

PROSPECTIVA PARA EL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE UNA ÓRTESIS IMPRESA EN 3D

*José M. Segnini²⁵, Mary J. Vergara²⁶,
Sebastián E. Provenzano²⁷*

En la última década se han producido avances tecnológicos en Medicina, muchos de los cuales están relacionados con el uso de las impresoras 3D. Específicamente en el área de traumatología se están utilizando estos equipos de impresión para manufacturar órtesis que mejoran la calidad de vida del usuario, ya que son productos anatómicamente personalizados, más ligeros, cómodos, transpirables, estéticos y resistentes al agua. En el mercado global, que comprende tanto la producción como la investigación y desarrollo de estas, se impulsa principalmente la posibilidad de construirlas sin hacer pruebas funcionales y de homologación. Este proceso presenta tres fases: 1) la toma de datos digitales con equipos de escaneo 3D, 2) el procesamiento de datos, y 3) el modelado con paquetes computacionales de diseño

²⁵*Grupo de Investigación en Diseño Sustentable GIDISUS, Escuela de Diseño de Productos y Control de Procesos, Pontificia Universidad Católica de Ecuador, Ibarra, Ecuador {jmsegnini@pucesi.edu.ec; mjvergarara@pucesi.edu.ec}*

²⁶*Grupo de Investigación en Diseño Sustentable GIDISUS, Escuela de Diseño de Productos y Control de Procesos, Pontificia Universidad Católica de Ecuador, Ibarra, Ecuador {jmsegnini@pucesi.edu.ec; mjvergarara@pucesi.edu.ec}*

Grupo de Diseño y Modelado de Máquinas DIMMA, Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Los Andes,

²⁷*Grupo de Diseño y Modelado de Máquinas DIMMA, Escuela de Ingeniería Mecánica. Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela {prse@ula.ve}*

hasta llegar a la impresión 3D. El tiempo necesario para empezar a usar la órtesis es el principal inconveniente que se prevé en su desarrollo histórico, el cual se encuentra en alguna fase del proceso perjudicando directamente el tiempo de recuperación del paciente. Así, desde el mismo momento en que la extremidad del paciente es escaneada hasta que la órtesis es instalada sobre la región afectada, pueden pasar desde 24 horas hasta 72 horas.

En este sentido, esta investigación presenta una prospectiva para disminuir el tiempo de instalación de la órtesis considerando dos propuestas en su diseño y construcción: una para disminuir los tiempos que intervienen en la impresión 3D y otra en la que se incluye en la relación médico-paciente un sistema embebido de diseño generativo integrado por el uso de programas para ingeniería y fabricación en nube. La primera propuesta muestra cómo imprimiendo una órtesis de brazo, que fue dividido en seis piezas volumétricamente similares para su posterior ensamblaje, se logra una disminución en el tiempo de impresión de, por lo menos, un 46,7%, con un 33,3% de costo con respecto a la impresión simultánea de cada pieza; mientras que la segunda impulsa el uso de sistemas de cómputo de alto rendimiento en nube a fin de lograr bajar los tiempos para la incorporación de la órtesis.

Palabras clave: órtesis; impresión 3D; diseño; prototipado rápido

INTRODUCCIÓN

La impresión 3D es un proceso para construir objetos sólidos a partir de un archivo digital y podría considerarse la tecnología disruptiva más importante de los últimos tiempos porque está generando una gran transformación en muchos campos, especialmente en la medicina (Alcázar, 2017; Um, 2015; Borello y Backeris, 2017). Poco a poco, los tratamientos médicos han ido avanzando con la tecnología y muchos centros de tratamientos traumatológicos están revolucionando el mundo de la inmovilización de lesiones aplicando férulas personalizadas con dispositivos de impresión 3D a deportistas de alto rendimiento. Como plantea Rubio (2016), este tipo de tecnología posee varias ventajas

con respecto a los yesos convencionales (mayor ligereza, adaptación más precisa, transpiración, y la gran ventaja de que, al ser abierta, al especialista le permite trabajar en la zona afectada). Según Baez (2016), para el tratamiento de fracturas, los yesos y órtesis convencionales presentan muchos problemas, puesto que este material absorbe una cantidad de humedad del ambiente y sudor de la piel contribuyendo a la acumulación de bacterias, lo cual representa un peligro, sobre todo cuando hay laceraciones. De esta manera, la impresión 3D tiene un valor agregado en aquellas áreas que demandan personalización. La medicina es una de ellas, específicamente la Traumatología.

En este capítulo se presenta una prospectiva para el diseño y fabricación de una órtesis que destaca la disminución del tiempo de instalación tomando en cuenta en primer término la impresión 3D con sus costos, y en segundo término, que el proceso de diseño se encuentre contenido en la relación médico-paciente. En el primer caso se pueden lograr disminuciones de, por lo menos 46,7% en los tiempos de fabricación, y de 33% en los costos, mientras que con el segundo, dicha disminución dependerá de cómo se introduzca el diseño generativo en el proceso.

Para apoyar la prospectiva se presentan cinco secciones, la *primera* de las cuales introduce la historia de la impresión 3D; la *segunda*, su uso en la industria médica, que se complementa con la *tercera*, referida a la tecnología disponible, y a la *cuarta* con los diseños de órtesis que pueden realizarse. Estas secciones sirven de base para apoyar la prospectiva propuesta en la *quinta*, en la cual se presentan finalmente las conclusiones más relevantes.

INICIO DE LA IMPRESIÓN 3D

Muchas personas se han familiarizado hace poco con el concepto de impresión 3D a pesar de que estas impresoras 3D han estado disponibles desde hace casi tres décadas, específicamente desde 1984, cuando Chuck Hull desarrolló un sistema de prototipado que se basaba en el proceso conocido como estereolitografía. Cinco años más tarde, Scott Crump ideó y patentó una nueva tecnología de fabricación aditiva llamada modelado

por deposición fundida (FDM, por sus siglas en inglés Fused Deposition Modeling). En 1993, el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) fue el siguiente en patentar una nueva tecnología usando el término “impresión 3D” de la mano con dos estudiantes, Jim Bredt y Tim Anderson. A partir de ahí, la impresión 3D comenzó a perfilarse como una revolución a través del proyecto RepRap, y ahí es cuando entra en juego la comunidad Maker (hazlo tú mismo). Este hecho constituye la entrada de código abierto (open-source) en la historia de la impresión tridimensional y un gran paso hacia su normalización e implementación en el mercado (ver, por ejemplo, Zuniga y col. (2016)). La popularización de la impresión 3D ha logrado escalar importancia en casi todos los campos tecnológicos, entre ellos, uno de los que más está avanzando y que más controversia y escepticismo genera es el de la impresión 3D con fines médicos.

