



Trabajo Fin de Máster

La impresión 3D en el ámbito hospitalario: estudio
de caso de un hospital en Aragón.

3D Printing in the hospital environment: case study
of a hospital in Aragon.

Autor/es

Ismael Mayoral García

Director
José Ramón Vera Gracia

Ponente
Sophie Gorgemans

Escuela de Ingeniería y Arquitectura. Universidad de Zaragoza.

2021

Resumen del trabajo propuesto

El objetivo es describir el estado actual de la impresión 3D en el ámbito hospitalario (usos, tecnologías y características) y profundizar en el estudio del caso del Hospital Universitario Miguel Servet (H.U.M.S). Valorar el futuro de esta tecnología aplicada en el ámbito sanitario y no sanitario. El uso de la tecnología de impresión 3 D se ha multiplicado en los últimos meses para conciliar la inmediatez y el futuro de equipos de todo tipo, inclusive equipos de protección individual; y de ahí ha nacido esta idea de proyecto para analizar la situación en el sector sanitario.

Tras realizar una revisión de la literatura especializada para conocer el estado actual de la impresión 3D en el ámbito hospitalario: tecnologías, características, usos y nivel de utilización; se ha estudiado la reglamentación específica sobre fabricación aditiva. Posteriormente se ha observado la situación actual del H.U.M.S: adquisición, usos y producción; para finalizar con un análisis de la viabilidad técnica y económica de la impresión 3D en el H.U.M.S y cambios en organización.

Las fases del trabajo han sido: en primer lugar, la búsqueda de documentación y análisis, en base a literatura especializada, artículos de prensa y de divulgación. A continuación, el análisis del caso, donde se ha estudiado la utilización de las tecnologías de impresión 3D en el H.U.M.S para posteriormente realizar un análisis de la viabilidad técnica, económica y los cambios organizacionales. Finalmente, se ha redactado la memoria.

Índice general

Resumen del trabajo propuesto.....	3
Índice general	4
Índice de Ilustraciones	6
Prólogo	7
I. Introducción a la fabricación aditiva.....	8
I.1. Definición.....	8
I.2. Historia de la fabricación aditiva.	8
I.3. Recursos de la fabricación aditiva.....	9
I.4. Tecnologías de fabricación aditiva.....	10
I.4.1. Estereolitografía (SLA)	10
I.4.2. Sinterizado selectivo por láser (SLS)	11
I.4.3. Modelado por deposición fundida (FDM)	12
I.4.4. Otras tecnologías de fabricación aditiva.	13
I.4.5. Comparativa entre las tecnologías más empleadas: SLA, SLS y FDM.....	13
II. La fabricación aditiva en el ámbito hospitalario.....	17
II.1. Introducción	17
II.2. Aplicaciones de la impresión 3D en medicina.....	17
II.2.1. Biomodelos	17
II.2.2. Guías y útiles quirúrgicos.	18
II.2.3. Medicamentos	18
II.2.4. Equipamiento médico en áreas de difícil acceso	19
II.2.5. Prótesis personalizadas	19
II.2.6. Docencia, simulación e investigación.....	20
II.2.7. Respiradores y equipos de protección individual anti-COVID	20
II.3. Gestión operativa de la impresión 3D en hospitales.....	22
II.3.1. Flujo de trabajo.	22
II.3.2. Factores estratégicos.....	24
II.3.3. Factores tácticos.....	25
II.3.4. Factores financieros.	25
II.4 Impresión 3D en Centros Sanitarios de España.....	26
II.4.1. Hospital de Sant Joan de Déu (Barcelona)	27
II.4.2. Hospital Gregorio Marañón (Madrid).....	27
II.4.3. Hospital Universitario la Paz de Madrid.....	28

II.4.4. Centros sanitarios de Castilla y León.....	28
II.4.5. Hospital Son Espases de Palma de Mallorca	28
III. Un caso de éxito: la Unidad de Impresión 3D del Hospital Universitario Miguel Servet.....	29
III.1 Introducción.....	29
III.2 La unidad de impresión 3D del H.U.M.S.	31
III.2.1 Justificación de existencia	31
III.2.2 Razones por las que orientarla al ámbito del mantenimiento	32
III.2.3 Crecimiento y desarrollo de la unidad.	32
III.2.4 Difusión del trabajo llevado a cabo por la Unidad	33
III.2.5 Estructura organizativa / ubicación en el H.U.M.S	34
III.3 Los Recursos de la Unidad.	34
III.3.1 El personal de la Unidad y sus funciones.	34
III.3.2 Equipos y máquinas.....	35
III.3.3 Materiales	38
III.3.4 Software.....	39
III.3.5 Diseños	39
III.4 Metodología de trabajo y aplicaciones de las piezas.....	40
III.4.1 Justificación de necesidad de las piezas	40
III.4.2 Flujo de trabajo en la Unidad del H.U.M.S	41
III.4.3 La ingeniería inversa	42
III.4.4 Aplicaciones de las piezas fabricadas desde la Unidad	42
III.5 Análisis de viabilidad	45
III.5.1 Rentabilidad económica de piezas impresas en 3D frente a suministros comerciales.....	46
III.5.2 Aportación de soluciones originales y valor añadido a los servicios de mantenimiento.	48
III.6 La Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S: Un proyecto de futuro.	49
III.6.1 Análisis DAFO	50
III.6.2 Propuestas para el desarrollo de la unidad	50
III.7 Análisis crítico del caso.....	53
IV. Conclusiones	55
V. Bibliografía.....	57

Índice de Ilustraciones

Ilustración 1.....	10
Ilustración 2.....	11
Ilustración 3:	12
Ilustración 4.....	18
Ilustración 5.....	23
Ilustración 6.....	29
Ilustración 7.....	43
Ilustración 8.....	45
Ilustración 9.....	46
Ilustración 10.....	47
Ilustración 11.....	47
Ilustración 12.....	50

Prólogo

En los últimos años la ingeniería industrial está experimentando cambios de gran calado. La aparición de nuevas tecnologías está modificando integralmente aspectos como la forma de producir, las relaciones de la empresa con su entorno o la estructuración de sus recursos humanos. La magnitud de este salto evolutivo en la industrial es tal que ya se habla de una cuarta revolución industrial. Desde una óptica académica es interesante analizar cómo una de las tecnologías que mayor proyección tiene en esta cuarta revolución industrial como es la impresión 3D puede cambiar la forma en la que se realiza el suministro de material en el ámbito hospitalario.

La medicina se ha interesado por lo que la impresión 3D podía ofrecer desde sus inicios. Esto es así porque muchas de las propiedades más interesantes de los productos impresos 3D son las mismas que la medicina busca en sus suministros. Los hospitales, por lo tanto, han incorporado las tecnologías de impresión 3D que tenían a su alcance para la fabricación de estos suministros. Por lo que observar cómo esta tecnología se emplea en un hospital en la actualidad es un análisis interesante para estudiar la viabilidad y las posibles mejoras que esta puede traer a la medicina.

Con la crisis sanitaria de la COVID-19, la medicina se ha visto en una situación de desabastecimiento, lo que ha causado tensiones en las cadenas de suministros médicos. La ingeniería industrial y las tecnologías que esta ha desarrollado, especialmente la fabricación aditiva, han desempeñado un rol crucial a la hora de dotar a los servicios médicos de herramientas con las que dar una mejor respuesta a la crisis.

Finalmente, se debe tener interés por cómo se emplean los recursos económicos, especialmente si estos se destinan a proveer un servicio tan importante como es mantener la salud de la ciudadanía. Es por esta razón que también el trabajo presta especial atención a la componente económica derivada de aplicar la tecnología. Cuando se trata de algo tan delicado y valioso como es la salud de las personas, la eficiencia y optimización de la inversión pública son dos horizontes por alcanzar, porque de ninguna forma se debe comprometer la calidad. La mayor garantía de que un servicio de la más alta calidad se consolide como alternativa de utilización es que este tenga viabilidad económica.

Ingeniería, medicina y economía se unen en el presente trabajo con el propósito de evaluar cómo las nuevas tecnologías garantizan mejores servicios con inversiones más eficientes.

I. Introducción a la fabricación aditiva.

I.1. Definición

La impresión 3D se define como cualquiera de los diversos procesos para fabricar objetos tridimensionales mediante la superposición de secciones transversales bidimensionales de forma secuencial, una sobre otra.

Con el nombre de fabricación aditiva se hace referencia a todas las técnicas de fabricación por adición de material empleadas con el objetivo de producir nuevos componentes complejos y durables, mientras que la impresión 3D, como heredera del prototipado rápido, hace alusión a la fabricación de modelos o piezas finales de modo rápido pero limitado y, habitualmente se limita a un tipo concreto de tecnología aditiva.

Si bien el comienzo de la fabricación aditiva fue la función del prototipado rápido, la tecnología ha tenido una evolución tal que le ha permitido crecer de manera exponencial desde sus orígenes tanto en volumen de uso como en diversidad de aplicaciones. A las funciones de prototipado rápido se le han sumado aplicaciones en otros sectores como ingeniería aeroespacial, la ingeniería aeroespacial o la ingeniería biomédica. Especialmente, las características ventajosas que presenta la fabricación aditiva la han convertido en una tecnología apreciada en el ámbito sanitario. No en vano, el presente documento trata sobre las aplicaciones que se ha dado a esta tecnología desde un centro hospitalario

I.2. Historia de la fabricación aditiva.

Desde comienzos de la década de 1980 hasta principios de la siguiente, diferentes personas en todo el mundo presentaron patentes de tecnologías que se ajustan a las características de la fabricación aditiva.

En 1981, el Dr Hideo Kodama, en Japón, hizo la solicitud de la patente para un dispositivo de prototipado rápido; la primera tecnología empleada para este prototipado fue el curado de resina mediante láser, lo que sería un predecesor del SLS y de la impresión 3D en su conjunto.

Posteriormente, en Francia; Jean-Claude André, Olivier de Witte y Alain le Méhauté presentaron una patente en 1984 de un método de fabricación que empleaba resinas capaces de solidificar si eran expuestas a laser; su proyecto no contó con un desarrollo profundo y terminó por ser abandonado.

Paralelamente en California, Charles Hull, quien era un trabajador de una fábrica de muebles, encontraba dificultades para conseguir algunas piezas pequeñas que necesitaba para su trabajo. Conocedor de las propiedades de las resinas fotosensibles, decidió emplear las lámparas de luz UV que había en la fábrica para curar resina fotosensible y así conseguir en la resina ya sólida dichas piezas. Con esta tecnología solicitó una patente en 1984, el éxito de la tecnología patentada fue tal que Hull, en 1986, fundó la empresa 3D Systems, que hoy es una de las empresas líderes en el sector de la impresión 3D. En 1988 3D Systems lanzó su primer modelo comercial.

También en 1988, un estudiante de la Universidad de Texas, Carl Deckard, presentó una patente con una nueva tecnología de conformado mediante la adición de capas superpuestas de material: el sinterizado selectivo por láser (SLS).

Ya en 1992, en Minnesota, Scott Crump presentó una patente de tecnología de impresión 3D, el modelado mediante deposición fundida (FDM); esta tecnología forma capa a capa mediante la deposición de un filamento polimérico por capas que se unen mediante fusión. Crump motivado por éxito de su patente fundó, al igual que Hull, una empresa con la que comercializar máquinas que emplean su tecnología: Stratasys. A pesar de ser la más recientemente patentada, la FDM es hoy la tecnología de impresión 3D más extendida.

Desde 1992, la fabricación aditiva ha continuado innovando, incorporando nuevos materiales y perfeccionando sus tecnologías. Hoy es una tecnología extendida y en rápido crecimiento, con aplicaciones en aeronáutica, medicina o automovilismo de élite. Las características de la impresión mediante la adición de capas sucesivas la han convertido en una tecnología capaz de dar respuesta a necesidades que ninguna otra tecnología había podido conseguir.

I.3. Recursos de la fabricación aditiva.

La fabricación aditiva es una tecnología que, según su definición, forma piezas mediante la consolidación de material por capas superpuestas. Fabricar una pieza siguiendo estas premisas tiene una complejidad que la imposibilitan sin la mediación de herramientas digitales. Estas herramientas digitales junto a las físicas forman los recursos de la fabricación aditiva, que se enumeran a continuación.

Equipo de producción: la fabricación aditiva necesita de una unidad de producción donde en la cual realizar la transformación física de la materia prima. Estos equipos se conocen coloquialmente con el nombre de “impresoras 3D” y, según el fabricante pueden presentar tamaño, forma y tecnología de fabricación diferentes. con la evolución de la tecnología, las empresas han desarrollado unidades de producción novedosas que las hacen más competitivas que sus antecesoras frente a las tecnologías de fabricación convencionales.

Materia prima o consumibles: para la formación de los objetos a partir de la impresión 3D se debe suministrar la materia prima de la que está compuesto el producto. Lo más habitual es que la impresión 3D se haga con polímeros, aunque hay equipos y tecnologías que emplean metales o material cerámico. El suministro de la materia prima puede suministrarse de formas muy diferentes, de las que más habituales son: en forma de filamento (FDM), resina líquida (SLA) y polvo (SLS).

Software de fabricación: este elemento es propio de la fabricación aditiva y lo distingue de otros medios de fabricación. Cada impresora cuenta con un software diferente que permite controlar los movimientos en la impresora de manera que se pueda conformar debidamente la pieza producida. Los softwares empleados en impresión 3D han evolucionado desde sus orígenes, siendo un elemento clave para el aumento de la competitividad de la impresión 3D como tecnología alternativa de fabricación.

Diseño de producto: la impresión 3D se caracteriza por su gran flexibilidad para fabricar piezas de diferentes formas, lo que les permite cubrir una amplia diversidad de funcionalidades; esta flexibilidad se manifiesta en que una sola impresora programada con un único software es capaz de producir piezas de formas muy diferentes. El programa informático que recoge la información para construir el objeto es por tanto otro elemento crucial.

Aunque no sea un elemento definitorio de la impresión 3D, el que tal vez sea el recurso más estratégico para la impresión 3D es el **equipo humano** que la utiliza. Contar con operarios, diseñadores, personal de mantenimiento y programadores de las impresoras que estén motivados, sean creativos y apuesten por desarrollar todo el potencial que la fabricación aditiva puede ofrecer es, sin lugar a dudas, una de las claves de éxito de la impresión 3D.

I.4. Tecnologías de fabricación aditiva.

La impresión 3D se define como el conjunto de tecnologías de fabricación que consiguen el conformado de piezas mediante la agregación de sucesivas capas de material, siguiendo las instrucciones informáticas de un diseño digital. La componente computacional de la impresión 3D es común a toda la fabricación aditiva; sin embargo, existen diferentes procesos físicos que permiten consolidar sucesivas capas de material para crear objetos sólidos. A continuación, se describen las diferentes tecnologías de fabricación aditiva, clasificadas según el fenómeno físico que emplean respectivamente para la agregación de las capas de material:

I.4.1. Estereolitografía (SLA)

Patentado por Hull en 1984, es un método para fabricar objetos sólidos mediante la impresión sucesiva de finas capas de una resina líquida fotosensible que solidifica al exponerse a un haz de rayos UV.



Ilustración 1 Pieza impresa en SLA. Fuente: Formlabs.

Como en todos los procesos de impresión 3D se parte de un diseño en CAD que definirá las dimensiones de la pieza a imprimir. Para realizar la impresión se utiliza un haz de luz UV móvil programado que brilla sobre la superficie de la resina fotosensible en aquellas zonas especificadas por el diseño, y así se consigue formar una sección transversal sólida del objeto en la superficie del líquido. A continuación, el objeto se aleja una la distancia que corresponde al grosor de una capa de la superficie del líquido para entonces formarse la siguiente sección transversal que se adhiere a la capa anterior. Este proceso continúa hasta que se forma el objeto completo.

Una vez impreso este objeto debe someterse a un baño en alcohol isopropílico para retirar los excesos de resina no solidificada. En algunas piezas es necesario definir en el diseño soportes para aquellas piezas que durante el proceso de impresión se precipitarían al vacío. Estos soportes se eliminan una vez la pieza está impresa y limpia. Entre las principales aplicaciones de las piezas impresas por SLA están la odontología, la joyería o la inyección de plásticos.

I.4.2. Sinterizado selectivo por láser (SLS)

El sinterizado selectivo por láser fue patentado por Deckard en 1988. La tecnología consiste en la conformación de objetos mediante el sinterizado de material en polvo sobre el que actúa un láser que amalgama, capa a capa, el polvo en aquellas zonas indicadas por el diseño; de forma que el producto obtenido sea una pieza de material ya compactado.



Ilustración 2. Pieza impresa en SLS. Fuente: Treatstock

El proceso se hace depositando una capa de polvo de material, polimérico, metálico o cerámico, en una cuba con un suelo móvil en el eje vertical. El láser se hace incidir sobre las zonas especificadas de manera que se sinteriza el polvo de la cuba. Tras el paso del láser, este suelo se desplaza una distancia equivalente al grosor de capa y se vuelve a llenar de polvo la cuba hasta enrasar la superficie superior. El láser vuelve a actuar uniendo la capa que se sinteriza en el momento con la anterior. Este proceso se repite hasta conformar toda la pieza.

Una vez formadas, las piezas deben dejarse enfriar para posteriormente limpiar el polvo que no ha sido sinterizado que las rodea. Aunque esta técnica se puede emplear con materiales de diversa naturaleza, lo más habitual es hacerlo con un polímero: la poliamida o NYLON. Debido a su baja velocidad de producción, el SLS se ha empleado tradicionalmente para el prototipado, aunque recientemente se han conseguido impresoras SLS más rápidas que han permitido diversificar las aplicaciones de esta tecnología.

