevado. En el caso de piezas impresas en PLA, se han probado con éxito diversos baños en distintas sustancias como la sosa cáustica o disolventes clorados.



Ilustración 68: Pieza de ABS sometida a un baño en acetona. Fuente: StackExchange. Ref: [43]

Otro método que ofrece resultados similares a la inmersión en vapor de acetona es la aplicación de un recubrimiento con un barniz o resina epoxi líquidos. En la preparación de estas resinas se mezcla un polímero con otro líquido que actúa como catalizador. Tras mezclarse, comienza una reacción que solidifica el polímero. Las ventajas que ofrece este método son que se puede aplicar a una gran variedad de materiales de impresión (PLA, ABS, Laywoo-d3, etc.), que además de alisar la superficie producen un acabado duro y resistente, y que se pueden añadir pigmentos en su preparación de manera que se aporte una coloración a la pieza.

Uniones y ensamblados

Una posible tarea post-impresión es la unión de los diferentes componentes que pueden formar el objeto definitivo. Son diversas las razones por las que una pieza impresa puede estar dividida en partes, aunque fundamentalmente esto ocurrirá cuando el tamaño de la pieza exceda el volumen de impresión o cuando debido a su complejidad geométrica sea recomendable imprimir la pieza por partes. También podrá recurrirse a esta operación en caso de rotura del objeto. Haremos una diferenciación según sea necesario realizar un pegado de las partes o sea suficiente con ensamblar las piezas.

Los métodos de pegado son variados y dependen en gran medida del tipo de material. Nosotros centraremos la explicación en los dos materiales más extendidos en FDM: el ABS y el PLA. [44]

- Para el ABS podemos usar adhesivos tipo cianoacrilato, cloruro de metileno, pegamentos con base de poliuretano o acetona. En el último caso – recordamos que el ABS es soluble en acetona – podemos aplicar acetona en las zonas de unión utilizando un pincel. De este modo, el ABS se reblandece de forma que al poner en contacto las partes impregnadas estas quedan soldadas de forma química.
- Para el PLA se pueden usar igualmente adhesivos tipo cianoacrilato, aunque también son efectivos los adhesivos comerciales de uso frecuente en la elaboración de maquetas. Estos últimos permiten que las piezas unidas mantengan cierta elasticidad entre sí.

La otra situación la encontramos en piezas que se forman de varios componentes diseñados con la intención de que sean posteriormente ensamblados. Estos componentes incorporan elementos que van a permitir unirlos unos con otros (pines, orificios, salientes, etc). La operación de montaje variará según esté pensado el ensamblado de la pieza: unión mecánica (con tornillos, tuercas, remaches, etc.) o unión por encaje. En ambos casos deberemos realizar operaciones manuales que podrán estar apoyadas por las herramientas de trabajo habituales.

6.2 Mantenimiento de las impresoras

A la hora de desarrollar una actividad como la que se lleva a cabo en nuestro laboratorio de fabricación aditiva, es necesario dar importancia al mantenimiento adecuado de las máquinas para asegurar una correcta ejecución del proceso de impresión. Puesto que la impresora 3D es una máquina de un cierto nivel de complejidad, debe establecerse un conjunto de actividades destinadas a revisar su funcionamiento. Esto permitirá no solo favorecer una correcta impresión de las piezas sino también prevenir la aparición de averías.

Podemos dividir las tareas de puesta a punto de una impresora 3D en dos grandes grupos en función de su utilidad. Por un lado se encuentran las operaciones de calibración, que permitirán asegurar la precisión en los movimientos de la impresora; mientras que por otro aparecen las operaciones de mantenimiento, destinadas a permitir que la máquina funcione con normalidad y no se vea afectada por fenómenos indeseables.

6.2.1 Procedimientos de calibración

Las operaciones de calibración se realizarán en el proceso de puesta a punto inicial de la máquina. Si el ajuste realizado es adecuado, no será necesario repetir estas operaciones con frecuencia. En cualquier caso, debe formar parte de la revisión periódica de la máquina la comprobación del correcto funcionamiento de todos los elementos que deban ser calibrados. Los procedimientos de calibración que describiremos a continuación se especifican para la DIMA LT, pero pueden ser aplicados de manera genérica en una impresora de características similares – una Prusa P3 Steel o basada en ella –. Las operaciones de calibración que realizaremos se centrarán en la nivelación de la base de impresión y la regulación de la tensión de las correas.

Nivelación de la base de impresión

Una de las etapas cruciales en el calibrado inicial de muchas impresoras es la correcta nivelación de la base de impresión. Este proceso asegura que la distancia entre la boquilla y la base es constante a lo largo y ancho de toda su área, y que es adecuada al diámetro de la boquilla. Una correcta nivelación de la base permitirá una buena adherencia de las piezas a la superficie de impresión. El método de nivelación de la base que emplea este tipo de máquinas es diverso: unas incorporan un sistema de autocalibrado que se ejecuta antes de comenzar la impresión de una pieza, otras emplean un sistema de compensación que actúa durante toda la impresión y en algunas el procedimiento es manual. En el caso de la DIMA LT, la nivelación de la base es manual y está basada en la regulación de cuatro puntos de altura.

Para regular la base de la DIMA LT debemos tener en cuenta tres factores que afectan a la nivelación y que indicamos a continuación:

- Horizontalidad del eje X, dado que para la elevación del extrusor a lo largo del eje Z se utilizan dos husillos independientes.
- Altura de cada una de las esquinas de la base de impresión.
- Posición del tornillo regulador del final de carrera del eje Z, para subir o bajar toda la nivelación de una sola vez.

El procedimiento de calibración de la base consta de una serie de pasos que deberemos realizar de forma ordenada, en los que nivelaremos los tres componentes que forman el sistema de calibración. Los pasos que debemos realizar son los siguientes:

- I. En primer lugar debemos comprobar la horizontalidad del eje X. Para ello, medimos la distancia desde ambos motores del eje Z hasta la tuerca trapezoidal de cada husillo y comprobamos que los valores son los mismos en los dos husillos. De no ser así, debemos girar manualmente los husillos hasta lograrlo.
- II. En segundo lugar, hacemos la nivelación del tornillo final de carrera del eje Z. Desplazamos el extrusor hasta un punto cercano a una de las esquinas de la base, colocamos una hoja de papel sobre la superficie de impresión y realizamos un *homing* del eje Z. Movemos la hoja y comprobamos si presenta cierta resistencia a ser desplazada, caso en el que tendríamos un ajuste exitoso. Si la hoja está muy apretada y no conseguimos desplazarla, la nivelación es muy baja y debemos apretar el tornillo del final de carrera del eje Z y repetir la comprobación. Si por el contrario la hoja está totalmente libre, la nivelación es excesivamente alta y debemos desapretar el tornillo. Una vez que logremos la tensión adecuada, ya no moveremos este tornillo.
- III. En tercer lugar, pasamos a la nivelación de la cama de impresión. Realizamos la misma operación de comprobación del paso anterior en cada una de las tres esquinas restantes. En este caso, si la nivelación no es la adecuada, debemos actuar sobre el sistema de tuercas autoblocantes que fija la base de impresión al soporte de la misma. Solamente actuaremos sobre las tuercas 2 y 3, tal y como se indica en la figura 69. Para elevar la base deberemos roscar las tuercas en sentido descendente, mientras que para reducir la altura de la base el roscado lo realizaremos en sentido contrario.
- IV. Por último, debemos realizar la comprobación descrita en el paso anterior nuevamente en las cuatro esquinas. Comprobamos finalmente que la nivelación es adecuada en el centro y en las cuatro esquinas de la superficie.

Este procedimiento lo deberemos repetir siempre que detectemos que la nivelación de la base no es la adecuada. Algunos factores que nos pueden indicar una falta de ajuste en el calibrado de la base son los siguientes: la pieza se adhiere de manera heterogénea a la superficie, la primera capa de las piezas es excesivamente ancha o estrecha, o el desplazamiento vertical del extrusor no es fluido.

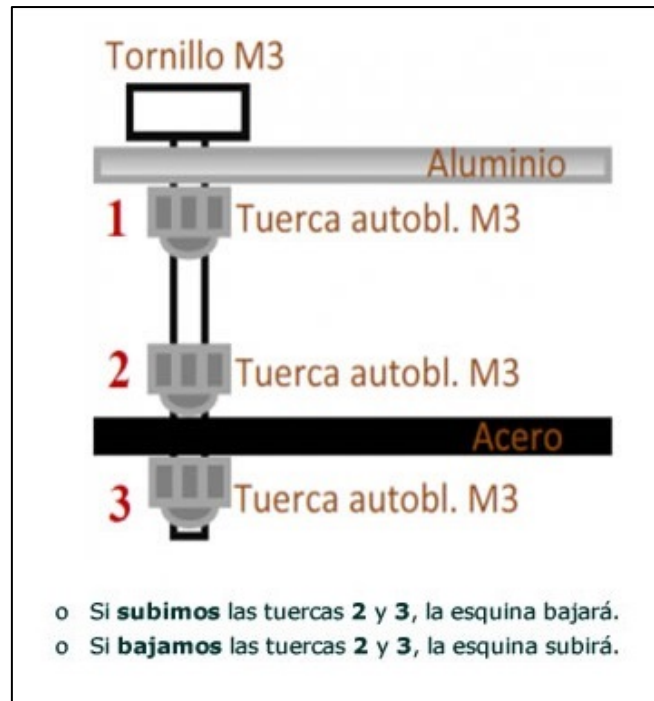


Ilustración 69: Método de calibración de la base de impresión. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Regulación de la tensión de las correas

La tensión que presentan las correas encargadas de transmitir el movimiento de los motores a los ejes X e Y es otro parámetro crítico del proceso de impresión. La correcta tensión de estos elementos nos permitirá evitar problemas durante la impresión. Una correa estará correctamente apretada si para juntar sus extremos en el punto central de esta debemos aplicar bastante esfuerzo.

Unas correas poco tensas pueden provocar la aparición de un efecto de histéresis mecánica en los movimientos de los ejes X e Y. Este fenómeno afecta de forma muy negativa al posicionamiento del cabezal del extrusor. Algunas de las consecuencias que puede tener un apriete insuficiente de las correas son que el motor se salte algunos pasos durante la impresión o que las paredes de las piezas se impriman con deformaciones. En el otro extremo nos encontramos con la situación en la que las correas tienen una tensión excesiva. En este caso, las piezas de la máquina trabajarán excesivamente forzadas; en concreto los motores podrían verse afectados por un aumento excesivo de temperatura.

Para realizar el apriete en ambos ejes, existen sendas piezas plásticas denominadas apretadores. Estas piezas contienen en un extremo los rodamientos por los que desliza

la correa en el sistema de transmisión del movimiento, mientras que en el otro extremo disponen de un tornillo de regulación. Mediante el apriete de este tornillo conseguiremos una mayor tensión en las correas en cuestión.

6.2.2 Operaciones de mantenimiento

Las operaciones de mantenimiento permiten mantener las impresoras en un estado óptimo para su utilización. A su vez, esto disminuye la probabilidad de que aparezcan fallos y averías en los distintos componentes de la impresora. La frecuencia con la que deben realizarse las tareas de mantenimiento varía en función de la operación; existirán operaciones que deberemos realizar tras un cierto periodo de tiempo pese a que la máquina no haya estado en funcionamiento, otras que deberemos repetir tras cada impresión o varias impresiones y otras que dependerán de la carga de trabajo a la que esté sometida la máquina.

