



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN
DE INGENIEROS EN LA
ERA DIGITAL



DISEÑO DE UN CONTROL MULTIVARIABLE EN LAZO CERRADO PARA PROCESOS DE MANUFACTURA ADITIVA

Francisco José Mercado Rivera, Álvaro José Rojas Arciniegas

**Universidad Autónoma de Occidente
Santiago de Cali, Colombia**

Resumen

La manufactura aditiva, también conocida como impresión 3D, es un conjunto de herramientas de prototipado y fabricación de piezas de manera sencilla y rápida. Las técnicas de los sistemas de manufactura aditiva han sido foco de estudio y avance tecnológico durante los últimos años, llegando a un punto que ha permitido la materialización y fabricación de piezas con alta complejidad geométrica de una manera sencilla, rápida y con un buen nivel de precisión.

Sin embargo, a pesar de la gran adopción de la manufactura aditiva en los sectores de ingeniería, diseño y educativo, estas técnicas presentan aun deficiencias y retos como son: la ausencia de mediciones durante los procesos de fabricación y estándares de productividad, limitación de materiales, incertidumbres en la calidad de las piezas, entre otros. Gran parte de estas problemáticas se atribuyen a que la mayoría de mecanismos de manufactura aditiva trabajan bajo un sistema de control a lazo abierto, dejando a un lado variables involucradas que juegan factores importantes. Es aquí donde se realizará un sistema de control en lazo cerrado multivariable, el cual permita el monitoreo de las distintas variables involucradas en la impresión y de esta manera mitigar los posibles errores que se puedan presentar.

Para lo cual se aborda la caracterización de las 7 diferentes técnicas, en donde se realiza una revisión de literatura explorando las tecnologías, materiales y aplicaciones de cada una de las técnicas, con el fin de identificar variables y factores cruciales envueltos en estos. Para finalmente estudiar sistemas de control en lazo cerrado aplicados en un proceso de manufactura aditiva.

Palabras clave: manufactura aditiva; control en lazo cerrado; impresión 3D

Abstract

The additive manufacturing (also known as 3D printing), is a set of tools that allows prototyping and fabrication of 3D pieces to be done easy and rapid. These techniques have been growing in the last decade, until reach the point that allows the building of pieces with high geometric complexity, in a simple and fast way, with a good precision and resolution level.

Despite the adoption of the additive manufacturing in the engineer, design, and academic sectors, these techniques present some limitations and challenge, such as; the absence of a fabrication process measurement, material limitations, uncertainty piece quality. Most of the problems can be attributed to the open loop control system implemented in the additive manufacturing machines, leaving aside important variables involved in the processes. For those reasons, a development of closed loop control system is proposed.

A characterization of the 7 different techniques of additive manufacturing in made, in order to identify the critical variables involved in each one. Subsequently make a study of different closed loop systems implemented in additive manufacturing processes.

Keywords: *additive manufacturing; 3D printing; closed loop control system*

1. Introducción

La impresión 3D hace referencia a la creación de objetos tridimensionales, depositando capa tras capa de un determinado material hasta conformar el producto final. Sin embargo, el término formal para este tipo de tecnología es manufactura aditiva y este término se ha venido acuñando desde la creación de la primera máquina de prototipado rápido en la década de 1980 basada en la técnica de estereolitografía por la empresa 3D Systems (Gibson et al., 2015.)

Generalmente estas técnicas de manufactura son utilizadas para el modelado y la creación de prototipos rápidos, debido a la versatilidad de crear figuras de geometrías complejas, en un corto tiempo y a bajo costo en comparación con técnicas de manufactura convencional, haciendo que diferentes sectores de la industria como el aeronáutico, educativo, de la salud, automotriz, entre otros, estén interesados en este tipo de tecnología. Este interés por parte de los sectores productivos ha desembocado en la creación de diferentes técnicas de manufactura aditiva, muchas de estas basadas en el principio de deposición de capas de material. Estas técnicas difieren las unas de las otras en los materiales utilizados, estado y morfología de la materia, así como en el principio de adhesión entre las partículas de material (Gibson, et al., 2015.).

