

# MATERIALES COMPUESTOS Y LA TECNOLOGÍA DE IMPRESIÓN 3D EN LA PRODUCCIÓN DE MATERIALES INTELIGENTES

---

**Irna Zukeyt Garduño Jaimes<sup>1</sup>, Gonzalo Martínez Barrera<sup>2\*</sup>,  
Enrique Viguera Santiago<sup>2</sup>, Julián Cruz Olivares<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Posgrado en Ciencia de Materiales, Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Paseo Colon esquina Paseo Tollocan S/N, 50180 Toluca, México.

<sup>2</sup>Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA), Facultad de Química, Universidad Autónoma del Estado de México, Km.12 de la carretera Toluca-Atlacomulco, San Cayetano 50200, México.

<sup>3</sup>Facultad de Química. Universidad Autónoma del Estado de México. Paseo Colón esq. Paseo Tollocan S/N. 50120. Toluca, Estado de México, México.

[zukeyt@yahoo.com.mx](mailto:zukeyt@yahoo.com.mx), [gonzomartinez02@yahoo.com.mx](mailto:gonzomartinez02@yahoo.com.mx), [enriqueviguera@yahoo.com.mx](mailto:enriqueviguera@yahoo.com.mx), [jcruzolivares@gmail.com](mailto:jcruzolivares@gmail.com)

<https://doi.org/10.3926/oms.409.03>

Garduño Jaimes, I. Z., Martínez Barrera, G., Viguera Santiago, E., & Cruz Olivares, J. (2022). Materiales compuestos y la tecnología de impresión 3D en la producción de materiales inteligentes. En E. Viguera Santiago y G. Martínez Barrera (Ed.), *Materiales Avanzados y Nanomateriales: aprovechamiento de fuentes naturales y sus beneficios al medio ambiente* (pp. 69-94). Barcelona, España: OmniaScience.

## Resumen

Durante mucho tiempo las disciplinas del conocimiento fueron muy marcadas en cuanto a sus límites, como la Ciencia de Materiales y la Tecnología, sin embargo, los recientes avances científicos han cambiado este paradigma. La Ciencia de Materiales ha aportado el conocimiento de las propiedades de los materiales, mientras que la tecnología de impresión en 3D ha permitido darle forma a un nuevo objeto, esto se conoce ahora como impresión en 4D. Estos objetos, además de ser amigables con el medio ambiente, son capaces de transformarse cuando interactúan con el entorno, sin la necesidad de la participación del ser humano, por ejemplo, tejidos que cambian de color con la luz, superficies que cambian su permeabilidad con la humedad, objetos que modifican su forma ante la temperatura o materiales que aumentan su resistencia al ser sometidos a fuerzas externas. Este capítulo se divide en tres secciones, en la primera denominada Introducción se plantea el panorama global de la impresión en 3D y 4D; en la segunda se lleva a cabo la revisión del estado de arte de la impresión en 3D y 4D y los avances logrados en la Ciencia de Materiales. Finalmente, en la última se muestran los avances de la investigación sobre este tema del grupo de investigación en Materiales Compuestos de la Facultad de Química en la Universidad Autónoma del Estado de México.

## Palabras clave

Materiales compuestos verdes, impresión 3D, materiales inteligentes, impresión 4D.

## 1. Introducción

La impresión en 3D, es un proceso cada vez más conocido y usado, no sólo en el ámbito de la manufactura sino en diversas áreas de conocimiento. La impresión en 3D es un proceso para construir objetos físicos en tres dimensiones a partir de modelos digitales, mediante la deposición sucesiva de capa por capa de materiales, como plástico, metal, cerámica y células vivas (Bhatia & Ramadurai, 2017). El concepto de impresión en 3D fue propuesto por primera vez por Charles W. Hull, en la década de 1980, utilizando estereolitografía para hacer objetos de polímero. En la actualidad existen diversas tecnologías de impresión en 3D, así como una inmensa gama de materiales y de impresoras.

La tecnología de impresión 3D y la Ciencia en Materiales, han dado origen a los términos “materiales avanzados inteligentes” e “impresión en 4D”. Estos materiales pueden transformarse de forma preprogramada en respuesta a un estímulo externo. La transformación depende de las propiedades estructurales del material (Figura 1).

Las tres dimensiones se refieren al volumen del material y la cuarta dimensión (4D) al tiempo empleado. Las estructuras auto-transformables se aplican en los sectores médico, de defensa y aeroespacial (paneles solares desplegados y antenas). El uso de materiales con memoria de forma en la fabricación aditiva ha ido en aumento; siendo una de las diez tendencias más prometedoras en el crecimiento sostenible (Liu, Du, Liu & Leng, 2014; Aïssa, Therriault, Haddad & Jamroz, 2012). La principal ventaja de la impresión en 3D y 4D, principalmente

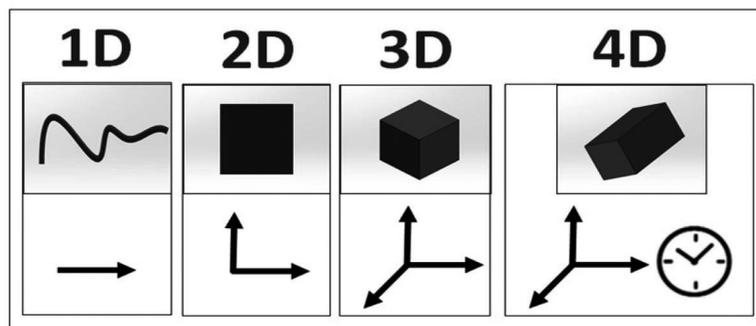


Figura 1. Dimensiones 1D, 2D, 3D y 4D de impresión

en la fabricación aditiva, ha sido la reducción del costo de los objetos imprimibles y del tiempo de diseño e impresión, así como la mejora del rendimiento. Esto ha permitido la creación rápida de prototipos y mayor investigación de materiales compuestos amigables con el medio ambiente.

La tecnología de impresión en 3D ha ido mejorando la impresión con polímeros y metales, ha avanzado en la fabricación aditiva y disminuido los tiempos de impresión. Más aun, actualmente lleva a cabo estudios para el mejoramiento de la superficie y la optimización del control de la impresión (Muzaffar, Ahamed, Deshmukh, Faisal & Pasha, 2018; Deshmukh, Ahamed, Deshmukh, Sadasivuni, Ponnamma, Pasha et al., 2017). Con la llegada de la impresión en 3D y 4D, la fabricación aditiva ha facilitado la producción en diferentes aéreas, como la industria del automóvil, la ingeniería biomédica y la joyería. En los sectores farmacéuticos y de la salud ha sido más prominente, debido a su aplicabilidad. En odontología y ortopedia se ha utilizado para prótesis, mediante el proceso de sinterización selectiva por láser (Gentile, Greco & Larobina, 2013).