I.4.3. Modelado por deposición fundida (FDM)

La primera patente de FDM la registró Crump en 1992; y pese a ser la tecnología más reciente en haber sido patentada, la FDM se ha convertido en la más extendida. La manera en la que este sistema conforma los objetos es diferente; a diferencia de en los dos anteriores, para la FDM no es necesario de disponer de más volumen de material que el necesario para conformar la pieza. El FDM forma las piezas mediante el depósito de un material en forma de hilo siguiendo el diseño.



Ilustración 3: Pieza impresa en FDM. Fuente: Stratasys

El proceso de impresión es el siguiente: el cabezal va depositando material en forma de hilo mientras se mueve siguiendo la forma definida por el diseño computacional, este material funde a una cierta temperatura que le es proporcionada cuando atraviesa la boquilla del cabezal; en cada capa se van depositando material que se une a la capa anterior; una vez se deposita, el material enfriá y, por tanto, se consiguen fabricar objetos sólidos.

Los materiales empleados en esta tecnología son ceras auto-endurecibles, resinas termoplásticas, metales fundidos, epoxis de dos partes, plásticos espumosos y vidrio. La altura de cada capa se define a partir de la distancia que guarda el cabezal con la capa anterior, mientras este deposita material.

I.4.4. Otras tecnologías de fabricación aditiva.

Otras tecnologías empleadas, de menor arraigo y utilización, son:

Material jetting: variación de la SLA, se emplean resinas pigmentadas que permiten crear modelos con variación de color; el proceso de conformado es idéntico a la estereolitografía. Tiene como ventaja frente a esta que permite crear objetos con policromía, como pueden ser modelos de órganos que muestran cavidades y tejidos internos; y como inconvenientes, su mayor lentitud en la impresión y coste más elevado, debido al coste elevado de las resinas pigmentadas.

Fusión por haz de electrones (EBM): al igual que el SLS esta tecnología se basa en el sinterizado de un lecho de polvo; sin embargo, en el caso del EBM, solo es posible el sinterizado de polvo metálico. En cuanto a la tecnología, la principal diferencia respecto al SLS es que el EBM emplea otra fuente de calor, el haz de electrones. Como ventajas frente al SLS, el EBM permite una mayor rapidez en la fabricación, así como la reutilización del material del lecho que no se ha sinterizado. Por otra parte, de entre los inconvenientes que presenta el EBM está la necesidad de post-procesado; es necesario el horneado de la pieza sinterizada para la liberación de tensiones y también el mecanizado de las superficies si se desea conseguir un mejor acabado. Otras ventajas del SLS frente al EBM son que el primero permite conformar piezas con mayor precisión dimensional y de mayor tamaño.

Inyección aglutinante o *Binder Jetting*: esta tecnología también pertenece a la familia del sinterizado de lecho de polvo. El conformado de la pieza se realiza mediante la pulverización de una sustancia aglutinante al lecho del material en polvo que constituirá el producto impreso. Los materiales que pueden emplearse en esta tecnología son tanto cerámicos como metálicos y poliméricos, siendo además esta la única tecnología de impresión 3d que permite el conformado en arena. Presenta como ventaja la posibilidad de imprimir piezas a color con menor coste que otras tecnologías, como el material jetting; y, como inconveniente, la necesidad de un curado posterior de las piezas para aumentar su resistencia.

I.4.5. Comparativa entre las tecnologías más empleadas: SLA, SLS y FDM.

Al ser diferentes procesos físicos los que permiten la agregación de material en la impresión 3D, cada tecnología permite emplear únicamente ciertos materiales. Esta diversidad de materiales y de fenómenos físicos de consolidación da lugar a piezas impresas de diferentes tamaños, formas y propiedades.

Esta diversidad causa que, para valorar la idoneidad del uso de una y otra, se deba conocer cuál será la aplicación que tenga la pieza y qué necesidades se espera que satisfaga. Por esta razón, a continuación, se indica una comparativa entre las tres tecnologías más comunes (SLA, SLS y FDM) donde, empleando como baremo diferentes aspectos y características de estas, se muestran las ventajas e inconvenientes que cada tecnología presenta.

Por calidad del acabado y de las propiedades del material.

Las piezas impresas en 3D en ocasiones se emplean en sectores donde se debe prestar atención tanto a la precisión dimensional de la pieza como a la resistencia del material. Se muestra a continuación qué caracteriza a cada tecnología según estos criterios:

SLA: la estereolitografía presenta el mejor acabado de las tres tecnologías; al realizarse la solidificación del material mediante haces de luz, y no de calor, se evitan las contracciones térmicas asociadas a la variación de la temperatura de los sólidos; además, la foto-polimerización genera enlaces a escala molecular, lo que implica que las piezas son más densas, impermeables y herméticas que las creadas por los demás métodos.

SLS: el sinterizado forma piezas con acabados más rugosos que las demás tecnologías, sin embargo, las piezas impresas de esta forma presentan las mejores propiedades mecánicas.

FDM: la deposición de material capa a capa forma acabados poco precisos y además, las líneas de soldaduras pueden generar problemas de adherencia entre las capas que posteriormente se vean reflejados en una merma de las propiedades mecánicas.

Por materiales empleados.

En función de cual vaya a ser la utilidad de la pieza, es conveniente saber si el material empleado es el adecuado. Aspectos como la densidad, rigidez, elasticidad o capacidad aislante son cruciales para seleccionar un material u otro y, ya que cada tecnología trabaja con materiales diferentes, también para seleccionar una tecnología u otra.

SLA: emplea resinas fotosensibles, que en como materia prima se suministran en estado líquido, además estas resinas pierden propiedades si se exponen a la luz. El curado posterior de las piezas permite una mejora de las propiedades mecánicas. Estas resinas, sin embargo, tienen un rango escaso de colores y texturas.

SLS: utiliza como materia prima principal la poliamida, también conocida como NYLON. Este material destaca por sus buenas propiedades mecánicas; pero, como en el caso de las resinas, permite un rango escaso de colores y texturas.

FDM: el material para la FDM se suministra en filamentos de polímero termoplástico, es un material con peores propiedades mecánicas, pero, por el contrario, permite una variedad de colores y texturas, algunos de los cuales pueden evocar al metal o la madera.

Por complejidad del proceso

Algunas de las tecnologías descritas requieren de ciertos trabajos previos y posteriores al momento de la impresión. la complejidad, duración o especialización de estos procesos previos y posteriores es también un factor decisivo a la hora de optar por una u otra tecnología.

SLA: una vez conformada la pieza, es necesario realizar un baño en alcohol iso-propílico para disolver la resina líquida adherida a la pieza. Además, es necesario un proceso de

post curado para finalizar el proceso de foto-polimerización. Si la pieza ha necesitado soportes, es necesario retirarlos mediante cortes.

SLS: tras la impresión, no es necesario más que retirar el polvo que pudiera ensuciar la pieza. La SLS es la única tecnología que permite la impresión de voladizos sin necesidad de soportes. Presenta como inconveniente que se debe limpiar el polvo que queda en la impresora después de la impresión.

FDM: no requiere de post-procesado ya que la pieza recién impresa es plenamente funcional. Para imprimir voladizos son necesarios soportes, pero se pueden retirar mediante arrancado, sin necesidad de cortar.

Por costes

El coste económico de las tecnologías es, por lo general, el más decisivo de los factores tenidos en cuenta a la hora de optar por una tecnología u otra y, yendo incluso más allá, suele ser el factor más estudiado cuando se decide invertir en impresión 3D. Tanto es así, que una tecnología se considera viable si es más competitiva en costes, aun presentando menores prestaciones en el resto de factores. En la evaluación del coste de una tecnología se debe tener en consideraciones las variables que lo pueden alterar: precio del equipo, precio de la materia prima, cánones de software y de diseño o formación del personal, entre otras.

SLA:

- *Equipos:* el precio de las máquinas de menor formato parte de los 3.100 €, impresoras más grandes tienen un precio de entorno a los 9.000 € y las industriales se encuentran en torno a los 70.000 €.
- *Material:* el precio de las resinas está alrededor de los 180 €/ kg.

SLS:

- *Equipos:* los sistemas de trabajo parten de 9.000 €, y las impresoras industriales tienen un precio en torno a 90.000 €.
- *Material:* el polvo de NYLON empleado para SLS tiene un precio de alrededor de 90 €/kg.

FDM:

- *Equipos:* el precio de las maquinas más sencillas es de menos de 900€, máquinas de escritorio de gama media, a partir de 1.800 € e industriales, más de 13.000 €.
- *Material:* el precio del filamento básico es inferior a 45 €/ kg, y el de los filamentos especiales está en torno a 130 €/ kg.

Por velocidad de fabricación.

La velocidad de fabricación es de las mayores desventajas que presenta la fabricación aditiva frente a los medios convencionales de conformado. Junto al coste, es una de las líneas de investigación en las que más se trabaja para mejorar la competitividad de la impresión 3D.

SLA: es la tecnología más rápida debido a que imprime toda la superficie de la capa de manera simultánea; sin embargo, al proceso de fabricación debe sumarse el post-curado posterior a la impresión, lo que aumenta el tiempo total de fabricación.

SLS: es más lenta que la SLA, pero menos que la FDM.

FDM: a igualdad de espesor de capa, es la más lenta de todas; pero se suele aprovechar la ventaja de que permite crear espesores más grandes, lo que reduce en gran medida el tiempo necesario de impresión.

Por volumen de fabricación.

El volumen de las piezas fabricadas viene determinado por el tamaño de la máquina, cada fabricante se especializa en una tecnología, y algunas permiten la creación de piezas más grandes sin necesidad de dotar a los equipos de mucho espacio físico para imprimir.

SLA: se necesita más de un equipo, ya que las actividades de post procesado requieren dos recipientes del tamaño de la pieza para la limpieza y el post curado; por ello no se fabrican impresoras de muy gran formato en esta tecnología.

SLS: no es necesario más que un equipo del tamaño de la pieza, pero sí se requiere energía para elevar la cama donde está depositado el polvo a la temperatura de fusión del NYLON, lo que desincentiva la fabricación de impresoras muy grandes.

FDM: es la tecnología que permite crear mayores tamaños de impresora, superando algunos modelos varias veces el volumen del de sus competidoras.

Se ve que en función de las aplicaciones que se requiera para las piezas, una u otra tecnología presenta mejores o peores prestaciones. La SLA, debido a su gran precisión de fabricación, pero a lo tedioso de su post-procesado y elevado coste; se reserva para la generación de modelos únicos que requieran de gran precisión. Por su parte el FDM, aunque sus piezas presentan las prestaciones más pobres, permite grandes volúmenes a bajo coste; por lo que se emplea para piezas de uso cotidiano donde la calidad del acabado no es crucial. El SLS se emplea por su capacidad de construir sin soportes para, por ejemplo, la creación de modelos de mecanismos que se imprimen ya ensamblados.

II. La fabricación aditiva en el ámbito hospitalario.

II.1. Introducción

Desde la patente de las primeras tecnologías de fabricación aditiva, la medicina ha seguido con mucha atención aquellas aportaciones y mejoras que esta forma de creación de componentes puede proporcionar. La capacidad de la impresión 3D de producir objetos tridimensionales a partir de diseños digitales despertó la atención de la comunidad médica, quienes se interesaron por la posibilidad de reproducir con fidelidad la anatomía humana sin necesidad de practicar ningún tratamiento invasivo a los pacientes.

La cirugía y la implantología pronto incorporaron la impresión 3D como herramienta de apoyo por permitir conformar prótesis y modelos biológicos que fueran representarán la anatomía del paciente con fidelidad; y en algunos casos, gracias al empleo de materiales biocompatibles que permitieran la construcción de prótesis a medida. De igual manera, la impresión en 3D de biomodelos construidos según la anatomía individual del paciente permite elaborar diagnósticos con más precisión y servir como una guía de gran utilidad durante los preoperatorios.

De igual forma, las piezas en 3D que pueden darse uso en un hospital no solo se ciñen al ámbito estrictamente anatómico; sino que mediante la impresión en 3D se pueden conformar elementos como material de cirugía o suministros comunes que pueden ser impresos *in situ* desde los hospitales.

La personalización y accesibilidad de la impresión 3D ha permitido a muchos centros sanitarios incorporar la tecnología de manera que se han producido grandes mejoras en la prestación de los servicios sanitarios.

II.2. Aplicaciones de la impresión 3D en medicina.

II.2.1. Biomodelos

Los biomodelos son reproducciones de órganos o partes de estos que permite a los médicos conocer de forma precisa la anatomía del paciente sin tener que recurrir a cirugía invasiva. Gracias a las ventajas que la fabricación aditiva aporta, como es la creación de piezas personalizadas con un alto nivel de detalle, los biomodelos se han convertido en una de las aplicaciones más extendidas de la impresión 3D sanitaria.

Mediante herramientas de visión como es el TAC, los médicos son capaces de recrear mediante software un mapa preciso del interior de órganos del paciente como pueden ser los tejidos o las cavidades de algunos órganos. El biomodelo es empleado después para la creación de elementos ortopédicos y prótesis con mayor fidelidad a las necesidades del paciente que si estos fueran creados sin el empleo del biomodelo.

Un ejemplo del uso de esta tecnología es la creación de un stent para una vena de un paciente con trombosis. Se mapeó el interior de la vena y se realizó un biomodelo de la

misma, donde se mostraban todas las rugosidades, curvaturas y los capilares anexos para reproducirla de la manera más realista posible. Con esto, el stent que se colocó al paciente fue mucho más adaptativo que el que se hubiera fabricado sin la ayuda del biomodelo.

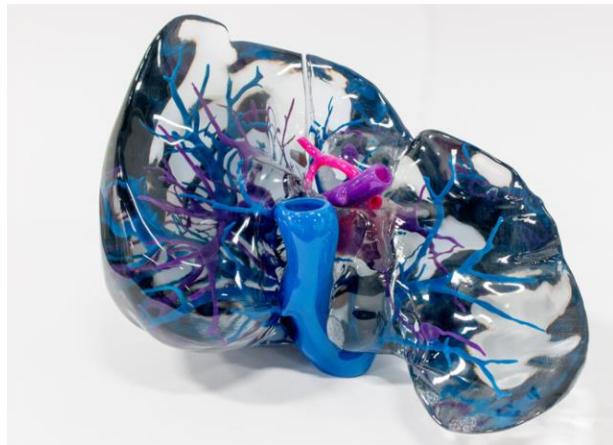


Ilustración 4. Biomodelo impreso en 3D mediante material jetting. Fuente:3DNatives

II.2.2. Guías y útiles quirúrgicos.

Otra de las aplicaciones que tiene la impresión 3D en el ámbito hospitalario ha sido la creación de guías y útiles quirúrgicos. En muchos casos, los dispositivos 3D que ayudan a la realización de operaciones quirúrgicas no se fabrican con la calidad, detalle y precisión que debiera. Con la impresión 3D estos problemas se solucionan debido a que las guías fabricadas facilitan las labores de cirugía.

Un ejemplo de esta tecnología se puede encontrar en el Hospital parisino de Bicêtre, donde el Dr Marc Soubeyrand ha creado sus propias herramientas auxiliares en nylon para proporcionar a los implantes una mejor posición durante la cirugía.

Mediante el uso de TAC, Soubeyrand mapea la zona donde necesita conocer la anatomía del paciente, y mediante un software llamado Osiris, importa las geometrías a la impresora 3D para desde ella realizar la impresión de las partes.

Estos materiales, además, son biocompatibles y permiten ser esterilizados, lo cual es un incentivo muy bueno para el empleo de estas tecnologías.

II.2.3. Medicamentos.

Ya fuera del ámbito quirúrgico, se ha investigado de igual manera en realizar medicación empleando las tecnologías de impresión 3D.

El Doctor Min Pu, de la Universidad Wake Forest, ha realizado un estudio en el que ha creado dosis personalizadas de medicamentos sinterizando las píldoras mediante impresión 3D.

A través de un software, el doctor puede introducir datos fisiológicos del paciente de forma que se calcula de forma automática la dosis adecuada de cada medicamento y se genera un diseño 3D de cómo debe ser la píldora a administrar.

El empleo de esta tecnología ha conseguido ventajas tales como las siguientes:

- Las píldoras creadas son más porosas que las convencionales, esto permite una absorción más rápida por parte del organismo. Asimismo, al ser fácilmente solubles en líquidos estas píldoras pueden ser ingeridas con mayor facilidad
- La geometría personalizada permite controlar la potencia del principio activo
- La personalización respecto a las características médicas del paciente reduce los riesgos como efectos secundarios y reacciones adversas.
- La fabricación rápida y a demanda de estas pastillas permite descentralizar la producción de los medicamentos con el ahorro en costes que conlleva
- La fabricación rápida, también, permite al paciente poder disponer de medicación en momentos de urgencia, reduciendo así los riesgos por un tratamiento tardío.

II.2.4. Equipamiento médico en áreas de difícil acceso

Otro de los ámbitos en los que la impresión 3D puede contribuir a la medicina, debido a su carácter descentralizador de la producción, es mediante la introducción de impresoras 3D como servicio médico en zonas de difícil acceso.

Aunque la implantación de esta tecnología todavía es muy pequeña, como filosofía para dotar de material médico a zonas alejadas de los grandes centros productivos de suministros permitirá reducir los costes y facilitar las soluciones para aquellos médicos que trabajen allí.

Muchas intervenciones requieren de material muy concreto y muy diferente entre sí. Si este material puede ser creado mediante impresión 3D se reduce el suministro de la misma a una sola máquina.

De igual manera, la facilidad de uso de la impresión 3D puede servir para que las personas locales sean quienes realicen la fabricación de los componentes, democratizando el uso en zonas aisladas.

II.2.5. Prótesis personalizadas

Dentro de la medicina, el uso más conocido de las aplicaciones de la fabricación aditiva es la conformación de prótesis médicas. El nivel de detalle y la posibilidad de emplear material biocompatible hacen de las impresoras 3D un instrumento clave a la hora de crear prótesis para pacientes.