Como norma general, los fabricantes suelen indicar en el manual de utilización de una máquina las operaciones de mantenimiento que deben llevarse a cabo. En cualquier caso, estas operaciones son conocidas y compartidas por las comunidades de desarrolladores y aficionados a la fabricación aditiva. En esta sección haremos una revisión de las operaciones habituales de una impresora FDM, que tratarán la limpieza, la lubricación y la revisión de los componentes más críticos de la máquina.

Limpieza de componentes

Las operaciones de limpieza deberemos realizarlas tras pocas horas de impresión, puesto que la aparición de restos y suciedad es fenómeno inherente al proceso de impresión. Nos centraremos en cuatro componentes cuyo estado óptimo tiene gran relevancia para obtener una pieza correctamente impresa: la base de impresión, el tornillo moleteado, los husillos y barras cromadas y los ventiladores.

Como medida previa a cada impresión debemos retirar todos los restos plásticos presentes en la superficie de impresión. Además, en el caso de emplear productos de fijación como lacas o adhesivos, debemos realizar una limpieza de la base tras unas pocas impresiones. El método aconsejado para esta operación consiste en eliminar los restos de adhesivo con un papel húmedo o una toallita y emplear para el secado papel de cocina.

El tornillo moleteado se encarga de empujar el plástico hacia la boquilla de extrusión mediante el arrastre del mismo. En ese proceso es habitual que se adhieran restos de plástico a los dientes encargados del arrastre, y una acumulación de estos restos provocaría un funcionamiento deficiente del sistema al no clavarse los dientes del tornillo en el filamento. Por ello, tras varias impresiones es recomendable retirar los restos plásticos presentes en el tornillo moleteado con la ayuda de algún elemento afilado.

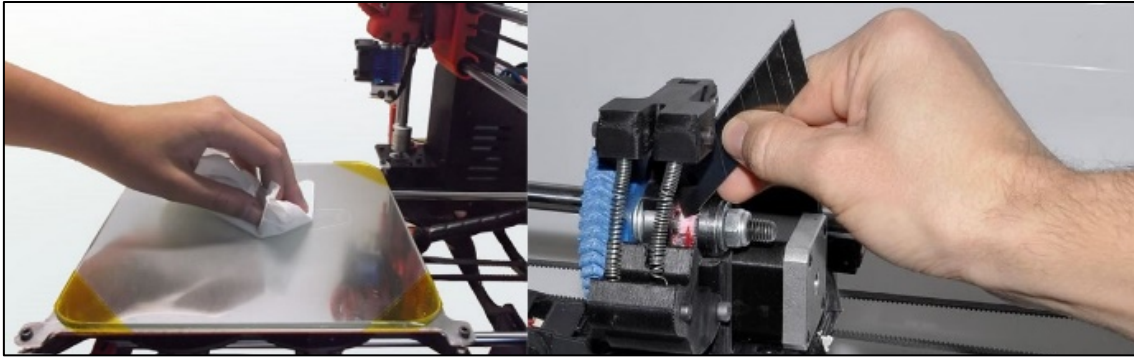


Ilustración 70: Operaciones de limpieza de la impresora. Fuente: BPMSat. Ref: [41]

Con el uso de la máquina no es extraño que se acumulen restos de plástico, de espráis fijadores o pelusas en los husillos y en las barras cromadas. Es necesario limpiar estos elementos tras varias horas de impresión para evitar que los restos se introduzcan en los rodamientos y las tuercas, hecho que provocaría un aumento de rozamiento negativo para el desplazamiento.

De manera similar a lo que ocurre con husillos y barras, los restos derivados del proceso de impresión pueden ir a parar a los ventiladores. Estos elementos se encargan de asegurar la correcta regulación térmica de los componentes electrónicos, por lo que será importante mantenerlos en buen estado. Para ello, debemos retirar los posibles cuerpos indeseables que se hayan depositado en las hélices del ventilador.

Lubricación de barras y husillos

La lubricación conviene realizarla sobre los elementos dedicados a desplazar los componentes móviles de la impresora; esto es, las barras y los husillos. La necesidad de engrasar estos elementos se detecta ante una excesiva dificultad en su movimiento o ante ruidos de rozamientos. Esta acción es recomendable llevarla a cabo tras varias horas de impresión.

En el caso de las barras debemos comenzar por retirar la suciedad y la grasa previa acumulada, que puede estar deteriorada. Para ello, limpiamos con papel las barras, desplazamos el carro correspondiente y volvemos a limpiar. Repetimos esta acción hasta que no apreciamos restos de suciedad. Al desplazar el carro lo que hacemos es conseguir que se depositen los restos de grasa y otros materiales adheridos que son indeseables. Aplicamos en este momento la lubricación y volvemos a desplazar los carros. El engrase de los husillos es más sencillo, puesto que bastará con aplicar aceite lubricante en el dentado del husillo y desplazar el carro para asegurar la correcta extensión de este.

Los materiales empleados como engrasadores que se recomienda utilizar para esta finalidad son grafito, vaselina, aceite, grasas basadas en siliconas y, por encima de todos, grasa de litio. En ningún caso deberemos utilizar lubricantes del tipo “3 en 1” o basados en derivados del petróleo, ya que pueden ser agresivos para los rodamientos.

Revisión de componentes

Dentro de las operaciones de mantenimiento incluimos la revisión de los elementos que forman parte del calibrado de la máquina. Nos centraremos en la comprobación de la tensión de las correas y de la correcta alineación de los husillos. Destacaremos también la necesidad de comprobar el apriete de los tornillos de fijación y de revisar el estado de las piezas impresas. Es recomendable realizar estas revisiones periódicamente, incluso aunque la impresora no haya estado en operación.

Si bien es cierto que las correas son duraderas y que no suelen aflojarse, debemos revisar la tensión de las mismas tras varias horas de impresión. Una disminución de la tensión puede ser un indicador de la avería de alguna de las piezas del sistema de transmisión. De ser así, primero deberíamos realizar la sustitución de la pieza y a continuación la regulación de la tensión de la correa.

Los husillos son los encargados de desplazar el carro en la dirección vertical. Para que esta función se realice de manera óptima, debemos asegurarnos de que la alineación de los husillos con los motores del eje Z es adecuada. De no ser así, podemos jugar con el sistema de apriete mediante tornillos prisioneros para conseguir una correcta alineación. Al mismo tiempo, debemos comprobar que el carro del eje X, que es soportado por los husillos, es paralelo a la base de impresión. En caso negativo, debemos girar manualmente los husillos hasta lograr una correcta alineación horizontal. Por último, debemos prestar atención al estado de los propios acopladores ya que estos elementos se encargan de absorber fuerzas y vibraciones, las cuales pueden provocarles grietas e incluso un colapso total.

Las impresoras 3D suelen estar confeccionadas gracias al uso de tornillos de fijación. Dado que la máquina produce vibraciones en operación, es posible que estos elementos se aflojen y provoquen un ajuste insuficiente. Es una buena práctica, por tanto, revisar el apriete de los tornillos cada cierto tiempo, independientemente de la carga a la que haya estado sometida la máquina.

Por otro lado, algunas piezas impresas que incorporan las impresoras en su estructura – así ocurre con la DIMA LT – forman parte de mecanismos móviles de la máquina. En nuestro caso nos encontramos los engranajes del extrusor o las piezas tensoras de las correas. Es importante tener preparado al menos un juego de piezas autoimpreso que nos permita realizar la sustitución de piezas en caso de avería. El estado de estas piezas impresas que trabajan en condiciones más críticas debemos revisarlo con periodicidad tras varias horas de impresión.

Capítulo 7
Costes y explotación
económica

7 COSTES Y EXPLOTACIÓN ECONÓMICA

El laboratorio que hemos puesto en marcha en este proyecto tiene como finalidad la ejecución de actividades de carácter investigador y docente. Para el desarrollo de cualquier tipo de actividad de esta naturaleza es necesario conocer los costes económicos asociados, de forma que se pueda valorar su viabilidad y su conveniencia. En este punto debemos, en consecuencia, ser capaces de calcular los costes asociados a una actividad o proyecto que valoremos poner en marcha, así como de dar un presupuesto a entidades externas que deseen solicitar un servicio a nuestro laboratorio.

La actividad principal del laboratorio será la impresión de piezas para el estudio de los distintos parámetros que rodean el proceso de impresión. Esta tarea de investigación nos permitirá profundizar el conocimiento tanto de la tecnología FDM como del comportamiento de las impresoras y los materiales con los que trabajemos. Gracias a este dominio de la materia, el laboratorio acogerá en un futuro sesiones educativas en las que se desarrollarán los conceptos de la tecnología de impresión 3D y se realizarán ejercicios prácticos de impresión de piezas.

El laboratorio estará disponible para que empresas o particulares puedan encargar estudios de piezas impresas. Bien sean baterías de pruebas de una pieza para producción, la obtención de prototipos para el desarrollo de un producto o la experimentación con un nuevo material, en el laboratorio podrán ejecutarse este tipo de actividades.

En definitiva, el núcleo de la actividad del laboratorio será la impresión de piezas. Debemos tener en cuenta que en el proceso de impresión de una pieza entran en juego tanto las infraestructuras del laboratorio como la propia operación de explotación de las impresoras. Esto tendrá relevancia a la hora de cuantificar los costes de la actividad, donde deberemos hacer una distinción entre los costes asociados a las infraestructuras, que serán fijos, y los que estarán sujetos al propio proceso de impresión, que serán costes variables.

7.1 Análisis de modelos de coste

El objetivo de nuestro análisis de costes será obtener una función que nos permita cuantificar el coste económico de cualquier actividad a desarrollar. Nos centraremos únicamente en los costes de fabricación de una pieza mediante la técnica FDM de fabricación aditiva. Para desarrollar esta función debemos analizar las diferentes técnicas de estimación de los costes de un producto y seleccionar la que mejor se adapte a nuestra actividad. En nuestro caso el producto será una pieza impresa en 3D.

En este capítulo revisaremos los distintos modelos de producción que han sido desarrollados con anterioridad por autores de la materia. A partir de ellos,

desarrollaremos un modelo adaptado a las actividades que nosotros realizamos en el laboratorio. Para la elaboración del modelo de costes deberemos analizar en profundidad el proceso de impresión y los recursos que forman parte del mismo. Una vez que tengamos identificadas las fuentes de coste, haremos los estudios pertinentes para dar una estimación de los costes asociados a cada una. Finalmente propondremos un modelo matemático que nos permita calcular el coste de llevar a cabo una actividad determinada.