USO EN LA INDUSTRIA MÉDICA DE LA IMPRESIÓN 3D

La impresión 3D, como herramienta en la industria médica, está generando una serie de cambios significativos en la historia. Tal como se muestra en la figura 1, la experimentación con esta tecnología en el campo de la medicina no es para nada reciente, sino que se remonta a 1999 con el primer órgano impreso en 3D. Tras este primer acercamiento entre ambos mundos ha habido muchos más casos exitosos, como la creación en 2002 del primer riñón 3D en funcionamiento, la fabricación en masa de células y vasos sanguíneos o la impresión de prótesis útiles y adaptadas completamente al paciente (Marcos, 2013).

En la actualidad, esta tecnología se está convirtiendo en algo novedoso, necesario y como una elección de fabricación de dispositivos médicos a medida, tales como prótesis de rodilla, órtesis, implantes de cadera, órganos, todo orientado a mejorar la calidad de vida de las personas. Tal y como expresa Bucco y Hofman (2016) en su investigación, la impresión 3D promete ofrecer diversas características como la personalización según el paciente, la flexibilidad en el diseño y la fabricación, además de la disminución de desperdicio en el material y los bajos costos en el ciclo de vida del producto.

Las piezas impresas se están convirtiendo en una herramienta eficaz para los cirujanos y médicos para aumentar las tasas de éxito y reducir los tiempos de operación. La impresión 3D puede fabricar componentes con un detalle de hasta 0.001 mm (Moya, 2015), de formas complejas y en una amplia variedad de materiales. La producción rápida de piezas de pequeño volumen, así como la eliminación casi total de las limitaciones de fabricación, ofrece a los profesionales médicos y pacientes nuevas perspectivas (Beck y Vale, 2004).

La conexión entre el diseño digital en tres dimensiones, las imágenes médicas y la impresión en 3D, hacen posible que los datos específicos del paciente puedan ser capturados, manipulados y, en definitiva, aplicados a situaciones médicas de todo tipo y tamaño (ver Fig. 1.).

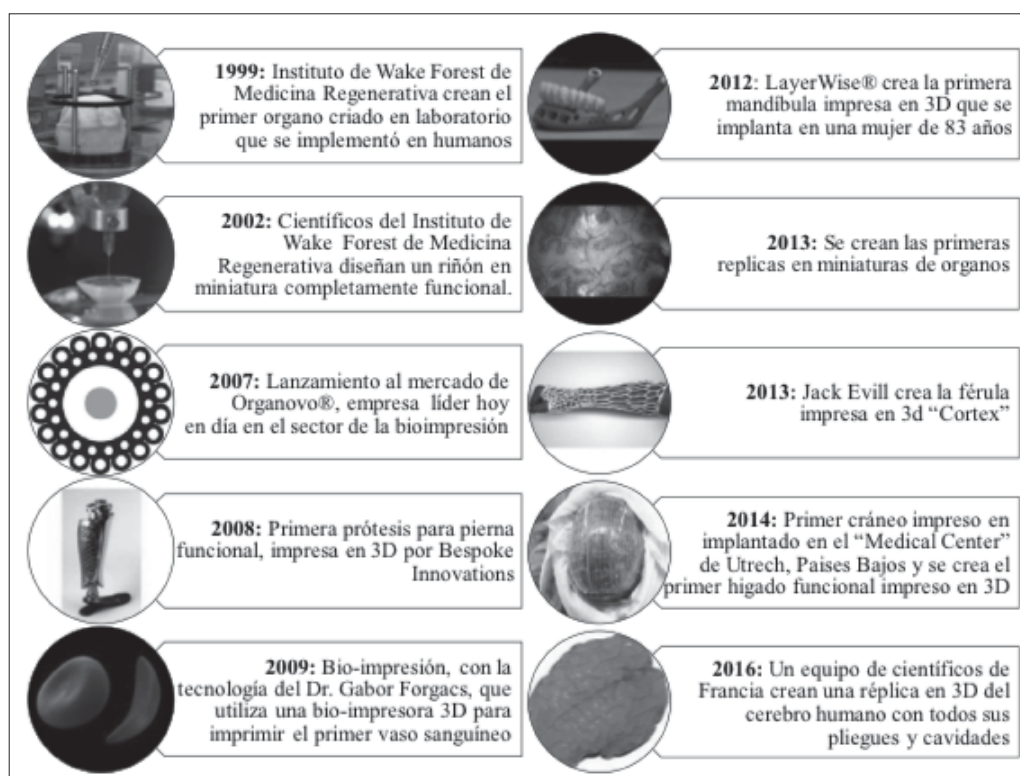


Figura 1. Infografía de la impresora 3D en la industria médica, información extraída de Escobar (2013)

Tal como lo indica la empresa Smartech® (2015), la tecnología de imágenes médicas permite la captura precisa de datos específicos del paciente en un formato digital, traduciendo estos a formatos que

pueden ser manipulados con el fin de planificar la solución ideal en el espacio digital (ver Fig. 2). Asimismo, Gómez, Vergara, y Alvarado (2016) utilizan esta interconexión para proponer un método que sirve para estimar distribuciones de densidad en tejidos corticales sanos como estrategia eficiente para asignar propiedades materiales en modelos numéricos de estructuras óseas complejas. Esta sinergia existente en los tres componentes tecnológicos presentados en la Fig. 2 hace posible que institutos como el Centro para la Integración de la Biomedicina y la Tecnología (CBMTI) de la Universidad de Malasia utilice esta tecnología para imprimir órganos humanos en 3D para que profesionales médicos puedan practicar sus cirugías utilizando los mismos instrumentos que se emplean en las cirugías reales.

Por otra parte, algunos dispositivos médicos han cambiado su proceso de manufactura radicalmente. Las prótesis, órtesis e implantes, que por lo general eran productos elaborados “artesanalmente”, hoy en día se generan desde un computador en el cual se evalúan morfológica y numéricamente disminuyendo así el margen de error que existía en el antiguo proceso manual de fabricación.

En estos últimos cinco años se ha diseñado y manufacturado una gran variedad de órtesis de inmovilización alrededor del mundo, todo ello con el fin principal de cumplir con los requerimientos citados. Algunos de estos son proyectos consolidados aprobados por la FDA (Food and Drug Administration) en Estados Unidos o la CE (European Commission) en Europa, tal como Cortex (Ewill, 2013), Bespoke Innovations (Summit, 2015), (Younext, 2015), (Zdravprint, 2015), otros están en vías a alcanzar la aprobación como Osteoid (Barnes, 2014), Exovite (Escudero, 2016), Xkelet (Brown, 2016) y algunos son proyectos emanados de universidades que recién dan sus primeros pasos, tal como Fiixit (Fiixit Orthotic Lab, 2016), #Cast (Fathom, 2014), Splint+ (Carmichael, 2013), Imaginarium India Pvt Ltd (Autodesk, 2016) y NovaCast (MediPrint, 2016), los cuales se especifican en los siguientes apartados.

