Mejora en la calidad de las piezas fabricadas mediante impresión 3D por depósito fundido mediante el ajuste eficiente de parámetros de impresión: una revisión

Improving the quality of parts manufactured by fused deposition 3D printing through efficient adjustment of printing parameters: a review

Yoloxóchitl Adela Torres Carrillo.[*]
Alfredo Toriz Palacios.[†]

Resumen

La manufactura aditiva o impresión 3D ha cobrado importancia en años recientes para la fabricación de prototipos funcionales, parte de este auge obedece a la rapidez de manufactura desde el diseño hasta la pieza culminada, significando un ahorro en tiempo y su correspondiente monetario, sin embargo, para el uso de las partes manufacturadas como parte de un diseño funcional se requiere que cada pieza elaborada sea una pieza de calidad, y esta se repita en cada impresión del mismo tipo. Para alcanzar el objetivo de la mejora en la calidad de piezas fabricadas mediante esta metodología se ha realizado una revisión de la literatura existente, permitiendo plantear los trabajos pendientes en el área y las posibles líneas de investigación a seguir para hacer más eficiente la obtención de los parámetros de impresión adecuados para cada pieza.

Palabras Clave: impresión 3D, manufactura aditiva, depósito fundido, parámetros de impresión

Abstract

[*] Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. yoloxochitladela.torres@upaep.edu.mx
[†] Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla. alfredo.toriz@upaep.mx

Additive manufacturing or 3D printing has gained importance in recent years for the manufacture of functional prototypes, part of this boom is due to the speed of manufacturing from the design to the finished part, meaning a saving in time and its corresponding monetary, however, for the use of the manufactured parts as part of a functional design it is required that each part produced to be a quality part, and this is repeated in each print of the same type. In order to achieve the objective of improving the quality of parts manufactured by this methodology, a review of the existing literature has been carried out, allowing us to propose the pending work in the area and the possible lines of research to follow in order to make more efficient the obtaining of the adequate printing parameters for each part.

Keywords: 3D printing, additive manufacturing, fused deposition model, printing parameter.

1 Introducción

En años recientes la investigación en México en campos diversos ha buscado integrarse a la solución de necesidades específicas tanto en la industria como en el ámbito público o gubernamental, áreas como la electrónica, control y mecatrónica no pueden estar exentas de ello. Para la validación de las contribuciones científicas y tecnológicas en estas áreas generalmente es necesario el modelado, análisis y fabricación de prototipos funcionales, ya sea para el engranaje de un sistema de control, la aleta de un vehículo aéreo no tripulado, la perilla de un simulador de vuelo o el alojamiento para los componentes electrónicos de un dispositivo de comunicación portátil, la manufactura aditiva se ha vuelto cada día más común para la implementación de prototipos, tal como lo mencionan Sánchez y Lira (2020) el poder crear rápidamente un producto innovador, que permita el rediseño constante hasta obtener un desempeño óptimo en la función para la cual se diseñó, ha logrado la predilección de la impresión 3D sobre otros procesos de manufactura.

Se define como manufactura aditiva al proceso de unión de materiales para fabricar objetos a partir de datos de modelos tridimensionales (3D), normalmente capa a capa, a diferencia de las metodologías de fabricación tradicionales como el mecanizado o la fundición. Huang, Y. *et al.*,

(2015) Comúnmente conocida como "impresión 3D", la manufactura aditiva puede utilizar materiales metálicos, plásticos, cerámicos, compuestos o biológicos. Como ventajas de esta tecnología sobre otros procesos de fabricación pueden mencionarse la facilidad de fabricación bajo demanda, adaptación, personalización y poca o nula herramienta extra para su fabricación. Este proceso también reduce la cantidad de residuos por fabricación, así como tiempos de manufactura y costos. La Fig. 1 muestra el proceso que se sigue en el diseño y manufactura de una pieza en impresora 3D.

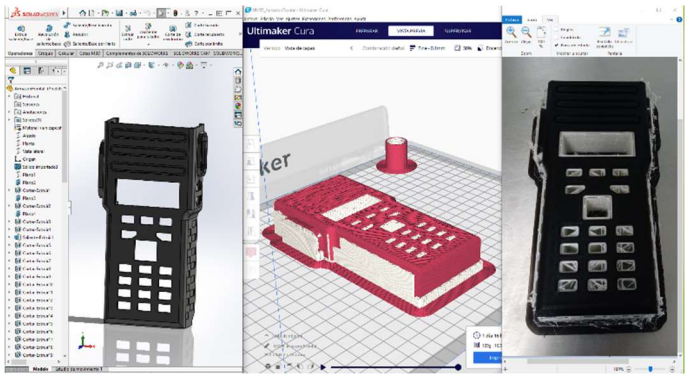

Fig. 1 Proceso de Diseño y fabricación por manufactura aditiva. Diseño, segmentación para manufactura, Impresión 3D

Los procesos de manufactura aditiva permiten la libertad de diseño en los aspectos de complejidad de la forma, la complejidad del material y la complejidad funcional, así como oportunidades de proceso en los aspectos de fabricación y montaje. Yang, S., Zhao, Y.F (2015) Sin embargo, es esta misma libertad en el diseño y procesos de manufactura aditiva que hacen evidentes algunos problemas al seleccionar la impresión 3D como método de manufactura. Entre estos se puede mencionar la dificultad para adaptar un modelo CAD originalmente diseñado para una manufactura tradicional.