7.1.1 Modelos de estimación de costes de producción

Entre las técnicas de estimación del coste de un producto que han sido desarrolladas hasta la fecha, encontramos dos clasificaciones generales: las técnicas cualitativas y las técnicas cuantitativas. Las técnicas cualitativas se basan en un análisis comparativo del nuevo producto con productos similares fabricados con anterioridad, mientras que las técnicas cuantitativas se fundamentan en el estudio detallado del diseño del producto, sus parámetros y los procesos de fabricación correspondientes. Dentro de las técnicas cuantitativas podemos hacer una nueva clasificación en función del método de estimación del coste, donde diferenciaremos entre las técnicas paramétricas y las técnicas analíticas. Por un lado, las técnicas paramétricas se sirven de variables que representan diferentes parámetros del producto para el cálculo del coste; mientras que, por otro lado, las técnicas analíticas hacen una suma de elementos unitarios que representan los recursos consumidos durante todo el ciclo de producción. [45]

El método que hemos escogido para hacer la estimación de costes de nuestro producto es la estimación analítica de costes. En esta metodología se descompone un producto en unidades elementales, operaciones y actividades que representan diferentes recursos consumidos durante el ciclo de fabricación, y expresamos el coste como suma de todos estos componentes. Las ventajas que nos han llevado a seleccionar una metodología analítica para el cálculo de los costes de producción son principalmente tres: la mayor precisión que ofrecen estas técnicas, el desglose detallado del coste que permiten – muy recurrente para una negociación – y la capacidad para evaluar modelos alternativos. Por el contrario, las desventajas más notables a las que nos enfrentaremos serán la necesidad de contar con información detallada del diseño y la posibilidad de no tener acceso a esa información. [46]

A partir de la bibliografía existente acerca del cálculo de costes de producción en el sector de la fabricación aditiva, hemos considerado la técnica analítica más adecuada la basada en el desglose de actividades (*ABC – Activity Based Costing*). Esta técnica se centra en calcular los costes incurridos en la realización de cada una de las actividades necesarias para fabricar un producto. La metodología ABC no solamente ofrece resultados más precisos que los métodos tradicionales de estimación de costes, sino que

además permite evaluar diferentes tipos de coste para múltiples procesos de fabricación. [45]

Los modelos más destacados que se han desarrollado para la estimación de los costes de fabricación mediante fabricación aditiva son principalmente tres: uno desarrollado por Hopkinson y Dickens (HD), otro con la autoría de Ruffo, Tuck y Hague (RTH) y un tercero elaborado por Liendemann. [47] El primero en ser desarrollado fue el de HD, que se centró en estimar el coste anual por pieza basándose en tres supuestos: el sistema produce un único tipo de pieza durante un año, se utiliza el volumen máximo y la máquina opera el 90% del tiempo. [48] Más tarde apareció el modelo de RTH, que experimentaba con la misma pieza que HD pero centrándose en la tecnología de *Laser Sintering*, y que adoptó la técnica ABC para diseñar el modelo de costes. [49] Por último, Liendemann desarrolló su propio modelo basándose en el trabajo de RTH pero incorporando ciertas mejoras para dar una explicación más profunda de la estructura de costes de un producto elaborado mediante fabricación aditiva. [50]

7.1.2 Desarrollo de un modelo de costes “ABC”

El modelo que vamos a desarrollar para calcular los costes de cualquier proyecto que llevemos a cabo en nuestro laboratorio se basará en el desglose del proceso de impresión en una serie de actividades, cada una de las cuales llevará asociado un coste. La suma de los costes de cada una de estas actividades nos permitirá obtener el coste total del proyecto.

Para desarrollar el modelo en primer lugar debemos realizar un desglose del proceso de impresión mediante fabricación aditiva. Adaptaremos este proceso a la tecnología con la que nosotros trabajamos en el laboratorio, la FDM. Además, propondremos diversos modelos de proceso para hacer un cálculo más realista y adaptado a los servicios que ofrecemos. Finalmente, introduciremos el modelo e indicaremos las consideraciones que hemos realizado en su planteamiento.

Proceso de impresión

Las actividades que desarrollaremos en el laboratorio se adaptarán a tres tipos de servicio. La diferenciación de estos servicios se hará en función de la posesión del objeto físico o del archivo geométrico de la pieza que se desea imprimir. Así, consideramos los tres modelos de proceso siguientes:

- Modelo 1: disponemos del archivo geométrico de la pieza.
- Modelo 2: no disponemos ni del objeto ni del archivo geométrico; partimos de la idea de cómo será la pieza final deseada. Debemos diseñar la pieza.
- Modelo 3: no disponemos del archivo geométrico, pero sí del objeto físico que queremos imprimir. Debemos realizar un escaneado.

El personal presente en el laboratorio y que será el que se encargue de las distintas actividades estará compuesto por un ingeniero y por un técnico de laboratorio. El ingeniero será responsable de trabajar con los paquetes de software en las actividades de diseño y preparación de las piezas. El técnico será el que se encargue de la parte operativa del proceso de impresión.

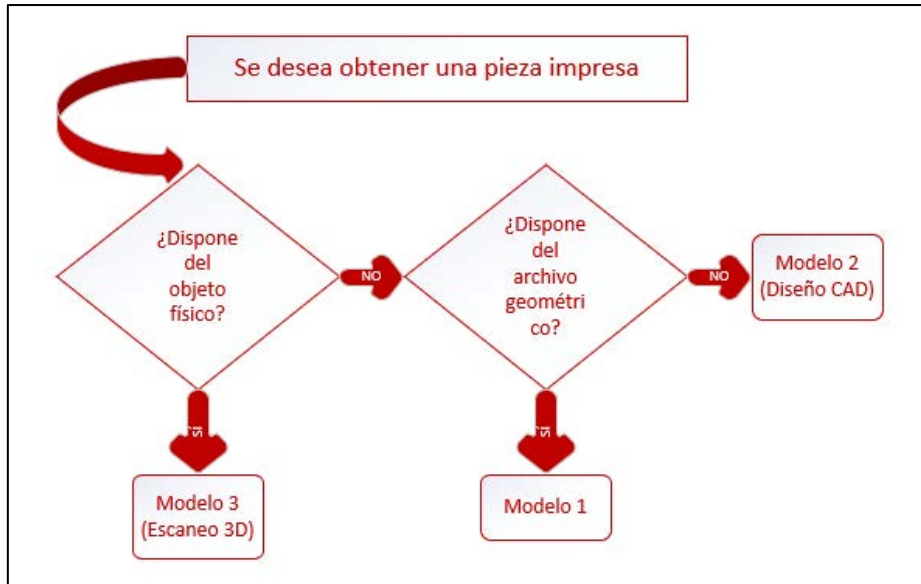


Ilustración 71: Diagrama de flujo del modelo de trabajo. Fuente: Elaboración propia.

En este momento conviene realizar el desglose de las actividades que compondrán el proceso de impresión como tal. Este proceso será invariable una vez que se tiene el archivo geométrico de la pieza que se desea imprimir. Sin embargo, existirán variaciones entre los distintos modelos en las etapas iniciales. Los modelos están descritos en la figura 72 y servirán para adaptar el estudio de costes a cada modelo de proceso. De esta manera podremos obtener un presupuesto más realista para cada proyecto que efectuemos, tanto para aquellos que desarrollemos a nivel interno como para reportar un coste a entidades externas.

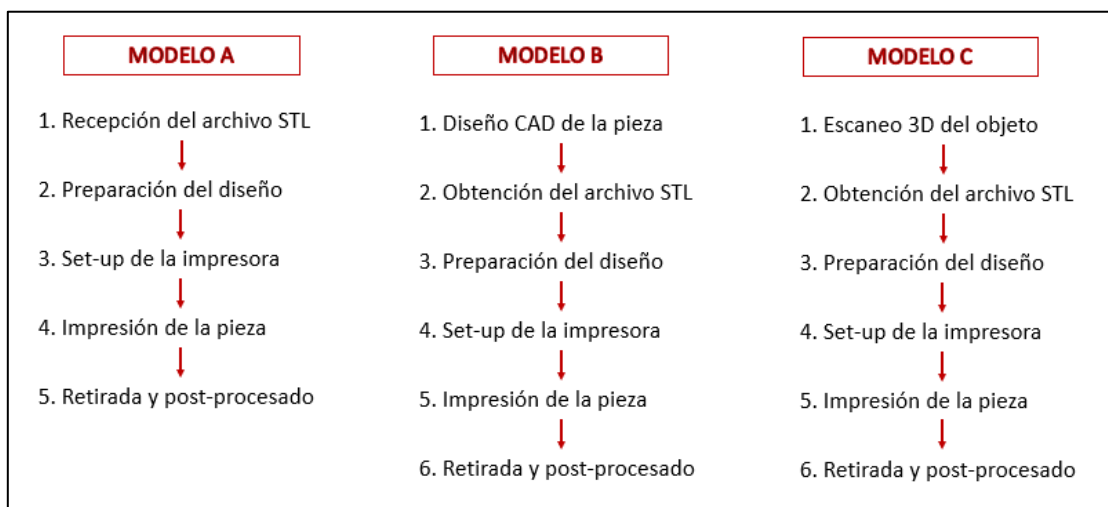


Ilustración 72: Modelos de proceso de impresión. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, realizaremos una breve explicación de cada una de las actividades que componen el proceso de impresión. Los tres modelos se diferencian en los pasos iniciales; en concreto, en la forma en la que se obtiene el archivo en formato STL de la pieza que se quiere imprimir. Observamos las diferencias entre las primeras actividades de cada uno:

- Recepción del archivo STL: en el modelo A partimos directamente del archivo geométrico de la pieza, el cual ya puede ser tratado por los programas CAM de impresión 3D. Este archivo puede haber sido descargado de un repositorio online o provenir de un diseño elaborado previamente por una entidad externa.
- Diseño CAD de la pieza: en el modelo B el diseño completo de la pieza lo realizará el ingeniero del laboratorio a través de las herramientas CAD que han sido instaladas en el PC.
- Escaneo 3D del objeto: en el modelo C la obtención del archivo geométrico provendrá del escaneo del objeto en cuestión mediante el escáner 3D presente en el laboratorio. Este proceso implicará el uso de diversos programas de software y será realizado por el ingeniero del laboratorio.
- Obtención del archivo STL: para los modelos B y C, una vez que se tiene el diseño geométrico tridimensional, este deberá ser exportado en formato STL para permitir pasar al siguiente paso. Esta actividad es simplemente un hito que nos permite igualar el proceso de los modelos B y C al del modelo A.

El resto de las actividades del proceso de impresión serán comunes para los tres modelos. Observamos las operaciones que incluye cada una de estas etapas:

- Preparación del diseño: esta actividad incluye la revisión del archivo STL y la reparación de la malla en caso de que existieran defectos en su confección. Asimismo, en esta etapa se diseñan los soportes que deberán facilitar la impresión de la pieza, en caso de que fueran necesarios. Por último, se lleva a cabo la laminación de la pieza configurando los parámetros para obtener el resultado deseado. Para realizar estas operaciones el ingeniero hará uso de las herramientas CAM instaladas en el PC.
- Set-up de la impresora: en este apartado se incluyen las operaciones que deberá realizar el técnico para acondicionar la impresora; limpieza de restos de plástico, aplicación de spray adhesivo, correcto apriete de los componentes, etc.
- Impresión de la pieza: la etapa de impresión incluye el calentamiento previo de la cama y del extrusor de la máquina, el propio proceso de extrusión de la pieza y el posterior enfriamiento de los elementos calefactados y de la pieza. En esta

actividad solamente interviene la máquina y es el paso en el que se realiza la fabricación de la pieza.

- Retirada y post-procesado: en esta etapa el técnico realiza la retirada de la pieza de la superficie de impresión y la posterior aplicación de los tratamientos de post-procesado necesarios.

Esta serie de actividades consecutivas componen los procesos para la fabricación de una pieza mediante FDM que hemos considerado para nuestro laboratorio. Ahora que ya conocemos las etapas estamos en condiciones de elaborar un modelo de costes. Puesto que hemos decidido adoptar la metodología ABC para el cálculo de costes, deberemos considerar los costes derivados de la ejecución de cada una de estas actividades. Asimismo, dado que disponemos de tres tipos de proceso de impresión, desarrollaremos tres modelos adaptados a cada uno de ellos.