El proceso de impresión en 3D y 4D comienza con el uso de un archivo de diseño asistido por computadora (CAD), en el cual se seleccionan las dimensiones y formas que tendrá el objeto. Posteriormente un software traducirá estas formas a un código en el lenguaje de la impresora para formar la figura. La impresión en 4D permite combinar sensores inteligentes, estructuras de auto-ensamblaje, robóticas y materiales, a través de métodos novedosos. La síntesis y caracterización del material con el que se desea imprimir deben garantizar las propiedades finales del objeto fabricado, como las mecánicas y geométricas, entre otras; dependiendo de la aplicación que se desee (Ge, Dunn, Qi & Dunn, 2014; Singh, Haverinen, Dhagat & Jabbour, 2010; Ponnamma, Chamakh, Deshmukh, Basheer-Ahamed, Erturk, Sharma et al., 2017).

De acuerdo con las normas ISO y ASTM, las tecnologías de Manufactura Aditiva (AM) que se utilizan son: extrusión e inyección de material, fusión de lecho de polvo, inyección de aglutinante, fotopolimerización en cubeta, laminación y deposición de energía dirigida, aunque cada día existen nuevos equipos diseñados para objetivos muy específicos (Manabe, Nishizawa & Shiratori, 2013; Bourell, 2016). La más utilizadas son el método de extrusión de material, la escritura con tinta directa (DIW) y el modelado de deposición fundida (FDM) (Han, Tofangchi, Deshpande, Zhang & Hsu, 2019).

## 2. Impresión en 3D

La impresión en 3D es una tecnología que ha tenido impacto en la fabricación de productos para aplicaciones en áreas de la salud y medicina; aeronáutica y espacio; industria automotriz, textil y alimentaria; arte y moda; arquitectura y construcción (Ozbolat, Peng & Ozbolat, 2016). Dentro de la impresión en 3D existen diferentes tecnologías, como las señaladas en la Tabla 1. La más utilizada por su costo es el modelado por deposición fundida (FDM) (Figura 2), la cual utiliza polímeros termoplásticos extruidos, los cuales se colocan a través de una boquilla, en una plataforma de impresión (Kotikian, Truby, Boley, White & Lewis, 2018).

La impresión en 3D requiere un tipo especial de software que opera a través de CAD. La unidad de fabricación asistida por computadora (CAM), también conocida como control deslizante, convierte el modelo CAD en un conjunto de instrucciones mecánicas específicas para el robot de impresión. El software de control de la impresora transmite las instrucciones a una interfaz en tiempo real (Kamran & Saxena, 2016). En la actualidad se cuenta con una gran variedad de

Técnica	Descripción
Modelado por deposición fundida (FDM)	Se utilizan termoplásticos que funde en un estado semilíquido. La extrusión se realiza por algoritmos controlados por computadora.
Estereolitografía (SLA)	Se utiliza plástico líquido, una plataforma perforada y láseres UV.
Sinterización por láser selectiva (SLS)	Pequeñas partículas de plástico, vidrio o cerámica se fusionan con un láser de alta potencia.
Fabricación de objetos laminados (LOM)	Se pegan y cortan capas de papel laminado adhesivo o láminas de plástico, para crear objetos complejos.
Fusión del haz de electrones (EBM)	Se utiliza un haz enfocado de electrones de alta energía para fundir el metal que se encuentra en alto vacío.
Fusión selectiva por láser	Se utiliza un rayo láser para derretir al metal y crear objetos complejos.

Tabla 1. Principales tecnologías de impresión en 3D



Figura 2. Impresor 3D por deposición fundida (FDM)

escáneres en 3D. El proceso de impresión se lleva a cabo conforme al esquema mostrado en la Figura 3.

Las aplicaciones de materiales en 3D, depende de los materiales y del tipo de impresora. Se tienen por ejemplo, materiales en polvo que logran impresión mediante fusión o por uso de aglutinantes o aditivos, así como madera (en forma de

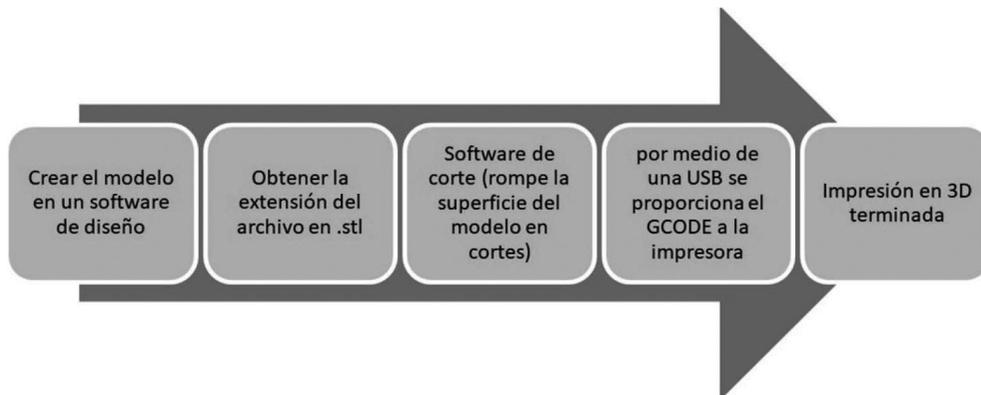


Figura 3. Esquema del proceso de impresión en 3D

filamento) con ácido poli(láctico) (PLA). La impresión se basa en la uniformidad del material, la distribución adecuada de las fases del material compuesto y de la boquilla que se usa para la extrusión del material (Kamran & Saxena, 2016).

Actualmente los filamentos poliméricos son los más utilizados, con estos se pueden crear estructuras muy versátiles. Se han utilizado ácido poli(láctico) (PLA), acrílico nitrilo butadieno estireno (ABS), elastómeros termoplásticos (TPE) y alcohol polivinílico (PVA). El PLA (polímero biodegradable), es más rígido que el ABS y no requiere el calentamiento de la cama de impresión mientras se imprime. Sin embargo, durante el enfriamiento la deformación por calor se puede mejorar utilizando una cama caliente. En el caso del ABS se adhiere fácilmente y produce estructuras 3D con un acabado vítreo suave. Dichas estructuras pueden tolerar deformación y contracción a altas temperaturas, debido a que sus temperaturas de transición vítrea son altas. Siendo entonces muy versátil en las plataformas de impresión (Barr, 2013; Desai & Magliocca, 2013). Los elastómeros termoplásticos (TPE) se imprimen mediante el método de extrusión con filamentos rígidos. La impresión requiere que la extrusora se mantenga a la presión del ralentí, que está ligado a la velocidad del motor y su posición debe ser precisa para evitar que el filamento se aplaste (De León, Chen, Palaganas, Palaganas, Manapat & Advincula, 2016). El alcohol polivinílico (PVA), se utiliza como material de soporte en la impresión por extrusión, por ejemplo, del ABS. Esto debido a los problemas que presenta en ambientes de alta humedad, causado por su solubilidad en agua (Ramya & Vanapalli, 2026).

Los materiales cerámicos se pueden imprimir mediante una impresora termojet, se utilizan junto con termoplásticos hechos de amidas, hidrocarburos y ésteres. También se utilizan resinas curables por UV, compuestas de plásticos termofijos. Este tipo de impresiones tienen características diferentes a las obtenidas por extrusión, como la resistencia a la tracción y la temperatura de transición vítrea (Kamran & Saxena, 2016).