Entre aquellas aplicaciones que se han beneficiado de la impresión 3D se encuentran prótesis odontológicas, reemplazos de cadera, válvulas coronarias y otras prótesis para zonas óseas dañadas o débiles.

Como se puede observar, el tipo de prótesis en donde la impresión 3D ha producido un mayor avance es en el de prótesis internas, es decir, aquellas que se colocan en el interior del organismo del paciente.

Del mismo modo, aunque en menor medida, la fabricación aditiva también se ha usado en la conformación de prótesis externas, aunque el valor añadido que aporta en estas últimas no es tanto la personalización y biocompatibilidad sino la reducción de costes.

II.2.6. Docencia, simulación e investigación

Las diferentes aplicaciones anteriormente descritas son en sí mismas una fuente de creación de valor en el sentido de que no sólo sirven para facilitar las labores médicas de manera directa, sino que al aplicarse, contribuyen a un mejor desempeño de la profesión en futuras ocasiones.

En el ámbito de la docencia, por ejemplo, el empleo de biomodelos 3D puede ser útil para las lecciones de anatomía a estudiantes de medicina y otras ciencias de la salud; y la conformación de biomodelos a partir del mapeado del organismo del paciente puede ayudar a los investigadores a conocer mejor como se producen ciertas afecciones como lesiones o tumores, ya que pueden ver en el modelo creado la forma y evolución de estos.

Son por tanto la docencia y la investigación médicas dos de los ámbitos que, aunque sea indirectamente, se benefician de la incorporación de la impresión 3D dentro del ámbito hospitalario.

II.2.7. Respiradores y equipos de protección individual anti-COVID

Si ha habido una cuestión en los últimos tiempos en donde la medicina ha necesitado recurrir a todo lo que tenía en su mano para darle solución, ha sido la pandemia mundial por COVID-19. Hasta el descubrimiento y certificación de vacunas efectivas contra la enfermedad, la gestión de la pandemia derivada del Coronavirus ha supuesto un desafío cuya repentina irrupción ha desencadenado una situación caótica, peligrosa y extremadamente dolorosa en la sociedad. En estas circunstancias, la medicina ha necesitado una dotación extraordinariamente mayor de recursos para dar respuesta. Desgraciadamente y aun contando los esfuerzos adicionales, se han producido ocasiones en las que esta respuesta no ha podido ser suficiente.

Las impresoras 3D son un recurso que ha tenido que orientar su utilización al suministro de material para combatir la enfermedad, así como han tenido que aumentar su producción todo lo necesario para dar satisfacción a la demanda de este material. Han sido muchos los productos anti COVID que se han impreso en 3D; ya que la necesidad exigió el uso de todas las herramientas productivas disponibles. Igualmente, el papel desempeñado por la impresión 3D cobra mayor importancia debido a la urgencia, volumen y flexibilidad requeridos por la situación sanitaria. Un hecho tan extraordinariamente exigente indica además la importancia de dotarse de instrumentos y planes de contingencia en el ámbito sanitario frente a posibles nuevas situaciones de tensión que puedan tener lugar.

Respiradores artificiales fabricados en 3D

Algunos de los productos realizados por impresión 3D para hacer frente a la COVID han sido los respiradores para las unidades de cuidados intensivos, el número de estos del que disponían los hospitales no fue suficiente para dar respuesta a la cantidad de enfermos y

las cadenas de suministro convencionales no pudieron abastecer toda la demanda. En España, tanto entidades como particulares con impresoras 3D pusieron sus equipos a modelar material en los momentos más tensos de la pandemia.

España, como estado miembro de la UE, exige que los productos sanitarios tengan el certificado CE acorde a la normativa comunitaria. En el caso de los respiradores, estos deben cumplir con la *Directiva 93/42/CEE del Consejo del 14 de junio de 1993, relativa a los productos sanitarios y el Real Decreto 1591/2009 de 16 de octubre, por el que se regulan los productos sanitarios*. En el Anexo I de ambos textos se recogen los requisitos que debe cumplir el material sanitario para obtener certificado CE.

La situación de emergencia sanitaria en los meses de marzo y abril de 2020 hizo necesario el suministro urgente de respiradores artificiales, lo que propició a que el Ministerio de Sanidad habilitara un procedimiento de certificación más rápido para que pudiera usarse material sanitario suministrado por nuevas vías en los centros. En este sentido, a fecha de 27 de marzo de 2020, el Ministerio de Sanidad, a través de la Agencia Española de Medicamentos y Productos Sanitarios (AEMPS) publicó en el BOE un comunicado indicando la documentación técnica y pruebas mínimas que debían realizarse en estos productos antes de su utilización en pacientes. Si estos requisitos fueran conformes, la AEMPS autorizaría la utilización del producto sanitario sin necesidad de obtener certificado CE. Esta medida sirvió para reducir los tiempos de suministro de los respiradores para las UCI.

El proceso para la obtención de la certificación consta de dos etapas: una etapa previa que consiste en la elaboración de una documentación técnica con información completa y detallada sobre el prototipo. Y una segunda etapa en la que, una vez presentada la documentación anterior, se debe solicitar una investigación clínica a la AEMPS. Desde el Ministerio de Sanidad se insistió en la necesidad de estas certificaciones por parte de la AEMPS debido a que los respiradores son productos complejos e invasivos y que, de no estar debidamente probados, su uso podría ser inútil o pernicioso para los pacientes.

Otros equipos anti COVID fabricados en 3D

Otro de los productos anti COVID que ha sido fabricado mediante impresión 3D son los equipos de protección individual (EPI), como viseras protectoras. Estos productos no requieren certificación y cuentan con una dificultad de fabricación menor que los respiradores, lo que facilitó su suministro. Algunas de las iniciativas llevadas a cabo para la fabricación de EPIs mediante impresión 3D fueron las de las empresas León 3D y Somos Zamora 3D en sus respectivas provincias; o la que realizó Jaime Delgado, vecino de Majadahonda que, con su impresora 3D personal organizó el suministro de EPIs para la Comunidad de Madrid, coordinando un grupo de hasta 118 usuarios con impresora 3D. Junto a respiradores y EPIs, también se ha fabricado mediante impresión 3D otros productos para evitar la transmisión de la COVID como apéndices que permiten la apertura de puertas evitando el contacto directo con la piel.

Iniciativas como estas se han puesto en marcha por toda España para dotar de suministros sanitarios en los momentos de mayor tensión y escasez durante la pandemia, lo que como la impresión 3D ha sido un avance además para la medicina convencional, también para

hacer frente a emergencias sanitarias como la pandemia de Coronavirus. Además, en situación de emergencia, algunas de las grandes ventajas que tiene la fabricación 3D como la flexibilidad le han otorgado un valor adicional como método de suministro.

II.3. Gestión operativa de la impresión 3D en hospitales.

La incorporación de tecnologías de impresión 3D en los hospitales es una práctica en expansión que genera mejoras cruciales en la prestación de los servicios sanitarios; que se manifiestan como un aumento de la eficiencia técnica y económica del centro y una mejora en la calidad de atención al paciente. La impresión 3D es, no obstante, una tecnología novedosa con un bajo nivel de implantación; lo que causa que algunos centros muestren escepticismo sobre la viabilidad de esta inversión. Para esclarecer la conveniencia o no de una inversión como esta se debe hacer un análisis que proyecte los posibles elementos de mejora que la impresión 3D puede proporcionar al hospital y exponer razonadamente la toma de decisiones en función de cuáles son las conclusiones extraídas de dicho análisis.

La Gestión Operativa se define como aquellas prácticas de administración de empresas tales que permiten la consecución del más alto nivel de eficiencia dentro de la organización; y, en referencia al ámbito tratado, corresponde al estudio de aquellos factores estratégicos, tácticos y financieros que las organizaciones médicas deben tener en cuenta si desean incluir la impresión 3D dentro de sus servicios.

Para entender mejor la labor que se lleva a cabo en la gestión operativa se va a analizar todo el proceso de creación de dispositivos de impresión 3D para su empleo en hospitales. En primer lugar, se va a introducir un esquema del flujo de trabajo para la conformación de piezas en impresión 3D en hospitales, aquí se van a explicar las actividades del proceso desde la idea hasta la puesta en servicio, y servirán de base para conocer cuáles son los hitos donde se debe hacer la toma de decisiones. Posteriormente, se tratarán los factores propios de la gestión operativa, a tres niveles: estratégico, táctico y financiero. En este análisis por factores se tratan las diferentes decisiones de operación que debe realizar la unidad de impresión 3D antes y durante la puesta en marcha del servicio, de manera que así se consiga el más alto nivel de eficiencia.

II.3.1. Flujo de trabajo.

Flujo de trabajo hace referencia al proceso que se debe seguir para el desarrollo de las soluciones en el empleo de cierta herramienta. En el caso de la impresión 3D, el flujo de trabajo busca establecer las acciones que deberán tener lugar desde la etapa de idea a la etapa de aplicación de una pieza impresa. Definir adecuadamente el flujo de trabajo: sus etapas, variables y condicionantes; es una tarea clave para poder tomar las decisiones adecuadas en lo respectivo a la incorporación de servicios de impresión 3D al centro hospitalario.



Ilustración 5. flujo de trabajo en la impresión 3D hospitalaria. Fuente: *3D Printing In Hospitals: A Beginner's Guide*, 2020. Elaboración propia.

En la impresión 3D en el ámbito hospitalario, se puede subdividir el flujo de trabajo en estos procesos:

Recogida de información: constituye el primer elemento de la fabricación de elementos mediante impresión 3D. El proceso de ingeniería inversa puede diferir según la naturaleza de la pieza que se va a formar; por ejemplo, si la pieza a imprimir se trata de una prótesis o un biomodelo, es crucial contar con herramientas que permitan realizar un mapeado de la anatomía del paciente, como son la tomografía axial computerizada (TAC) y la resonancia magnética. Si es una pieza de uso técnico, como material sanitario; esta ingeniería inversa se hace estudiando las necesidades del entorno de trabajo o piezas que se usen con anterioridad. Una vez realizado este estudio se crea el diseño de la pieza a imprimir a partir de la información obtenida.

Manipulación de archivos: importante en tanto que supone la traslación de las imágenes adquiridas de la anatomía del paciente o elaborar el diseño de la pieza en CAD; para posteriormente trasladarlo a archivos capaces de ser leídos por la impresora 3D. En este aspecto se debe prestar especial atención a dos características: la segmentación, es decir, la capacidad del programa de seleccionar aquellas partes de las imágenes que van a conformar el modelo; y la optimización de los archivos, es decir, la no pérdida de resolución ni precisión en las imágenes en el cambio de soporte de imagen a código de impresión.

Impresión: el proceso nuclear de la tecnología, en donde se debe prestar especial atención a la tecnología de impresión empleada, el modelo de máquina o las propiedades del material utilizado.

Post procesamiento: una vez impreso, lo habitual es que el producto sanitario no cumpla con las funciones previstas inmediatamente después de su conformado. Por tanto, es necesaria una etapa de post procesamiento que puede consistir en el pulido, eliminación de rebabas o esterilización del artefacto.

Validación y control de calidad: la impresión 3D tiene características que la hacen susceptible de necesitar un exhaustivo control de calidad; la juventud de la tecnología, la sensibilidad de la aplicación médica y la complejidad del proceso de fabricación obligan

a un minucioso proceso de validación y control de calidad del producto. Asimismo, se debe prestar especial atención a los posibles errores que puedan cometerse y tener especial cuidado a que estos no comprometan etapas posteriores del proceso.

II.3.2. Factores estratégicos.

Una vez introducido el flujo de trabajo, y conocidas sus diferentes etapas, es necesario evaluar qué decisiones se deben tomar en base al procedimiento para conseguir la máxima eficiencia en el servicio. Para tomar las decisiones adecuadas que conduzcan a ello, es necesario conocer y estudiar los diferentes factores que afectan. Para su análisis, estos factores se han clasificado en estratégicos, tácticos y financieros.

Se consideran factores estratégicos aquellos que van a definir la utilización de la impresión 3D en los hospitales, los cuales vienen determinados por las necesidades de los centros. Los factores estratégicos van a definir la identidad y misión de la unidad de impresión 3D en el hospital. En este análisis se consideran aspectos como el entorno, la flexibilidad, la capacidad de adaptación, la capacidad de innovación y la respuesta frente a los riesgos, problemas e incidencias que puedan presentarse. En definitiva, estos factores son los que determinan qué aporta la impresión 3D al servicio en el hospital de manera global, y cómo esto ayuda a su desarrollo general como centro sanitario.

Para una evaluación estratégica adecuada de la incorporación de esta tecnología, los centros hospitalarios observan con una aplicación experimental de la tecnología si esta da una respuesta lo suficientemente buena como para motivar una posterior inversión que consiga una utilización del proceso de manera escalada y continuada.

Otro de los elementos importantes cuando se analiza la estrategia a seguir para la impresión 3D en el centro hospitalario es conocer cómo va a ser la estructura del personal encargado del servicio. La complejidad en las etapas del proceso hace necesario que el equipo responsable deba ser multidisciplinar, y que cuente con personal conocedor de diferentes ramas:

Ingeniería: para conocer la tecnología empleada, las propiedades del material usado y diseño de producto.

Informática: para conocer el detalle de traslado de la imagen computerizada en un diseño de impresión acorde a las necesidades

Médica: para conocer la anatomía del paciente que debe ser modelada; y la mejor aplicación del conocimiento adquirido mediante la impresión para el tratamiento de enfermedades.

Gestión y Finanzas: para conocer si, al tratarse la impresión 3D de una tecnología novedosa y no convencional, la apuesta por la tecnología es viable económicamente para el centro.

Otra de las grandes decisiones estratégicas de los centros hospitalarios es si apostar por una instalación interna de impresión 3D o recurrir a servicios externos de suministro. La inversión por una impresora interna permite la creación de sinergias con servicios actuales y un mayor nivel de flexibilidad y personalización. Por su parte, la contratación de

servicios externos puede contribuir con un know-how consolidado tanto en calidad de fabricación como en eficiencia en los costes. Es decisión del centro valorar cuál de las opciones se adapta más a sus necesidades. También es posible optar por una colaboración mixta que se beneficie de las ventajas de ambas alternativas.

Finalmente, recordar uno de los elementos de ámbito estratégico que merecen atención del centro hospitalario como son las regulaciones y los aspectos legales que acompañan a la impresión 3D. Aspectos como los requisitos del material hospitalario, la protección a la propiedad intelectual e industrial de las tecnologías y diseños o la prevención de riesgos laborales derivados pueden suponer un desafío si el hospital no ha hecho la valoración adecuada de forma previa de cómo gestionarlos.

II.3.3. Factores tácticos.

Los factores tácticos tratan sobre la manera en que se debe realizar el servicio de impresión 3D. Las buenas decisiones tácticas permiten elaborar un plan de trabajo adecuado para conseguir metas estratégicas. La planificación táctica centra su estudio en conocer los recursos con los que se cuenta, así como evaluar los riesgos y desafíos que pueden tener lugar. En conclusión, una buena planificación táctica consiste en el empleo eficiente de los recursos para conseguir los objetivos marcados.

Un primer aspecto a tener en cuenta en este sentido es la formación e información con la que cuenta el personal. Al tratarse de este procedimiento de algo muy específico tanto en forma como en aplicaciones, se debe ser meticuloso en la preparación de los profesionales. Otros elementos cruciales que el centro debe seleccionar son la tecnología (SLS, FDM, ...), el tipo de software, el material con el que se va a producir o el modelo de máquina, entre otros. Estas decisiones se tomarán en función de las aplicaciones previstas por el centro.

Finalmente, dentro del proceso de fabricación se debe analizar y elegir con la forma en que se realiza la gestión de la calidad y la mejora continua, la verificación y adecuación del producto a reglamentos médicos para una prestación óptima del servicio.

II.3.4. Factores financieros.

En este último apartado se tratarán los factores financieros que el centro médico debe tener en consideración. Para una buena gestión de la inversión en impresión 3D es necesario conocer y tomar decisiones sobre las formas de financiación, cobros y pagos por el servicio.

Uno de los aspectos a considerar en materia financiera de la impresión 3D médica es la forma de pago del servicio. Esto dependerá si se decide por un suministro externo de las piezas conformadas o si se realiza una producción in-house.

La manera en que se financia el servicio de impresión 3D puede variar, su financiación puede venir desde la planificación del centro hospitalario como una partida específica o bien puede estar su financiación desglosada en función de servicios o proyectos a realizar. Asimismo, es posible contar con mecanismos de colaboración con entidades externas que

a través de servicios médicos especiales que financien los proyectos desarrollados desde la unidad de impresión 3D del centro. Cabe destacar aquí el papel que se lleva a cabo en España con iniciativas de colaboración público-privada, cuyo resultado es la aplicación de la pericia y expertise propio de la empresa en la mejora de la prestación del servicio público.

Para concluir, cuando se precisa analizar la rentabilidad de una inversión en Impresión 3D médica es relevante conocer la naturaleza de los costes en que se va a incurrir. Los costes de la impresión 3D pueden descomponerse en tres clases principales:

Costes de capital: aquellos costes en los que se incurre de manera puntual, generalmente al comienzo de la puesta en marcha. Ejemplos de estos son la compra de la maquinaria, licencias de actividad y de software y adecuación de las instalaciones para la producción.

Costes operativos fijos: aquellos costes en los que se incurre de manera periódica pero que son independientes de la producción por unidad, por ejemplo, se consideran aquí costes de seguros, costes de mantenimiento, o de formación. Se pueden incluir aquí los costes salariales ya que, aunque mayor nivel de producción implica mayor necesidad de personal, el salario por persona es independiente del volumen de producción.