Modelo de cálculo del coste

El modelo de costes que desarrollaremos nos va a permitir calcular el coste de impresión de una única pieza, que servirá como pieza prototipo para ser reproducida posteriormente. Sin embargo, incluiremos un segundo modelo para calcular los costes de impresión por plataforma, para lo que bastará con hacer una pequeña modificación sobre el modelo para una pieza. En el modelo para los costes por plataforma asumiremos la hipótesis de que solamente podrá imprimirse la misma pieza en tantas copias como permita la superficie de impresión. La justificación de hacer esta división en dos modelos es la siguiente: en el primer modelo contemplaremos los costes de obtención del archivo geométrico y preparación de este para su impresión, mientras que en el modelo de costes por plataforma eliminaremos estas fuentes de coste puesto que ya dispondremos de la pieza preparada para su impresión.

Para la construcción de nuestro modelo nos basaremos en los modelos de estimación de costes desarrollados con anterioridad en el sector. Tomaremos como guía el modelo elaborado por Ruffo, Tuck y Hague para estructurar nuestro modelo y, sobre él, haremos modificaciones que incluirán conceptos introducidos por Liendemann, por Hopkinson y Dickens, y algunos propios que nos permitirán adaptar el modelo a la actividad concreta de nuestro laboratorio.

El objetivo será el cálculo del coste de una pieza una vez que esta ya haya sido elaborada. Se trata, por tanto, de un modelo de costes “a posteriori”. Las variables que deberemos medir en el proceso de elaboración para poder calcular posteriormente los costes serán de dos tipos: los tiempos de las distintas actividades (t_{prep} , t_{setup} , t_{pp} , t_{CAD} , t_{esc}) y la masa de la pieza elaborada (m_p).

La fórmula del modelo general para una pieza con las variables correspondientes es la siguiente:

$$CT^k = CD^k (t_{prep}, t_{CAD}, t_{esc}, t_{setup}, t_{pp}, m_p, t_p) + CI(t, t_p) + C_{nc}(m_p, t_p, t_{setup}, t_{pp})$$

, donde los tres componentes son el coste directo de fabricación (CD), el coste indirecto (CI) y el coste de no calidad (C_{nc}). En el coste directo incluiremos los costes relacionados directamente con la operación de manufactura que realiza la propia máquina. Incluimos, por ello, los costes derivados del material consumido y de la energía eléctrica empleada. En los costes indirectos incluiremos todos los costes derivados de la infraestructura que será necesaria para poder desarrollar la actividad. Por último, los costes de no calidad tendrán en consideración los diferentes errores de impresión que hacen insatisfactoria una pieza. El modelo para calcular los costes por plataforma, que incluye una ligera variación, se calculará mediante la siguiente ecuación:

$$CP = CD (t_{setup}, t_{pp}, m_p, t_p) + CI(t, t_p) + C_{nc}(m_p, t_p, t_{setup}, t_{pp})$$

En el siguiente capítulo haremos un análisis minucioso de cada una de las variables y los componentes de estas dos ecuaciones.

7.2 Desarrollo del modelo de costes

En este capítulo nos vamos a centrar en la desagregación del modelo de estimación del coste que proponemos. Nuestro modelo se fundamenta en la diferenciación por costes de fabricación directos e indirectos, tal y como proponen RHT en su trabajo. A su vez, dentro de los costes directos e indirectos haremos una distinción entre los costes variables de fabricación y los costes fijos. Introduciremos además un tercer término que nos permitirá cuantificar los costes de no calidad en los que incurramos, en el que incluiremos los costes de las piezas defectuosas. Este coste tendrá una consideración independiente dentro del desglose que hemos llevado a cabo.

Una vez conocido el modelo, procederemos a realizar las estimaciones de los distintos elementos de coste. Para realizar estas estimaciones nos basaremos tanto en datos existentes como en la experiencia adquirida. El último paso será desarrollar las ecuaciones de costes hasta ofrecer una fórmula que permita cuantificar los costes incurridos en cualquier proyecto que sea ejecutado.

7.2.1 Desglose de los costes

El modelo de costes que proponemos consta en su nivel más alto de tres grupos de coste: los costes directos (CD), los costes indirectos (CI) y los costes de no calidad (C_{nc}). Esta desagregación da lugar a la fórmula general del modelo, la cual hemos introducido en el apartado anterior. Sin embargo, hemos considerado tres modelos de proceso de

impresión, por lo que existirán tres fórmulas que nos permitirán calcular el coste de cada uno de ellos. En su nivel más alto, estas fórmulas son las siguientes:

$$CT^1 = CD^1 + CI + C_{nc}$$

$$CT^2 = CD^2 + CI + C_{nc}$$

$$CT^3 = CD^3 + CI + C_{nc}$$

, donde CT indica el coste total de fabricar una pieza, CD los costes directos, CI los costes indirectos y C_{nc} los costes de no calidad. Los superíndices indican el modelo de proceso.

Como vemos, las tres fórmulas se diferencian únicamente en el término de costes directos. Por lo tanto, realizaremos el desglose de los tres modelos para los costes directos mientras que haremos una descomposición genérica de los costes indirectos y los de no calidad.

Costes directos

Los costes directos de fabricación son aquellos que están directamente relacionados con la obtención del producto. En nuestro caso, el producto obtenido es una pieza impresa en 3D, por lo que contabilizaremos como costes directos las actividades responsables de su fabricación. Tal y como hemos analizado en el apartado de “Proceso de impresión”, el proceso de fabricación de una pieza mediante FDM consta de una serie de etapas. Las actividades asociadas a esas etapas son, por tanto, actividades implicadas en la propia fabricación de la pieza, y serán los costes de estas lo que consideraremos costes directos. Estas actividades tienen una dependencia directa con el volumen de producción, por lo que los costes directos asociados a ellas serán también clasificados como costes variables de fabricación.

Las actividades en las que hemos desglosado el proceso de impresión dependen del modelo de proceso utilizado. De la misma manera, desarrollaremos los costes directos para cada uno de ellos. La ecuación que utilizamos hace una diferenciación entre las actividades que son realizadas por los trabajadores del laboratorio y la etapa de impresión de la pieza, que será realizada por la máquina. La ecuación general para el cálculo de los costes directos es la siguiente:

$$CD^k = C_{mo}^k + C_{maq} = (C_{ing}^k + C_{tec}) + (C_{mat} + C_{ener})$$

, donde el superíndice k indica el modelo de proceso, C_{mo} representa los costes de mano de obra, C_{maq} los costes de máquina, C_{ing} indica los costes del ingeniero, C_{tec} indica los costes del técnico, C_{mat} representa los costes de material y C_{ener} los costes de energía.

Como podemos ver en la ecuación anterior, serán solamente las actividades ejecutadas por los trabajadores las que se vean afectadas por el modelo seguido. Las actividades de cada modelo, que aparecen indicadas en la figura 72, serán realizadas bien por el ingeniero o bien por el técnico de laboratorio. Concretamente, el ingeniero se encargará

del diseño CAD de la pieza, del escaneo 3D del objeto y de la preparación del diseño. El técnico, por su parte, será responsable del set-up de las máquinas y de la retirada y post-procesado. No consideraremos actividades con coste la recepción del archivo STL ni la obtención del archivo STL, puesto que se trata solamente de hitos del proceso. El coste de todas estas actividades se incluye en el término C_{mo} . La actividad restante – la impresión de la pieza – será la que realice la máquina y se computará en el término de la ecuación correspondiente (C_{maq}). Las ecuaciones de costes directos de mano de obra desglosadas para cada modelo de proceso quedan de la siguiente manera:

$$C_{mo}^1 = C_{ing}^1 + C_{tec} = P_{ing} * t_{prep} + P_{tec} * (t_{setup} + t_{pp})$$

$$C_{mo}^2 = C_{ing}^2 + C_{tec} = P_{ing} * (t_{CAD} + t_{prep}) + P_{tec} * (t_{setup} + t_{pp})$$

$$C_{mo}^3 = C_{ing}^3 + C_{tec} = P_{ing} * (t_{esc} + t_{prep}) + P_{tec} * (t_{setup} + t_{pp})$$

, donde P_{ing} indica el salario por hora del ingeniero y P_{tec} indica el salario por hora del técnico. El resto de términos indican los tiempos (en horas) de preparación del diseño (t_{prep}), de set-up de la impresora (t_{setup}), de retirada y post-procesado (t_{pp}), de diseño CAD de la pieza (t_{CAD}) y de escaneo 3D del objeto (t_{esc}).

La ecuación de costes de la máquina va a tener en cuenta dos fuentes de costes imputadas al proceso de extrusión de la pieza: el material utilizado y la energía eléctrica consumida. Estos costes no se verán afectados por el modelo utilizado, puesto que en los tres casos se realiza este paso. A continuación introducimos la ecuación de costes de máquina:

$$C_{maq} = C_{mat} + C_{ener} = P_m * m_p + P_E * t_p$$

, donde P_m indica el precio del material (en €/kg), m_p indica la cantidad de material utilizado (en kg), P_E indica el precio de la energía eléctrica (en €/h) y t_p representa el tiempo que tarda en fabricarse la pieza (en horas).

Con estas ecuaciones quedarían contemplados todos los costes directos implicados en el proceso de impresión, que serán los que determinen en gran medida los costes totales de cualquier proyecto. Es cierto que los costes de defectos están relacionados directamente con la obtención del producto, por lo que podrían considerarse costes directos. Sin embargo, por la relevancia que tienen en la fabricación mediante FDM, les daremos un tratamiento especial.

Costes indirectos

Los costes indirectos de fabricación son aquellos que afectan al proceso general de uno o más productos, por lo que no se pueden imputar directamente a un solo producto sin usar algún criterio de asignación. En esta clasificación contemplamos los gastos de alquiler, las amortizaciones de equipos y los gastos de mantenimiento.

Dentro de los costes indirectos podemos hacer una nueva clasificación en costes fijos y costes variables. Esta subdivisión nos permitirá establecer un criterio de asignación distinto para cada grupo. Los costes fijos incluirán aquellas actividades o equipos que no se vean afectados por el volumen de producción, mientras que formarán parte de los costes variables las actividades cuyos costes varíen en función del volumen de unidades producidas. La ecuación de alto nivel para los costes fijos es la siguiente:

$$CI = CF_{ind} + CV_{ind}$$

, donde CF_{ind} indica los costes fijos indirectos y CV_{ind} los costes variables indirectos.

En este punto cabe destacar las dos actividades de mantenimiento que consideraremos en nuestro modelo. Una de estas actividades supondrá un coste indirecto variable mientras que la otra computará como coste indirecto fijo. El mantenimiento periódico de las máquinas será el que consideremos coste fijo. Esta actividad se refiere a las actividades de mantenimiento que deben realizarse sobre las máquinas con cierta periodicidad, independientemente del volumen de trabajo que hayan soportado. Algunas de estas actividades son la revisión del estado de los componentes, el apriete de los sistemas de soporte, la comprobación del funcionamiento de los sistemas de transmisión o el engrasado de ciertos elementos. Por otro lado, debemos asignar un coste a las actividades de mantenimiento y reparación de las máquinas que estarán condicionadas por el volumen de trabajo que soporte la máquina. En este caso nos referimos a operaciones de sustitución de componentes, reparación de fallos y tareas de calibración y de verificación, entre otras. Estas actividades estarán contempladas en los costes variables.