A pesar de que la manufactura aditiva ha presentado un gran avance tecnológico en especial durante la última década y haya tenido una aceptación dentro de los sectores de ingeniería, diseño y educativo, se encuentra lejos de ser perfecta y presenta una cantidad de retos que impiden que este tipo de tecnología sea utilizada ampliamente como un medio de producción y que las partes que se fabriquen sean utilizadas en aplicaciones reales, cumpliendo con estándares de calidad exigidos para dichas aplicaciones. Es por esto que se realizará un sistema de control en lazo

cerrado multivariable, el cual permita el monitoreo de las distintas variables involucradas en la impresión y de esta manera mitigar los posibles errores que se puedan presentar, con el objetivo de generar piezas de mejor calidad. De esta manera se plantea el interrogante: ¿Cómo desarrollar un sistema de control en lazo cerrado para un proceso de manufactura aditiva, con el fin de obtener piezas tridimensionales de mejor calidad, acabado y con especificaciones muy aproximadas a las diseñadas?

Para dar solución a este interrogante se aborda la caracterización de las 7 diferentes técnicas establecidas por la Organización Internacional de Estándares (ISO) y la Asociación americana de ensayos y materiales (ASTM) en su norma estándar de terminología para tecnologías de manufactura aditiva ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2015), se realiza una revisión de literatura explorando las tecnologías, materiales y aplicaciones de cada una de las técnicas, con el fin de identificar variables y factores cruciales envueltos en estos.

Posteriormente se plantea un estudio exploratorio del uso de sistemas de control en lazo cerrado para los diferentes sistemas de manufactura aditiva, con el objetivo de determinar la viabilidad de la implementación de dicho sistema de control donde se integren diferentes estrategias de control y permita la obtención de piezas con mayor desempeño en comparación a las piezas obtenidas con tecnologías de manufactura aditiva sin un sistema de control a lazo cerrado implementado.

2. Procesos de manufactura aditiva

La manufactura aditiva enmarca las técnicas de manufactura en las que se adiciona material para lograr la geometría deseada en contraposición a las técnicas de manufactura sustractiva en las cuales se parte de un bloque de materia prima del cual se remueve material hasta formar la geometría deseada. A pesar de ser un término más amplio, hoy en día se utiliza de manera intercambiable con el término prototipado rápido e impresión 3D y se ha convertido en la terminología preferida por buena parte de la comunidad académica por levantar la implicación de que las piezas fabricadas por estas técnicas se limitaban exclusivamente a la creación de prototipos. En general, estas técnicas consisten en la deposición de capa tras otra capa de un material hasta obtener un objeto en tres dimensiones (Radharamanan, 2017). Generalmente estos procesos comienzan desde un diseño asistido por computador (CAD) de la pieza o producto a fabricar, este se guarda como un archivo de malla .STL para posteriormente ser tratado por un software especializado, el cual se encarga de seccionar la pieza en distintas capas transversales con el fin de mantener las geometrías y detalles del objeto. El mismo software es encargado de generar comandos y rutinas que se entregaran a la máquina para fabricar la pieza deseada (Gardan, 2015).

Desde la creación de la primera máquina comercial de manufactura aditiva en la década de 1980 por la empresa 3D Systems, se han creado un gran número de sistemas que se pueden agrupar en siete grandes técnicas de manufactura aditiva, como lo indica la norma ISO/ASTM 52900 (ISO/ASTM, 2015), las cuales son: Foto-Polimerizado, inyección de material, inyección de aglutinante, extrusión de material, fusión de cama de polvo, laminado y deposición directa de

energía. A continuación, se hace una descripción general de cada uno de los procesos anteriormente mencionados.

2.1. Foto-polimerización

La foto-polimerización es un proceso de formación reticulado de materiales de alto peso molecular (polímeros) desde moléculas monómeras u oligómeros sometidas a un haz de luz, generalmente en el espectro de ultravioleta, es decir transformar un fotopolímero líquido convirtiéndolo en sólido por medio de un haz de luz que activa el curado del fotopolímero (Khudyakov 2018). La foto-polimerización es la base de muchos sistemas comerciales y su aplicación se ha dado en diversos sectores de la industria como arte, adhesivos ópticos, aplicaciones médicas, óptica microelectrónica, entre otros (Hull and Arcadia, 1984). Dentro de la foto-polimerización encontramos dos tecnologías principales: la estereolitografía (SLA) y la producción continua mediante interfaz líquida (CLIP), en la figura 1 se puede observar el esquemático de funcionamiento de dichas tecnologías.