Entre todos estos, los costes de mantenimiento de la tecnología son de suma importancia, tanto del hardware como de la maquinaria, debido a la alta precisión y el especial cuidado que se debe tener para unas condiciones correctas en la impresión, dotar a la unidad 3D de un sistema de mantenimiento minucioso es crucial para un buen uso de la tecnología. El mantenimiento debe ser cuidado tanto en su aspecto preventivo, de manera que sea mínima la ocurrencia de incidentes; así como el correctivo, actuando de forma rápida y acorde a la calidad cuando estos incidentes tengan lugar.

Costes operativos variables: aquellos costes en los que se incurre de manera periódica y a su vez dependen del volumen de producción. El ejemplo paradigmático de estos costes es la materia prima, que se escala de forma acorde al volumen producido. Asimismo, si hay costes salariales facturados por hora de producción, estos se considerarían coste variable.

II.4 Impresión 3D en Centros Sanitarios de España.

La variedad de aplicaciones que la impresión 3D ofrece para los servicios sanitarios ha despertado el interés de muchos centros hospitalarios españoles que, motivados por las ventajas de la fabricación aditiva, han decidido incorporarla dentro de sus carteras de servicio.

Como se ha visto en la gestión operativa; el alcance, las aplicaciones y la tecnología de fabricación aditiva empleada son factores decisivos que se deben tener en cuenta si se va a recurrir a la impresión 3D en el centro hospitalario. Algunos centros han optado por la creación de unidades de impresión 3D internas, desde las que se presta servicio a diversos ámbitos del hospital; mientras que desde otros centros han optado por incorporar las soluciones de impresión 3D apoyándose en el suministro por parte de proveedores externos. A continuación, se enumera una breve muestra de centros hospitalarios

españoles que han incorporado la impresión 3D; exponiendo la forma en que se ha hecho y las necesidades que han cubierto mediante esta tecnología.

II.4.1. Hospital de Sant Joan de Déu (Barcelona)

Los comienzos de intervenciones hospitalarias en el hospital Sant Joan de Déu de Barcelona se remontan a 2014, cuando se empleó la tecnología para una intervención quirúrgica para un paciente de oncología pediátrica. Esta experiencia, pionera en España, fue el inicio del desarrollo de una unidad de impresión 3D en el centro que a lo largo de estos últimos años se ha consolidado y ha ido ampliando sus aplicaciones a nuevos ámbitos y necesidades. Actualmente, son más de 8 especialidades las que emplean la fabricación aditiva para su desempeño.

La unidad se ha organizado según un modelo mixto: en el propio centro se dispone de máquinas con las que se realizan simulaciones virtuales e impresiones; y, de manera externa, un grupo de expertos ofrece asesoramiento y apoyo en aquellas situaciones en las que son requeridos.

El equipo que opera en esta unidad es multidisciplinar, y cuenta con ingenieros, médicos del servicio de diagnóstico, cirujanos, técnicos de finanzas y técnicos de software. Los miembros realizan un seguimiento individualizado de cada caso y ofrecen las soluciones según estas son requeridas.

II.4.2. Hospital Gregorio Marañón (Madrid)

El hospital Gregorio Marañón de Madrid introdujo en sus instalaciones en el año 2013 la impresión 3D en el área de traumatología; desde ese momento, más de 17 departamentos se han visto beneficiados por la utilización de esta tecnología.

En el año 2015 se puso en marcha en el Hospital un laboratorio de fabricación que cuenta con 6 impresoras 3D y que da cobertura a 12 especialidades médicas del hospital. Actualmente, este servicio in-house se ha propuesto ser un centro de referencia de la impresión 3D hospitalaria en toda España. Los actuales objetivos de la unidad son conseguir certificación ISO y avanzar en la implementación de impresión de prótesis biocompatibles e impresión de tejidos. La unidad además cuenta con la colaboración de las Universidades Carlos III y Politécnica de Madrid con la que la colaboración docente, de investigación y de atención al paciente han permitido un mayor desarrollo del proyecto.

En el Hospital Gregorio Marañón se ha creado además la primera comisión de impresión 3D hospitalaria de España, que busca desarrollar la tecnología dentro del centro y promocionar su utilización en hospitales de todo el país. La comisión cuenta con 28 profesionales de 24 servicios hospitalarios de vocación interdisciplinar, desde servicios eminentemente clínicos a servicios de investigación, innovación, farmacia, compras o calidad. Desde la comisión se espera crear un Hub Hospitalario que sirva de punto de encuentro donde los profesionales compartan las soluciones de impresión 3D desarrolladas con otros centros médicos.

II.4.3. Hospital Universitario la Paz de Madrid

En el Hospital Universitario La Paz de Madrid se ha creado la Plataforma de Ingeniería Tisular e Impresión 3D (PITI3D). Su función es la de coordinar proyectos multidisciplinares que van desde la impresión de tejido, biomodelos y dispositivos a medida.

Esta plataforma es conocida por su línea de investigación en bioimpresión, que es a lo que hace referencia la Ingeniería Tisular (ingeniería de los tejidos del organismo); cabe destacar que desde esta plataforma se consiguió la impresión de piel orgánica. Esta piel se imprimió capa a capa siguiendo el orden geométrico de los tejidos de la piel humana, desde las capas profundas de la dermis hasta la epidermis, en condiciones *in vitro*. Se espera que la piel impresa sirva para la investigación de patologías y enfermedades de la piel como heridas, enfermedades infecciosas o melanoma.

II.4.4. Centros sanitarios de Castilla y León.

Desde la Gerencia Regional de Salud de Castilla y León se han realizado 130 procesos sanitarios con impresión 3D desde los Complejos Asistenciales de León y Salamanca y los Hospitales Río Hortega y Clínico de Valladolid. Este último, además, cuenta con una unidad de impresión 3D.

Cabe destacar la labor desarrollada desde el Centro Asistencial de Salamanca, que gracias a una colaboración *outsource* se ha podido desarrollar, en más de 40 ocasiones, prótesis torácicas para pacientes de enfermedades que requerían cirugía pulmonar, siendo una experiencia pionera en este sentido. Las prótesis se encargaron a empresas externas, siendo este un ejemplo paradigmático de impresión 3D sanitaria en la que se produce una

II.4.5. Hospital Son Espases de Palma de Mallorca

El hospital Son Espases de Palma de Mallorca cuenta con una unidad de impresión 3D que realiza procesos de conformado de biomodelos que sirven como guías en la fase preoperatoria. Esta producción se controla por una comisión que establece objetivos, dirige operaciones y coordina a los profesionales. La unidad cuenta con dos impresoras FDM de tamaño mediano y grande y una impresora SLS.

III. Un caso de éxito: la Unidad de Impresión 3D del Hospital Universitario Miguel Servet.

III.1 Introducción

La relación entre la impresión 3D y la medicina es estrecha y cuenta con una dilatada trayectoria, las posibilidades de personalización y mejora continua que ofrece la fabricación aditiva la han convertido en una herramienta especialmente atractiva para el ámbito sanitario. Han sido varios los hospitales que han incorporado las tecnologías de impresión 3D como elemento de apoyo y de mejora de los servicios sanitarios. Uno de estos ha sido el Hospital Universitario Miguel Servet de Zaragoza (H.U.M.S) que ha conseguido crear y desarrollar una Unidad de impresión 3D que constituye un caso de éxito por su carácter innovador y por la mejora que ha aportado al servicio sanitario.



Ilustración 6. Fotografía del Hospital Universitario Miguel Servet de Zaragoza. Fuente: Ajzh2074 - Trabajo propio, recuperado desde Wikipedia..

En el caso del H.U.M.S, la Unidad de impresión 3D del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento se ha dedicado a una función diferente a las que habitualmente se destina esta tecnología en el ámbito sanitario. Muchos hospitales y centros médicos emplean la impresión 3D para mejorar servicios asistenciales, ya que su actividad se focaliza en el diseño de biomodelos o prótesis. La Unidad de Impresión 3D, sin embargo, realiza funciones de mantenimiento hospitalario. La tecnología se ha implementado, en consecuencia, de manera que sirva como mejora de los equipos e instalaciones empleados en el hospital; ya sea bien porque han quedado obsoletos, estén averiados o que se requieran cambios en su funcionalidad.

La forma en cómo el H.U.M.S ha hecho uso de la impresión 3D sirve de ejemplo para cómo los servicios de mantenimiento pueden verse beneficiados gracias a la incorporación de esta tecnología; beneficios que se dan tanto en eficiencia económica como en incremento del nivel de calidad. Su puesta en marcha conlleva la implantación de cambios muy significativos que suponen una revolución en las tareas de mantenimiento. En el caso del H.U.M.S, esta unidad de impresión se orienta para dar respuestas a las necesidades de un hospital, que es un espacio con unas características

muy definidas. No obstante, el alcance de las mejoras en tareas de mantenimiento es tal que los beneficios asociados a la incorporación de la impresión 3D son extensibles a cualquier tipo de servicio de mantenimiento. Por ejemplo, la impresión en 3D de piezas para la resolución de averías en los equipos médicos pueden reproducirse para equipos con otra funcionalidad.

La impresión 3D posee ciertas características que incentivan su aplicación en servicios de mantenimiento, como son la personalización de los elementos y la fabricación a demanda. Del mismo modo, uno de sus principales inconvenientes como es la baja velocidad de fabricación no constituyen un problema, debido a que el mantenimiento no requiere de la producción continua de piezas en grandes volúmenes. En el mantenimiento, además, muchas de las piezas necesarias se fabrican con el fin de ser sustitución de otras que han dejado de ser funcionales; así que, si se prevé que una cierta avería es frecuente, es posible anticiparse mediante la fabricación de un lote de piezas de sustitución cuyo suministro pueda hacerse a demanda sin necesidad de esperar el tiempo que dura la impresión.

La Unidad de impresión 3D del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento nació con el fin de dar respuesta a ciertas necesidades del H.U.M.S; la capacidad de respuesta obtenida de la fabricación aditiva fue tal que su adopción se demostró como un caso de éxito. Para llegar a este éxito cabe destacar el rol que desempeñaron las personas encargadas de la unidad, quienes gracias a su motivación y esfuerzo en desarrollar el trabajo de la Unidad han sido condición indispensable para que esta respuesta se produjera. La medida sin embargo no ha tenido una recepción uniforme en todas las instancias ejecutivas del hospital. Se han producido reticencias y escepticismo por parte de ciertas instancias organizacionales del hospital que han ralentizado el desarrollo de la Unidad. Por este motivo, el contenido de lo aquí expuesto busca ser un alegato que evidencie la gran oportunidad que es para el H.U.M.S apostar por la impresión 3D.

El análisis a la Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S sigue la siguiente estructura. En primer lugar, se describe la Unidad, sus recursos y metodología de trabajo. Asimismo, se da un breve listado de ejemplos de piezas impresas desde la Unidad, y su aplicación. A continuación, se realiza un breve estudio sobre el ahorro económica y en términos de calidad que ha aportado la Unidad a las labores de mantenimiento en el H.U.M.S. Posteriormente se plantea un análisis de situación y diferentes opciones de futuro que, de llevarse a término, contribuirían a la consolidación, crecimiento y desarrollo de la Unidad dentro del H.U.M.S. Finalmente, se hace un análisis crítico de la situación del H.U.M.S a modo de conclusiones de la información anteriormente expuesta.

El objetivo final de este análisis es exponer las características de la aplicación de la impresión 3D en el mantenimiento del H.U.M.S, especialmente aquellas que lo convierten en un caso de éxito y proponer nuevas medidas cuya implantación contribuiría a un mayor desarrollo de la Unidad.

III.2 La unidad de impresión 3D del H.U.M.S.

La unidad de impresión 3D del H.U.M.S es un conjunto de recursos humanos, materiales e informáticos que, motivados por la voluntad de satisfacer ciertas necesidades de mantenimiento del H.U.M.S, realizan un servicio de aprovisionamiento de material impreso en 3D con el fin de aportar valor añadido a la labor de mantenimiento. Este valor se ve aportado tanto mediante el ahorro en el coste de los suministros como mediante la mejora de la calidad.

Actualmente, la Unidad carece de carácter oficial dentro de la estructura organizativa del H.U.M.S; la labor desarrollada desde la Unidad se encuadra en el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del H.U.M.S; pero la Unidad no es una sección del mismo. Dotar a la Unidad de este carácter oficial es una de las reivindicaciones más anheladas desde la Unidad, ya que ello le aportaría mayor notoriedad y mejor financiación, lo que expandiría el volumen de trabajo y, por consiguiente, la relevancia de la Unidad en el hospital.

III.2.1 Justificación de existencia

Previo a la incorporación de la tecnología de impresión 3D en el departamento de mantenimiento, las piezas se compraban en el mercado o, si se encontraban descatalogadas, se recurría a una reparación con los recursos disponibles de forma que se pudiera garantizar la funcionalidad, lo cual en muchos casos no era posible. En el peor de los escenarios, la falta de piezas de recambio y la imposibilidad de realizar una reparación del equipo sin esta obligaba a la baja del equipo y su sustitución por uno nuevo, lo cual suponía un sobrecoste tanto elevado como, en algunos casos, absurdo, debido a que la razón de la perdida de funcionalidad era por el fallo o falta de uno o varios componentes.

Estas soluciones terminaron por suponer un problema acuciante en el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento, lo que dio pie a la adquisición de las impresoras 3D y la constitución de la Unidad, para poder dar una respuesta a esta problemática.

La razón principal por la que el departamento de mantenimiento decidió optar en un inicio por incorporar la impresión 3D fue por la previsión de ahorro en suministros hospitalarios que esta podría traer consigo.

Fueron los jefes de taller quienes, a causa de los sobrecostes de los suministros quienes plantearon las posibles ventajas económicas que traería el conformado de recambios mediante impresora 3D. Las personas que hoy forman la unidad, que ya eran depositarios de la confianza del personal del hospital, optaron por hacer algunas de las peticiones que Jefatura de Taller tenía, diseñando piezas cuyos repuestos comerciales análogos resultaban demasiado caros. Las piezas impresas fueron empleadas en sustitución a estos repuestos y el resultado obtenido fue satisfactorio, manteniendo la funcionalidad original a un coste mucho menor. Lo significativo del ahorro, sumado a la posibilidad de emplear la impresión 3D para aplicaciones, hizo que la Unidad se asentara como un servicio adicional dentro del departamento de mantenimiento.

III.2.2 Razones por las que orientarla al ámbito del mantenimiento

La impresión 3D orientada al ámbito del mantenimiento es algo novedoso, especialmente si lo enmarcamos dentro de una institución como es un centro hospitalario. La filosofía llevada a cabo en este centro ha sido a causa de tres problemáticas que los servicios de mantenimiento han encontrado en su desempeño, y a las que la impresión 3D ha sabido dar respuesta: obsolescencia o descatalogación de las piezas, piezas en el mercado a un coste muy superior y piezas que permiten resolver una necesidad a la que no se había podido dar una respuesta satisfactoria por otros métodos.

Existen además otras razones que hacen de la impresión 3D una tecnología muy útil para llevar a cabo labores de mantenimiento.

Producción a demanda: no existe previsión exacta del momento en que una pieza se va averiar; además, las averías, roturas o disfunciones de piezas de algunos equipos no se producen de forma masiva. La impresión 3D permite una fabricación a demanda de las piezas cuando estas se necesitan, sin ser imprescindible mantener una producción continuada y con bajos costes fijos en caso de que la impresora no esté en funcionamiento.

Independencia del tiempo de fabricación: uno de los mayores hándicaps de la impresión 3D en comparativa a otros métodos de conformado es su baja velocidad de producción. Si se desea una orientación al mantenimiento, no hay una demanda elevada y constante en el tiempo de grandes volúmenes de piezas. Esto permite eliminar la variable del tiempo de fabricación como condicionante; y, por tanto, permite obviar la desventaja de la baja velocidad debido a que no afecta al suministro. De igual manera, en muchos casos se puede disponer de cierto stock de seguridad de fácil almacenaje en caso de que la avería sea urgente, lo cual es infrecuente.

Control de costes y ahorro económico: en el mercado de suministros hospitalarios, debido a lo sensible del material y a la no sujeción de esta demanda a fluctuaciones; los comerciales de suministros médicos especulan con los costes de los suministros fijando precios sobredimensionados a dichos suministros. Si parte de este aprovisionamiento se hace mediante fabricación in situ de piezas impresas en 3D, los costes de suministro se ven reducidos en una magnitud muy relevante, como se muestra a continuación.

Personalización: la impresión 3D in situ permite realizar diseños personalizados que solucionen problemas novedosos o que salven fallos de los diseños comerciales, orientando la pieza a satisfacer en mayor grado la necesidad a la que pretende dar respuesta. En algunos casos el diseño de las piezas comerciales aumenta la probabilidad del fallo y, con el diseño elaborado desde la Unidad, se consigue mejorar la geometría de la pieza para el fallo. De igual forma, la unidad de impresión 3D permite conformar insumos más económicos, ligeros y funcionales debido a la personalización en el diseño.

III.2.3 Crecimiento y desarrollo de la unidad.

La unidad de impresión 3D del H.U.M.S comienza su recorrido en el año 2015. En septiembre de aquel año, el Servicio de Oncología Radioterápica solicitó la petición de una pieza para adaptar el sistema de presión abdominal del TAC de planificación. Esta petición fue motivada debido a que el centro, hasta aquel momento, no podía llevar la técnica en condiciones óptimas y de calidad, por lo que era habitual remitir a los pacientes

a otros centros donde esta prueba diagnóstica tiene un coste económico más elevado. Ante la petición el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del H.U.M.S optó por realizar el diseño de la pieza y encargar su fabricación a un proveedor externo.

Este caso se demostró como un ejemplo de éxito, lo que animó al Servicio de Ingeniería y Mantenimiento a presentar, en octubre de 2015, este proyecto al “V Premio a la Innovación en el Sector II”. La candidatura tuvo una gran acogida y obtuvo por parte de Gerencia del H.U.M.S una mención especial al proyecto “Diseño y Fabricación de componentes en impresión 3D para reparaciones de equipamiento e instalaciones del Sector II”. Al tratarse de un proyecto con mención, este llegó hasta el Instituto Aragonés de Ciencias de la Salud (IACS), quien la incluyó en el Banco de Ideas “Hospital Innovador”. Sin embargo, la gerencia se lamentaba de no poder dotar fondos al proyecto para llevarse a cabo.