Las actividades que representarán costes fijos serán las amortizaciones, los gastos de alquiler y los gastos del mantenimiento periódico de la máquina. Para asignar estos costes al proceso de fabricación de una pieza utilizamos el siguiente criterio: consideramos los costes anuales de cada actividad, los dividimos entre el total de horas de operación de las máquinas a lo largo de un año y los multiplicamos por el tiempo que tarda en completarse el proceso de fabricación de la pieza. La ecuación de costes fijos indirectos que hemos desarrollado es la siguiente:

$$CF_{ind} = (C_{alq} + C_{am} + C_{mto_f}) * \frac{t}{h_{anuales}}$$

$$t = t_{prep} + t_{CAD} + t_{esc} + t_{setup} + t_{pp}$$

, donde C_{alq} representa los costes anuales de alquiler, C_{am} los costes anuales de amortización, C_{mto_f} los costes anuales del mantenimiento periódico, $h_{anuales}$ las horas anuales de impresión de las máquinas y t el tiempo total del proceso de fabricación.

Los costes de amortización tendrán a su vez una subdivisión en los dos tipos de costes que consideraremos: la amortización de las impresoras y la amortización de los equipos auxiliares. Podríamos incluir en este apartado la amortización de los programas de

software utilizados durante el proceso de impresión; sin embargo, al comienzo de la actividad del laboratorio dispondremos únicamente de programas de software libre. En el término de amortización de las impresoras incluiremos los costes de amortización de las nueve máquinas que estarán operativas. En cuanto a los costes de amortización de los equipos auxiliares, consideraremos los ordenadores, los monitores y el escáner.

$$C_{am} = C_{am_imp} + C_{am_eq}$$

, donde C_{am_imp} representa los costes de amortización de las impresoras y C_{am_eq} los costes de amortización de los equipos auxiliares.

Los costes variables indirectos solamente están representados por los costes de mantenimiento que dependen del proceso de impresión. En este caso los costes nos vendrán dados por horas de impresión, por lo que la asignación se hará multiplicando estos costes por un tiempo determinado. Consideramos que la única actividad que tiene efecto directo sobre las necesidades de mantenimiento de las impresoras es la impresión de la pieza (t_p). Por lo tanto, el tiempo que tarda en ejecutarse esta actividad será el que utilizaremos para asignar los costes. La siguiente ecuación contempla los costes variables indirectos:

$$CV_{ind} = C_{mto_v} * t_p$$

, donde C_{mto_v} indica el coste de las reparaciones de los fallos y t_p indica el tiempo de impresión de una pieza.

Costes de no calidad

En la fabricación mediante impresión 3D, al igual que ocurre con el resto de las tecnologías de fabricación, no todas las piezas obtenidas cumplen los requisitos establecidos. Estas piezas son defectuosas y no pueden entregarse como producto final. Las piezas que deban desecharse supondrán un coste adicional que debe cuantificarse, para lo cual realizaremos un análisis de los defectos que suelen ocurrir y la frecuencia con que estos aparecen.

La cantidad de piezas defectuosas obtenidas en fabricación aditiva mediante la tecnología FDM puede considerarse elevada en comparación con las obtenidas mediante métodos tradicionales. Esto se debe a que entran en juego diversos parámetros que tienen un comportamiento crítico a la hora de determinar las propiedades del producto final. Los parámetros más destacados que son responsables de la aparición de defectos en las piezas impresas son la preparación de la máquina, las propiedades del material de fabricación, el diseño adecuado de soportes y la configuración oportuna de los parámetros de impresión.

El término de la ecuación del modelo de costes que contempla los costes de defectos de fabricación incorporará un parámetro unitario (β) que represente el porcentaje de piezas insatisfactorias obtenidas. En la ecuación este parámetro multiplicará a la suma

de los costes de máquina y los costes del técnico. Esto se justifica porque tras obtener una pieza defectuosa solamente deberán repetirse las actividades de set-up de la máquina y de retirada y post-procesado, realizadas por el técnico, además de la propia impresión de la pieza por la máquina. La ecuación de costes de no calidad es la siguiente:

$$C_{nc} = \beta * (C_{maq} + C_{tec})$$

, donde $\beta \in [0,1]$ es el parámetro que representa el porcentaje de piezas defectuosas.

7.2.2 Estimación de los factores de coste

En esta sección estimaremos el valor de los factores de coste que hemos determinado para nuestro modelo. Para su estimación nos serviremos tanto de la información recabada como de la experiencia adquirida por haber realizado procesos de impresión previamente.

Costes directos

Hemos dividido los costes directos en costes de mano de obra (C_{mo}) y costes de máquina (C_{maq}). Vamos a analizar por separado estas dos fuentes de coste.

Los costes de mano de obra contemplan las actividades que son ejecutadas por los dos trabajadores del laboratorio: el ingeniero (C_{ing}) y el técnico (C_{tec}). El coste de estas actividades se computa en función de la duración de las mismas. Debemos, por tanto, estimar el salario por hora para el ingeniero y para el técnico, y establecer un criterio de asignación de costes en función de los tiempos para cada actividad.

Tabla 16: Salarios por hora de los trabajadores. Fuente: Elaboración propia.

Trabajador	Variable	Salario (€/h)
Ingeniero	P_{ing}	21
Técnico	P_{tec}	12

Para asignar estos costes a cada una de las actividades, estableceremos franjas horarias que tendrán su coste asignado. Dado que las actividades no tienen una duración discreta, para computar el coste se considerará el tiempo del intervalo siguiente al de la duración medida de la actividad.

Tabla 17: Costes de las actividades del proceso de impresión. Fuente: Elaboración propia.

Actividad	Variable	Interv. (h)	Trabajador	Coste/interv. (€/h)
Diseño CAD de la pieza	t_{CAD}	1	Ingeniero	21
Escaneo 3D del objeto	t_{esc}	1	Ingeniero	21
Preparación del diseño	t_{prep}	0,5	Ingeniero	10,5
Set-up de la impresora	t_{setup}	0,2	Técnico	2,4
Retirada y post-procesado	t_{pp}	0,2	Técnico	2,4

Los costes de máquina están formados por los costes del material que es utilizado para fabricar la pieza (C_{mat}) y los costes de la energía eléctrica consumida durante la fabricación (C_{ener}). Para contabilizar estos costes estimaremos los precios del material y de la energía, y los multiplicaremos por la masa consumida y por el tiempo de impresión de la pieza respectivamente. El precio del material (P_m) se expresará en euros por kilogramo; haremos un estudio de los precios de mercado de los distintos materiales presentes en el laboratorio (ver tabla 18). El precio de la electricidad (P_E) lo estimaremos a partir de los valores de consumo energético de una impresora y del coste por hora de la electricidad, y estará expresado en euros por hora.

Una impresora tipo Prusa i3 – como las DIMA LT – consume en torno a 250W en su funcionamiento desde la perspectiva más conservadora. El coste medio de la electricidad en la actualidad se sitúa en torno a los 0,14 €/kWh. Por lo tanto, tras realizar los cálculos pertinentes, concluimos que el coste más pesimista de la energía eléctrica consumida por las impresoras asciende a 0,035 euros por hora de impresión ($P_E = 0,035$ €/h).

Tabla 18: Precios de los distintos tipos de materiales. Fuente: Elaboración propia.

Tipo de filamento	Sección (mm)	P_m (€/kg)
PLA	3	18
	1,75	20
ABS	3	16
	1,75	18
HIPS	3	28
	1,75	28
Filaflex y Ninjaflex	3	32
	1,75	32
Laywoo-d3	3	80

Costes indirectos

Los costes indirectos que consideramos en nuestro modelo están identificados en la subdivisión en fijos y variables. Los costes indirectos fijos (CF_{ind}) incluirán el coste de alquiler, el coste de las amortizaciones y el coste del mantenimiento periódico. El único coste indirecto variable (CF_{var}) será el asociado al mantenimiento variable.

Comenzaremos estudiando los costes indirectos fijos. Estos costes se calculan para un año y, posteriormente, se asignan al proyecto en cuestión como función de las horas que se han empleado para realizarlo. Para determinar el número de horas que las impresoras están operativas nos fijamos en los modelos de costes de RHT y HD. Los primeros proponen que una máquina de *Laser Sintering* optimiza su rendimiento anual para un 57% de uso, mientras que HD sostienen que cualquier máquina de fabricación aditiva puede alcanzar el 90% de tiempo de operación. En el caso de nuestro laboratorio,

consideramos que la utilización más adecuada de nuestras máquinas es de 500 horas mensuales (superior al 68%). Por lo tanto, el tiempo anual de operación de nuestras impresoras será de 6000 horas y utilizaremos este dato para asignar los costes fijos. Dado que tenemos 9 impresoras operativas, repartiremos los costes fijos entre las horas de operación de todas las máquinas ($h_{\text{anuales}} = 54000\text{h}$).

El coste del alquiler (C_{alq}) se estima en base a los metros cuadrados con los que cuenta el laboratorio. Un coste aproximado del metro cuadrado para un local de oficinas asciende a 96 euros anuales. Puesto que el tamaño de nuestro laboratorio es superior a 25 m^2 , estimaremos el coste de alquiler suponiendo 26 m^2 . Tras el cálculo, el coste anual de alquiler que obtenemos es de 2400 euros ($C_{\text{alq}} = 2400\text{€}$).

El coste de amortización de los equipos (C_{am}) se divide en costes de amortización de las impresoras ($C_{\text{am_imp}}$) y coste de amortización de los equipos auxiliares ($C_{\text{am_eq}}$). Los equipos auxiliares que vamos a considerar son aquellos cuyo valor es suficientemente representativo como para que no pueda ser omitido. Para obtener los costes de amortización realizaremos una desagregación lineal del coste de adquisición en función del número de años que la Agencia Tributaria estima para cada tipo de equipos. Los costes anuales que obtenemos, y que están desglosados en la tabla 19, son $C_{\text{am_imp}} = 562,5\text{€}$ y $C_{\text{am_eq}} = 287,5\text{€}$.

Tabla 19: Costes de amortización de los equipos. Fuente: Elaboración propia.

Equipo	Cantidad	C. Adquis. (1 ud)	Variable	Años am.	C. Am.(total)
Impresora	9	500	C_{imp}	8	562,5
PC	2	800	C_{eq}	8	200
Monitor	2	100	C_{eq}	8	25
Escáner	1	500	C_{eq}	8	62,5

El coste del mantenimiento periódico de las impresoras ($C_{\text{mto_f}}$) lo calcularemos a partir de un estudio de los costes de mantenimiento reportados por los fabricantes en las especificaciones de sus productos; centrándonos en máquinas de la misma categoría que las DIMA LT. Un mantenimiento de nivel medio sobre una impresora de tipo Prusa i3 podría ascender a los 700 euros anuales ($C_{\text{mto_f}} = 700\text{€}$).