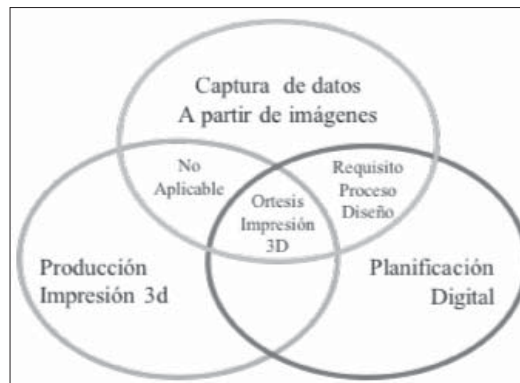


Figura 2. Interconexión para soluciones médicas usando de impresión 3D

TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN 3D

Las órtesis 3D están diseñadas para inmovilizar una región específica, por ejemplo, después de una fractura o cirugía y también para facilitar el movimiento en casos de parálisis o de contracturas (OrthoIDI3D, s.f.).

En la industria médica hay empresas destinadas al diseño y producción de estos dispositivos inmovilizadores (ver Fig. 3), la cuales, a su vez, emplean distintas tecnologías de impresión 3D para manufacturar sus productos.

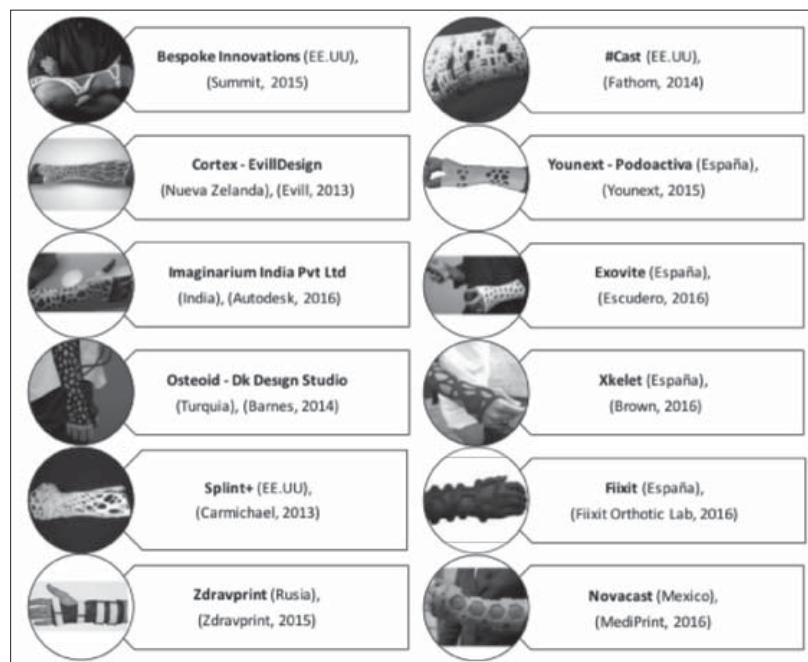


Figura 3. Empresas desarrolladoras de órtesis de brazos

Así, todas estas empresas utilizan la personalización como valor agregado para la producción de órtesis. Para eso se valen del manejo de escáner 3D para obtener los parámetros dimensionales de los pacientes. Una vez procesados los datos de la imagen 3D, modelan virtualmente el producto utilizando programas de Diseño Asistido por Computadora (CAD), Ingeniería Asistida por Computadora (CAE) y Manufactura Asistida por Computadora (CAM). Por último, convierten el diseño virtual en físico utilizando las impresoras 3D.

A pesar de que cada empresa utiliza distintos dispositivos de escaneo que van desde equipos de bajo costo, como lo muestra Contreras (2016), pasando por software desarrollado por ellos mismos (Xkelet, 2016), hasta dispositivos industriales de precisión metrológica como (Artec Europe, 2017) y a su vez, todas modelan geoméricamente con diferentes programas para el dibujo y diseño asistido por computadora (CAD, CAE) y manufactura (CAM), existe una diferencia que estriba en la calidad del producto final, que suele ser consecuencia del proceso de impresión 3D empleado.

Este proceso se refiere a la tecnología o método utilizado por la impresora 3D para formar las diferentes capas que conforman el producto. Como expresa Um (2016), algunos métodos usan fundido o ablandamiento del material para producir las capas, por ejemplo, FDM y Modelado por Sinterizado selectivo por láser (SLS), mientras que otros depositan materiales líquidos que son curados con UV (Polyjet).

MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA (FDM)

Es una técnica aditiva que deposita el material capa por capa para formar la pieza. Un filamento plástico es introducido en una boquilla que se encuentra por encima de la temperatura de fusión del material y puede desplazarse en tres ejes controlándola electrónicamente. La pieza es construida con finos hilos del material que se solidifican inmediatamente después de salir de la boquilla (Um, 2015; Borello y Backeris, 2017; BlogTD3D, 2017).

El FDM es una de las técnicas más accesibles y baratas de la manufactura aditiva, y también es uno de los procesos más fáciles de mantener y operar. Las empresas Osteoid, Zdravprint, Younext, Exovite, Fiixit y Novacast utilizan este proceso tecnológico para producir sus órtesis de inmovilización.

Destacamos la joven empresa Osteoid, que utiliza pequeñas vibraciones ultrasónicas de baja intensidad (LIPUS) para acelerar el tiempo de curación ósea hasta en un 40 por ciento (Lahuerta, 2014). Exovite también propone una característica única que reduce el tiempo de curación mediante la integración de un sistema de electroestimulación (Escudero, 2016).

Dicha tecnología sigue siendo un proceso de manufactura lento. Tal como lo indica Vidal (2016), estos procesos de creación y fabricación de órtesis impresas en 3D requieren varias horas, por lo que no pueden usarse en casos en los que se requiere inmovilización inmediata. Existen otros problemas de impresión ligados a esta tecnología, que en el ámbito de las impresoras 3D es conocido como “pandeo” en vértices (*warping*) y rupturas (*cracking*), las cuales son causadas por la contracción del plástico al enfriarse, lo cual, en ocasiones, provoca que las piezas se deformen o se rompan (FFF World, 2016).

La empresa Exovite está trabajando desde el año 2015 (en proceso de patente) en una tecnología que reduciría el proceso que actualmente es de 20 horas a solo 5 minutos, tal como se expresa en Climent (2015).

Otro método utilizado en la manufactura aditiva es el SLS por ofrecer una amplia variedad de materiales para trabajar y por una alta velocidad de impresión en comparación a la FDM

MODELADO POR SINTERIZADO SELECTIVO POR LÁSER (SLS)

Es un proceso en el que se utiliza un láser de CO₂ que sinteriza el material en polvo formando la pieza final capa a capa. De las órtesis de inmovilización revisadas, Bespoke Innovations (Summit, 2015), Cortex (Evill, 2013), Imaginarium India Pvt Ltd (Autodesk, 2016), #Cast (Fathom, 2014) y Splint+ (Carmichael, 2013) utilizan esta tecnología para fabricar sus productos.