A partir de noviembre de aquel año, el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento se marcó como objetivo la compra del equipamiento necesario para desarrollar el proyecto; sin embargo, ninguna de las alternativas propuestas fructificó. No fue hasta julio de 2017 cuando, a través del IACS, se pudo efectuar la adquisición de la impresora y escáner actuales, valorados ambos en 22.000€. Durante el tiempo de negociación de la compra, los técnicos del Servicio se formaron por cuenta propia en el empleo de la impresión 3D, aprendiendo con un software libre y ensayando diseños en sus hogares.

Una vez adquiridos los equipos, el personal del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento continuó con un proceso de mejora continua y desarrollo de aplicaciones de la impresión 3D. La inversión ha supuesto la mejora en el suministro de piezas necesarias para el mantenimiento del centro. Ello se ha visto traducido en una significativa reducción de costes a tal efecto que en menos de dos años el desembolso por la compra de los equipos fue amortizado.

Desde la compra de los equipos a mediados de 2016, el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del H.U.M.S ha tenido como objetivo el desarrollo tanto a nivel de difusión como de aplicaciones. Ambos aspectos además se benefician mutuamente y ayudan al crecimiento cualitativo y cuantitativo de la unidad de impresión 3D.

III.2.4 Difusión del trabajo llevado a cabo por la Unidad

El Servicio de Ingeniería y Mantenimiento ha sido un referente y ha buscado compartir la experiencia y resultados obtenidos con otros organismos interesados en la materia; así lo ha acreditado en diferentes eventos donde ha presentado este proyecto como Caso de Éxito de implantación de la tecnología de impresión 3D. Además, la experiencia del proyecto también ha sido compartida con otros centros hospitalarios de fuera de Aragón, con el fin de mostrar el potencial de la impresión 3D en el mantenimiento hospitalario y potenciar la transmisión de conocimiento y experiencias de otros centros que emplean la impresión 3D en sus servicios.

De igual manera el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento ha hecho una labor interna dentro del sector II para dar a conocer la existencia de la unidad, sus aplicaciones, y qué mejoras puede llevarse a cabo a través de la impresión 3D en los distintos servicios del H.U.M.S. Asimismo, las labores de difusión se han producido también hacia otros

sectores del Servicio Aragonés de Salud. En todos los centros sanitarios de la comunidad, los equipamientos son similares, y las necesidades de este tipo de productos impresos en las unidades y servicios podrían verse satisfechas con un aumento de la producción de las instalaciones que ya hay en el H.U.M.S., así como con una correcta implantación de medios de contacto y solicitudes.

III.2.5 Estructura organizativa / ubicación en el H.U.M.S

La unidad de impresión 3D carece de entidad oficial dentro de la estructura organizativa del H.U.M.S, los miembros de la unidad desean que esta unidad se incorpore como un servicio adicional al departamento de mantenimiento, los miembros de la unidad pertenecen tanto al departamento de mantenimiento como al de seguridad, quienes suman el desarrollo de la unidad a sus funciones laborales originales, en múltiples ocasiones su apuesta a título personal por la Unidad de impresión 3D les ha llevado a formarse y desarrollar diseños desde sus domicilios, fuera del tiempo de trabajo.

Existe una figura de coordinación de la unidad, pero que, al no tratarse de una entidad oficial dentro del hospital no existen dependencias jerárquicas entre los miembros de la unidad.

El crecimiento y desarrollo de la unidad se ha realizado de forma autónoma por parte de la misma, sin tutela ni planificación desde la gestión del hospital; esto ha permitido libertad y flexibilidad en el formato de desarrollo de la unidad, sin embargo, ha restado velocidad y alejado los horizontes de expansión desde sus orígenes.

Debido a su carácter no oficial, la unidad carece de un espacio específico, repartiéndose sus equipos y el personal por diferentes dependencias del espacio reservado a mantenimiento, en los sótanos del edificio del H.U.M.S.

Las personas que forman la unidad manifiestan la necesidad de que para la consolidación de este servicio es necesario dotar de un espacio específico para ubicar las máquinas, con los requerimientos de ventilación adecuados.

III.3 Los Recursos de la Unidad.

III.3.1 El personal de la Unidad y sus funciones.

La Unidad carece de un organigrama de personal estipulado, a causa de no contar con carácter oficial. Esta se ha desarrollado y desempeña su labor gracias a la participación y el trabajo de un grupo interdisciplinar y transversal de trabajadores del Servicio de Ingeniería y mantenimiento del Hospital que, de manera adicional a las funciones de sus respectivos puestos, desarrollan los trabajos dentro de la unidad. Este grupo de personas está formado por:

Una delineante perteneciente a Oficina Técnica; entre sus funciones dentro de la unidad están el diseño de las piezas que se necesitan imprimir, la puesta en marcha de los equipos y el control de fabricación de las piezas gestionando el manejo de las impresoras durante la preparación, proceso y post procesado.

Una técnica de la Sección de Seguridad. Entre sus funciones ha estado el diseño de piezas y el proceso de formación en el manejo de los softwares de diseño, que ha sido de forma completamente autodidacta. Asimismo, se encarga de procesos de mejora continua de la unidad y el desarrollo de soluciones de valor añadido.

Un técnico no titulado de especialidad electrotecnia. Sus funciones dentro de la unidad son el mantenimiento del hardware, set up de los equipos y resolución de averías menores que no requieren al técnico del proveedor.

El Jefe de sección de Seguridad. Realiza la función de coordinación de toda la unidad, dirigiendo los trabajos a realizar y trasladando las directrices de actuación a los demás miembros. También ha empleado labores de diseño, mejora continua y aplicaciones de valor añadido de las piezas. Su labor es la de la gestión de todas las estrategias generales de difusión, crecimiento y desarrollo de la unidad, ampliando la cartera de recursos y el grado de utilización, así como la promoción de los servicios tanto a nivel interno como externo.

Todas las personas que forman la unidad han demostrado desde el comienzo de la andadura de este proyecto una implicación en el mismo a nivel particular sin la cual este no hubiera podido tomar forma. Su trabajo se ha caracterizado por una filosofía orientada a la continua innovación, crecimiento del servicio y búsqueda de soluciones y recursos que permitieran crecer la unidad de impresión 3D del H.U.M.S no solo per se, sino en su amplísimo potencial utilitario.

De este grupo de profesionales cabe destacar dos características que constituyen dos factores clave para que la unidad de impresión 3D del H.U.M.S sea un caso de éxito: la primera, una perspectiva filosófica libre y alternativa, que, motivada por la originalidad y la exploración de nuevos horizontes emprende la búsqueda de soluciones alternativas, novedosas y originales a los problemas en el departamento de mantenimiento. Y, en segundo lugar, a una personalidad de quienes integran la unidad marcada por la motivación y el tesón en desarrollar el proyecto de la impresión 3D, pese a las dificultades encontradas por lo novedoso y extraordinario de la unidad; apostando por trabajar a nivel personal, fuera de su horario y funciones laborales, por mejorar, desarrollar y consolidar la unidad de impresión 3D del H.U.M.S, aplicada al mantenimiento hospitalario.

III.3.2 Equipos y máquinas

Como se ha explicado en el desarrollo histórico de la unidad, la impresión 3D en el H.U.M.S comenzó con la adquisición por parte del IACS de una impresora de FDM de gran formato (modelo DT 600 de Dynamical Tools), además de un escáner de piezas(Einscan Pro), esta adquisición se produjo en 2017.

Posteriormente, y debido al crecimiento de la unidad, en 2020 el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento compró una nueva impresora, de SLA de marca Formlabs (Formlabs Form 3). Estos son, por consiguiente, los tres equipos con los que cuenta la unidad para las labores de impresión 3D: impresora FDM, impresora SLA y Escáner. Además, su control se realiza mediante software controlado a través de ordenadores personales.

III.3.2.a Impresora FDM:

El modelo es una impresora FDM de DT 600 de formato industrial. La impresora cuenta con dos cabezales que permiten trabajar de manera simultánea y reducir a la mitad el tiempo de impresión. Los ejes de máquina son los siguientes: los movimientos en X e Y (horizontales) los realiza el cabezal mientras que el movimiento en Z (vertical), lo realiza la bancada.

Actualmente la impresora emplea filamento de PLA, cuyas propiedades se describen más adelante, en hilos de grosores 1,75 mm con boquillas de los extrusores de 0,4 y 0,6 mm. Según los requerimientos de precisión dimensional y velocidad de impresión de la pieza se opta por el uso de uno y otro filamento.

El funcionamiento de la impresora es el siguiente. Una vez diseñada en CAD la geometría de la pieza, esta se ejecuta a través del PC asociado a la impresora; los ficheros de diseño de las piezas se exportan al formato stl. El software de impresión Simplify3d gestiona las piezas para su impresión, añadiendo perfiles de impresión, soportes, distribución de piezas en la cama, densidades y otros parámetros de impresión según el material que va a usarse.

Para la impresión en PLA, material usado en la impresora de FDM, la bancada debe calentarse hasta los 40°C y los extrusores a los 215°C. Si se va a imprimir una pieza con gran superficie de adherencia a la bancada, es recomendable rociar la bancada con laca para evitar que la pieza quede pegada a esta y al retirarse queden rebabas o se dañe la pieza. En el caso de la impresión FDM no es necesario el post procesado más allá de la eliminación de los soportes generados para oquedades y vacíos. Una vez retirada de la impresora y eliminados los soportes y posibles rebabas, la pieza conformada es plenamente funcional.

III.3.2.b Impresora SLA:

El modelo de impresora SLA es la Formlabs Form 3. La impresora emplea diferentes resinas fotosensibles para el conformado de piezas. El proceso de conformar las piezas difiere del FDM debido a que el proceso físico es diferente. En este caso el material no se deposita a través de un extrusor de forma gota a gota, sino que mediante el curado de diferentes capas del material permite conformar la pieza.

El proceso de impresión mediante SLA se realiza en tres equipos hardware diferentes: la impresora, donde se realiza la foto-polimerización de la resina, un recipiente con alcohol iso-propílico para el baño de la pieza y un hornillo donde se realiza el curado para finalizar el proceso.

En el equipo de la impresora se encuentran las siguientes partes diferenciadas: una cartuchera en la pared posterior donde se alojan los cartuchos de resina y que alimenta a la impresora. Un tanque que ocupa la superficie inferior de la impresora y que se alimenta de resina a partir del cartucho; la resina de la capa superior del tanque será la que, capa a capa, se vaya depósito en donde se vierte la resina líquida; este tanque además cuenta con un peine que homogeneiza la resina antes de realizar la impresión. Y finalmente, una plataforma que aloja el láser de la impresora. Esta plataforma es móvil en el eje Z y su superficie limita el tamaño de la pieza a imprimir.

El proceso de impresión es el siguiente: se carga la imagen de la pieza en el software de impresión. La plataforma superior desciende hasta entrar en contacto con la resina alojada en el tanque en la plataforma inferior. En ese caso el láser va solidificando las áreas de resina marcadas por el diseño y una vez la resina ha curado, la plataforma asciende una distancia igual al grosor de capa; el proceso se repite sucesivamente hasta la finalización de la pieza. Una vez acabada, la pieza queda pegada en voladizo a la cara inferior de la plataforma superior, se debe retirar y posteriormente retirar las rebabas y soportes que hayan podido generarse. Una vez impresa, se realiza el baño en alcohol iso-propílico en el equipo correspondiente, durante 5 minutos y, tras el baño, se introduce la pieza en el horno para el curado, a 60°C durante 60 minutos. Es tras este curado que la pieza formada es planamente funcional.

Según el fabricante, el coste de la impresora Formlabs Form 3 junto con las unidades de baño iso-propílico y curado es de 4799,00€. Según la información facilitada por la unidad el coste de mantenimiento de la impresora es de 420,00€/año.

La unidad cuenta con estos dos equipos de impresión, destinados a aplicaciones diferentes. La impresora de FDM se emplea con mayor frecuencia por varias razones: al ser de mayor formato permite formar piezas más grandes; el material de impresión, PLA, es más económico que las resinas de la SLA; la velocidad de impresión es también mayor en la impresora FDM; la adquisición anterior de la impresora FDM ha permitido al personal un aprendizaje más profundo de uso; y, finalmente, el factor más relevante para la primacía del FDM en la unidad es su conveniencia, facilidad de uso y carácter intuitivo.

Por su parte, la impresora de SLA presenta ciertas ventajas que la adecuan para la impresión de piezas en algún caso concreto. Cabe destacar la resolución de las piezas y el buen acabado dimensional conseguido; asimismo, la variedad de resinas empleadas en la unidad la hacen muy versátil si se desea imprimir elementos con propiedades específicas. Una las propiedades más relevantes de alguna resina frente al PLA es su buena resistencia a la temperatura, lo que la hace idónea para piezas que puedan someterse a procesos de esterilización, muy comunes en el ámbito hospitalario.

III.3.2.c Escáner:

El escáner se adquirió de manera simultánea a la impresora de FDM y se pretendía emplear como una herramienta que permitiera trasladar los datos de superficies de piezas sólidas al software del PC para su impresión, sin necesidad de hacer el diseño completo a través de softwares CAD.

Esta tecnología podría ahorrar mucho trabajo, pero se ha manifestado como un elemento de escasa utilidad. Esto es así porque la calidad de escaneado de las piezas es baja, no detecta las superficies interiores además de que se consigue una calidad de imagen escaneada baja, que genera nubes de puntos detectados que no se ajustan a las caras reales del objeto; además, la mayoría de objetos diseñados se hacen a partir de geometrías sencillas que no requieren de mucho tiempo de diseño. Por estas razones el uso del escáner en la unidad es prácticamente inexistente.

Según la información facilitada desde la Unidad, el precio de compra del Escáner fue de 4800€. Posteriormente se adquirió un plato giratorio para un mejor escaneado de las piezas de un coste de 800€.

III.3.3 Materiales

III.3.3.a PLA

La impresora FDM emplea como material de trabajo Ácido Poliláctico (PLA). El PLA es un compuesto polimérico que se extrae de materia prima orgánica y que se suministra para impresión 3D en forma de filamento. Presenta como ventajas su fácil manejo, ligereza (densidad: $1,24 \cdot 10^3$ kg/m³) y buenas propiedades mecánicas en el producto acabado. Como inconveniente cabe destacar su sensibilidad a la humedad y las altas temperaturas, lo que puede suponer un problema si las piezas fabricadas en PLA necesitan esterilización, especialmente si este proceso es frecuente.

La Unidad de Impresión 3D del HUMS trabaja principalmente con PLA en bobinas, de diferentes colores y acabados. El precio habitual del material es entorno a los 21€/kg

Este material no requiere de post procesado, por lo que una pieza es plenamente funcional inmediatamente después de su impresión.

III.3.3.b Resinas fotosensibles

La impresora de SLA emplea de material resinas fotosensibles comerciales de Formlabs. Estas resinas se suministran en cartuchos de 1L, en estado líquido. Presenta como ventajas un mejor acabado superficial, pero como inconvenientes unas propiedades mecánicas más pobres, una menor velocidad de impresión y un manejo poco agradable, debido a sus fuertes olores y consistencia viscosa y pegajosa.

En la Unidad, las resinas comerciales de Formlabs empleadas actualmente son:

- **STANDARD WHITE & BLACK V4:** resinas básicas blanca y negra, respectivamente; empleadas para piezas con alta precisión dimensional, permiten pintado posterior y no requieren post curado.
- **TOUGH 1500 & TOUGH 2000:** resinas caracterizadas por sus altas propiedades mecánicas, con módulo de flexión de 1,5 y 2 GPa, respectivamente.
- **DRAFT V2:** resina para prototipado rápido, caracterizada por permitir una rápida velocidad de impresión.
- **ELASTIC 50A:** resina con buenas propiedades elásticas, especialmente su alta velocidad de recuperación elástica.

El coste de estas resinas es elevado, ya que la media de precio de un cartucho ronda los 200 euros. De igual manera, cada resina debe llevar asociado un tanque individualmente; el precio de cada tanque es de 250 euros y, aunque es reutilizable una vez se acaba el cartucho, el fabricante no recomienda que dos resinas diferentes sean vertidas en el mismo tanque.

Resina, más pringosa, tanques, falta de reutilización, tanques, más cara y menos útil para según que funciones

III.3.4 Software

En la Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S, los diseños de las piezas se dibujan a través de diversos softwares CAD. El más empleado en la Unidad es FreeCAD debido a su carácter libre e intuitivo. El aprendizaje del manejo de este Software por parte del personal se ha producido de manera autodidacta con el fin de emplearlo para el diseño de las piezas. De igual manera, en el diseño de piezas también se han empleado otros softwares CAD como los módulos de Autodesk: AutoCAD, con los que ya contaba el hospital de manera previa a constituir la unidad y Fusion 360, adquirido en el último año.

Para las labores de parametrización y ejecución de la impresión, el software a través del cual se realizan estas labores es Simplify3D, el cual es usado para la impresora FDM (DT 600) , y para la impresora de SLA (Formlabs Form 3) el software PreForm. En la impresora de FDM, los archivos en los que se guarda la información de la pieza se abren desde Simplify3D en dos extensiones diferentes, según cual vaya a ser el trabajo que se haga con ellos. Con la extensión “.STL” se realiza la configuración de la impresión (método de impresión, geometría, orientación, material...), mientras que la compilación y ejecución de la impresión se hace mediante un archivo con extensión “.GCODE”; en la impresora de SLA tanto la configuración como la ejecución se realizan con los archivos en extensión “.STL”. Simplify3D además genera de manera automática los soportes que puedan aparecer, si es que son necesarios, para que la pieza se imprima correctamente.