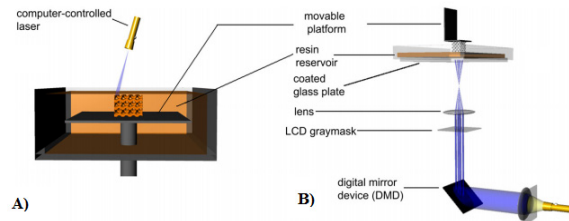


Figura 1. Esquemático de los dos tipos de configuración **Fuente:**(Melchels, et al, 2010)

2.2. Inyección de aglutinante

La tecnología de manufactura aditiva basada en la inyección de aglutinante es una de las técnicas más comerciales de este tipo de procesos de manufactura desde el 2010, fue desarrollada originalmente en el Massachusetts Institute of Technology (MIT) en la década de 1990 y permite el manufacturar materiales en morfología de polvos como arena, vidrio y metales. La figura 2 muestra el esquemático de funcionamiento de esta técnica.

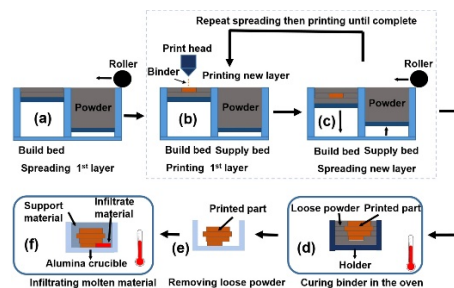


Figura 2. Esquemático de proceso de inyección de aglutinante. **Fuente:** (Do, et al, 2017)

Una de las grandes ventajas presente en este proceso es la capacidad de obtener piezas con diferentes tipos de colores, esto se debe gracias a que los aglutinantes utilizados para la unión de las diferentes capas pueden ser teñidos con diferentes colorantes, transmitiendo estos colores a las piezas impresas. Por otro lado, este proceso presenta dos grandes desventajas, la primera es la

fragilidad de las piezas fabricadas y esto se debe a que el proceso consiste en la unión de partículas de un material por medio de un aglutinante, por lo cual la resistencia de la pieza depende de este último. La segunda gran desventaja presente en este proceso es la obtención de los distintos materiales en forma de polvos, ya que la producción de estos polvos presenta un alto grado de dificultad haciéndolos costos y de difícil acceso (Xu, et al, 2014).

2.3. Extrusión de materiales

Las técnicas de extrusión de material consisten en hacer atravesar un material selectivamente a través de un dado de extrusión o un orificio cuando una presión es aplicada, el resultado de esto es la extrusión del material de una forma constante, con un diámetro de trazos determinados, el cual se deposita capa tras capa hasta obtener la geometría deseada, como se muestra en el esquemático de la figura 3. Algunas de las tecnologías que hacen parte de esta técnica son; Modelación por Deposición Fundida (FDM) o Fabricación por Filamento Fundido (FFF) y Modelación por Extrusión de Masas (DDE).

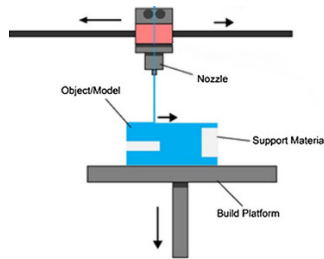


Figura 3. Esquemática extrusión de materiales. **Fuente:** (FDM Setup.)

Durante el año 2010 de acuerdo con el reporte de la revista Wohler's Report el mercado de las técnicas por modelamiento por deposición fundida era 3.5 veces más grande que cualquier otra técnica de manufactura aditiva, llegando a tener el 41.5 % del total de las ventas de todos los sistemas de manufactura aditiva (Wohlers, 2011). Este posicionamiento en el mercado se debe a que en general las tecnologías de extrusión de material presentan la ventaja de trabajar no solo con materiales poliméricos, si no también materiales como cerámicos, siliconas, alimentos, biomateriales, entre otros.

2.4. Fusión de cama de polvos

La técnica de fusión de una cama de polvos comienza con la aspersion del material en forma de polvo sobre la plataforma de construcción del objeto, una fuente de energía es programada para dosificar energía directamente a la superficie de la plataforma con el fin de fundir o sinterizar el polvo del material en una forma deseada. Nuevamente una capa de polvo es esparcida sobre la plataforma de impresión y el proceso se repite hasta obtener la pieza deseada. La figura 4 muestra el esquemático del proceso de fusión de una cama de polvo (Frazier, 2014).