Nos quedan por analizar los costes indirectos variables, que estarán representados por los costes de mantenimiento de las impresoras que dependen del uso de estas ($C_{\text{mto_v}}$). Identificaremos estos costes realizando una ficha de los fallos y averías más habituales que se producen en las impresoras DIMA LT. Cada fallo llevará asociada una actividad de revisión, reparación o sustitución de componentes. Estableceremos una duración promedio para cada actividad, y su coste se calculará multiplicando esta duración por el salario que el técnico percibe por hora ($P_{\text{tec}} = 12\text{€/h}$), ya que será el encargado de realizar estas operaciones.

Tabla 20: Lista de fallos de las DIMA LT y sus costes asociados. Fuente: Elaboración propia.

Fallo	Frec. (h)	Durac. (h)	Coste (€)	Coste/Frec. (€/h)
Rotura del tensor X	500	0,5	6	0,012
Rotura del apretador de filamento	700	0,5	6	0,008571429
Atasco del filamento en el extrusor	800	0,2	2,4	0,003
Rotura del termistor del hot-end	2000	2	24	0,012
Parada de un motor	1500	0,5	6	0,004
Rotura de cables	3000	1,5	18	0,006
Descalibración de los drivers	3200	0,5	6	0,001875
Atasco de los engranajes	2000	1,5	18	0,009
Descalibración de la base y el carro X	350	0,5	6	0,017142857
			C_{mto_v}	0,073589286

Costes de no calidad

Puesto que necesitamos cuantificar los costes de no calidad (C_{nc}) para incorporarlos a nuestro modelo de estimación del coste, debemos analizar los fallos provocados por los parámetros críticos del proceso de impresión. En la tabla 21 hemos realizado un estudio de los fallos más habituales que hemos detectado a lo largo de la explotación del laboratorio hasta la fecha, y hemos cuantificado su frecuencia en porcentaje respecto del total de piezas fabricadas. Como podemos observar, el valor total de frecuencia que se obtiene asciende al 26%. Esto quiere decir que existirá una probabilidad del 26% ($\beta = 0,26$) de que la pieza que fabriquemos sea defectuosa y no podamos entregarla.

Tabla 21: Fallos habituales de impresión en FDM. Fuente: Elaboración propia.

Fallo	Frecuencia
Mal calibrado mecánico	4%
Mal calibrado eléctrico	1%
Mal apriete del extrusor	5%
Enredo del filamento en la bobina	2%
Obstrucción del filamento en el extrusor	3%
Avería de un componente plástico	2%
Mala configuración de parámetros	1%
Mal diseño de soportes	4%
Fallos impredecibles de la máquina	4%
Total	26%

Con objeto de entender mejor las no conformidades que pueden derivarse de los fallos anteriormente descritos, hemos utilizado un diagrama causa-efecto o diagrama espina de pescado. Un diagrama espina de pescado permite identificar las causas que provocan un efecto determinado, que en este caso es la obtención de una pieza defectuosa. En nuestro diagrama, que podemos observar en la figura 73, hemos agrupado las causas en

cuatro categorías: problemas en las capas, deformaciones de la pieza, problemas en la extrusión y defectos de acabado superficial. En cada categoría hemos indicado los tres problemas mayoritarios que son responsables de la impresión de una pieza insatisfactoria, la cual deberemos desechar incurriendo en un coste de no calidad.

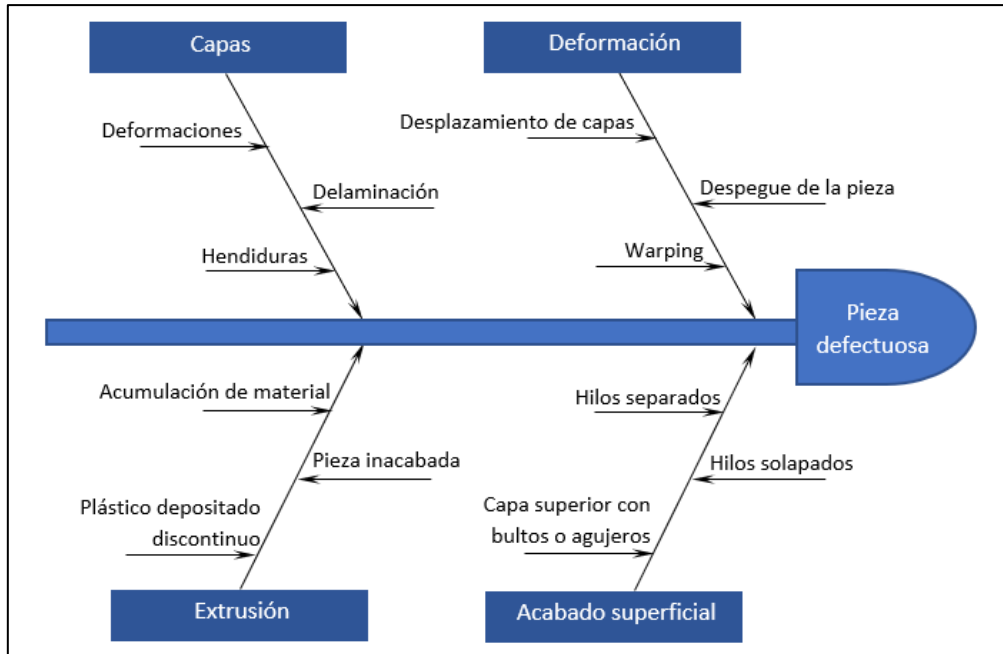


Ilustración 73: Diagrama causa-efecto de los defectos de impresión. Fuente: Elaboración propia.

Deberemos tener estos fallos en consideración a la hora de planificar la producción de un número de piezas, puesto que no bastará con realizar tantas impresiones como piezas queramos obtener.

7.2.3 Desarrollo matemático y fórmulas finales

El modelo matemático que hemos desarrollado ya ha sido analizado y conocemos cada uno de los términos que lo componen, así como la estimación de los costes asociados a ellos. En este momento estamos ya capacitados para desarrollar las fórmulas que dan cuerpo al modelo. Comenzaremos introduciendo un listado que incluya las variables conocidas y las variables desconocidas, que serán las que deberemos determinar a la finalización del proyecto correspondiente.

La única variable conocida para la que deberemos seleccionar un valor variable es el precio del material, puesto que dependerá del material empleado. En cuanto a las variables desconocidas, deberemos determinarlas a lo largo del proceso. Para ello, mediremos los tiempos de cada actividad y calcularemos la masa de la pieza obtenida. Observamos en la tabla 22 el listado de todas las variables que forman nuestro modelo de costes.

Tabla 22: Variables del modelo de costes. Fuente: Elaboración propia.

Var. conocidas	Valor	Unidad	Var. desconocidas	Unidad
P_{ing}	21	€/h	t_{prep}	h
P_{tec}	12	€/h	t_{CAD}^1	h
P_m	f(material)	€/kg	t_{esc}^2	h
P_E	0,015	€/h	t_{setup}	h
$h_{anuales}$	54000	h	t_{pp}	h
C_{alq}	2400	€	t_p	h
C_{am_imp}	562,5	€	m_p	kg
C_{am_eq}	287,5	€	t	h
C_{mto_f}	700	€		
C_{mto_v}	0,07358929	€/h		
β	0,26	-		

¹ Esta variable solamente se incluye en el modelo 2.

² Esta variable solamente se incluye en el modelo 3.

Haremos el desarrollo de la fórmula para el modelo de proceso 1, puesto que el desarrollo es análogo para los tres modelos. Partimos de la fórmula general y la desagregamos:

$$CT^1 = CD^1 + CI + C_{nc}$$

$$CT^1 = [C_{mo}^1 + C_{maq}] + [CF_{ind} + CV_{ind}] + [\beta \cdot (C_{maq} + C_{tec})]$$

Simplificamos la fórmula, asignando el término de costes de no calidad a los términos de costes directos correspondientes:

$$CT^1 = [C_{ing}^1 + C_{tec} + C_{maq}] + [CF_{ind} + CV_{ind}] + [\beta \cdot (C_{maq} + C_{tec})]$$

$$CT^1 = [C_{ing}^1 + (1 + \beta)(C_{tec} + C_{maq})] + [CF_{ind} + CV_{ind}]$$

Continuamos ahora con la desagregación de los grupos de costes directos e indirectos:

$$CT^1 = [C_{ing}^1 + (1 + \beta)(C_{tec} + C_{mat} + C_{ener})] + [CF_{ind} + CV_{ind}]$$

Finalmente, la fórmula obtenida en su nivel más bajo es la siguiente:

$$CT^1 = [P_{ing} * t_{prep} + (1 + \beta)(P_{tec} * (t_{setup} + t_{pp}) + P_m * m_p + P_E * t_p)] + \left[(C_{alq} + C_{am_imp} + C_{am_eq} + C_{mto_f}) * \frac{t}{h_{anuales}} + C_{mto_v} * t_p \right]$$

Mediante esta fórmula seremos capaces de calcular el coste de fabricar una pieza siguiendo el modelo de proceso 1. Introducimos ahora las fórmulas desarrolladas para los modelos 2 y 3.

Modelo 2:

$$CT^2 = [P_{ing} * (t_{CAD} + t_{prep}) + (1 + \beta)(P_{tec} * (t_{setup} + t_{pp}) + P_m * m_p + P_E * t_p)] \\ + \left[(C_{alq} + C_{am_imp} + C_{am_eq} + C_{mto_f}) * \frac{t}{h_{anuales}} + C_{mto_v} * t_p \right]$$

Modelo 3:

$$CT^2 = [P_{ing} * (t_{CAD} + t_{prep}) + (1 + \beta)(P_{tec} * (t_{setup} + t_{pp}) + P_m * m_p + P_E * t_p)] \\ + \left[(C_{alq} + C_{am_imp} + C_{am_eq} + C_{mto_f}) * \frac{t}{h_{anuales}} + C_{mto_v} * t_p \right]$$

Estas fórmulas serán las que utilizaremos para calcular el coste de fabricar una pieza sobre la que deberemos preparar para su impresión (1), diseñar y preparar (2) o escanear y preparar (3), según el modelo correspondiente. Una vez que ya hayamos realizado la impresión de la pieza prototipo, podremos imprimir varias copias de esa pieza en cada una de las máquinas. Para determinar los costes de este proceso, utilizamos la ecuación de costes por plataforma (CP). Esta ecuación parte de la ecuación de costes de una pieza (CT), de la que se elimina el coste relativo al trabajo del ingeniero. La ecuación general de costes por plataforma es la siguiente:

$$CP = CD + CI + C_{nc}$$

$$CP = [C_{tec} + C_{maq}] + [CF_{ind} + CV_{ind}] + [\beta \cdot (C_{maq} + C_{tec})]$$

Si desarrollamos la fórmula mediante un procedimiento análogo al seguido para la fórmula de CT, obtenemos la siguiente expresión:

$$CP = [(1 + \beta)(P_{tec} * (t_{setup} + t_{pp}) + P_m * m_p + P_E * t_p)] \\ + \left[(C_{alq} + C_{am_imp} + C_{am_eq} + C_{mto_f}) * \frac{t}{h_{anuales}} + C_{mto_v} * t_p \right]$$

En este caso, los costes obtenidos serán los de imprimir todas las piezas presentes en la plataforma. Por lo tanto, si queremos calcular el coste por pieza impresa, debemos dividir estos costes por número total de piezas que contiene la plataforma. La expresión es la siguiente:

$$C_{pieza} = \frac{CP}{N}$$

, donde C_{pieza} representa el coste de una pieza, CP representa los costes por plataforma y N indica el número de piezas fabricadas en la plataforma.