La impresión de objetos metálicos es generalmente un proceso difícil, sin embargo se ha propuesto un método de extrusión basado en un mecanismo de alimentación de alambre metálico (análogo al método de deposición fundida), el cual requiere un sistema de calentamiento capaz de fundir localmente el alambre metálico. También se ha trabajado en impresión en 3D por laser de hilo y mediante soldadura por arco de alambre (Ding, Pan, Cuiuri & Li, 2015; Ding, Colegrove, Mehnen, Ganguly, Sequeira Almeida, Wang et al., 2021).

De acuerdo a la economía sostenible, la exploración de biopolímeros renovables y de origen natural; biomásas de residuos marinos, leñosos y agrícolas; materias primas renovables para la fabricación de diversos productos, ha recibido una gran atención. Dentro de los biopolímeros de origen natural para impresión en 3D, se encuentran la celulosa, hemicelulosa, lignina, almidón, alginato y quitosano, los cuales no solo satisfacen la demanda de sostenibilidad, sino que también reducen la posibilidad de los efectos secundarios negativos, asociados con algunos polímeros sintéticos en aplicaciones biomédicas (Chia & Wu, 2015; Park, Lih, Park, Joung & Han, 2017). Mediante la biorrefinería, cada componente de la biomasa puede extraerse y mantener su estructura, así como adaptarse como material de impresión 3D. Puede ser utilizado en la fabricación adictiva y producir una variedad de productos con alto valor agregado, los cuales brindan la oportunidad de tener una economía de reciclaje sostenible (Bhatia & Ramadurai, 2017; Wijk & Wijk, 2015).

Los materiales compuestos en la impresión 3D, son desarrollados con materiales de origen natural, renovables y que no dañen el medio ambiente, por ejemplo, una matriz polimérica con refuerzos de nanopartículas para mejorar las propiedades mecánicas de carcasas de automóviles (Ahn, Montero, Odell, Roundy & Wright, 2002).

La bioimpresión desarrollada desde 2004 ha ido evolucionando. Actualmente se cuenta con varios procesos de bioimpresión: asistida por láser, por estereolitografía, por inyección de tinta y por extrusión. Esta última, es la más popular debido a su bajo costo, la diversidad de materiales imprimibles, la facilidad de uso de los equipos y su amplia aplicación (Manavitehrani, Nasiri & Parviz, 2019; Chimene, Lennox, Kaunas & Gaharwar, 2016).

### **3. Impresión en 4D**

Los objetos 3D que son estimulados por el entorno y/o estímulos externos durante cierto tiempo, se denominaron “objetos impresos en 4D” (Tibbits, 2014). Los cambios de la forma después de la impresión es la característica principal de la impresión en 4D. Estos cambios son provocados por estímulos externos, que permiten la expansión, contracción o plegado de los objetos impresos. Los estímulos externos pueden ser la temperatura, humedad, solventes, pH y luz (Kwok, Wang, Deng, Zhang & Chen, 2015; Leist & Zhou, 2016). Los materiales con efecto de memoria de forma (SME), responden a estímulos externos y

cambian su forma y/o volumen, así como sus propiedades físicas y mecánicas, por ejemplo, el módulo de Young, la rigidez y la resistencia. Sin embargo, estos materiales son capaces de recuperar su forma original con cambios de humedad, pH, radiación y temperatura (Yang, Lu, Huang, Qi, Wu & Sun, 2014).

Los materiales por estímulos térmicos (SMP), transforman o revierten sus formas memorizadas. Los SMP tienen una temperatura de transición vítrea característica. La transformación conlleva la fuerza de recuperación, la cual se ha aprovechado para la activación del material en la impresión 4D. Por ejemplo, al añadir fibras de SMP a una viga flexible, se alcanzó la autoexpansión y la autocontracción durante el proceso de impresión (Wu, Yuan, Ding, Isakov, Mao, Wang et al., 2016; Bodaghi, Damanpack & Liao, 2016). En la Tabla 2, se muestran los estímulos y las respuestas de algunos materiales inteligentes.

Los materiales por estímulos térmicos (SMP) muestran respuesta a la penetración de agua, ya que disminuyen la temperatura de transición vítrea por debajo de la temperatura ambiente. Más aun, se tuvo una recuperación más lenta para los SME inducidos por agua que para los SME inducidos por calor (Meng & Li, 2013). A pesar de la desventaja de tener un tiempo de la reacción lento, los objetos de SMP de respuesta al agua, se han utilizado en ambientes acuáticos o a temperatura ambiente. El polímero hidrófilo se expandió 150 % y pudo recuperar su volumen original (Zhang, Yang, Dai, Ma, Li, Cheng et al., 2013).

<b>Material</b>	<b>Estímulo</b>	<b>Respuesta</b>
Termosensible	Temperatura	Tensión/volumen
Fotosensibles	Intensidad de luz	Tensión/propiedad óptica
Químicamente activo	Químico	Volumen
Magneto Activo	Campo magnético	Tensión/Luz/Color
Electrosensible	Campo eléctrico	Tensión
Multisensible	Más de una de las anteriores	Tensión/Volumen

*Tabla 2. Estímulos y respuestas de materiales inteligentes*

La impresión de materiales inteligentes (impresión 4D) con funcionalidades específicas es un proceso difícil, si se realiza en impresoras 3D comunes, debido a la obstrucción y aglomeración del material durante el proceso de impresión. Por lo cual, se han desarrollado impresoras 4D, que señalan los parámetros de impresión que corresponden al tipo de material utilizado. Por ejemplo, impresoras con una boquilla revestida de poliuretano térmico (TPU), que funciona por extrusión. La cual tiene un lecho calefactor que mantiene circulación uniforme del calor durante la impresión. Esto debido a que el poliuretano térmico tiene mayor coeficiente de expansión térmica, que evita la compresión y obstrucción de la boquilla al calentarse. Para reducir la fricción, la boquilla se recubre con politetrafluoroetileno (PTFE) (Choi, Kwon, Jo, Lee & Moon, 2015).

La impresora 3D que funciona por extrusión, que consta de un cabezal calefactor especial y una boquilla capaz de licuar vidrio, puede imprimir materiales funcionales, por ejemplo, vidrio transparente funcional, el cual tienen características similares a las del vidrio producido convencionalmente (Klein, Stern, Franchin, Kayser, Inamura, Dave et al., 2015).

Debido a las propiedades de incompatibilidad, el alto contenido de agua y la consistencia blanda (muy similar a los tejidos vivos), los hidrogeles se han utilizado en la impresión 4D, particularmente para aplicaciones biomédicas. Se han utilizado hidrogeles (peptídicos, naturales y sintéticos), los cuales responden fisiológicamente ante estímulos externos. Los hidrogeles inteligentes tienen características únicas como memoria de forma, autocuración y transición sol-gel controlable (Ge, Sakhaei, Lee, Dunn, Fang & Dunn, 2016; Khoo, Teoh, Liu, Chua, Yang, An et al., 2015).