Existen dos sub-procesos basados en la técnica de fusión de una cama de polvos que tiene un gran impacto en el mercado; el sinterizado de láser selectivo y la fusión selectiva con láser. Básicamente

los procesos de sinterizado por láser selectivo y fusión selectiva por láser son el mismo: La diferencia entre estos subprocesos radica en que la fusión selectiva por láser realiza una fundición completa del material para unir las capas, mientras que el sinterizado por láser selectivo realiza una fundición parcial de las partículas del material en polvo para realizar la unión entre las diferentes capas.

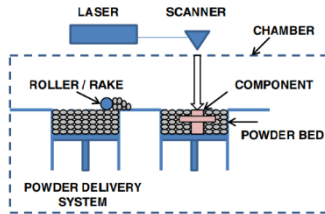


Figura 4. Esquemático de proceso de fusión de una cama de polvo. **Fuente:** (Frazier, 2014)

2.5. Manufactura de objetos laminados

Por medio de esta técnica es posible crear objetos tridimensionales por medio de una secuencia de cortes y laminaciones de una sección bidimensional. El proceso consiste en alimentar la máquina del material en lamina, por medio de comandos computacionales el láser es dirigido hacia el material trazando una sección con geometría específica hasta cortar el material (Generalmente esta geometría es rodeada por un cuadrado que también es cortado, para facilitar su separación al finalizar el proceso), Posteriormente la plataforma se desplaza hacia abajo, dejando un espacio para una próxima capa, el mecanismo de enrollado y desenrollado realiza un movimiento con el fin de dejar material sobre la sección anteriormente cortada, el rodillo caliente atraviesa la sección donde se está construyendo el objeto haciendo la suficiente presión para unir la capa cortada con la nueva sección que será cortada. Una nueva capa es cortada por medio del láser y el proceso se repite hasta obtener la pieza con la geometría diseñada. La figura 5 muestra el esquemático del proceso anteriormente descrito (Feygin, et al, 1991).

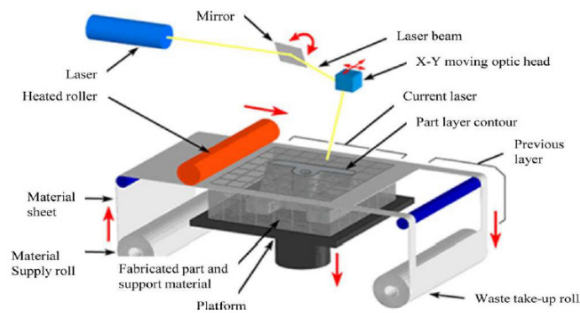


Figura 5. Esquemático de técnica de manufactura de objetos laminados. **Fuente:** (Ahn, et al. 2012)

2.6. Deposición directa de energía

El método de deposición directa de energía abarca una gran cantidad de procesos como lo son: Laser Engineered Net Shaping, fabricación directa por luz, deposición directa de metal, revestimiento laser 3D. Sin embargo, todos lo se basan en el mismo principio de fabricación y son comúnmente utilizados para reparar o agregar material a piezas previamente fabricadas, sin dejar a un lado la posibilidad de crear una pieza en su totalidad (Vignat, 2014) El proceso está

compuesto por un sistema de dosificación de material que se encuentra en forma de polvos o filamento. Un sistema de aplicación de energía directa (Laser, soldadura de plasma, vapor, gases ionizados, rayo de electrones, etc) que varía dependiendo del proceso en aplicación. Una plataforma de impresión.

El proceso consiste en ir depositando el material con un patrón en específico sobre la plataforma de extrusión, junto con un proceso paralelo en el cual se le aplica grandes cantidades energía provenientes de la fuente con el fin de ir derritiendo el material depositado y que de esta forma se vaya fusionando con el resto de las partículas de material (Thompson, et al. 2015) (Heigel, et al, 2015). En la figura 6 se muestra el esquemático de trabajo de estos procesos.