La relación de costo de esta tecnología comparada con la deposición fundida (FDM) es mucho mayor, y si se utiliza una impresora SLS industrial, el costo puede alcanzar los 100.000 euros (Regidor, 2016). La gran ventaja de esta tecnología es que piezas con geometrías muy complejas pueden imprimirse con cierta facilidad, pero a pesar de ser esta una tecnología más rápida que la FDM, el tiempo de impresión en general sigue siendo el talón de Aquiles de todas las impresoras 3D.

Una tecnología relativamente nueva está siendo promovida por la industria Stratasys Ltd., y que encaja perfectamente en la personalización, diseño y producción de órtesis de inmovilización, tal como presentan Kelly, Paterson, y Bibb (2015) y Paterson et al. (2015) en sus investigaciones.

TECNOLOGÍA DE FOTOPOLÍMEROS (POLYJET)

Este proceso combina la tecnología *inkjet* (inyección a tinta) y el uso de fotopolímeros. Un carro equipado con cuatro o más cabezales de inyección de tinta y una lámpara UV cruzan el espacio de trabajo depositando pequeñas gotas de fotopolímeros que se solidifican cuando se exponen a la luz UV. Después de imprimir una capa delgada de material, el proceso se repite hasta completar la forma del objeto 3D (Comher, 2013). Esta tecnología presenta una serie de ventajas, las más importantes de las cuales son una excelente resolución de hasta 0.016 mm, superficies muy lisas y sin efecto de escalera (efecto característico de la FDM). Adicionalmente presentan una amplia gama de materiales y colores con un costo y un tiempo de impresión relativamente bajos (Sánchez, 2015). Al igual que la impresión SLS, esta tecnología es aún muy costosa.

Dado que esta tecnología permite crear objetos de múltiples materiales, Paterson *et al* (2015) han propuesto algunos diseños como los mostrados en la figura 4, hechos especialmente para personas de la tercera edad y pacientes con artritis reumatoide.

Las tecnologías presentadas permiten diseñar y crear casi cualquier forma de órtesis dando libertad para proponer diseños conceptuales que, además de cubrir con los requerimientos planteados, son personalizados.



Figura 4. Órtesis con malla textil impresa en 3D para pacientes de la tercera edad y piel sensible. Imagen extraída de Nelson (2016) y Paterson y col (2015)

DISEÑOS CONCEPTUALES DE LA ÓRTESIS DE BRAZO

Todos los productos cubren con los requerimientos de diseño que los diferencian de los yesos convencionales, además de ser productos ventilados, ligeros y anatómicos, fabricados con un material biocompatible, de alta resistencia estructural y alto grado de resistencia a la humedad, como se encuentran detallados por Kelly, Paterson y Bibb (2015).

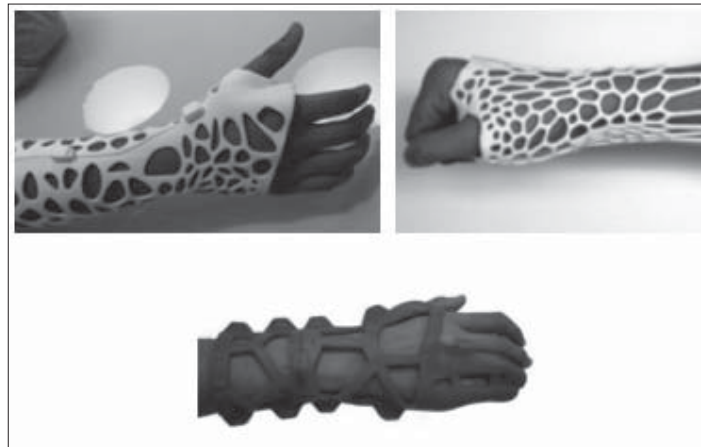


Figura 5. Diseño morfológico de algunas órtesis. Imagen extraída de (Autodesk, 2016; Evill, 2013; Fiixit Orthotic Lab, 2016)

La mayoría de los diseños presentados son morfológicamente similares y se enfocan en diseños trabajados con estructuras de voronoi, panel de abeja o combinación de ambas, tal como muestra la figura 5. Solo Bespoke Innovations (Summit, 2015), Zdravprint (Zdravprint, 2015) y #Cast (Fathom, 2014) presenta propuestas distintas, de las cuales #Cast propone una órtesis con una estructura morfológica basada en letras (ver figura 6), ya que la idea (netamente comercial) es que los familiares y amigos del paciente puedan escribir mensajes sobre el producto (Calhoon, 2014).

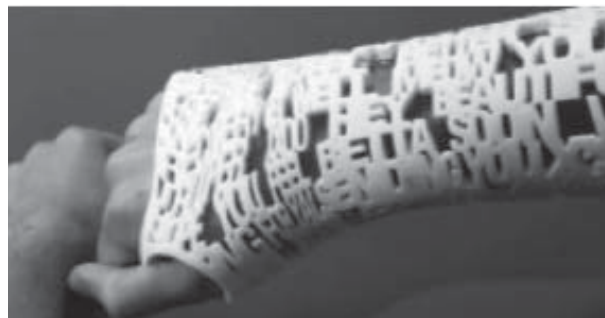


Figura 6. #Cast: Órtesis de inmovilización. Imagen cortesía de (Fathom, 2014)

Con respecto al comportamiento del material, la propuesta de Paterson et al (2015) muestra un estudio del uso del producto en forma empírica con diferentes materiales. En las demás propuestas de órtesis se debe partir de la suposición de que internamente se realizaron análisis del material, para definir así su comportamiento.

Hoy en día, los pacientes no participan en el diseño de su órtesis. En algunos casos, este podrá al menos seleccionar el color. Es evidente la mejora estética entre las órtesis impresas y las tradicionales, sin embargo, no son diseños centrados en los gustos de los usuarios. Solo la empresa Fathom con su modelo #Cast presenta un concepto con algo más de personalización considerando una estructura morfológica basada en letras, mientras que Paterson y su equipo presentan una propuesta en la que el paciente puede integrar algunos aspectos de personalización dentro del diseño de la órtesis, pero hasta la fecha, eso sigue siendo un proyecto.

La disruptiva presencia de las impresoras 3D en el proceso de fabricación de las órtesis marcó un precedente en el área traumatológica, así como en el desarrollo continuo del diseño de órtesis; sin embargo en cuanto a esta tecnología pueden evidenciarse algunos elementos problemáticos dentro del proceso de diseño y construcción, los cuales se analizan en el siguiente apartado.