Las aplicaciones de los hidrogeles de celulosa son diversas, por ejemplo, en medicina se utilizan debido a que tienen propiedades de biocompatibilidad y un comportamiento semejante al de tejidos vivos. También se aplican en el transporte y liberación de medicamentos (Kabir, Sikdar, Haque, Bhuiyan, Ali & Islam, 2018), así como en la industria de la horticultura para mejorar las propiedades del suelo, consistentes en aumentar la capacidad de retención de agua y/o la retención de nutrientes del suelo. Actúan como un sistema de liberación lento, que favorece la absorción de nutrientes y retrasa su disolución (De France, Hoare & Cranston, 2017). La impresión en 3D de hidrogeles para el reemplazo o reparación de tejidos y órganos humanos va en aumento. Además de su aplicación en la producción *in situ* de apósitos para heridas, desarrollo de sistemas de administración de

fármacos y pruebas de toxicidad (Chinga-Carrasco, Ehman, Pettersson, Vallejos, Brodin, Felissia et al., 2018).

Las nanofibras de celulosa (CNF) están siendo utilizadas en electrónica impresa, la cual consiste en combinar tintas y procesos de impresión para la fabricación de componentes electrónicos. Se desea tener componentes flexibles a base de nanocelulosa o almidón y utilizar tintas poliméricas, metálicas (producidas con nanopartículas de oro, plata o cobre), o de carbono (producidas con nanotubos, grafeno, grafito, fulleneros). Otra aplicación de las nanofibras de celulosa, son las celdas solares flexibles, ligeras y de bajo costo, que se obtienen por electrónica impresa (Hoeng, Denneulin & Bras, 2016).

La impresión de los componentes multilateral es otra de las características de la impresión 4D. Este tipo de impresión permite que las estructuras impresas tengan diferentes colores, formas y propiedades electrónicas, que cambian según la respuesta a los estímulos. Las impresoras multimaterial tienen la capacidad de combinar dos o más materiales dentro de una estructura impresa (Joe Lopes, MacDonald & Wicker, 2012).

#### **4. Avances de Investigación: Caso de estudio**

En el Laboratorio de Investigación y Desarrollo de Materiales Avanzados (LIDMA) de la Universidad Autónoma del Estado de México (UAEM), se está trabajando en producir materiales compuestos verdes por medio de impresión en 3D, utilizando celulosa, un polímero de origen natural. Se busca producir un filamento con nanofibras de celulosa y posteriormente incorporarlas en una matriz polimérica, en nuestro caso ácido poli(láctico) (PLA).

La celulosa es considerada el polímero renovable más abundante en la Tierra. Se obtiene de diferentes fuentes como plantas y algas, así como por procesos bacterianos, enzimáticos y químicos. Las fibras naturales están formadas básicamente por celulosa, hemicelulosa y lignina, razón por la cual, también se denominan fibras celulósicas o fibras lignocelulósicas (Satyanarayana, Guimaraes & Wypych, 2007). La pectina, los pigmentos y los extraíbles se pueden encontrar en cantidades bajas en las fibras naturales. En cada fibra, las microfibrillas rígidas de celulosa están incrustadas en una matriz blanda compuesta principalmente de hemicelulosa y lignina. Las propiedades de la fibra de celu-

losa dependen primordialmente de la composición química, del ángulo de las micro-fibrillas y de la cristalinidad; estas difieren de planta a planta o de las secciones de la planta. Cabe mencionar que la estructura química de las fibras naturales es complicada y que sus propiedades mecánicas dependen del tipo de celulosa (Dufresne, 2008).

La nanocelulosa tienen diámetros nanométricos ( $< 100$  nm) (Wang, Yao, Liu, Sun, Zhu & Chen, 2019). La nanocelulosa, al igual que la celulosa, es un material renovable, biodegradable y atóxico, además, sus excelentes propiedades mecánicas y ópticas amplían su rango de aplicación a diferentes sectores, como el envasado de alimentos (Espinosa, Bascón-Villegas, Rosal, Pérez-Rodríguez, Chinga-Carrasco & Rodríguez, 2019), industria papelera (Boufi, Gonzalez, Delgado-Aguilar, Tarres, Pèlach & Mutje, 2016), construcción (Claramunt, Ventura, Toledo Filho & Ardanuy, 2019), biomedicina (Chinga-Carrasco, 2018), remediación ambiental (Torstensen, Helberg, Deng, Gregersen & Syverud, 2019) y electrónica (Agate, Joyce, Lucia & Pal, 2018). Se pueden distinguir tres principales tipos de nanocelulosa: nanocristales de celulosa (CNC), nanofibras de celulosa (CNF) y nanocelulosa bacteriana (BNC). La obtención de estos se obtiene mediante diferentes tipos de procesos, que pueden ser mecánicos, químicos y bacterianos. La obtención de las nanofibras de celulosa, llevada a cabo en nuestro Laboratorio (LIDMA), se realizó mediante un proceso bacteriano con la bacteria *Gluconacetobacter xylinus*.

La nanocelulosa obtenida con la bacteria *Gluconacetobacter xylinus* es cristalina, libre de hemicelulosa y lignina. Se sabe que el mayor rendimiento de celulosa se logra con glucosa; sin embargo, una alta concentración de esta puede inhibir el crecimiento y la producción, así como disminuir el pH, debido a la acumulación de ácidos (ceto)-glucónicos. La celulosa bacteriana tuvo un pH de 4-6 a una temperatura de producción de 28-32 °C (Keshk & Sameshima, 2005). Dado que la fuente de carbono es un factor fundamental en la producción de celulosa bacteriana, se propusieron dos tipos para realizar un estudio comparativo. Se utilizaron azúcar y melaza de remolacha, en biorreactores estáticos. Los mejores resultados se obtuvieron con melaza de remolacha.

Se empleó el método de Hestrin and Schramm para la síntesis. La composición fue: glucosa (20 g/L), peptona (5 g/L), extracto de levadura (15 g/L), fosfato disódico (2,7 g/L) y ácido cítrico (1,15 g/L). El pH se ajustó a 5,5 usando hidróxido de sodio 0,1 N, mientras que el medio de cultivo se esterilizó en auto-

clave a 15 psi y 121 °C durante 15 min. Luego, se colocaron en tubos de ensayo 9mL de medio de cultivo y 1mL de vinagre de sidra de manzana. Dichas mezclas se homogeneizaron con un agitador y se incubaron durante 6 días a 32 °C. Las variables estudiadas fueron la producción de celulosa, pH, pérdida de volumen, tamaños de celulosa, estructura química y el efecto del tamaño en el biorreactor. En la Figura 4 se observa la nanocelulosa bacteriana (BNC) producida, identificada como la parte blanca dentro del recipiente.