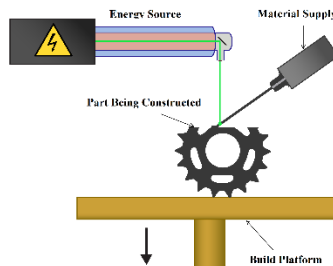


Figura 6. Esquemático de procesos por deposición directa de energía. **Fuente:** (Metal 3D Printing processes)

2.7. Inyección de materiales

En el proceso de inyección de material creado en 1984, las piezas en tres dimensiones son creadas haciendo uso de un cabezal de chorro de tinta móvil, que inyecta un fotorpolímero directo a una plataforma. Las gotas son inyectadas de una manera selectiva por medio de uno o más cabezales a través de dicha plataforma. La figura 7 muestra el esquemático de trabajo de la técnica de inyección de material (Calignano, et al. 2017). La técnica de deposición de gotas, permite la exactitud en el posicionamiento de las gotas, reduciendo los desperdicios de material. El material es curado mediante haces de luces ultra violeta capa tras capa de material.

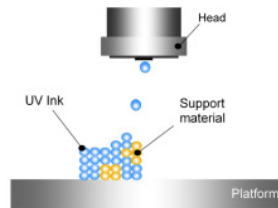


Figura 7. Esquemático de inyección de material. **Fuente:** (Calignano, et al. 2017)

Los materiales utilizados en este proceso presentan una viscosidad que permita la creación de gotas, como son los fotorpolímeros o las resinas de materiales. Para facilitar la inyección los materiales deben ser calentados o utilizar solventes con el fin de reducir su viscosidad. Por medio de esta técnica es posible imprimir diferentes materiales o colores, y se puede alcanzar una resolución del orden de 10-30 μ m, haciendo las capas apenas notables a la vista humana (Wohler Report, 2014).

3. Limitaciones de la Manufactura Aditiva

La empresa china distribuidora de impresoras 3D Anet 3D Printer (Print Quality Troubleshooting Guide) expone algunos de los errores más comunes durante los procesos de manufactura aditiva. Dentro de estos errores encontramos el exceso o déficits en la deposición del material, Este error se presenta debido a que los sistemas de impresión no cuentan con una forma de controlar que tanta cantidad de material que se deposita y la maquina deposita más o menos material de lo que el software de control espera. Otro error encontrado en los procesos de manufactura aditiva es el sobrecalentamiento, este error es frecuente cuando las temperaturas de calentamiento de material son demasiado altas, lo que conlleva a que la pieza se encuentre flexible por un tiempo prolongado, lo que puede ocasionar malformaciones en la geometría de las piezas. Uno de los problemas que más afecta a las piezas desarrolladas bajo este tipo de manufactura es el desplazamiento de capas, este problema se presenta debido a que las plataformas de impresión no cuentan con sistemas de control retroalimentado para la ubicación espacial de los componentes móviles del sistema, por lo cual una perturbación externa al sistema puede influir sobre dicha ubicación espacial del sistema de impresión y no quedara ubicado de la posición deseada.

4. Aplicaciones de sistemas de control en lazo cerrado a sistemas de manufactura aditiva

4.1. Intra-layer closed-loop control of build plan during directed energy additive manufacturing of Ti-6Al-4V

Este proyecto fue desarrollado por Pennsylvania State University y se basa en la creación de un sistema de control en lazo cerrado aplicado entre las capas de impresión de un sistema de impresión basado en la técnica de deposición directa de energía.

El objetivo de este sistema de control, es poder mantener la temperatura alrededor del punto donde se está aplicando la energía controlada, esto con el fin de mitigar los problemas de historial térmico, deformación térmica, micro fisuras y propiedades mecánicas de las piezas en fabricación (Nassar, et al. 2015).

4.2. Diseño y Construcción de una impresora 3D auto-replicable controlada inalámbricamente para el prototipado de piezas plasticas de bajo costo, mediante software libre: Software de concitación y control.

Es una tesis desarrollada en la Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador, cuyo objetivo es el control de una impresora 3D por medio de un computador que cuenta con software de plataforma libre al cual fueron adaptados sistemas de control y monitoreo inalámbrico, con el fin de que la impresora pudiese ser controlada de manera remota, evitando así la necesidad de tener un operario que junto a la maquina durante los procesos de impresión (Chancusi, et al, 2014).