Por lo tanto, gracias a estas dos ecuaciones podremos calcular los costes incurridos, por un lado, en la preparación e impresión del prototipo de la pieza a fabricar y, por otro, en la reproducción de esa pieza.

Capítulo 8

Conclusiones

8 CONCLUSIONES

8.1 Objetivos alcanzados

Al comienzo del proyecto nos planteamos una serie de objetivos que deberían guiar nuestros pasos en el desarrollo de este. Es ahora el momento de revisar la consecución de los objetivos y del alcance planteados para evaluar el éxito del trabajo.

El objetivo primordial de este trabajo era el lanzamiento de un laboratorio de impresión 3D que permitiera explorar el proceso de fabricación aditiva. A la finalización del proyecto, el laboratorio lleva más de tres meses realizando tareas de impresión 3D de piezas. De esta manera, el local está ya preparado para la ejecución del proyecto Lonja3D.

En el primer bloque del documento hemos realizado un análisis previo de las tecnologías de fabricación aditiva más relevantes en el panorama actual y de los materiales implicados en sus procesos. Este estudio nos ha permitido comprender las aplicaciones más destacadas de estas tecnologías y las posibilidades que ofrecen de cara a su evolución futura. Además, hemos realizado una primera aproximación a la tecnología FDM utilizada por las máquinas del laboratorio, para lo que hemos investigado acerca del proceso de fabricación y de los distintos materiales compatibles.

La operación del laboratorio durante este tiempo nos ha permitido adquirir un importante conocimiento de campo de la tecnología de FDM, tanto en lo que al proceso de fabricación se refiere como a la utilización de las máquinas y los equipos implicados. Gracias a este aprendizaje hemos podido desarrollar los capítulos relacionados con la explotación del laboratorio basándonos en un conocimiento empírico. En estos capítulos recogemos la información necesaria para el acondicionamiento de un laboratorio de impresión 3D en base a las necesidades que hemos advertido. Igualmente, se presenta la información relativa a la documentación técnica de las máquinas, a su preparación y a su mantenimiento. Estos conocimientos permitirán optimizar las tareas de explotación del laboratorio.

La información obtenida a partir de la explotación del laboratorio la hemos incorporado en el desarrollo de un modelo de costes realista y adaptado a este nuevo método de fabricación. La experiencia real de operación de la actividad de impresión 3D nos ha permitido considerar las variables implicadas desde una perspectiva práctica, y nos ha servido para diseñar un modelo de costes flexible y modelable.

A lo largo del desarrollo del proyecto hemos ido adquiriendo valiosas lecciones acerca de la puesta en marcha de un laboratorio de impresión 3D. En los siguientes apartados indicaremos las más destacadas, haciendo una división por etapas.

La etapa de acondicionamiento del local nos ha permitido conocer las características de los requerimientos físicos implicados en un laboratorio de impresión 3D. Las conclusiones que hemos obtenido se exponen a continuación:

- La adquisición de los equipos es la actividad más crítica en el acondicionamiento del local. Es indispensable contar con una gran variedad de herramientas y equipos que permitan realizar un correcto mantenimiento sobre las máquinas. Igualmente, es necesario considerar los equipos informáticos que posibilitan el proceso de impresión, así como los materiales que se consumen durante el mismo.
- Los requisitos en cuanto a instalaciones, suministros y adecuación del local no son excesivamente elevados. En principio, el establecimiento no será un factor determinante para lanzar una actividad de este tipo.
- La distribución en planta es crucial para favorecer la explotación de la actividad. La operación con impresoras 3D requiere de un constante desplazamiento por el área de trabajo para las operaciones de impresión, las operaciones post-impresión y las tareas de mantenimiento de las máquinas. Además, debemos tener un acceso rápido a gran cantidad de materiales y herramientas.

De la explotación del laboratorio hemos obtenido valiosas lecciones acerca del proceso de impresión 3D y de la tecnología FDM. A continuación exponemos las más relevantes:

- Las máquinas de impresión 3D que emplean la tecnología FDM poseen cierta complejidad a nivel mecánico y electrónico. Es importante conocer en profundidad su composición, su conexionado y el comportamiento esperado de los distintos elementos que las forman. Asimismo, es muy importante realizar un correcto mantenimiento de estas ya que los fallos de operación se ven considerablemente reducidos.
- La tecnología FDM ofrece la posibilidad de fabricar piezas con geometrías complejas mediante un proceso de fabricación sencillo. Esta tecnología resulta muy adecuada para el desarrollo de actividades investigadoras y docentes, debido a su facilidad de uso y a la accesibilidad de los equipos. Las limitaciones que presenta se relacionan principalmente con las propiedades mecánicas de las piezas y con el nivel de detalle alcanzado.
- El software de impresión 3D ofrece una infinidad de posibilidades a la hora de seleccionar los parámetros de impresión de una pieza. La elección que hagamos tendrá una gran repercusión sobre el resultado final de la pieza obtenida. Conviene ajustar estos parámetros para cada pieza que vaya a ser impresa.

- La configuración de la impresora debe realizarse cuidadosamente. Es necesario conocer las características de la máquina para adecuar los parámetros de configuración. De no realizarse un ajuste correcto, la calidad de impresión se verá notablemente reducida y aumentará la probabilidad de que la máquina sufra algún tipo de avería.
- En el proceso de fabricación mediante impresión 3D con FDM se obtiene un elevado número de piezas defectuosas en comparación con los valores que reportan los métodos tradicionales. Esto se debe a la gran cantidad de parámetros que entran en juego en la obtención de una pieza satisfactoria (propiedades del material, estado de la máquina, preparación adecuada de la pieza, etc.).
- El proceso de impresión 3D es sencillo de ejecutar a nivel operativo. Será suficiente con conocer los pasos a seguir y realizarlos ordenadamente. Es, por lo tanto, una tecnología accesible desde el punto de vista técnico. Sin embargo, la obtención de resultados de alta calidad estará sujeta a un dominio profundo del software de impresión 3D y del funcionamiento de las impresoras.

Del estudio de los costes implicados en el proceso de impresión 3D de una pieza extraemos conclusiones interesantes que presentamos a continuación:

- El coste más significativo en la impresión 3D de una pieza es el asociado al material de fabricación que se consume. El coste de las piezas defectuosas tiene una cierta afectación sobre el coste total, mientras que el consumo eléctrico y las amortizaciones de los costes fijos son poco representativos.
- El principal coste a la hora de solicitar un servicio de impresión 3D reside en las tareas de diseño, escaneado y preparación de la pieza para su impresión. Una vez que el modelo ha sido acondicionado para su impresión, los costes de reproducir esa pieza no serán tan significativos.

En vista del cumplimiento de los objetivos planteados y de las lecciones aprendidas que hemos recogido, podemos considerar que la ejecución del proyecto ha sido exitosa. Por lo tanto, una vez que el laboratorio ha sido lanzado y se encuentra operativo, es el momento de proponer los pasos futuros.

8.2 Trabajos futuros

El laboratorio se encuentra en la actualidad realizando tareas de impresión 3D de manera habitual. Hasta ahora la finalidad perseguida era principalmente su puesta en operación; sin embargo, con esta premisa ya cumplida podemos pensar en diversificar sus funcionalidades. Puesto que las tareas que ejecuta el laboratorio tienen fines investigadores y docentes, los próximos pasos que deberán realizarse se enmarcarán en este contexto.

En el desarrollo del proyecto hemos tenido siempre presente un doble objetivo a la hora de acondicionar el laboratorio: disponer del espacio suficiente para diversificar las actividades que se desarrollan y realizar una distribución flexible de los equipos. Estas dos consideraciones adquieren en este momento una gran relevancia, ya que facilitarán las transformaciones futuras del laboratorio.

Los pasos que proponemos a continuación tienen como propósito ampliar los servicios que ofrece el Laboratorio de Impresión 3D del GIR INSISOC. En el ámbito de la investigación, las actividades propuestas se centrarán en la experimentación con nuevas tecnologías de fabricación aditiva y en la explotación del proceso de escaneado. En lo relativo a la docencia, se pretende lograr que el laboratorio sea un centro de transferencia de conocimiento puntero.

En primer lugar, resultaría muy interesante introducir impresoras que empleasen una tecnología distinta a la de modelado por deposición fundida (FDM). La adquisición de una máquina que emplease una tecnología nueva permitiría explorar esa tecnología a nivel de proceso, de maquinaria y de características de las piezas obtenidas. De este modo, podrían realizarse estudios comparativos entre las piezas obtenidas por las distintas tecnologías; introduciendo como variables el coste, el tiempo de fabricación y la calidad final de la pieza. Al mismo tiempo, podrían llevarse a cabo estudios de viabilidad de la nueva tecnología para su introducción en la industria.

En segundo lugar, puesto que el laboratorio pretende convertirse en centro de referencia en actividades de transferencia tecnológica, un paso a seguir sería el acondicionamiento del local para el desarrollo de actividades docentes. Esto implicaría no solo una reorganización del layout del local, sino la adquisición del mobiliario y los equipos de apoyo. La previsión que se ha realizado contempla la impartición de sesiones educativas a lo largo de los próximos años.

En tercer lugar, en el laboratorio podría explotarse en profundidad el proceso de escaneado 3D de un objeto físico. La técnica de escaneado se encuentra en un notable estado de desarrollo en la actualidad, sin embargo el proceso resulta a menudo complejo y tedioso. Mediante la adquisición de equipos de escaneado más potentes sería interesante explorar el proceso, notar sus puntos fuertes y sus puntos débiles, y orientarlo hacia la optimización.

Capítulo 9
Estudio de costes del
proyecto

9 ESTUDIO DE COSTES DEL PROYECTO

El estudio económico del proyecto comprenderá la inclusión de todas las actividades implicadas en la ejecución de este. Para poder estimar un presupuesto, haremos las dos siguientes consideraciones:

- El proyecto ha sido ejecutado por una única persona cuyas atribuciones profesionales podrían asimilarse a las de un ingeniero recién titulado.
- El desarrollo del proyecto ha comprendido un periodo total de seis meses.

En el estudio de costes consideraremos dos fuentes de costes diferenciadas: el coste de los recursos humanos utilizados y el coste de los materiales consumidos a lo largo del proyecto y los gastos indirectos. Haremos el desglose de cada fuente de costes por separado.

Para analizar los costes de los recursos humanos debemos considerar tanto las horas dedicadas por el ingeniero en el desarrollo de las actividades como las horas dedicadas por el tutor en las tareas de apoyo y de revisión. El coste/hora del ingeniero lo cuantificamos en 14€, mientras que el coste/hora del profesor lo fijamos en 30€.

Las tres actividades principales en las que se puede dividir el proyecto en cuestión son: formación, operación del laboratorio y documentación y elaboración de la memoria. En los siguientes apartados analizaremos los costes de recursos humanos propios de cada actividad.

La actividad de formación hace referencia al Curso de Técnico Superior en Impresión 3D (impartido por BPMSat) que el ingeniero realizó para adquirir los conocimientos necesarios sobre la fabricación aditiva. Este curso fue realizado previamente al inicio de la elaboración formal del proyecto y tuvo una duración de 200 horas repartidas en un periodo de un mes y una semana.

En la actividad de operación del laboratorio se incluye la explotación de las máquinas y los equipos del laboratorio. Esta actividad se realizó paralelamente a la redacción de la memoria y sirvió para adquirir conocimientos prácticos de la materia. El periodo que abarca corresponde a cuatro meses y un total de 400 horas.