Para el crecimiento de celulosa bacteriana, los bioreactores fueron esterilizados en autoclave a 15 psi y 121 °C por 15 min. Los cuales contaron con 1 mL de la solución obtenida en el paso anterior, así como sorbato de potasio (0.13 %), sacarosa (12.66 %), extracto de levadura (1.26 %), cloruro de calcio (0.76 %), fosfato de potasio (0.37 %) y agua destilada (84,9 %). Los bioreactores se cubrieron con un paño de algodón para permitir la aireación en el medio de cultivo, con el fin de promover el contacto con el oxígeno y lograr el crecimiento de bacterias. Posteriormente, los bioreactores se colocaron en una incubadora con circulación a 30 °C. Una vez transcurridos 28 días para el crecimiento de la celulosa bacteriana, se retiró el cultivo, para ser lavado y eliminar las bacterias presentes en la nata (Figura 5). Posteriormente, se secó el material (Figura 6), se molió en un molino convencional y finalmente se tamizó.



*Figura 4. Nanocelulosa bacteriana producida en el Bioreactor*



*Figura 5. Nanocelulosa bacteriana extraída del bioreactor*

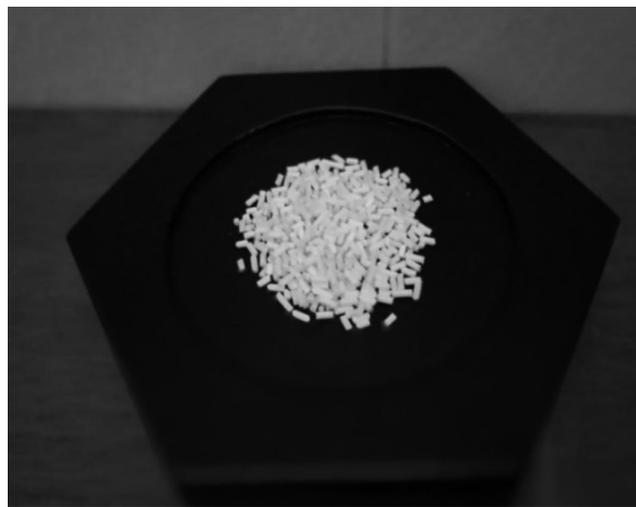


*Figura 6. Nanocelulosa bacteriana después del secado*

El siguiente paso fue mezclar la nanocelulosa bacteriana con el PLA en una extrusora. El ácido poliláctico es un biopolímero termoplástico cuya molécula precursora es el ácido láctico. Este se obtiene mediante la polimerización del monómero de ácido láctico. El poli(ácido L-láctico) (PLLA) o el poli(D, L-ácido láctico) (PDLLA) se pueden obtener utilizando dos estereoisómeros, el D (+) o el L (-), este último obtenido de forma natural. El PLA es biocompatible, biodegradable, con adecuadas propiedades mecánicas; no es tóxico ni cancerígeno para los seres humanos. Sus aplicaciones incluyen las industrias alimentaria, textil, plástica, agrícola, farmacéutica y química (Ponce Cahuasqui, 2011).

El PLA es un polímero termoplástico que tiene el potencial de reemplazar polímeros tradicionales como PET, PS y PC en aplicaciones electrónicas y automotrices. Si bien el PLA tiene propiedades mecánicas similares a las de polímeros tradicionales, no así para las propiedades térmicas, debido a su baja Tg de 60 °C. Este problema se puede solucionar cambiando la estequiometría del polímero y mezclándolo con otros polímeros (Babu, O'Connor & Seeram, 2013). El PLA fue adquirido en forma de pellets (Figura 7), con una temperatura de fusión entre 220-230 °C.

Se obtuvieron las mezclas de nanocelulosa bacteriana y PLA. Posteriormente se diseñaron las probetas para la prueba de tensión con las medias adecuadas según



*Figura 7. Pellets de ácido poliláctico (PLA)*

la norma que se utilizó se generó el archivo .STL, ambos pasos se realizaron por medio de Solidworks. Con el archivo en .STL el siguiente paso fue hacer la edición de la impresión, seleccionando los parámetros adecuados por medio del software UltramakerCura (Figura 8).

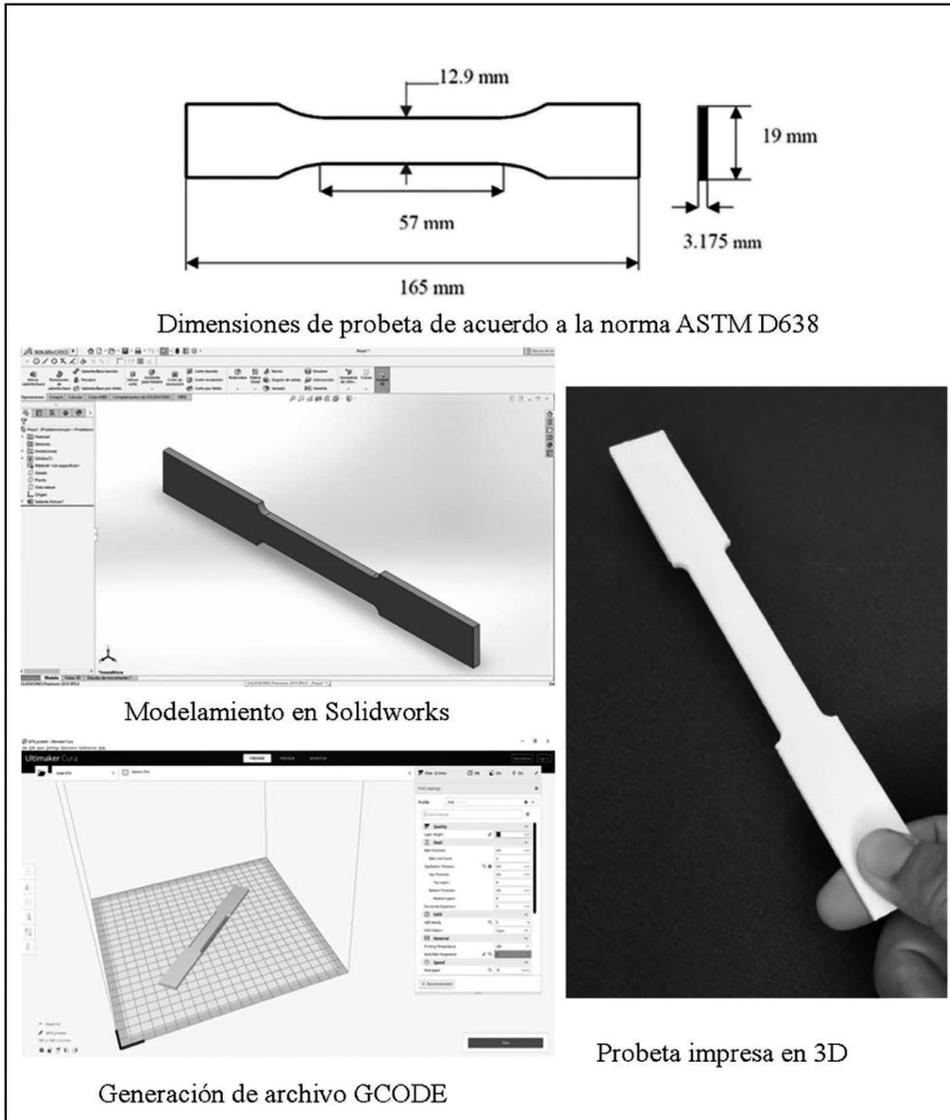
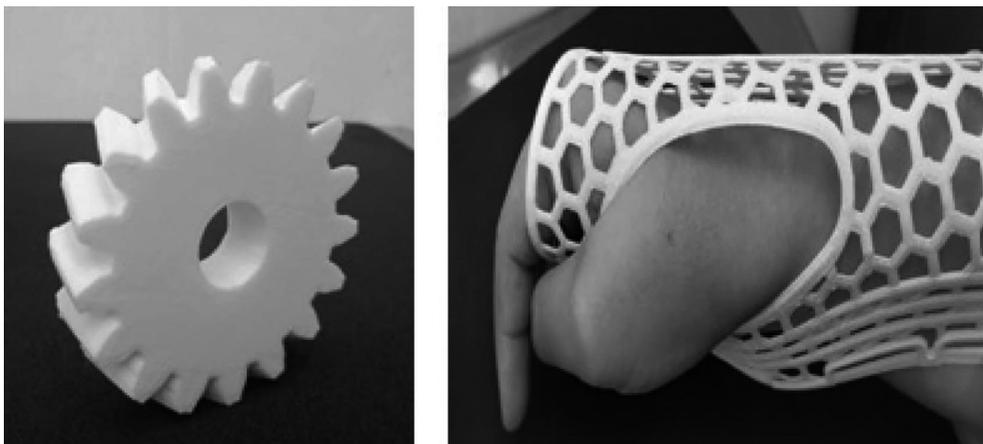