4.3. Develop of a Supervision System: Towards Closing the Control Loop in 3D Printing Systems

Este proyecto se enfoca en supervisar y controlar la salida de material en una impresora 3D de Fabricación por Filamento Fundido, Dicha supervisión se realiza capturando imágenes de la boquilla de salida de material, con el fin de que estas imágenes sean analizadas mediante procesamiento de imágenes utilizando un software libre, este procesador de imágenes determina si hay un flujo de material constante durante las impresiones y en un caso contrario suspende temporalmente el proceso de fabricación (Rojas Arciniegas, et al, 2016).

4.4. Closed-Loop Control of a 3D printer Gantry

Es una tesis realizada fue realizada por estudiantes del Master of Science de la Universidad de Washington. Está enfocada en el uso de impresoras 3D de bajo costo y como principal objeto de estudio utilizaron la primera generación de la impresora Mbot Cube, sobre ella se realizaron estudios sobre las ventajas de la implementación de un sistema en lazo cerrado, para esto se implementaron sensores de tipo magnético que detectan los movimientos a lo largo de los eje X, Y y Z, esta información captada por los sensores es suministrada al controlador en lazo cerrado para modificar las ubicaciones espaciales de la impresora en caso de detectar errores. Este proceso está llevado a cabo por la plataforma IMC (Un micro-controlador programable que brinda la potencia, seguridad e interfaz necesaria para el control de los ejes con motores a pasos) como maestro que se encuentra comunicado con un controlador Teensy 3.1 para cada uno de los sensores (Weiss, 2014).

5. Propuesta a desarrollar

La mayoría de los sistemas de control en lazo cerrado aplicados en sistemas de manufactura aditiva desarrollados y encontrados hasta el momento son aplicados a una o dos variables en específico de del proceso de fabricación, especialmente en la retroalimentación de la ubicación espacial de los sistemas móviles y el flujo de material, dejando a un lado un sistema de control multivariable, es decir, un sistema de control que monitoree y retroalimente distintas variables involucradas en los procesos de impresión 3D, como temperaturas del ambiente, acabados superficiales, estándares de producción, dimensiones de las piezas, disponibilidad de material, tiempos de impresión, entre otros y de esta manera obtener sistemas más autónomos y confiables durante sus procesos de fabricación.

Uno de los retos de la manufactura aditiva es poder tener una retroalimentación de las diferentes variables del proceso, con el fin de tener un sistema de control a lazo cerrado y de esta manera garantizar un proceso óptimo durante la fabricación de las piezas, por esta razón se plantea el desarrollar un sistema de control multivariable en lazo cerrado para procesos de manufactura aditiva que permita obtener piezas de mejor calidad, acabado y especificaciones, en donde se integren diferentes estrategias de retro alimentación.

Esto con el objetivo de mitigar las problemáticas presentes dentro de los procesos, adicionando la capacidad de cumplir con mediciones e incertidumbres de producción, estándares de calidad, procesos de calidad, entre otros y de esta manera, cambiar el uso de las piezas producidas por métodos de manufactura aditiva como prototipos, convirtiéndolos en productos para los diferentes sectores del conocimiento y del consumo diario.