Previo a la impresión en FDM también es posible visualizar un renderizado de la pieza donde se muestran elementos tales como la orientación de la pieza en su impresión o los soportes generados, este renderizado es visible desde la página web de Dynamical Tools.

Para la generación de algunos biomodelos o prótesis desde la Unidad se ha empleado también un software de diferentes características llamado DICOM. Este software permite convertir imágenes de la anatomía de los pacientes que se hayan obtenido mediante TAC a archivos imprimibles en 3D. Aunque la función principal de la impresión 3D en el H.U.M.S es para mantenimiento, el uso de las impresoras de la Unidad para conformar biomodelos o prótesis no invasivas ha despertado interés por el personal médico de otros departamentos, algunos ejemplos de estas aplicaciones se comentan con posterioridad.

III.3.5 Diseños

Como se ha explicado, la Unidad ha creado diseños a través del software de diseño asistido por computadora para idear la geometría de las piezas. Todos estos diseños elaborados desde la unidad forman una base de datos de 161 referencias (a fecha de 8/11/2021). Esta base de datos se encuentra vinculada a un servidor del centro que guarda de manera diaria esta información.

El proceso de diseño más empleado es mediante ingeniería inversa, es decir, con piezas deterioradas o mediante un estudio de necesidades, son los miembros de la unidad quienes elaboran un diseño idéntico o mejorado de la pieza para poderla imprimir posteriormente;

o, en algunos casos, elaboran piezas ex novo creadas a partir de la geometría del elemento donde van a encajar o del espacio donde van a ser incorporadas.

III.4 Metodología de trabajo y aplicaciones de las piezas.

En este apartado se va a desarrollar la metodología de trabajo empleada dentro de la Unidad de impresión 3D del H.U.M.S. En primer lugar, se describen las diferentes problemáticas que motivan la creación de un diseño e impresión de una pieza en la Unidad. También se explica cómo trabaja la Unidad cuando se requiere la impresión de una pieza, prestando especial atención a la filosofía de Ingeniería Inversa que se lleva a cabo en la Unidad en el momento de diseño. Finalmente, se muestran algunos ejemplos de piezas realizadas dentro de la unidad, qué motivó su diseño e impresión y qué mejoras en la funcionalidad han sido aportadas a las piezas por su impresión en la Unidad.

III.4.1 Justificación de necesidad de las piezas

Al encontrarse enmarcada la Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S en el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento; la mayoría de requerimientos de necesidad de piezas que llegan a la unidad son a causa de necesidades derivadas del mantenimiento del Hospital.

Desde la Unidad, se han establecido tres categorías que reflejan las diferentes motivaciones que se tienen para realizar una pieza nueva desde la Unidad:

Obsolescencia de las piezas: en ocasiones las piezas que se averían o se rompen en un equipo hospitalario se encuentran descatalogadas en el mercado, lo que hace que sea imposible realizar una reparación o sustitución de la pieza ya que no se puede encontrar. Las alternativas en este caso son bien realizar una reparación de peor calidad que reste funcionalidad y conveniencia al equipo, o en el peor de los casos, darlo de baja y requerir la compra de uno nuevo, el cual supone un sobrecoste mucho mayor que el de la pieza en sí.

Coste muy elevado de piezas de repuesto: puede darse el caso que estas piezas sí que se encuentren en el mercado, pero su coste sea muy superior al que pueden tener si se imprimen en 3d, esto invita a que se emplee la impresión 3D para conseguir una reducción de los costes de suministro, así como de los plazos si se recurre a compras externas.

Soluciones novedosas y originales a diferentes incidencias y necesidades que puedan presentarse ante el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento para las que, hasta el momento, no se había podido dar respuesta con los recursos disponibles y que, gracias a piezas impresas en 3D, han conseguido dar un valor añadido a las mismas. Al tratarse el hospital de un servicio público, y al tratarse el servicio que se pretende reforzar mediante la 3dp de mantenimiento; en muchas ocasiones la motivación económica y comercial no es la que se tiene en cuenta para idear una pieza, sino la capacidad de resolver nuevas necesidades que antes no se habían podido satisfacer.

Este último aspecto, de los tres mencionados, merece especial atención ya que da a la impresión 3D un carácter de utilidad mucho más amplio y profundo que si solo se justificara su uso en base a la rentabilidad. El HUMS ha conseguido mediante la

impresión 3D elaborar piezas para satisfacer necesidades que ningún elemento comercial habría podido haber satisfecho; y esta detección, desarrollo e implementación de soluciones ha sido una labor casi exclusiva del personal de la unidad, lo que significa la labor de valor añadido, mejora continua y trabajo intelectual de los miembros de la unidad, más allá de sus tareas como operadores de máquina.

III.4.2 Flujo de trabajo en la Unidad del H.U.M.S

Previo a la incorporación de la tecnología de impresión 3D al Servicio de Ingeniería y Mantenimiento, si alguno de los equipos que llegaban para su arreglo a Mantenimiento requerían de recambios de alguna de sus piezas, estas se compraban externamente. En ocasiones, estas piezas podrían encontrarse descatalogadas, por lo que se recurría a una reparación con los recursos disponibles de forma que se pudiera garantizar una cierta funcionalidad, lo cual en muchos casos no era posible. En el peor de los escenarios, tanto la falta de piezas de recambio como la imposibilidad de realizar una reparación del equipo obligaba a dar de baja al equipo y proceder a su sustitución por uno nuevo. Esto último suponía un sobrecoste elevado y, en algunos casos, resultaba absurdo dar de baja a todo un equipo completo si la razón de la avería era el fallo de una pieza pequeña.

Esta forma de proceder resultaba ser, por lo general, cara y poco eficiente. Por este motivo, el Servicio de Ingeniería y mantenimiento optó por la adquisición de las impresoras 3D y la constitución de la Unidad, de manera que se pueda dar una respuesta más rápida, barata y eficaz a esta problemática; más adelante se demostró que no sólo se consiguió solucionar este problema, sino que la aplicación de la impresión 3D ha proporcionado mejoras al Servicio de Ingeniería del H.U.M.S más allá del mantenimiento y la sustitución de piezas dañadas en los equipos.

Como las piezas impresas en la unidad tienen funcionalidad variada, existen por tanto metodologías variadas en cómo se trabaja desde la Unidad para la resolución de los problemas que a esta le llegan. De entre las metodologías de trabajo actuales de la Unidad, se va a describir la más habitual: creación de piezas para la sustitución y mejora de la funcionalidad de equipos médicos. Esta manera de trabajar es la más frecuente y el resto guardan importantes semejanzas con esta.

En caso de avería, requiera esta una solución de impresión 3D o no, la tramitación de la reparación de esta comienza con la solicitud vía la intranet del Hospital de un parte de incidencia. el cual es generalmente redactado por el personal de secretariado de departamento, quienes no suelen tener un conocimiento al detalle de la división del trabajo en el Servicio de ingeniería y mantenimiento; además, en muchos casos, se desconoce la existencia de la Unidad de Impresión 3D con la que cuenta el H.U.M.S. Por esto, darse a conocer dentro del hospital es una prioridad dentro de la Unidad, ya que esta difusión tiene entre sus objetivos que el personal que tramita las incidencias conozca la existencia de este servicio.

Una vez se ha notificado el parte de incidencia, el equipo dañado se traslada a las dependencias del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento, donde la Jefatura de Taller evalúa la avería y destina su labor de reparación a una u otra sección del departamento (electrotecnia, carpintería, mecánica...). Si la avería puede resolverse mediante la

sustitución de la pieza dañada por una pieza impresa en 3D, Jefatura Técnica informa a la Unidad de que se requiere el suministro de la pieza correspondiente, y es el personal de la Unidad de impresión 3D quien producirá la pieza en cuanto tenga ocasión. Una vez la pieza ha sido fabricada, se inserta al equipo dañado y se notifica en la intranet que ya ha sido reparado; posteriormente el personal lo recogerá de la zona de mantenimiento y lo pondrá en uso nuevamente.

III.4.3 La ingeniería inversa

En el método de trabajo que lleva a cabo la unidad de impresión 3D del H.U.M.S cobra especial importancia la ingeniería inversa. La ingeniería inversa se define como el proceso que identifica las propiedades de un objeto físico mediante la realización de un análisis exhaustivo de su estructura, funciones y operaciones. Se toman medidas de la geometría de toda la superficie del objeto, ya sea manualmente o con diversas tecnologías de medición 3D, para crear una representación digital 3D del objeto.

La ingeniería inversa cuenta con una serie de ventajas que la hacen especialmente atractiva para su uso en el proceso de trabajo de la fabricación aditiva, y especialmente, si esta está orientada a labores de mantenimiento: permite detectar zonas susceptibles de desgaste y mecanismos de fallo, sirve como fuente para la innovación, mejora continua y aportación de valor añadido, ayuda a conseguir una reducción de coste y plazo al facilitar la independencia respecto a proveedores externos y es un elemento estratégico clave si se desea realizar labores de mantenimiento preventivo en los equipos en uso.

Los métodos de ingeniería inversa son tan antiguos como el propio oficio de la ingeniería y se basan en el estudio de la geometría de un elemento ya existente de forma que sirva de origen para el diseño y conformado de un nuevo producto. En el caso de la fabricación aditiva, el proceso de ingeniería inversa parte de conocer la necesidad que se pretende satisfacer y elaborar un diseño en software 3D para su posterior impresión y uso.

En el método de trabajo de la Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S, la metodología de ingeniería inversa está siempre presente en todos los nuevos diseños de la Unidad, independientemente de la funcionalidad o razón por la que estos se han llevado a cabo. Por ejemplo: si la pieza diseñada se desea que sirva de sustitución o de mejora de una pieza comercial que ha quedado dañada, la ingeniería inversa se realiza estudiando la geometría y mecanismo de fallo de la pieza antigua, de forma que se diseñe una versión idéntica o mejorada de la misma para ser impresa. Si, por otra parte, el diseño que se desea crear pretende ofrecer una solución original a una necesidad, se observa la geometría de los elementos que interactuarán con la pieza; y así se hace un diseño a medida que maximice la funcionalidad.

III.4.4 Aplicaciones de las piezas fabricadas desde la Unidad

Actualmente la Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S cuenta con una base de datos que recoge un total de 161 diseños diferentes de piezas que fueron solicitadas para imprimir, aunque no todas ellas se han impreso o llevado a aplicación. Desde sus inicios, la base de datos de diseños ha ido creciendo y las aplicaciones de las piezas creadas han sido múltiples: recambios de piezas dañadas, rediseños de piezas de avería frecuente en donde

se refuerza la zona de fallo, piezas que aportan soluciones novedosas a problemas que no habían sido resueltos con anterioridad y, en algunos casos, biomodelos y prótesis temporales para convalecientes. Esto demuestra del grado de utilización de los recursos de la Unidad más allá de las labores de mantenimiento. A continuación, se muestran algunos ejemplos de piezas diseñadas por la unidad, clasificadas según la aplicación que estas han tenido.

Cierre de ventanas del Hospital Materno Infantil.

Este fue el primer diseño propio impreso desde la Unidad, vino motivado por un problema recurrente que padecía el Hospital Materno Infantil (adyacente al H.U.M.S). Las ventanas de este Hospital poseen un mecanismo de cierre que se encuentra descatalogado; por tanto, en caso de que uno de estos cierres se averiara y ya no fuera funcional, el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento se veía obligado al atornillado de la ventana al marco para garantizar el cierre, una solución temporal y de baja calidad que a la postre deriva, en caso de implementar una solución permanente, en la completa sustitución de la ventana, a un coste muy superior que el que tuviere el recambio de la pieza.

Este problema, que previo a la creación de la Unidad ya era conocido y suponía una de las incidencias más relevantes entre las tareas de mantenimiento: fue trasladado a la Unidad una vez fue constituida para diseñar e imprimir una pieza a sustitución de la averiada, aplicando ingeniería inversa sobre el diseño comercial descatalogado.

Como esa pieza es de pequeñas dimensiones, permite la impresión de lotes de un alto número de unidades. Su pequeño tamaño facilita su almacenaje y permite crear de un stock al que poder recurrir en caso de que la pieza se necesite con urgencia, esto permite salvar la desventaja de la baja velocidad de fabricación propia de la impresión 3D.

Esta solución es un ejemplo de éxito de la aplicación de la impresión 3D en el ámbito hospitalario por su ahorro en costes, conveniencia y facilidad en la solución de la avería y resolución de un problema crónico en el mantenimiento del H.U.M.S.



Ilustración 7. Piezas de la ventana del Hospital Materno-Infantil. Fuente: Archivo del H.U.M.S.

Piezas de repuesto o mejora de elementos mecánicos en equipos médicos:

Como se ha explicado en las justificaciones de necesidad, una de las aplicaciones más recurrentes de las piezas conformadas en impresión 3D desde la Unidad es el suministro de piezas de repuesto que han quedado descatalogadas o a elevado coste en el mercado. Algunos ejemplos de esta clase de piezas son:

- Bisagras para biombos
- Articulación para los monitores de las UCI
- Pieza para la sujeción de cables en monitores de electrocardiografía de sujetacables
- Fantomas para gammagráfia (para el Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa)
- Bandejas para agitadores vórtex
- Asas para autoclaves *Statim*
- Tope para tallímetros.
- Bloqueador de abdomen del paciente que se somete a un escáner.
- Articulaciones y uniones de reposapiés para sillas de ruedas.
- Sistemas regulables de camillas.
- Soportes de bombas de perfusión.
- Carcasas, pinzas y otros accesorios secundarios.

Soluciones originales.

Otra de las aplicaciones que se les da a las piezas realizadas en impresión 3D es la creación de soluciones originales a necesidades a las que no se les había podido dar una respuesta satisfactoria hasta el momento. Los detalles de cómo se ha realizado este proceso son de gran interés y se explican con mayor detenimiento en el apartado XXX. Estos son algunos ejemplos:

- Porta-termómetros de cabecera de camas
- Gradillas para el Laboratorio de Hematología
- Férula de Brown para sujeción de rodilla
- Salva-orejas para mascarillas
- Pantallas protectoras
- Grifo de codo gerontológico
- Soporte para balón de radioterapia para cáncer de mama.
- Soporte de botellas de oxígeno para cabeceros de camas.



Ilustración 8. Mango de grifo de codo gerontológico. Fuente. Archivo del H.U.M.S.

Prótesis y biomodelos

Aunque las principales aplicaciones de las piezas realizadas en impresión 3D en el H.U.M.S estén relacionadas con las labores del ámbito del mantenimiento, algunos servicios médicos encargaron a la unidad la elaboración de biomodelos y prótesis. Algunas de las piezas creadas han sido:

- Biomodelos de tráquea para evaluación de anestesia
- Biomodelos de órbitas oculares, mandíbulas, oídos.
- Prótesis craneal para mejorar la calidad de la convalecencia de un paciente sometido a una cirugía cerebral.

Durante cuatro años de trayectoria y con un portfolio de 161 diseños de piezas; la Unidad de impresión 3D del H.U.M.S se ha consolidado como un servicio multidisciplinar y ambicioso que ha podido satisfacer necesidades de diversa naturaleza gracias a su versatilidad.

III.5 Análisis de viabilidad

La apuesta por las tecnologías de fabricación aditiva en un centro hospitalario es una decisión que lleva aparejados ciertos riesgos. La inversión económica en todos los recursos necesarios para el buen desempeño de una unidad de impresión 3D es generalmente elevada, lo cual obliga a que, si el centro estudia incorporar a sus servicios la impresión 3D, sea recomendable realizar un análisis de viabilidad de la inversión.

Para conocer la viabilidad de una unidad de impresión 3D es necesario comenzar por evaluar qué necesidades se pretenden cubrir con esta tecnología, en otras palabras, pensar cual será el destino de utilización de las piezas que vayan a imprimirse desde la unidad. En el caso del H.U.M.S la Unidad de Impresión 3D ha conseguido satisfacer necesidades tanto relativas al ahorro en costes como a la aportación de valor añadido al Servicio de Ingeniería y Mantenimiento.

Otro elemento de importancia respecto a la viabilidad de la impresión 3D es contar con un equipo humano motivado para extraer el máximo potencial a esta tecnología. Que las personas involucradas en el trabajo desde la unidad sean ambiciosas y estén formadas,

motivadas y comprometidas con la viabilidad de la unidad supone un componente que se debe tener en cuenta para hacer un estudio completo de la viabilidad.

Como se ha expuesto en el apartado de Justificación de necesidad; el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento ha detectado varias razones que motivan la elaboración de piezas por parte de la Unidad. Este ejercicio realizado desde la Unidad demuestra su compromiso con el estudio de viabilidad; lo que, sumado a la implicación particular del equipo humano de la unidad hacen patente que la Unidad es un servicio viable dentro del H.U.M.S.

III.5.1 Rentabilidad económica de piezas impresas en 3D frente a suministros comerciales.

Una de las principales razones que motivan la compra de equipos de impresión 3D para el mantenimiento hospitalario es el ahorro en costes de suministros que supone la sustitución de los repuestos comerciales por repuestos impresos in situ desde la unidad de impresión 3D del centro. Por consiguiente, esta es una de las principales aplicaciones que tienen las piezas impresas en 3D en el H.U.M.S.