Figura 8. Modelamiento e impresión en 3D de probetas de nanocelulosa bacteriana y PLA

En la edición de del software UltramakerCura, se analizaron los parámetros que tienen influencia en la calidad de las impresiones encontrando tres variables que son fundamentales como lo es el relleno y la velocidad de impresión y la temperatura del extrusor y de la cama de impresión. Se utilizaron dos tipos de impresión, lineal y cúbica, bajo las condiciones: densidad de relleno de 50 %, velocidad de impresión de 70 mm/s, la temperatura de la boquilla a 215 °C y la temperatura de la cama a 60 °C. Estos parámetros deben elegirse en función del material que se utilice y las características finales de la pieza que se desea imprimir, como la geometría, el grado de cristalinidad y la estabilidad dimensional (Abeykoon Sri-Amphorn & Fernando, 2016).

Finalmente, las probetas se sometieron a pruebas de tensión en una maquina Universal, de acuerdo a la norma ASTM D638. Se obtuvieron el módulo de elasticidad y el coeficiente de Poisson. Con estos datos se pudieron imprimir engranes y férulas, las cuales podrían sustituir el tradicional yeso (Figura 9).

Por medio del análisis por elemento finito (FEA), se logró determinar la capacidad de resistencia de las piezas. Los elementos finitos consisten en un método de análisis que permite reproducir virtualmente a un componente o sistema mecánico en situación de trabajo real, ofreciendo las ventajas de la reducción de costos, tiempo, equipamiento y accesibilidad, que se requieren en una situación real. En la actualidad, la disponibilidad de software y hardware han puesto al alcance de los usuarios esta potente herramienta (González &



*Figura 9. Engranes y férulas impresas en 3D con nanocelulosa bacteriana y PLA*

González, 2020). En la Figura 10 se muestra el análisis por elementos finitos, con las tensiones en el material y los desplazamientos.

Durante la investigación se lograron hidrogeles de nanocelulosa bacteriana, con ciertas propiedades reológicas que pueden ser inyectados directamente por medio de una bomba infusora (Figura 11). Es un gel muy similar al obtenido por

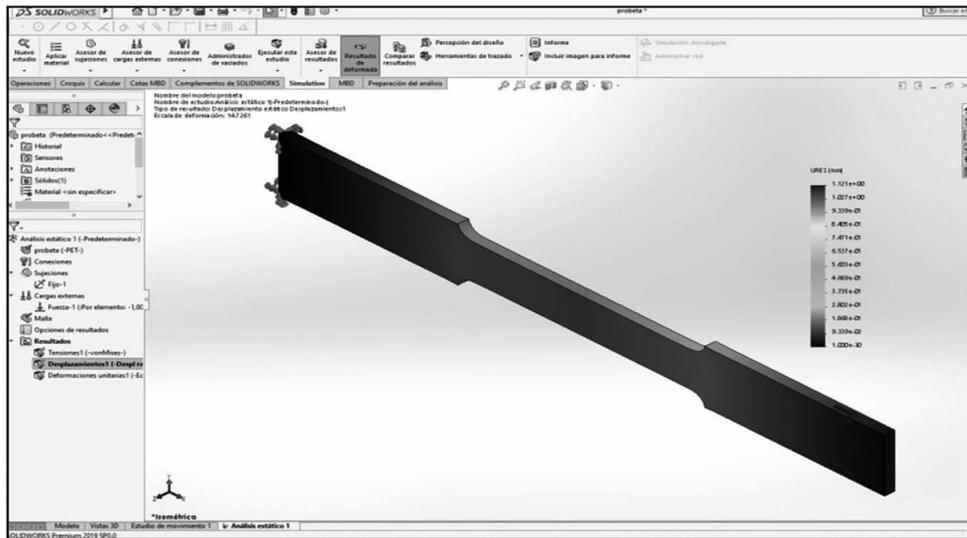


Figura 10. Análisis por Elementos Finitos (FEA) realizado en Solidworks



Figura 11. Hidrogeles de nanocelulosa bacteriana y PLA

biomasa, los cuales han sido aplicados en la sustitución de órganos y tejidos, así como en la liberación de fármacos.

## 5. Conclusiones

Los progresos logrados hasta el momento en el desarrollo de materiales amigables con el medio ambiente, han permitido establecer las bases de nuevas tecnologías, como la impresión en 3D. Por ejemplo, el uso de materiales compuestos sintetizados con química verde (Green Chemistry), en diversas aplicaciones, ha abierto un panorama prometedor en la conservación de fuentes naturales. Más aún, la combinación de la impresión en 3D y la Ciencia de Materiales está en evolución y paso a paso está permitiendo el desarrollo de materiales inteligentes, conocidos como materiales de impresión 4D, los cuales son capaces de transformarse cuando interactúan con el entorno, sin la necesidad de la participación del ser humano.

## Agradecimientos

Los autores agradecen al Consejo Mexiquense de Ciencia y Tecnología (COMECYT), por la beca otorgada a uno de los autores (I.Z. Garduño-Jaimes).