PROSPECTIVA DEL DISEÑO Y FABRICACIÓN DE ÓRTESIS

Hay un vacío tecnológico que genera que el tiempo de respuesta desde que el paciente es diagnosticado hasta la instalación de la órtesis sea grande. Este se refiere a tres procesos: adquisición de datos (escaneo 3D), modelado en programas (CAD-CAE) e impresión. Así, con un proceso optimista de diseño, el tiempo total puede durar desde 24 hasta 72 horas (Serrano, 2016; Patrici, 2016; Climent, 2015; Miranda, 2013;), lo que genera cierta incomodidad del paciente, ya que debe llevar un yeso convencional durante varios días mientras su órtesis personalizada es producida, entregada e instalada.

De los tres procesos nombrados, la adquisición de imágenes digitales en 3D depende de equipos de escaneo corporal bastante precisos. El proceso de modelado con software especializado ha presentado aproximaciones que van direccionadas a disminuir el tiempo de procesado

de prototipos virtuales (Brown, 2016; Paterson et al, 2014), pero que pueden mejorarse si se consideran soluciones con computación de alto rendimiento y simulación en la nube (Ranbhise y Joshi, 2014).

El proceso que tiene que ver con la fabricación mediante la impresión 3D depende netamente de la tecnología de impresión aplicada y no del proceso de diseño y producción empleado. Así, se plantea como una vía principal para disminuir el tiempo de instalación de una órtesis una impresión con tecnología FDM, que es más económica, acompañada de técnicas y/o procedimientos para controlar la solidez estructural (Ultimaker, 2014; Torralba, 2014; Henshaw, 2015; Smart Materials 3D, 2016) que mejoran el resultado de impresión, como presenta Al-Gurnawi (2013) en su investigación.

De esta manera, un sistema de producción utilizando varias impresoras 3D con tecnología FDM trabajándolas paralelamente, logrará reducir el tiempo de impresión y, por tanto, es una solución factible para reducir el lapso de respuesta al paciente sin hacer una inversión económica significativa. Por esta razón, una órtesis debería ser fabricada por partes para luego ser ensamblada, como en el caso de aplicación que se detalla a continuación.

CASO DE APLICACIÓN: ÓRTESIS DE ANTEBRAZO, MUÑECA Y MANO

Considerando lo anterior proponemos el diseño de una órtesis para inmovilización desde el antebrazo hasta la mano y que mejore los tiempos de respuesta (ver Fig. 7). La idea principal es diseñar una órtesis ensamblada en seis partes que permita la desincorporación de piezas a medida que mejore el paciente. La impresión se efectúa en varios equipos a la vez, de manera que el tiempo de respuesta disminuye en proporción directa al número de impresoras en funcionamiento. La propuesta de diseño comprende la conformación de seis piezas con volúmenes de impresión similares, como se observa en la Fig. 7, de modo que los tiempos de impresión sean equivalentes.

Asimismo, esta propuesta ayudaría a reducir las pérdidas de material y tiempo por desperfectos de impresión a un 17% aproximadamente, ya que de producirse una falla de impresión, esta solo afectaría a una de las seis piezas que conforman el ensamble total y no a la órtesis completa.

La propuesta es conformada por las piezas: uno (1) y dos (2) corresponden a la inmovilización del antebrazo, las piezas tres (3) y cuatro (4) fueron diseñadas para inmovilizar la muñeca, y las piezas cinco (5) y seis (6) corresponden a la mano (ver Fig. 7).

El tiempo de impresión fue calculado por medio de un software comercial (Stratasys Mojo Print Wizard®) y un software libre (Repetier®). En la Fig. 8 se muestra el proceso de impresión 3D mediante el software libre Repetier®. Adicionalmente, la inversión de capital en maquinaria de impresión es un factor a considerar y está directamente relacionado con el número de impresoras 3D a utilizar, así como con la reducción en el tiempo de impresión que se quiera lograr, por eso en la Fig. 9 se muestra la relación entre los tiempos de impresión, el número de impresoras utilizadas y el costo de la inversión. De esta se observa que existe un rango de variación de los tiempos de impresión y costos que son inversamente proporcionales. Así, considerando 2, 3 y 6 impresoras, el ahorro de tiempo comparado con el de usar una es de 46,7%, 67,9% y 83,7%, mientras que los costos aumentan según 33,3%, 50% y 100%.

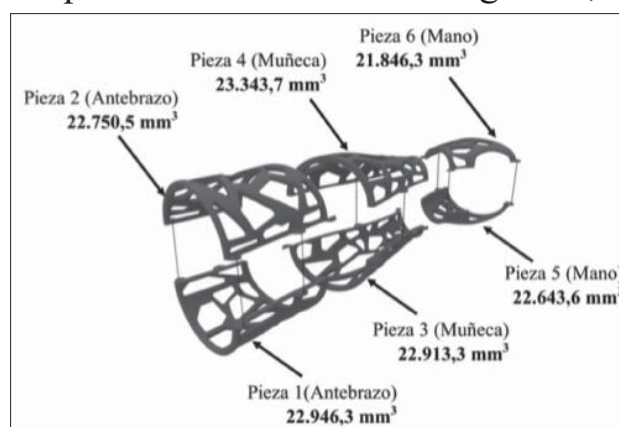


Figura 7. Propuesta de órtesis de brazo: Piezas y volumen

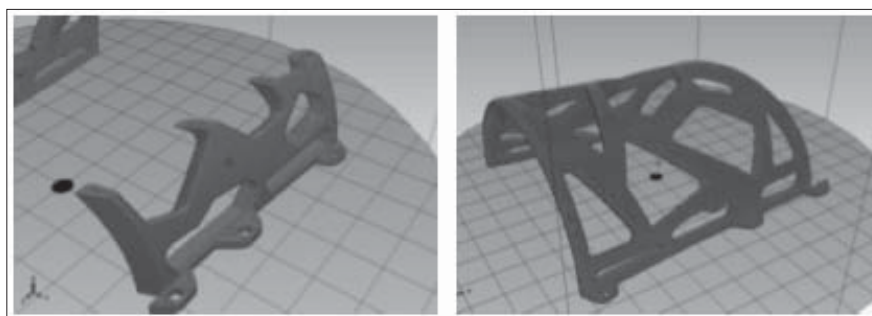


Figura 8. Proceso de impresión utilizando el programa Repetier®

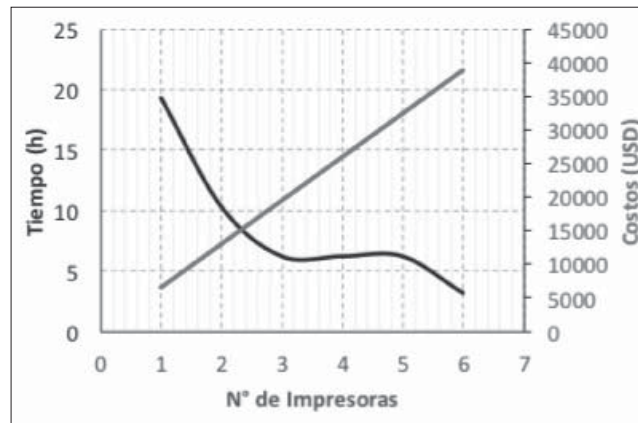


Figura 9. Grafica de tiempo de impresión (h) vs número de impresoras utilizadas vs costo de inversión (USD)

La órtesis cuenta con sistemas de sujeción desmontables (ver Fig. 10.a) que se logran con tornillo, clip plástico o banda de sujeción (*tie-wrap*). La propuesta ensamblada debe ser un producto con morfología pensada para reducir el peso, así como dar cumplimiento a los requisitos de diseño planteados por Kelly, Paterson y Bibb, (2015) (Ver la Fig. 10.b.)