6. Referencias

- Ahn, Daekeon, Jin-Hwe Kweon, Jinho Choi, and Seokhee Lee. (2012). "Quantification of Surface Roughness of Parts Processed by Laminated Object Manufacturing." *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 212. pp. 339–46.
- Calignano, Flaviana, Diego Manfredi, Elisa Paola Ambrosio, Sara Biamino, Mariangela Lombardi, Eleonora Atzeni, Alessandro Salmi, Paolo Minetola, Luca Iuliano, and Paolo Fino. (2017). "Overview on Additive Manufacturing Technologies." *Proceedings of the IEEE* Vol. 105, No. 4. pp. 593–612.
- Chancusi, S. and P. Navarrete. (2014). "Diseño Y Construcción de Una Impresora 3D Auto-Replicable Controlada Inalámbicamente Para El Prototipado de Piezas Plásticas, Mediante Software Libre." *Departamento Deficiencias de La Energía y Mecánica. Ingeniería Mecatrónica*.
- Do, Truong, Patrick Kwon, and Chang Seop Shin. (2017). "Process Development toward Full-Density Stainless Steel Parts with Binder Jetting Printing." *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Vol. 121. pp. 50–60.
- "FDM Setup [243]. | Download Scientific Diagram." Retrieved November 1, 2018a (https://www.researchgate.net/figure/FDM-setup-243_fig5_321702417).
- Feygin, M. and B. Hsieh. 1991. "Laminated Object Manufacturing: A Simpler Process." *Proceedings of the 2nd Solid Freeform Fabrication Symposium (SFF)* 0. pp. 123–30.
- Frazier, William E. (2014). "Metal Additive Manufacturing: A Review." *Journal of Materials Engineering and Performance*. Vol. 23 No .6. pp. 1917–28.
- Gardan, Julien. (2015). "Additive Manufacturing Technologies: State of the Art and Trends." *International Journal of Production Research* 7543. pp. 1–15.
- Gibson, Ian, David Rosen, and Brent Stucker. n.d. *Additive Manufacturing: Technologies 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. (2015) Second. New York: Springer.
- Heigel, J. C., P. Michaleris, and E. W. Reutzel. (2015). "Thermo-Mechanical Model Development and Validation of Directed Energy Deposition Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V." *Additive Manufacturing*. Vol. 5. pp. 9–19.
- Hull, C. W. and C. Arcadia. (1984). "Us4575330a." (19).
- ISO/ASTM. (2015). *ISO/ASTM 52900: Additive Manufacturing-General Principles-Terminology*.
- Khudyakov, Igor V. (2018). "Fast Photopolymerization of Acrylate Coatings: Achievements and Problems." *Progress in Organic Coatings*. Vol. 121. pp. 151–59.
- Melchels, Ferry P. W., Jan Feijen, and Dirk W. Grijpma. (2010). "A Review on Stereolithography and Its Applications in Biomedical Engineering." *Biomaterials*. Vol. 31. No. 24. pp. 21–30.

- “Metal 3D Printing Processes - Directed Energy Deposition (DED).” Retrieved November 1, 2018b (<https://news.3deo.co/metal-3d-printing-processes-directed-energy-deposition-ded>).
- Nassar, Abdalla R., Jayme S. Keist, Edward W. Reutzel, and Todd J. Spurgeon. (2015). “Intra-Layer Closed-Loop Control of Build Plan during Directed Energy Additive Manufacturing of Ti-6Al-4V.” *Additive Manufacturing* Vol. 6. pp. 39–52.
- “Print Quality Troubleshooting Guide.” Retrieved June 14, 2019c (<https://www.simplify3d.com/support/print-quality-troubleshooting/>).
- Radharamanan, R. (2017). “Additive Manufacturing in Manufacturing Education: A New Course Development and Implementation.” *124th ASEE Annual Conference and Exposition 2017*-June.
- Rojas Arciniegas, A. J. and J. C. Amaya Hurtado. (2016). “Development of a Supervision System: Towards Closing the Control Loop in 3D Printing Systems.” *32nd International Conference on Digital Printing Technologies, NIP 2016* 2016:221–26.
- Thompson, Scott M., Linkan Bian, Nima Shamsaei, and Aref Yadollahi. (2015). “An Overview of Direct Laser Deposition for Additive Manufacturing; Part I: Transport Phenomena, Modeling and Diagnostics.” *Additive Manufacturing*. Vol. 8. pp. 36–62.
- Vignat, Frédéric. (2014). “Additive Manufacturing Technologies State of the Art.” *54(November):18–32*.
- Weiss, B. J. (2014). “Closed_loop Control of a 3D Printer Gantry.”
- *Wohlers Report (2014)–3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry, Annual Worldwide Progress Report*. Cary, NC, USA.
- Wohlers, T. T. (2011). *Wohlers Report 2011: Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report* Title. Fort Collins, CO, US: Wohlers Associates, Inc.
- Xu, Xin, Nicolas Perry, and Yaoyao Fiona Zhao. (2014). “Energy and Material Flow Analysis of Binder-Jetting Additive Manufacturing Processes.” *Procedia CIRP*. Vol. 15. pp.19–25.

Sobre los Autores

- **Francisco José Mercado Rivera:** Ingeniero Mecatrónico. Estudiante de Doctorado en Ingeniería de la Universidad Autónoma de Occidente. francisco.mercado@uao.edu.co
- **Álvaro José Rojas Arciniegas:** Ingeniero Mecatrónico. Master en Ingeniería Industrial. Master en Sistemas de Ingeniería y emprendimiento empresarial. Doctor en Ciencias de la Imagen del Rochester Institute of Technology. Profesor Asociado de la Universidad Autónoma de Occidente. ajrojas@uao.edu.co

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)