## Referencias

- Abeykoon, A., Sri-Amphorn, P., Fernando, A. (2016). Optimization of Fused Deposition Modeling Parameters for Improved PLA and ABS 3D Printed Structures. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 3(3), 284-297. <https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2020.03.003>
- Agate, S., Joyce, M., Lucia, L., & Pal, L. (2018). Cellulose and nanocellulose-based flexible-hybrid printed electronics and conductive composites—a review. *Carbohydr Polym.*, 198, 249-260. <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2018.06.045>
- Ahn, S., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. (2002). Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS. *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248-257. <https://doi.org/10.1108/13552540210441166>

- Aïssa, B., Therriault, D., Haddad, E., & Jamroz, W. (2012). Self-Healing Materials Systems: Overview of Major Approaches and Recent Developed Technologies. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2012, 1-17. <https://doi.org/10.1155/2012/854203>
- Babu, R. P., O'Connor, K., & Seeram, R. (2013). Current progress on bio-based polymers and their future trends. *Progress in biomaterials*, 2(1), 8. <https://doi.org/10.1186/2194-0517-2-8>
- Barr, J. (2013). Makers: The New Industrial Revolution by Chris Anderson. *Journal of Business & Finance Librarianship*, 18(3), 276-278. ISBN 978-0-307-72097-9. <https://doi.org/10.1080/08963568.2013.794656>
- Bhatia S. K., & Ramadurai K. W. (2017). *3D printing and bio-based materials in global health*. Switzerland: Springer International Publishing AG. 10-39. ISSN 2192-1105. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58277-1>
- Bodaghi, M., Damanpack, A., Liao, W. (2016). Self-expanding/shrinking structures by 4D printing. *Smart Materials and Structures*, 25(10), 105034. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/25/10/105034>
- Boufi, S., Gonzalez, I., Delgado-Aguilar, M., Tarres, Q., Pèlach, M. A., Mutje, P. (2016). Nanofibrillated cellulose as an additive in papermaking process: a review. *Carbohydr Polym.*, 154, 151-166. <https://doi.org/10.1016/j.carb-jol.2016.07.117>
- Bourell, D. (2016). Perspectives on Additive Manufacturing. *Annual Review of Materials Research*, 46(1), 1-18. <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070115-031606>
- Chia, H., & Wu, B. (2015). Recent advances in 3D printing of biomaterials. *Journal of Biological Engineering*, 9(1). <https://doi.org/10.1186/s13036-015-0001-4>
- Chimene, D., Lennox, K., Kaunas, R., & Gaharwar, A. (2016). Advanced Bioinks for 3D Printing: A Materials Science Perspective. *Annals of Biomedical Engineering*, 44(6), 2090-2102. <https://doi.org/10.1007/s10439-016-1638-y>

- Chinga-Carrasco G. (2018) Potential and limitations of nanocelluloses as components in biocomposite inks for three-dimensional bioprinting and for biomedical devices. *Biomacromol.*, 19, 701-711.
- Chinga-Carrasco, G., Ehman, N., Pettersson, J., Vallejos, M., Brodin, M., Felissia, F. et al. (2018). Pulping and Pretreatment Affect the Characteristics of Bagasse Inks for Three-dimensional Printing. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(3), 4068-4075. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04440>
- Choi, J., Kwon, O., Jo, W., Lee, H., & Moon, M. (2015). 4D Printing Technology: A Review. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(4), 159-167. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0039>
- Claramunt, J., Ventura, H., Toledo Filho, R. D., Ardanuy, M. (2019). Effect of nanocelluloses on the microstructure and mechanical performance of CAC cementitious matrices. *Cement Concrete Res.*, 119, 64-76. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01614-5>
- De France, K., Hoare, T., & Cranston, E. (2017). Review of Hydrogels and Aerogels Containing Nanocellulose. *Chemistry of Materials*, 29(11), 4609-4631.
- De Leon, A., Chen, Q., Palaganas, N., Palaganas, J., Manapat, J., & Advincula, R. (2016). High performance polymer nanocomposites for additive manufacturing applications. *Reactive and Functional Polymers*, 103, 141-155. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2016.04.010>
- Desai, D. R., & Magliocca, G. N. (2013). Patents, meet Napster: 3D printing and the digitization of things. *Geo. LJ*, 102, 1691. Indiana University Robert H. McKinney School of Law Research Paper No. 2013-2037. <https://ssrn.com/abstract=2338067>
- Deshmukh, K., Ahamed, M., Deshmukh, R., Sadasivuni, K., Ponnamma, D., Pasha, S. et al. (2017). Eeonomer 200F®: A High-Performance Nanofiller for Polymer Reinforcement—Investigation of the Structure, Morphology and Dielectric Properties of Polyvinyl Alcohol/Eeonomer-200F® Nanocomposites for Embedded Capacitor Applications. *Journal of Electronic Materials*, 46(4), 2406-2418. <https://doi.org/10.1007/s11664-017-5304-4>

- Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. (2015). Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 81(1-4), 465-481. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7077-3>
- Ding, J., Colegrove, P., Mehnen, J., Ganguly, S., Sequeira Almeida, P., Wang, F. et al. (2021). *Thermo-mechanical analysis of Wire and Arc Additive Layer Manufacturing process on large multi-layer parts*. <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2011.06.023>
- Dufresne, A. (2008) Cellulose-based composites and nanocomposites. In Gandini A, Belgacem MN, Eds. *Monomers, polymers and composites from renewable resources*. Elsevier: Oxford, UK. 401-418. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-045316-3.00019-3>
- Espinosa, E., Bascón-Villegas, I., Rosal, A., Pérez-Rodríguez, F., Chinga-Carraco, G., & Rodríguez, A. (2019). PVA/(ligno) nanocellulose biocomposite films. Effect of residual lignin content on structural, mechanical, barrier and antioxidant properties. *Int J Biol Macromol.*, 141, 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.08.262>
- Ge, Q., Dunn, C., Qi, H., & Dunn, M. (2014). Active origami by 4D printing. *Smart Materials and Structures*, 23(9), 094007. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/9/094007>
- Ge, Q., Sakhaei, A., Lee, H., Dunn, C., Fang, N., & Dunn, M. (2016). Multimaterial 4D Printing with Tailorable Shape Memory Polymers. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep31110>
- Gentile, G., Greco, F., & Larobina, D. (2013). Stress-relaxation behavior of a physical gel: Evidence of co-occurrence of structural relaxation and water diffusion in ionic alginate gels. *European Polymer Journal*, 49(12), 3929-3936. <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2013.08.023>
- González, O., & González, C. (2020). Introducción al método del elemento finito: Solidworks y Matlab An Introduction to Finite Element Method: Solidworks and Matlab. <https://www.researchgate.net/publication/341911591>