La alta demanda de suministros para equipamiento médico es causa de sobreprecio de mercado en estos insumos; tanto es así que el ahorro asociado a la sustitución de repuestos comerciales por repuestos impresos in situ puede ser superior al 90% del precio comercial de la pieza. En la siguiente ilustración se muestran algunos ejemplos significativos de piezas comerciales cuyo suministro ha sido reemplazado por piezas impresas desde la Unidad, así como su ahorro asociado

PIEZA	Peso (g)	Volumen (cm ³)	Densidad (kg/l)	Tiempo de impresión (h:min)	Precio de mercado	Coste estimado*	Ahorro s/ precio estimado	Coste materia prima**	Ahorro s/ precio materia prima
Tope tallímetro	76	61	1,246	3:20	200,00 €	7,91 €	96,05%	1,59 €	99,21%
Fantomas gamma gráfia	64	51	1,255	1:35	810,00 €	7,09 €	99,12%	1,34 €	99,83%
Grifo de codo gerontológico	315	253	1,245	10:30	145,00 €	13,60 €	90,62%	6,59 €	95,46%
Sujeta-cables para electro-cardiógrafo	143	115	1,243	11:37	100,00 €	7,48 €	92,52%	2,99 €	97,01%

Ilustración 9. Comparativa del ahorro de algunas piezas en la Unidad de impresión 3D. Fuente: Elaboración propia, a partir de datos del Archivo del H.U.M.S.

* Coste orientativo mostrado por el software de *Dynamical Tools*.

** Elaboración propia basada en el precio de la materia prima para FDM (20,91 €/kg) y el peso de la pieza fabricada

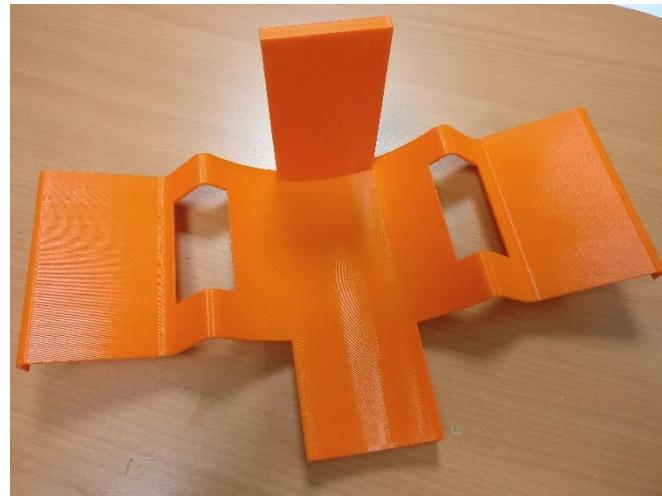


Ilustración 10. Soporte Fantomas Gammagrafía. Fuente. Archivo del H.U.M.S.



Ilustración 11. Sujeta cables. Fuente. Archivo del H.U.M.S.

Como se puede observar, el coste de la impresión de las piezas, bien considerando el coste estimado por el fabricante de la impresora o únicamente el coste de la materia prima; da como resultado ahorros entre el 90% y el 100% del precio de mercado de las piezas.

Los costes reflejados en la tabla XX son cifras orientativas donde no se muestra el coste real de la fabricación en 3D de las piezas. En las cifras de coste mostradas en la tabla no se considera o no aparecen desglosados costes adicionales del proceso como son: el coste de la energía, los costes de personal relativos a la ingeniería inversa y diseño de la pieza, las amortizaciones de la inversión o los costes de mantenimiento de software y equipos; entre otros. Sin embargo, al observarse tan amplio margen de ahorro, se puede inferir que la rentabilidad económica de estas piezas sigue siendo muy grande, aunque los factores mencionados anteriormente elevaran el coste de las mismas.

Para un correcto análisis de rentabilidad, cabría evaluar la amortización del equipo; esto se conseguiría con el cálculo del valor actual neto (VAN); donde se contraste la inversión realizada con la adquisición de los equipos frente al flujo de caja obtenido, expresado en ahorro conseguido debido al uso de piezas impresas en sustitución de recambios

comerciales. Desafortunadamente ese cálculo no ha sido posible de realizar, debido a la falta de información al respecto que se ha podido conseguir.

Sin embargo, las cifras anteriormente expuestas permiten observar por tanto que existe una rentabilidad económica de la inversión en impresión 3D en lo relativo a emplear las piezas impresas en sustitución de los suministros comerciales; lo que se exemplifica en elevado margen de ahorro que justifica con fortaleza la inversión en impresión 3D.

III.5.2 Aportación de soluciones originales y valor añadido a los servicios de mantenimiento.

Para estudiar la viabilidad de una inversión, especialmente si se trata de una tecnología novedosa e innovadora como es la impresión 3D, basar todo el análisis en el grado de rentabilidad y ahorro económico derivado es una aproximación incompleta. Por este motivo es interesante valorar además qué puede aportar la Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S en otros aspectos diferentes; centrándose en concreto en qué soluciones originales y qué valor añadido ha aportado a los servicios de mantenimiento, y por extensión al hospital en su conjunto, la incorporación de la Unidad de Impresión 3D.

Asimismo, el Hospital Universitario Miguel Servet es una entidad de titularidad pública destinada a prestar un servicio de carácter público. Esta realidad causa que la evaluación de los resultados en un servicio público se centre más en términos de calidad de servicio y mejora de atención al usuario que en la rentabilidad económica. Por esta razón es necesario extraer un análisis de viabilidad donde se observe en qué medida la impresión 3D ha contribuido a una mejora del servicio.

En este sentido existen diferentes ejemplos de cómo la Unidad de Impresión 3D ha diseñado piezas cuyo propósito no era producir un ahorro económico sino solucionar incidencias crónicas en el Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del hospital cuyas soluciones hasta el momento no habían sido satisfactorias.

Un ejemplo de esto fue el diseño de porta-termómetros que se colocan en el cabecero de las camas de los pacientes o gradillas impresas en 3D para laboratorios. Estas piezas no pretenden sustituir a su equivalente comercial, sino que lo que pretenden es dar una solución original y novedosa a un problema que antes se solucionaba de manera poco eficiente. La capacidad de la Unidad de Impresión 3D para elaborar piezas que cumplen funciones originales es un elemento que no se puede valorar económicamente en términos cuantitativos de capital ahorrado. Por el contrario, estas piezas aportan una mejora en la calidad del servicio prestado por el hospital en términos cualitativos, de mejora no cuantificable. Emplear la impresión 3D para la realización de esta clase de mejoras entraña tanto con la capacidad de la tecnología de propiciar un ambiente de innovación en los servicios del hospital, así como con la vocación de máxima calidad que debe tener un servicio público.

En otro orden, la impresión 3D es una tecnología de fabricación caracterizada por su capacidad de dar una respuesta rápida, personalizada y económica a las necesidades que busca cubrir; además, la incorporación de tecnologías de impresión 3D in situ permite independencia de las fluctuaciones de los mercados; y por tanto, el aprovisionamiento de materia prima si se produce un pico de demanda que genere cuellos de botella que a su

vez den lugar a aumentos de precios o escasez de suministros. Un ejemplo claro de ello fue la crisis de suministros sanitarios derivada de la pandemia de COVID-19, donde la falta de EPI o material para las UCI causó un deterioro en la atención hospitalaria. Disponer de una maquina propia de impresión puede ser de ayuda para elaborar in situ los suministros necesarios.

Finalmente, para un centro hospitalario que se incluya entre sus servicios las tecnologías de impresión 3D demuestra su apuesta por las nuevas tecnologías y la innovación; lo cual beneficia a su imagen de marca. En el caso del H.U.M.S, además, esta tecnología se aplica en un ámbito diferente como es el mantenimiento hospitalario, esto puede servir para que el H.U.M.S se convierta en el centro de referencia a nivel nacional en lo respectivo a mantenimiento hospitalario mediante impresión 3D. Esta perspectiva de futuro para la Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S, como referente nacional de la impresión 3D aplicada al mantenimiento hospitalario puede traer consigo la creación de un espacio de I+D y atracción de talento; creando aun mayor imagen de marca y empleos de calidad relacionados con la investigación y el desarrollo; lo cual también sería beneficioso para el prestigio de la Sanidad Pública Aragonesa y la vocación de servicio público, trascendiendo la prestación de atención médica y elevando estos beneficios del hospital a un centro que genera riqueza, valor, empleo e imagen de marca.

III.6 La Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S: Un proyecto de futuro.

Con todo lo expuesto, se ha visto la complejidad y las diferentes actividades desarrolladas desde la Unidad, así como ha sido su desarrollo y trayectoria desde su creación. Las personas que pusieron en marcha la Unidad son conscientes de lo mucho que se ha avanzado gracias a ella, pero lamentan que estos avances no hayan podido ir a más; extrayendo todo el potencial que la Unidad de Impresión 3D puede dar al H.U.M.S.

En este apartado se intenta hacer un análisis de la situación actual y la perspectiva de futuro de la Unidad en base a la información proporcionada. Se hará un análisis de las debilidades, amenazas, fortalezas y oportunidades (DAFO) que afronta la Unidad.

Posteriormente, y gracias a las aportaciones y perspectivas que el personal de la Unidad me ha trasladado; y también en base a toda la información recogida, se presenta un breve listado de iniciativas y decisiones para consolidar el trabajo en la Unidad y la propia Unidad como proyecto.

III.6.1 Análisis DAFO

DEBILIDADES	AMENAZAS
<ul style="list-style-type: none">• Carencia de institucionalidad oficial de la unidad dentro del H.U.M.S• Infrafinanciación• Falta de conocimiento de la Unidad por parte de la mayoría de los servicios del H.U.M.S	<ul style="list-style-type: none">• Falta de implicación por parte de la dirección del H.U.M.S en el desarrollo futuro de la Unidad.• Incertidumbre económica y política
FORTALEZAS	OPORTUNIDADES
<ul style="list-style-type: none">• Rentabilidad económica de las actividades• Haberse demostrado como caso de éxito.• Consolidación de la Impresión 3D como tecnología de fabricación.• Motivación e implicación del equipo humano.	<ul style="list-style-type: none">• Dar a conocer su actividad a nuevos actores interesados.• Convertirse en una experiencia referente en la aplicación de soluciones de Impresión 3D a nivel de mantenimiento hospitalario.• Actuar como central de servicio para todo el sector II

Ilustración 12. Análisis DAFO de la Unidad de impresión 3D. Fuente: elaboración propia.

Atendiendo a la situación actual de la Unidad, esta se encuentra en una encrucijada entre su consolidación dentro del H.U.M.S y continuar con el carácter informal y extraoficial en el que ahora se encuentra. La realidad anima al optimismo, pero se debe ser cauto.

La trayectoria de la Unidad desde su formación ha sido de continuo crecimiento y consolidación dentro del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento; sin embargo, el grado de conocimiento de la Unidad por parte de todos los servicios del H.U.M.S es todavía pequeño; situación que produce en la Unidad preocupación ya que la detectan como uno de los principales escollos que evitan un mayor crecimiento.

De igual manera, otro elemento que frena la expansión de la unidad es el carácter no oficial que todavía. Reconocer esta oficialidad sería el primer paso para la consolidación completa de la Unidad como una sección adicional dentro del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento. Desde el equipo humano se espera que esta situación cambie con prontitud para poder poner fin a este problema.

En conclusión; hay pocas amenazas a la continuidad de la Unidad debido a lo contundente de sus fortalezas como caso de éxito y gracias a la motivación de las personas que en ella trabajan. Sin embargo, hay que estar atento porque las oportunidades de crecimiento, pese a ser muchas y muy ventajosas, tienen sobre sí factores que las hacen poco probables, al menos en el corto plazo.

III.6.2 Propuestas para el desarrollo de la unidad

La Unidad de Impresión 3D ha sido un caso de éxito debido a las grandes mejoras que ha aportado su incorporación al Servicio de Ingeniería y Mantenimiento; la implicación de

las personas en el desarrollo de la misma y los ejemplos que demuestran el valor añadido al servicio así lo avalan. Desgraciadamente, la Unidad está aún lejos de alcanzar todo su potencial a causa de obstáculos tales como una mala financiación o un desconocimiento de la misma a instancias del hospital en su conjunto.

Emprender medidas que corrijan esta realidad es posible y deseable; y en base a lo observado a las actividades de la Unidad; y las opiniones de las personas que la integran, sería beneficioso para un mayor desarrollo de la misma, medidas tales como las siguientes:

- **Convertir la Unidad de Impresión 3D en una sección del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento:** actualmente, la Unidad de Impresión 3D no es más que el proyecto que, a título individual, comparten cuatro trabajadores del H.U.M.S para reforzar con la fabricación de piezas impresas en 3D las labores de mantenimiento. Carecer de un estatus de sección en el organigrama de servicios del H.U.M.S perjudica al desarrollo de la unidad debido a que no esta no queda debidamente financiada y que el grado de conocimiento de la misma no se extiende a todo el personal del hospital. Convertir a la Unidad en una sección del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento, o en su defecto, en otra entidad de carácter oficial en los servicios del H.U.M.S, contribuiría a corregir estos problemas.
- **Programar una petición de servicio dedicada en el portal de la Intranet del H.U.M.S:** crear una pestaña de la petición de Servicio de Ingeniería y Mantenimiento donde se puedan tramitar peticiones de manera específica a la Unidad de Impresión 3D. Esto conllevaría una ventaja doble; por un lado, que la Unidad apareciera en el portal del H.U.M.S al que tienen acceso todos sus trabajadores serviría para aumentar el grado de conocimiento; y por otro, una ventana de tramitación específica ayudaría a aumentar el volumen de producción de la Unidad y, por tanto, su peso específico dentro del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento.
- **Disponer de una o dos personas en dedicación exclusiva a la Unidad:** actualmente las personas que están dedicadas a la Unidad suman la realización de este servicio a sus funciones laborales; las cuales no contemplan la unidad 3D. Si la unidad continúa creciendo y el volumen de piezas producidas y diseñadas se eleva; sería insuficiente la dedicación de personas con otras funciones a la Unidad. Por este motivo, enmarcado dentro de la estrategia de crecimiento, sería interesante estudiar la incorporación de un trabajador con funciones de dedicación exclusiva a la Unidad de Impresión 3D, podrían ser dos si el incremento de volumen de trabajo se acrecentara más.

- **Partidas presupuestarias exclusivas para financiar la unidad:** Actualmente la manera en que se financian los materiales de la unidad es dentro del presupuesto general del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento. Esta forma genera problemas en tanto que no se puede hacer una dotación económica de recursos acorde a la necesidad real. De igual forma, ha supuesto un gran problema la no prestación de dinero a la Unidad para permitir a sus miembros formarse en el manejo de la tecnología; labor que se ha hecho, por el contrario, de forma autodidacta y fuera del horario laboral. Destinar por tanto una dotación económica exclusiva sería bueno para la consolidación y el crecimiento futuro de la Impresión 3D dentro del H.U.M.S.
- **Otorgar un espacio físico dedicado en específico a la Unidad.** En este momento, la Unidad no cuenta con un espacio propio donde desarrollar su actividad; las impresoras están ubicadas en dependencias del hospital que no están habilitadas, por cuestiones de olores, ruidos y ventilación, para la actividad. Desde la Unidad se ha estudiado algunos espacios en el H.U.M.S que podrían servir de ubicación para ubicar las máquinas y las computadoras que las dirigen.
- **Aumento de los recursos en caso de producirse una demanda mayor.** La previsión futura para la Unidad es de crecimiento en el volumen de trabajo; máxime si se incorporan algunas de las medidas aquí citadas. Es posible que los recursos actuales de los que dispone la unidad fueran insuficientes para cubrir dicha demanda; por este motivo, en caso de unas previsiones de gran crecimiento, se debería estudiar la ampliación de unidades de impresoras o adquirir otras con nuevas tecnologías y otras prestaciones.
- **Una estrategia de difusión del trabajo a nivel H.U.M.S:** uno de los principales escollos con los que se encuentra la Unidad es el escaso grado de conocimiento dentro del H.U.M.S. Es importante profundizar en aquellas estrategias efectivas para darse a conocer cómo puede publicar los casos de éxito en *newsletters* médicas o contactar con entidades externas con las que colaborar y que den publicidad al trabajo desarrollado dentro del hospital.
- **Prestar servicios a todos los sectores sanitarios de Aragón:** una vez las labores de difusión de la Unidad se hayan consumado, es interesante pensar en las oportunidades de la Unidad para la prestación de servicios de mantenimiento a todos los centros hospitalarios de Aragón. Ya se han realizado colaboraciones con centros como el Hospital Clínico Universitario Lozano Blesa; experiencias como esta han demostrado ser enormemente positivas y convertirlas en una colaboración regular es una vía de crecimiento interesante para los servicios de impresión 3D del H.U.M.S

- **Crear una base de datos de diseños de piezas para mantenimiento hospitalario a nivel nacional.** Otro de los proyectos que la Unidad desea llevar a cabo es la creación de una base de datos de acceso a todos los centros hospitalarios de España donde se depositen los diseños de piezas creadas para su impresión 3D en el ámbito del mantenimiento hospitalario. La creación de esta base de datos contribuiría a construir una comunidad de hospitales y difundiría las labores de la impresión 3D dedicada al mantenimiento hospitalario.
- **Convertirse en el centro de referencia de la impresión 3D dedicada al mantenimiento hospitalario en España:** La aplicación que se le da a la Impresión 3D en el H.U.M.S presenta un hecho diferencial respecto al resto de hospitales: la aplicación dedicada al mantenimiento. La Unidad tiene la oportunidad de potenciar esta estrategia de diferenciación para erigirse como referente entre los centros hospitalarios españoles. Compartir la experiencia de la Unidad con otros hospitales españoles podría dar pie a la atracción de talento que convirtiera al H.U.M.S en un centro conocido por la dedicación específica que tiene su Unidad de Impresión 3D.

Estos, junto con otros muchos, son ejemplos de diferentes decisiones que podrían tomarse en el futuro de la Unidad a corto y medio plazo. Las labores realizadas desde ésta son un ejemplo de caso de éxito; y el crecimiento de la misma será una realidad que, para consolidar este éxito, debe ir acompañada de una estrategia y objetivos bien definidos. El futuro del mantenimiento hospitalario pasa ineludiblemente por la potenciación de la impresión 3D.