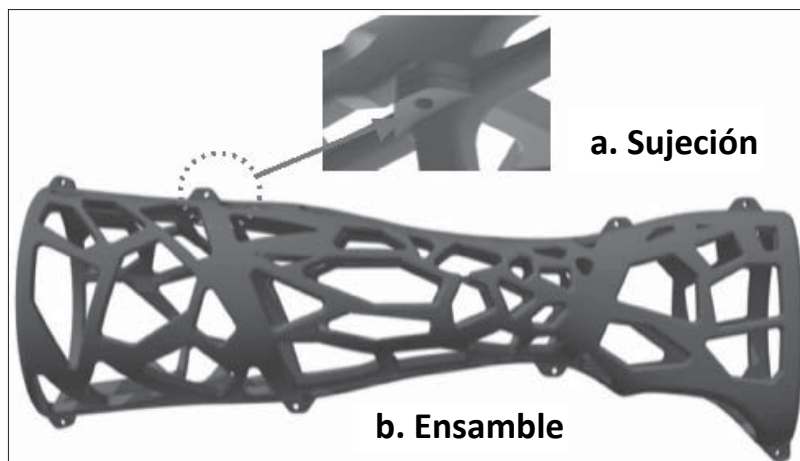


Figura 10. Propuesta de órtesis de Brazo. a) Sujeción y b) Propuesta ensamblada

A pesar de que el estado de carga al que está sometida la órtesis es relativamente pequeño como consecuencia de los movimientos involuntarios del paciente, y de que el tiempo de postura no excede de las ocho semanas, se debe hacer un análisis de esfuerzo del producto. Para

eso se deben considerar las propiedades mecánicas reales de los polímeros con las características de impresión que se usarán para manufacturarlo aditivamente. En este sentido se han dado aportes científicos (Martins et al, 2016; Relaño, 2013 y Boronat, 2009) que se pueden tomar como punto de partida considerando que las características de impresión 3D cambian dependiendo del fabricante de equipos y material. Por eso se deben caracterizar las propiedades mecánicas del material con que se trabajará para hacer así simulaciones numéricas más confiables.

Otro aspecto a considerar para mejorar el diseño y disminuir los tiempos para la instalación de la órtesis es la utilización de métodos para el diseño generativo y optimar la morfología estructural de las órtesis. La empresa Autodesk ha desarrollado un software “Autodesk WithIn” (Autodesk PR, 2015) que, introduciendo parámetros de entrada como el peso deseado, el material, el esfuerzo máximo, desplazamientos y costos, es capaz de generar una variedad de diseños con densidad y estructuras variables según las necesidades.

Bajo la luz de lo anterior surge la necesidad de crear un software médico intuitivo que ayude a los especialistas en traumatología a diseñar órtesis como parte de la relación médico-paciente planteado en la Fig. 11. Los paquetes computacionales CAD-CAE actuales requieren horas de adiestramiento, sin contar con los conocimientos previos sobre diseño estructural, diseño generativo y fabricación aditiva. Existen varios avances en esta dirección, como la empresa Xkelet (Brown, 2016), que han desarrollado una aplicación comercial para dispositivos móviles capaz de hacer un escaneo del brazo y proponer una órtesis en pocos minutos. Así, Paterson et al (2014) proponen el diseño de un software que además de ser intuitivo presenta también unos parámetros para personalizar las órtesis desde el punto de vista estético. En la Fig. 11 se presenta un esquema en el cual se detallan las dos propuestas descritas en esta investigación para bajar el tiempo de espera referido a la instalación de la órtesis y que depende del proceso de impresión 3D y de la implantación de forma transparente como un sistema impregnado de los CAD, CAE y CAM con alto rendimiento en nube en la relación médico paciente y el proceso de manufactura.

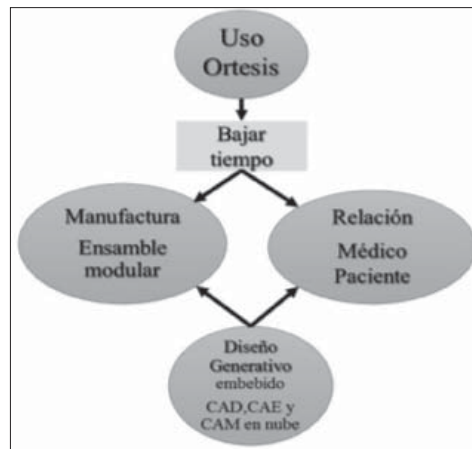


Figura 11. Propuesta para disminuir el tiempo de colocación de la órtesis

CONCLUSIONES

La inclusión de la impresora 3D en el área de la traumatología, particularmente en las órtesis de inmovilización, ha propiciado el desarrollo inminente de estos dispositivos. Las órtesis, hoy en día, son productos ligeros, transpirables, resistentes al agua, estéticos, que pueden contener componentes electrónicos que ayudan a acelerar el proceso de recuperación del trauma. Estos valores agregados hacen posible la inserción del paciente a sus actividades cotidianas.

A pesar de existir en el mercado muchas empresas que aportan a la traumatología, mediante el diseño y manufactura de órtesis impresas en 3D, solamente algunos estudios se basan en el mejoramiento del tiempo de respuesta para instalar una órtesis, y que en esta investigación está dirigida a:

Proponer la puesta en práctica de la impresión en 3D con tecnología FDM para una órtesis de brazo conformada por seis piezas imprimibles y volumétricamente similares que al ser ensambladas formen una sola, lo cual disminuye un 83.7% del tiempo empleado en esta actividad si se considera la impresión simultánea; sin embargo, esta propuesta requiere una inversión considerable, por cuya razón, una propuesta equilibrada está orientada al uso de dos o tres impresoras con una inversión 70% y 50% menor con respecto a la máxima inversión. Además, esta propuesta de diseño permite al médico intervenir la zona afectada en cualquier momento dado.