- Han, P., Tofangchi, A., Deshpande, A., Zhang, S., & Hsu, K. (2019). An approach to improve interface healing in FFF-3D printed Ultem 1010 using laser pre-deposition heating. *Procedia Manufacturing*, 34, 672-677. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.01.002>
- Hoeng, F., Denneulin, A., & Bras, J. (2016). Use of nanocellulose in printed electronics: a review. *Nanoscale*, 8(27), 13131-13154. <https://doi.org/10.1039/C6NR03054H>
- Joe Lopes, A., MacDonald, E., & Wicker, R. (2012). Integrating stereolithography and direct print technologies for 3D structural electronics fabrication. *Rapid Prototyping Journal*, 18(2), 129-143. <https://doi.org/10.1108/13552541211212113>
- Kabir, S., Sikdar, P., Haque, B., Bhuiyan, M., Ali, A., Islam, M. (2018). Cellulose-based hydrogel materials: chemistry, properties and their prospective applications. *Progress in Biomaterials*, 7(3), 153-174. <https://doi.org/10.1007/s40204-018-0095-0>
- Kamran, M., & Saxena, A. (2016). A comprehensive study on 3D printing technology, *MIT Int. J. Mech. Eng.*, 6(63). [http://www.mitpublications.org/yellow\\_images/21002-book-mechanical-eng.3.pdf](http://www.mitpublications.org/yellow_images/21002-book-mechanical-eng.3.pdf)
- Keshk, S., & Sameshima, K. (2005). Evaluation of different carbon sources for bacterial cellulose production. *Afr J Biotechnol.*, 4(6), 478-482.
- Khoo, Z., Teoh, J., Liu, Y., Chua, C., Yang, S., An, J. (2015). 3D printing of smart materials: A review on recent progresses in 4D printing. *Virtual and Physical Prototyping*, 10(3), 103-122. <https://doi.org/10.1080/17452759.2015.1097054>
- Klein, J., Stern, M., Franchin, G., Kayser, M., Inamura, C., Dave, S. (2015). Additive Manufacturing of Optically Transparent Glass. *3D Printing and Additive Manufacturing*, 2(3), 92-105. <https://doi.org/10.1089/3dp.2015.0021>
- Kotikian, A., Truby, R., Boley, J., White, T., & Lewis, J. (2018). 3D Printing of Liquid Crystal Elastomeric Actuators with Spatially Programed Nematic Order. *Advanced Materials*, 30(10), 1706164. <https://doi.org/10.1002/adma.201706164>

- Kwok, T., Wang, C., Deng, D., Zhang, Y., & Chen, Y. (2015). Four-Dimensional Printing for Freeform Surfaces: Design Optimization of Origami and Kirigami Structures. *Journal of Mechanical Design*, 137(11). <https://doi.org/10.1115/1.4031023>
- Leist, S., & Zhou, J. (2016). Current status of 4D printing technology and the potential of light-reactive smart materials as 4D printable materials. *Virtual and Physical Prototyping*, 11(4), 249-262. <https://doi.org/10.1080/17452759.2016.1198630>
- Liu, Y., Du, H., Liu, L., & Leng, J. (2014). Shape memory polymers and their composites in aerospace applications: a review. *Smart Materials and Structures*, 23(2), 023001. <https://doi.org/10.1088/0964-1726/23/2/023001>
- Manabe, K., Nishizawa, S., & Shiratori, S. (2013). Porous Surface Structure Fabricated by Breath Figures that Suppresses *Pseudomonas aeruginosa* Biofilm Formation. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 5(22), 11900-11905. <https://doi.org/10.1021/am4035762>
- Manavitehrani, I., Nasiri, N., & Parviz, M. (2019). Nanomaterials in 3D bioprinting. *Harnessing Nanoscale Surface Interactions*, 149-172. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-813892-2.00006-9>
- Meng, H., & Li, G. (2013). A review of stimuli-responsive shape memory polymer composites. *Polymer*, 54(9), 2199-2221. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2013.02.023>
- Muzaffar, A., Ahamed, M., Deshmukh, K., Faisal, M., & Pasha, S. (2018). Enhanced electromagnetic absorption in NiO and BaTiO<sub>3</sub> based polyvinylidene fluoride nanocomposites. *Materials Letters*, 218, 217-220. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2018.02.029>
- Ozbolat, I., Peng, W., & Ozbolat, V. (2016). Application areas of 3D bioprinting. *Drug Discovery Today*, 21(8), 1257-1271. <https://doi.org/10.1016/j.drudis.2016.04.006>
- Park, S., Lih, E., Park, K., Joung, Y., & Han, D. (2017). Biopolymer-based functional composites for medical applications. *Progress in Polymer Science*, 68, 77-105. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2016.12.003>

- Ponce Cahuasqui D. S. (2011). Obtención de materiales compuestos de matriz polimérica biodegradable reforzada con fibra natural, Tesis, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Ponnamma, D., Chamakh, M., Deshmukh, K., Basheer Ahamed, M., Erturk, A., Sharma, P. et al. (2017). Ceramic-Based Polymer Nanocomposites as Piezoelectric Materials. *Smart Polymer Nanocomposites*, 77-93. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-50424-7>
- Ramya, A., & Vanapalli, S. L. (2016). 3D printing technologies in various applications, *Int. J. Mech. Eng. Technol.*, 7(3), 396-409.
- Satyanarayana, K. G., Guilmaraes, J. L., & Wypych, F. (2007) Studies on lignocellulosic fibers of Brazil. Part I: Source, production, morphology, properties and applications. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(7), 1694-1709. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2007.02.006>
- Singh, M., Haverinen, H., Dhagat, P., & Jabbour, G. (2010). Inkjet Printing-Process and Its Applications. *Advanced Materials*, 22(6), 673-685. <https://doi.org/10.1002/adma.200901141>
- Tibbits, S. (2014). 4D Printing: Multi-Material Shape Change. *Architectural Design*, 84(1), 116-121. <https://doi.org/10.1002/ad.1710>
- Torstensen, J. O., Helberg, R. M. L., Deng, L., Gregersen, O. W., & Syverud, K. (2019) PVA/nanocellulose nanocomposite membranes for CO2 separation from flue gas. *Int J Greenh Gas Con.*, 81, 93-102. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2018.10.007>
- Wang, Q., Yao, Q., Liu, J., Sun, J., Zhu, Q., & Chen, H. (2019) Processing nanocellulose to bulk materials: a review. *Cellulose*, 26, 7585-7617. <https://doi.org/10.3389/fchem.2020.00420>
- Wijk A., & Wijk I. (2015). 3D printing with biomaterials-towards a sustainable and circular economy. Amsterdam: IOS Press, 23-55. ISBN 978-1-61499-486-2. <https://doi.org/10.3233/978-1-61499-486-2-i>

Wu, J., Yuan, C., Ding, Z., Isakov, M., Mao, Y., Wang, T. et al. (2016). Multi-shape active composites by 3D printing of digital shape memory polymers. *Scientific Reports*, 6(1). <https://doi.org/10.1038/srep24224>

Yang, W., Lu, H., Huang, W., Qi, H., Wu, X., & Sun, K. (2014). Advanced Shape Memory Technology to Reshape Product Design, Manufacturing and Recycling. *Polymers*, 6(8), 2287-2308. <https://doi.org/10.3390/polym6082287>

Zhang, X., Yang, P., Dai, Y., Ma, P., Li, X., Cheng, Z. et al. (2013). Multifunctional Up-Converting Nanocomposites with Smart Polymer Brushes Gated Mesopores for Cell Imaging and Thermo/pH Dual-Responsive Drug Controlled Release. *Advanced Functional Materials*, 23(33), 4067-4078. <https://doi.org/10.1002/adfm.201300136>