La actividad de documentación y elaboración de la memoria incluye las horas dedicadas expresamente a la búsqueda de información y a la redacción formal de la memoria del proyecto. El periodo comprendido es de cinco meses y una carga de 450 horas de trabajo.

Los costes repercutidos para cada una de las tres actividades se indican en la siguiente tabla:

Tabla 23: Costes de los recursos humanos del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Actividad	Concepto	Unidad	Cantidad	Coste/unidad	Total (€)
Formación	Horas ingeniero	h	200	14 €	2.800 €
Operación del laboratorio	Horas ingeniero	h	400	14 €	5.600 €
Documentación y memoria	Horas ingeniero	h	450	14 €	6.300 €
	Horas tutor	h	50	30 €	1.500 €
Agregado					16.200 €

Los materiales que originan costes en el proyecto pueden dividirse entre los que se utilizan en las tres actividades que hemos diferenciado y los utilizados en algunas de ellas en exclusiva. Entre los materiales comunes se incluyen el hardware utilizado, las licencias de software, los materiales de oficina, la conexión a internet y los gastos generales.

En la operación del laboratorio deberemos hacer uso de herramientas, equipos y consumibles cuyos costes deberemos cuantificar. También se incluirán en el estudio los costes del software específico de impresión 3D. Igualmente, el precio del curso de formación realizado deberá incluirse en la imputación de costes.

En la siguiente tabla podemos observar el desglose de los costes de materiales:

Tabla 24: Costes de los materiales del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Actividad	Concepto	Unidad	Cantidad	Coste/ud	Total (€)
Todas	Ordenador	U	1	800 €	800 €
	Licencia Microsoft Office Professional 2016	U	1	250 €	250 €
	Material de oficina	U	1	75 €	75 €
	Conexión internet	U	6	40 €	240 €
	Gastos indirectos (luz, teléfono, etc.)	U	6	15 €	90 €
Operación	Herramientas y equipos	U	1	400 €	400 €
	Consumibles del laboratorio	U	1	100 €	100 €
	Software de impresión 3D	U	1	0 €	0 €
Formación	Curso de Técnico en Impresión 3D	U	1	1.200 €	1.200 €
Agregado					3.155 €

A la suma de los costes de recursos humanos y recursos materiales derivados del proyecto les añadiremos un tres por ciento en concepto de gastos generales. Esta imputación nos permitirá considerar los costes asociados al riesgo del proyecto y nos permitirá incluir otros valores que no hayan sido considerados en el estudio de costes.

Tabla 25: Costes totales del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

Fuente de costes	Costes
Recursos humanos	16.200 €
Recursos materiales	3.155 €
Agregado	19.355 €
Gastos generales (3%)	581 €
Total	19.936 €

Por lo tanto, el coste estimado que ha supuesto el desarrollo del proyecto asciende a diecinueve mil novecientos treinta y seis euros.

Capítulo 10
Bibliografía

10 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Wikipedia, “Economía_digital,” 2017. [Online]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Economía_digital.
- [2] D. J. Teece, “Profiting from innovation in the digital economy: Enabling technologies, standards, and licensing models in the wireless world,” *Res. Policy*, vol. 47, no. 8, pp. 1367–1387, 2018.
- [3] M. Esteban, “OBSERVATORIO PARA LA INDUSTRIA 4.0,” Universidad de Valladolid, 2017.
- [4] PwC, “Industry 4.0 : Building the digital enterprise,” pp. 1–36, 2016.
- [5] Shaleen, “3D Printing Advantages/Disadvantages,” 2016. [Online]. Available: <http://blog.inkjetwholesale.com.au/3d-printing/disadvantages-3d-printing/>.
- [6] M. Despeisse *et al.*, “Unlocking value for a circular economy through 3D printing: A research agenda,” *Technol. Forecast. Soc. Change*, vol. 115, pp. 75–84, 2017.
- [7] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, “Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,” *Compos. Part B Eng.*, 2018.
- [8] Q. Zeng, Z. Xu, Y. Tian, and Y. Qin, “Progress of the Modelling of a Direct Energy Deposition Process in Additive Manufacturing.”
- [9] ASTM International, “F2792-12a - Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies,” *Rapid Manuf. Assoc.*, pp. 10–12, 2013.
- [10] F. Calignano *et al.*, “Overview on additive manufacturing technologies,” *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 4, 2017.
- [11] Additively, “3D Printing Technologies.” [Online]. Available: <https://www.additively.com/en/learn-about/3d-printing-technologies>.
- [12] J. T. Tech, “Directed energy deposition – Advances in surfacing ,”
- [13] B. Redwood, “Additive Manufacturing Technologies.” [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/additive-manufacturing-technologies-overview>.
- [14] 3DPrinting, “An overview on the most common types of metal 3D Printing,” 2017. [Online]. Available: <https://3dprinting.com/metal/types-of-metal-3d-printing/>.
- [15] S. INC, “Wire-Am-Vs-Powder-Am @ Www.Sciaky.Com,” *Electron Beam Additive Manufacturing*, 2015. [Online]. Available: <http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-am-vs-powder-am>.
- [16] A. B. Varotsis, “SLA 3D Printing,” *Manufacturing Processes Explained*. [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing#work>.

- [17] DruckWege, "Direct Light Processing." [Online]. Available: <https://druckwege.de/en/home-en/technology/direct-light-processing-dlp>.
- [18] Additive3D, "DLP vs CLIP," 2016. [Online]. Available: <https://www.additive3d.com/insights-continuous-liquid-interface-production-clip-digital-light-processing-dlp-3d-printers/>.
- [19] S. Oceanz, "How to design parts for SLS 3D printing." [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/how-design-parts-sls-3d-printing?action>.
- [20] H. J. O'Connor, A. N. Dickson, and D. P. Dowling, "Evaluation of the mechanical performance of polymer parts fabricated using a production scale multi jet fusion printing process," *Addit. Manuf.*, vol. 22, no. April, pp. 381–387, 2018.
- [21] 3DVERSO, "HP Multi Jet Fusion: La Revolución." [Online]. Available: <http://3dverso.com/blog/la-revolucion-hp-multi-jet-fusion/>.
- [22] I. Europe, "Glossary of inkjet terms." [Online]. Available: <http://imieurope.com/inkjet-blog/2016/2/22/glossary-of-inkjet-terms>.
- [23] 3DP Lighting, "Sheet Lamination (SL) technology." [Online]. Available: <http://www.3dprinting.lighting/3d-printing-technologies/sheet-lamination/>.
- [24] R. J. F. ResearchGate, "Schematic diagram of the Ultrasonic Consolidation process." [Online]. Available: https://www.researchgate.net/profile/Ross_Friel/publication/273977345/figure/fig1/AS:391892907905036@1470445958314/Schematic-diagram-of-the-Ultrasonic-Consolidation-process.png.
- [25] 3D Hubs, "3D Systems DuraForm Pa." [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/material/3d-systems-duraform-pa>.
- [26] X. Wang, M. Jiang, Z. Zhou, J. Gou, and D. Hui, "3D printing of polymer matrix composites: A review and prospective," *Compos. Part B Eng.*, vol. 110, pp. 442–458, 2017.
- [27] Materialise, "Titanium inserts for spacecraft 66% lighter metal 3D printing." [Online]. Available: <http://www.materialise.com/en/cases/titanium-inserts-for-spacecraft-66-lighter-metal-3d-printing>.
- [28] J. Y. Lee, J. An, and C. K. Chua, "Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials," *Appl. Mater. Today*, vol. 7, pp. 120–133, 2017.
- [29] A. N. Serrano, "Beyond Rapid Prototyping: automation of robotic 3D printing for construction," Universidad Complutense de Madrid, 2017.
- [30] Digg, "Glass 3D print MIT." [Online]. Available: <http://digg.com/video/glass-3d-print-mit>.
- [31] A. B. Varotsis, "Introduction to FDM 3D Printing," *3D Hubs*. [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-fdm-3d-printing>.
- [32] J. D., "Cartesian 3D printer," *3D Natives*, 2018. [Online]. Available:

- <https://www.3dnatives.com/en/four-types-fdm-3d-printers140620174/cartesian-3d-printer/>.
- [33] R. Singh, S. Singh, I. P. Singh, F. Fabbrocino, and F. Fraternali, "Investigation for surface finish improvement of FDM parts by vapor smoothing process," *Compos. Part B Eng.*, vol. 111, pp. 228–234, 2017.
- [34] 3D Matter, "FDM 3D printing materials compared," *3D Hubs*. [Online]. Available: <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared>.
- [35] 3D Printers Leapfrog, "3D Printing with polypropylene." [Online]. Available: <https://www.lpfrg.com/en/3d-printing-polypropylene/>.
- [36] O. SC3D, "Optimatter." [Online]. Available: <https://www.optimatter.com/>.
- [37] T. De Higiene, "Ordenanza General de Seguridad e Higiene en el Trabajo." 1971.
- [38] RepRap, "P3Steel." [Online]. Available: <http://reprap.org/wiki/P3Steel/es>.
- [39] D. 3D, "Nuestros productos." [Online]. Available: <http://www.dima3d.com/nuestros-productos/#dimalt>.
- [40] Imprimalia, "Dima LT Review." [Online]. Available: <http://imprimalia3d.com/recursosimpresion3d/review-dima-lt-impresora-3d-uso-personal-parte-1>.
- [41] BPMSat, "Curso de técnico superior en impresión 3D." .
- [42] R3ALD, "Qué es un fichero STL." [Online]. Available: <http://www.r3ald.com/que-es-un-fichero-stl>.
- [43] StackExchange, "How do I give 3D printed parts in ABS a shiny smooth finish." [Online]. Available: <https://3dprinting.stackexchange.com/questions/4106/how-do-i-give-3d-printed-parts-in-abs-a-shiny-smooth-finish>.
- [44] D. 3D, "Tratamientos superficiales post-impresión. Tratamientos químicos.," 2015. [Online]. Available: <http://www.dima3d.com/tratamientos-superficiales-post-impresion-iii-tratamientos-quimicos-i/>.
- [45] A. Niazi, J. S. Dai, S. Balabani, and L. Seneviratne, "Product Cost Estimation: Technique Classification and Methodology Review," *J. Manuf. Sci. Eng.*, vol. 128, no. 2, p. 563, 2006.
- [46] A. Busachi, J. Erkoyuncu, P. Colegrove, F. Martina, C. Watts, and R. Drake, "A review of Additive Manufacturing technology and Cost Estimation techniques for the defence sector," *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, vol. 19, pp. 117–128, 2017.
- [47] D. Thomas and S. Gilbert, "Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing - A Literature Review and Discussion," no. October 2016, pp. 1–77, 2014.
- [48] I. Repository, "Analysis of rapid manufacturing using layer manufacturing processes for production," 2003.

- [49] M. Ruffo, C. Tuck, and R. Hague, "Cost estimation for rapid manufacturing - laser sintering production for low to medium volumes," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B*, vol. 220, no. 9, pp. 1417–1427, 2006.
- [50] C. Lindemann, U. Jahnke, M. Moi, and R. Koch, "Analyzing product lifecycle costs for a better understanding of cost drivers in additive manufacturing," *Int. Solid Free. Fabr. Symp.*, vol. 23, pp. 177–188, 2012.