Introducir un diseño generativo que considere el cómputo de alto rendimiento en nube para CAD, CAE y CAM impregnados en la relación médico-paciente y la impresión 3D, que impulse el desarrollo de programas amigables y transparentes para uso médico.

REFERENCIAS

- ALCÁZAR, A. (2017) “3D printing en la medicina”, por Rafael Venegas. Obtenido de Infomotril: <https://www.infomotril.es/economia/3d-printing-en-la-medicina-por-rafael-venegas.html>
- AL-GURNAWI, R. (2013) *Preventing warping and improving adhesion of high temperature PLA: A practical guide*. Obtenido de Thingiverse: <https://www.thingiverse.com/download:250521>.
- ARTEC EUROPE (2017) *Artec Space Spider: Escáner 3D industrial con precisión metrológica*. Obtenido de Artec3D: Artec Europe.
- AUTODESK. (2016) *Imaginarium innovates in healthcare sector*. Obtenido de Customer Stories: http://images.autodesk.com/apac_india_main/files/imaginarium-india__case-study_16022016.pdf
- AUTODESK PR. (2015) *Autodesk Within: Generative Design Optimized for 3D Printing*. Obtenido de Autodesk News and Opinion: http://inthefold.autodesk.com/in_the_fold/2015/07/autodesk-within-generative-design-optimized-for-3d-printing.html
- BÁEZ, J. (2016) *Estos mexicanos revolucionarán el tratamiento de las fracturas*. Obtenido de Dinero en imagen: <http://www.dineroenimagen.com/2016-01-25/67796>
- BARNES, M. (2014) *3D Printing Is Revolutionizing the Medical World as We Know It*. Obtenido de Medical Design Technology: <https://www.mdtmag.com/article/2014/10/3d-printing-revolutionizing-medical-world-we-know-it>
- BECK, J.; VALE, A. (2004) *Drug and Medical Device Product Liability Deskbook*. Law Journal Press.
- BIRD, J. (Agosto de 2012) *Exploring the 3D printing opportunity*. Obtenido de Financial Times: <https://www.ft.com/content/6dc11070-d763-11e1-a378-00144feabdc0?mhq5j=e1>

- BLOGTD3D (2017) Fdm-fff o modelado por deposición fundida. Obtenido de Todo Digitalización 3D: <http://tododigitalizacion3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/>
- BORONAT, T. (2009) *Estudio y modelización de la procesabilidad mediante moldeo por inyección de materiales termoplásticos reciclados*. Obtenido de Repositorio Institucional de la Universitat Politècnica de València: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/5024/tesisUPV3054.pdf>
- BORRELLO, J.; BACKERIS, P. (2017) *Rapid Prototyping Technologies*. Farooqi K., *Rapid Prototyping in Cardiac Disease 3D Printind the Heart* (págs.41-61). USA. Springer.
- BROWN, B. (2016) *Xkelet 3D printed casts*. Obtenido de Health Tech Insider: <http://healthtechinsider.com/2016/07/22/xkelet-3d-printed-casts-video/>
- BUCCO, M.; HOFMAN, E. (2016) *La impresión 3D y su aplicación en los servicios médicos (prótesis, fármacos, órganos)*. Obtenido de Repositorio Digital San Andrés: <http://repositorio.udes.edu.ar/jspui/handle/10908/11878>
- BUTLER, B. (2015) Founder of Bespoke Innovations Fashions Open Structure for 3D Printed Arm Cast, Applied in Seconds. Obtenido de 3dPrint: <https://3dprint.com/85816/3d-printed-arm-cast/>
- CALHOON, J. (2014) *3D printed #cast for the social media age*. Obtenido de 3dCADWorld: <http://www.3dcadworld.com/3d-printed-cast-social-media-age/>
- CARMICHAEL, J. (2013) *We'd Happily Break Our Wrist For This 3-D Printed Splint*. Obtenido de Popular science: <http://www.popsci.com/technology/article/2013-08/intricate-3-d-printed-exoskeleton-splints>
- CLIMENT, M. (2015). Adiós escayola: Prótesis impresa en 3D con electroestimuladores. Obtenido de El Mundo: <http://www.elmundo.es/economia/2015/07/02/559410f2e2704e40378b4590.html>
- COMHER. (2013) *¿FDM o POLYJET? Determinar qué tecnología es la adecuada para nuestra aplicación*. Obtenido de Grupo Comher: <http://comher.blogspot.com/2013/11/fdm-o-polyjet-determinar-que-tecnologia.html>

- CONTRERAS, L. (2016) Top 10 con los mejores escáneres 3D low cost. Obtenido de 3DNatives: <http://www.3dnatives.com/es/top-10-escaneres-3d-low-cost-1910-2016/>
- ESCOBAR, C. (2013) *Breve historia de la impresión en 3D*. Obtenido de Impresion3D.com: <https://impresoras3d.com/blogs/noticias/102825479-breve-historia-de-la-impresion-3d>
- EVILL, J. (2013) *Cortex*. Obtenido de EvillDesign: <http://www.evilldesign.com/cortex>
- FATHOM. (2014) *What in the #Cast Project?* Obtenido de Studio Fathom: <http://studiofathom.com/hashcast/>
- FFF WORLD. (2016) *Guía de impresión*. Obtenido de ABS Tech: <https://www.fffworld.com/documentation/>
- FIIXIT ORTHOTIC LAB. (2016) Alternativa de escayola. Obtenido de Fiixit: <https://fiixit.es/>
- GÓMEZ, N.; VERGARA, M.; ALVARADO, J. (2016) A Practical Approach to Describe Density Fields of Cortical Bone. En: Y. González, E.; Dávila, M.; Candal, D. Pelliccioni; M. Cerrolaza. *Simulación y aplicaciones recientes para ciencia y tecnología* (Págs. MF182-MF191). Venezuela: Sociedad Venezolana de Métodos Numéricos en Ingeniería Universidad Central de Venezuela (SVMNI).
- HENSHAW, S. (2015) *How to prevent warping*. Obtenido de 3dPrinting: <https://3dprinting.com/tips-tricks/how-to-prevent-warping/>
- KELLY, S., PATERSON, A., & BIBB, R. (2015) *A review of wrist splint designs for additive manufacture*. Proceedings of 2015 14th Rapid Design, Prototyping and Manufacture conference. Loughborough: Great Britain.
- LAHUERTA, M. (2014) *Osteoid, un molde 3D que acelera la rehabilitación ósea*. Obtenido de Computer Hoy: <http://computerhoy.com/noticias/hardware/osteoid-molde-3d-que-acelera-rehabilitacion-osea-11975>
- MARCOS, A. (2013) *La historia del futuro industrial: cómo surgió la impresión 3D*. Obtenido de Teleco To Walk: <https://telecotowalk.wordpress.com/2013/11/01/la-historia-del-futuro-industrial-como-surgio-la-impresion-3d/>