III.7 Análisis crítico del caso.

La Unidad de Impresión 3D nació como una apuesta de algunas personas del H.U.M.S para acompañar con esta tecnología los servicios de mantenimiento del centro que, con los recursos entonces existentes, no se satisfacían completamente. Desde su incorporación al centro, el esfuerzo de las personas implicadas sumado a lo valioso de sus aportaciones dentro del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento ha demostrado que la Unidad de Impresión 3D es un caso de éxito de la implantación de esta tecnología.

Siguiendo lo expuesto en la gestión operativa del centro, se puede observar cómo la Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S ha optado por decisiones muy interesantes en el aspecto estratégico, táctico y financiero.

A nivel estratégico, cabe destacar la aplicación diferenciada que se le da a la impresión 3D en el H.U.M.S: el mantenimiento hospitalario. Decidirse por una misión diferente es arriesgado, pero aplicando la gestión adecuada puede demostrarse como algo exitoso. Un conocimiento profundo de las necesidades del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento y de las ventajas competitivas de la impresión 3D frente a otros modos de suministro ha evidenciado cómo esta estrategia constituye un caso de éxito de implantación.

A nivel táctico, existen ciertos problemas que deberían solucionarse para conseguir desarrollar el potencial de la Unidad. Dotar de un personal específico, que tenga pericia en la tecnología y pueda absorber la demanda futura; así como difundir la labor realizada para un mayor grado de conocimiento externo e interno son dos decisiones tácticas en las que se trabaja desde la Unidad, pero cuya consecución no se ha dado todavía, por desgracia.

En lo financiero, no contar con una financiación explícita es un inconveniente que está obstaculizando el desarrollo de la Unidad, al ser complicado adquirir nuevos equipos o emprender proyectos de investigación. Sin embargo, cabe destacar las sinergias conseguidas con instituciones externas como el IACS, quienes han ejercido mecenazgo en la constitución de la unidad mediante la adquisición de la impresora para el hospital.

En definitiva, la Unidad de Impresión 3D del H.U.M.S es un caso de éxito evidente; las piezas impresas desde la Unidad se cuentan en gran número y gracias a ellas se ha dado respuesta a multitud de necesidades. El futuro de la Unidad es prometedor, ya que el margen de crecimiento y las oportunidades de desarrollo que tiene ante sí son variadas y ambiciosas. Es necesario, por tanto, que la Unidad consiga hacerse valer dentro del H.U.M.S, que la dirección del centro apueste por el desarrollo de la Unidad ya que, sin duda alguna, su trabajo puede ser un elemento que aumente el prestigio del centro a nivel nacional; y la apuesta por la innovación que desde ella se ha hecho así lo avala.

IV. Conclusiones

La impresión 3D es una tecnología de reciente creación que ha demostrado en su corta vida ciertas ventajas frente a otros métodos de fabricación tradicionales tales que la han convertido en una revolución dentro del ámbito de las tecnologías de producción y conformado. Sectores como la ingeniería aeronáutica, automovilística y biomédica han encontrado la flexibilidad, personalización y accesibilidad de la impresión 3D un elemento de valor que otras tecnologías no ofrecen.

Precisamente desde el ámbito médico, la impresión 3D ha causado un significativo incremento de la calidad; por lo que la impresión 3D ha despertado el interés de multitud de centros hospitalarios de España, quienes la han incorporado de diferentes maneras en sus centros. Previo a la incorporación de la impresión 3D en un centro sanitario, es importante estudiar qué rango de posibilidades hay; los centros sanitarios deben decidir con acierto la misión, organización y vías de financiación de las unidades de impresión 3D; de manera que su labor sea viable y exitosa.

Un centro que ha incorporado la impresión 3D a su cartera de servicios ha sido el H.U.M.S, quienes han creado una unidad dedicada al mantenimiento hospitalario. La Unidad de impresión 3D del H.U.M.S se ha consolidado como un caso de éxito y un referente en la aplicación de las tecnologías de fabricación aditiva aplicadas al mantenimiento.

Incorporar la impresión 3D al H.U.M.S ha sido un éxito porque han conseguido mejoras en dos ámbitos cruciales. Por un lado, han conseguido reducir de forma muy significativa los costes de compra de suministros comerciales para repuestos en material dañado; amortizando la inversión realizada en los equipos con prontitud. De igual forma, la personalización, flexibilidad, creatividad y margen para la innovación de la impresión 3D ha motivado la impresión de piezas destinadas a cubrir necesidades a las que antes no se había podido dar respuesta. Estas dos razones demuestran la consolidación de la Unidad de impresión 3D del H.U.M.S como un caso de éxito.

La situación de la Unidad, sin embargo, no es la más idónea para desarrollar todo su potencial. Existen elementos que impiden este desarrollo: no contar la Unidad con un carácter oficial, no contar con una financiación específica, no contar con personal en dedicación exclusiva y no ser lo suficientemente conocidos internamente en el H.U.M.S, entre otros. Estos impedimentos han causado que la Unidad esté perdiendo oportunidades de crecimiento e implantación; y el H.U.M.S la posibilidad de aplicar las piezas impresas y sus ventajas en un mayor número de situaciones. Poner solución a los problemas anteriormente expuestos supondría la mejora del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento para todo el hospital y una consolidación de la Unidad tal que convertiría al H.U.M.S en un centro referente de la impresión 3D aplicada al mantenimiento hospitalario.

En definitiva, la impresión 3D es una tecnología de fabricación en auge y en desarrollo, que va a suponer toda una revolución en los procesos de conformado cuando su evolución le haya conseguido ser competitiva con los métodos tradicionales. Las ventajas de personalización, nivel de detalle y flexibilidad la posicionan como un sistema de fabricación especialmente interesante para el ámbito sanitario. El H.U.M.S ha

incorporado la impresión 3D desde un punto de vista original: el mantenimiento hospitalario; aplicación que dota al H.U.M.S en una diferenciación en el uso de esta tecnología y que, con una apuesta decidida y estratégicamente organizada colocaría a la Unidad de impresión 3D del H.U.M.S como referencia nacional, gracias a la aplicación diferente que ha dado a la tecnología.

V. Bibliografía

- [1] Curley, Robert (2011). 3D Printing, en *Encyclopædia Britannica, Inc.* Recuperado de <https://www.britannica.com/technology/3D-printing>
- [2] Redacción Interempresas. (19 de octubre de 2020) *Impresión 3D en el mantenimiento hospitalario*. Intermepresas.net. Recuperado de <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/316403-Impresion-3D-en-el-mantenimiento-hospitalario.html>
- [3] González, Izan. (29 de septiembre de 2020) *Así se usan las impresoras 3D en hospitales de Madrid para cirugías más seguras*. El Español. Recuperado de https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20200929/usan-impresoras-hospitales-madrid-cirugias-seguras/524198521_0.html
- [4] ABAX. *Impresión 3D para el sector sanitario*. Recuperado de <https://abax3dtech.com/impresion-3d-sector-sanitario/>
- [5] Dr. Pérez, Rubén. (2 de agosto de 2018) *La impresión 3D en los hospitales españoles/ Entrevistado por Lucía Contreras*. Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-en-los-hospitales-020820182/>
- [6] Axial 3D. (26 de junio de 2017) *The Ultimate Beginner's Guide to 3D Printing in Healthcare*. Recuperado de <https://www.axial3d.com/blog/beginners-guide-to-medical-3d-printing/#:~:text=Examples%20of%20actual%20and%20potential,drug%20dosage%20forms%20and%20discovery>
- [7] Formlabs. *High Performance 3D Printers, Finally Within*. Recuperado de <https://formlabs.com/>
- [8] Equipo de Expertos. (24 de mayo de 2019) *Fabricación aditiva: qué es, proceso y usos*. Universidad Internacional de Valencia. Recuperado de <https://www.universidadviu.com/es/actualidad/nuestros-expertos/fabricacion-aditiva-que-es-proceso-y-usos>
- [9] Greguric, Leo. (25 de febrero de 2020) *Historia de la impresión 3D: fechas clave*. All 3D. Recuperado de <https://all3dp.com/es/2/impresion-3d-historia-fechas-clave/>
- [10] Crump, S. Scott (1992). *Apparatus and method for creating three-dimensional objects* (U.S. Patent No. 5,121,329). U.S. Patent and Trademark Office. [https://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetahml%2FPTO%2Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=4575330.PN.](https://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetahml%2FPTO%2Fsrchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=4575330.PN.&OS=PN/4575330&RS=PN/4575330)
- [11] Deckard, Carl R (1986). *Method and apparatus for producing parts by selective sintering* (U.S. Patent No. 4,863,538). U.S. Patent and Trademark Office. <https://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=HITOFF&p=1&u=/netahml/PTO/srchnum.html&r=1&f=G&l=50&d=PALL&s1=4863538.PN>.

- [12] Hull, Charles W. (1984). *Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography* U.S. Patent No. 5,121,329). U.S. Patent and Trademark Office.
https://patft.uspto.gov/netacgi/nph-Parser?Sect1=PTO1&Sect2=H1TOFF&d=PALL&p=1&u=%2Fnetahtm%2FPTO%2Fs_rchnum.htm&r=1&f=G&l=50&s1=4575330.PN.&OS=PN/4575330&RS=PN/4575330
- [13] Sánchez Restrepo, Susana. (9 de noviembre de 2017) *SLA: Impresión 3D por estereolitografía, ¡te explicamos todo!*. 3D Natives. Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/impresion-3d-por-estereolitografia-les-explicamos-todo/>
- [14] Contreras, Lucía. (12 de marzo de 2019) *Guía completa: Sinterizado selectivo por láser o SLS, ¡te explicamos todo!* 3D Natives. Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/>
- [15] Sánchez Restrepo, Susana. (10 de octubre de 2017) *FDM o modelado por deposición fundida, te explicamos todo!* 3D Natives. Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>
- [16] Sánchez Restrepo, Susana. (16 de julio de 2019) *Guía completa: Material Jetting, ¡te explicamos todo!* 3D Natives. Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/la-impresion-3d-polyjet23072015/>
- [17] Sánchez Restrepo, Susana. (7 de octubre de 2019) *Guía: Fusión por haz de electrones, te explicamos todo!* 3D Natives. Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/fusion-por-haz-de-electrones-les-explicamos-todo/>
- [18] Contreras, Lucía. (29 de julio de 2019) *Guía completa: Binder Jetting o Inyección Aglutinante, ¡te lo contamos todo!* 3D Natives. Recuperado de <https://www.3dnatives.com/es/inyeccion-aglutinante-te-lo-contamos-23032016/>
- [19] Formlabs. *FDM o SLA: guía comparativa de impresoras 3D de 2020*. Recuperado de <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-comparacion-tipos-impresoras-3d/>
- [20] Formlabs. *Comparación de tecnologías de impresión 3D: FDM, SLA o SLS*. Recuperado de <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adecuada/>
- [21] Filament2Print. (3 de junio de 2020) *Como escoger la tecnología más adecuada: FDM, SLA y SLS*. Recuperado de https://filament2print.com/es/blog/92_tecnologia-fdm-sla-sls-impresion-3d.html
- [22] TRSD. *7 avances en la medicina que la impresión 3D puede hacer YA*. Recuperado de <https://impresiontresde.com/cosas-impresion-3d-medica-puede-hacer-ya/>
- [23] Hospital Sant Joan de Déu de Barcelona. *Unidad de 3D La Unidad de 3D consolida la planificación y simulación de cirugías complejas y ofrece servicio a todas las especialidades pediátricas*. Recuperado de <https://www.sjdhospitalbarcelona.org/es/unidad-3d>
- [24] Makarov, Alesya. Lacort, Javier (23 de marzo de 2020) *Arduino e impresoras 3D contra el coronavirus: así se han unido makers de toda España para evitar contagios y*

salvar vidas. xataka.com. Recuperado de <https://www.xataka.com/medicina-y-salud/arduino-e-impresoras-3d-coronavirus-asi-se-han-unido-makers-toda-espana-para-evitar-contagios-salvar-vidas>

[25] Jenny Chen, M.D. (3 de octubre de 2020) *3D Printing In Hospitals: A Beginner's Guide.* 3DHEALS. Recuperado de <https://3dheals.com/3d-printing-in-hospitals-a-beginners-guide>

[26] Jenny Chen, M.D. (10 de octubre de 2020) *Strategic Issues of 3D Printing in Hospitals – Guide Part 2/5.* 3DHEALS. Recuperado de <https://3dheals.com/strategic-issues-of-3d-printing-in-hospitals-guide>

[27] Jenny Chen, M.D. (27 de octubre de 2020) *Tactical Issues of 3D Printing in Hospitals – Guide Part 3/5.* 3DHEALS. Recuperado de <https://3dheals.com/tactical-issues-3d-printing-in-hospital>

[28] Jenny Chen, M.D. (15 de noviembre de 2020) *Financial Issues of 3D Printing in Hospitals – Guide Part 4/5.* 3DHEALS. Recuperado <https://3dheals.com/financial-issues-of-3d-printing-in-hospitals-guide>

[29] Hayes, Adam. Drury, Amy., Jackson, Amanda. (actualizado a 29 de agosto de 2021) *Operations Management (OM).* Investopedia. Recuperado de <https://www.investopedia.com/terms/o/operations-management.asp>

[30] Navarro, Sonia. (7 de mayo de 2021) *Impresión 3D en hospitales, mejoras para el paciente y la práctica clínica.* Redacción médica. Recuperado de <https://www.redaccionmedica.com/secciones/ingenieria/impresion-3d-hospitales-mejoras-paciente-practica-clinica-7479>

[31] 3D Printing & Design (19 de junio de 2018) *Entra en funcionamiento la primera comisión de impresión 3D hospitalaria.* 3D Printing & Design. Recuperado de <http://www.3dprintingdesign.es/es/noticia/entra-en-funcionamiento-la-primera-comision-de-impresion-3d-hospitalaria>

[32] Redacción médica (4 de agosto de 2021) *El Gregorio Marañón crea una unidad innovadora de diseño e impresión 3D.* Redacción médica. Recuperado de <https://www.redaccionmedica.com/autonomias/madrid/el-gregorio-maranon-crea-una-unidad-innovadora-de-diseno-e-impresion-3d-6292>

[33] Comunidad de Madrid. *Investigadores del Hospital La Paz imprimen piel humana gracias a la impresión 3D.* Recuperado de <https://www.redaccionmedica.com/autonomias/madrid/el-gregorio-maranon-crea-una-unidad-innovadora-de-diseno-e-impresion-3d-6292>

[34] Redacción. (27 de febrero de 2019) *El Hospital La Paz reconstruye una rodilla gracias a la impresión 3D de alta resolución.* Imprimalia 3D by 3D Natives. Recuperado de <http://imprimalia3d.com/noticias/2019/02/26/0010712/hospital-paz-reconstruye-una-rodilla-gracias-impresi-n-3d-alta-resoluci>

[35] Navarro, Tamara. (7 de diciembre de 2020) *La impresión 3D avanza en el hospital: 4 implantes torácicos a pacientes oncológicos desde 2015.* Tribuna Salamanca.

Recuperado de <https://www.tribunasalamanca.com/noticias/la-impresion-3d-avanza-en-el-hospital-4-implantes-toracicos-a-pacientes-oncologicos-desde-2015/1606064011>

[36] Hospital Universitari Son Espases. *Unidad de Impresión 3D*. Recuperado de <https://www.hospitalsonespases.es/simulacion/unidad-3d>

[37] Creaform (27 de abril de 2021) *¿Qué es ingeniería inversa?*. Creaform. Recuperado de <https://www.creaform3d.com/blog/es/que-es-ingenieria-inversa/>

[38] Dynamical 3D (27 de agosto de 2020). *El hospital Miguel Servet apuesta por la impresión 3d en la protección contra la pandemia*. Recuperado de <https://www.dynamical3d.com/el-hospital-miguel-servet-apuesta-por-la-impresion-3d-en-la-proteccion-contra-la-pandemia/>

[39] Corporación Empresarial Pública de Aragón, CEEI Aragón (23 de octubre de 2020) *Una impresora de Dynamical 3D, empresa CEEIARAGON, para el mantenimiento del Hospital Miguel Servet de Zaragoza*. Gobierno de Aragón. Recuperado de <https://www.ceeiaragon.es/noticia/una-impresora-de-dynamical-3d-empresa-ceeiaragon-para-el-mantenimiento-del-hospital-miguel-servet-de-zaragoza/>

[40] Redacción (Actualizado a 26 de agosto de 2020) *El Miguel Servet apuesta por la impresión 3D en la protección contra la covid-19*. Heraldo de Aragón. Recuperado de <https://www.heraldo.es/noticias/aragon/2020/08/26/el-miguel-servet-apuesta-por-la-impresion-3d-en-la-proteccion-contra-la-covid-19-1392557.html>

[41] Vera, José Ramón. (2020). *Memoria de la unidad de desarrollo e innovación del Servicio de Ingeniería y Mantenimiento. Impresión 3D*. PDF, Zaragoza.

[42] Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del Hospital Universitario Miguel Servet de Zaragoza. (2021). *Varios*. Papel, Zaragoza.

[43] Bucco, Mariano. (2016). *La impresión 3D y su aplicación en los servicios médicos (prótesis, fármacos, órganos)*. Tesis de Maestría. Maestría de Gestión de Servicios Tecnológicos y de Telecomunicaciones. Universidad de San Andrés. Ciudad autónoma de Buenos Aires, República Argentina.

[44] De las Casas, Jesús. (1 de julio de 2020) *Colaboración público-privada y tecnología contra la pandemia*. Expansión. Recuperado de <https://www.expansion.com/economia/2020/07/01/5efb91dd468aebd0458b4644.html>

[45] Servicio de Ingeniería y Mantenimiento del Hospital Universitario Miguel Servet de Zaragoza (12 de noviembre de 2019). *Registro de piezas impresas*. PDF, Zaragoza.