- MARTINS, D. ET AL. (2016) Caracterización de las propiedades mecánicas de los cuerpos de prueba abs confeccionados con diferentes parámetros de extrusión vía impresión 3d. En: *Revista Iberoamericana de Polímeros*, 16(6), 303-309.
- MEDIPRINT (2016) Novacast: Órtesis rehabilitatorias. Obtenido de NovaCast de MediPrint: <http://mediprint3d.com.mx>
- MIRANDA, L. (2013) *Diseñado por Jake Evill, la Cortex soluciona los problemas que acarrea tener una férula de yeso*. Obtenido de FayerWayer: <https://www.fayerwayer.com/2013/07/cortex-una-ferula-impresa-en-3d-que-ayudara-a-sanar-tu-brazo-roto/>
- MOYA, P. (2015) *Crean una impresora 3D capaz de crear objetos más pequeños que glóbulos rojos*. Obtenido de Omicrono: <http://omicrono.elespanol.com/2015/06/crean-una-impresora-3d-capaz-de-crear-objetos-mas-pequenos-los-globulosrojos/>
- NELSON, B. (2016) *3D Printing in Rheumatology Holds Promise for External Devices, Joints*. Obtenido de The Rheumatologist newsmagazine: <http://www.the-rheumatologist.org/article/3d-printing-rheumatology-holds-promise-external-devices-joints/>
- ORTHOIDI3D (s.f.) *Órtesis 3D*. Obtenido de OrthoIDI3d: <http://www.orthoidi3d.com/>
- PALMA, C. (2010) *Análisis de la percepción estética de la sonrisa*. Obtenido de Repositorio académico de la Universidad de Chile: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134339/An%C3%A1lisis%20de%20la%20percepci%C3%B3n%20est%C3%A9tica%20de%20la%20sonrisa.pdf?sequence=4>
- PATERSON ET AL. (2015) *Comparing additive manufacturing technologies for customised wrist splints*. *Rapid Prototyping Journal*, 21(3), 230-243.
- PATERSON, A. ET AL. (2014) *Computer-aided design to support fabrication of wrist splints using 3D printing: a feasibility study*. *Hand Therapy*, 19(4), 102-113.
- PATERSON, A.; BIBB, R.; CAMPBELL, R. (2012) *Evaluation of a digitised splinting approach with multiple-material*. *International Solid Freeform Fabrication Symposium - An Additive Manufacturing Conference*. Texas: The University of Texas.

- PATRICI. (2016) *Férulas en 3D que sustituyen a las escayolas*. Obtenido de Discapzine: <https://www.discapzine.es/actualidad/ferulas-en-3d-que-sustituyen-a-las-escayolas/>
- RANBHISE, S.M.; JOSHI, K.K. (2014) *Simulation and analysis of cloud environment*. Simulation, 2(4).
- REGIDOR, A. (2016) *Lisa, la impresora 3D SLS low cost*. Obtenido de Impresion3Daily: <https://www.impresion3daily.es/lisa-la-impresora-3d-sls-low-cost/>
- RELAÑO, A. (2013) *Estudio comparativo de piezas de ABS y PLA procesadas mediante modelado por deposición fundida*. Obtenido de Repositorio institucional Universidad Carlos III de Madrid: https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/18015/PFC_Antonio_Relano_Pastor.pdf?sequence=1
- RUBIO, A. (2016) *La revolución del deporte anónimo Valenciano*. Obtenido de Yo soy noticia: <https://www.yosoynoticia.es/mas/el-proyecto-que-revoluciona-la-recuperacion-de-lesiones-en-el-mundo-del-deporte#>
- SANCHEZ, S. (2015) *La impresión 3D PolyJet, te explicamos todo*. Obtenido de 3dnatives: <http://www.3dnatives.com/es/la-impresion-3d-polyjet23072015/>
- SERRANO, C. (2016) *Brazo roto. Imprimiendo férula de inmovilización*. Obtenido de Heraldo: <http://www.heraldo.es/noticias/suplementos/tercer-milenio/innovacion/2016/03/09/exovite-impresiones-para-inmovilizar-fracturas-808751-2121030.html>
- SMART MATERIALS 3D. (2016) *Caso de éxito: cerramiento para nuestra Ultimaker*. Obtenido de Smart Materials 3D: <http://www.smart-materials3d.com/blog/casos-de-exito/caso-de-exito-cerramiento-para-nuestra-ultimaker/>
- SMARTECH (2015) *Revolutionizing Healthcare: How 3D Printing is Creating New Business Opportunities*. Obtenido de Smartech markets publishing: https://www.smartechpublishing.com/images/uploads/general/Final_Medical_White_Paper.pdf
- SUMMIT, S. (2015) *Post Operative*. Obtenido de SummitID - Bespoke Innovations: <https://3dprint.com/85816/3d-printed-arm-cast/>

- TORRALBA, J. (2014) *Evitar el temido WARPING*. Obtenido de Createc3d: <https://createc3d.com/evitar-el-temido-warping/>
- ULTIMAKER (2014) *How to fix warping*. Obtenido de Ultimaker: <https://ultimaker.com/en/resources/19537-how-to-fix-warping>
- UM, D. (2015) *Solid Modeling and Applications: Rapid Prototyping, CAD and CAE Theory*. Springer.
- VIDAL, L. (2016) *La inmovilización sin escayola de Younext en la revista Interempresas*. Obtenido de Podoactiva: <http://www.podoactiva.com/es/blog/innovacion/la-inmovilizacion-sin-escayola-de-younext-en-la-revista-interempresas>
- WIKIPEDIA. (2017) *Impresión 3D*. Obtenido de Wikipedia, La enciclopedia libre: https://es.wikipedia.org/wiki/Impresi%C3%B3n_3D
- XKELET. (2016) *Software y app de Xkelet*. Obtenido de Xkelet: <https://www.xkelet.com/>
- YOUNEXT.(2015) *Protección adaptada, ligera e higiénica para la recuperación de lesiones*. Obtenido de <https://www.younext.es/inmovilizaciones>
- ZAHUMENSZKY, C. (2016) *Adiós a las escayolas: así funciona la tecnología española de impresión 3D para curar fracturas*. Obtenido de Gizmodo: <http://es.gizmodo.com/adios-a-las-escayolas-asi-funciona-la-tecnologia-espan-1771778670>
- ZDRAVPRINT (2015) *Órtesis cómodas individuales*. Obtenido de Órtesis Zdravprint: <http://zdravprint.ru/>
- ZUNIGA, J.M.; PECK, J.; SRIVASTAVA, R.; KATSAVELIS, D.; CARSON, A. (2016) *An open source 3D-printed transitional hand prosthesis for children*. *JPO: Journal of Prosthetics and Orthotics*, 28(3), 103-108.