La impresión 3D importa la geometría de un archivo CAD a instrucciones de máquina, la forma más común de hacerlo es mediante un archivo STL que permite interpretar la geometría como un conjunto de trazos y trayectorias.

Si bien, la manufactura aditiva se ha vuelto muy popular en la generación de prototipos, aún tiene diferentes retos para lograr un producto de calidad que permita emplear una impresión 3D como parte de un prototipo funcional o una pieza final, uno de ellos es la trayectoria generada, pues generalmente la construcción de la pieza se basa en una trayectoria capa por capa hasta cubrir por completo la geometría de la pieza a manufacturar. Un problema que trae consigo, es la anisotropía estructural y mecánica, la cual suele reducirse seleccionando adecuadamente la orientación de la pieza a imprimir.

Las limitaciones de la impresión 3D como el tamaño de la herramienta de impresión, discontinuidad del filamento, dirección de construcción, soporte de la pieza, discontinuidad En el patrón de impresión, inducen errores de impresión como porosidad de la pieza, soportes embebidos en la pieza, lo cual conduce a un pobre acabado e incremento en el uso de material y tiempo de fabricación.

Las modificaciones en el proceso de manufactura indicen en la calidad de la pieza fabricada, es por ello que, en la literatura, se hace hincapié en la necesidad de optimizar el proceso y los parámetros de impresión. Parámetros como ángulo de la trama, dirección de construcción, dimensión de la capa, son algunos parámetros que pueden optimizarse.

Garg *et al.* (2015) emplea inteligencia artificial para la optimización de las capas de impresión 3D de metal relacionando los parámetros del proceso con resultados físicos y estructurales.

En Guessasma *et al.* (2015) se considera la optimización en algunos puntos del proceso de manufactura para contribuir a la obtención de una pieza de mayor calidad. Los puntos a considerar son:

- Geometría del CAD
- Generación adecuada de rutas
- Selección del proceso de manufactura
- Resolución del proceso
- Propiedades de los materiales
- Material de soporte

Durante el diseño e impresión de piezas para prototipos funcionales se ha observado que las piezas elaboradas son pocas veces repetibles en características como apariencia, dureza, porosidad, que cada impresora, a pesar de tener la misma configuración de impresión para un material del mismo tipo, ofrece diferentes resultados.

Guessasma *et al.* (2015) menciona como parte de sus conclusiones, que, si bien existen una serie de trabajos enfocados a la optimización del proceso de manufactura aditiva, es un trabajo pendiente el abordar la optimización de la manufactura aditiva tomando como variantes las características físicas del material de impresión. Li, S. *et al.* (2020) propone establecer una correlación entre los parámetros relacionados con el proceso y las propiedades mecánicas de los

materiales impresos, implementando además dicha correlación para la optimización del proceso y la optimización de la topología mediante un algoritmo basado características como la rigidez del material.

Ante la falta de un trabajo que de claridad sobre de un procedimiento certero para obtener los parámetros para alcanzar una impresión óptima para cada material empleado, se plantea la necesidad de obtener un algoritmo que calcule los valores óptimos de las variables que inciden en el proceso de manufactura para hacer controlable la calidad de la pieza fabricada y en consecuencia repetible. Entre tales variables podemos encontrar temperatura del extrusor, temperatura de la cama de impresión, velocidad de impresión, relleno de la pieza, temperatura y humedad del ambiente, disposición u orientación de la pieza en la cama de impresión.

La impresión 3D ha contribuido significativamente al dinamismo de los procesos de fabricación actual. El concepto de la impresión 3D fue desarrollado inicialmente por Charles W. Hull en la década de 1980 como herramienta de estereolitografía para fabricar objetos básicos de polímero. En la actualidad, este proceso se utiliza para fabricar componentes complejos de aviones y automóviles.

1.1 Clasificación de la Manufactura Aditiva

La manufactura aditiva ha modificado su tecnología a través de los años, de acuerdo Srivatsan, T. S. (2015) la clasificación de las tecnologías de AM se basa en las materias primas que se utilizan en el proceso. Esta clasificación se divide en tres grupos principales: Sistemas basados en líquidos, Sistemas a base de polvo y Sistemas de base sólida, tal clasificación se muestra en la Fig. 2

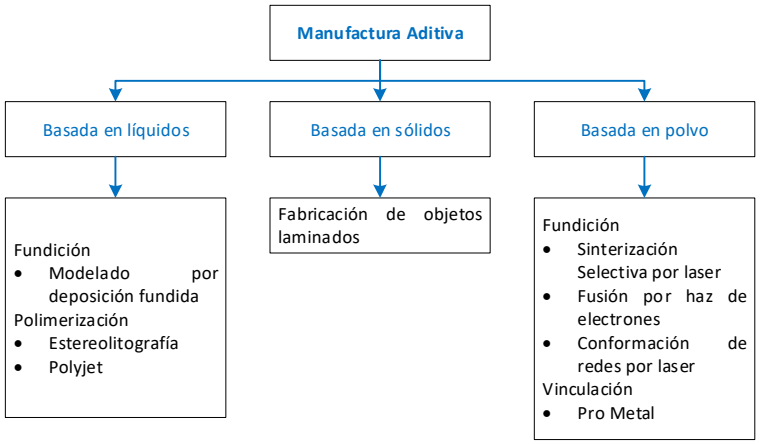

Fig. 2 Clasificación de Tecnologías de Manufactura aditiva (Adaptada de Srivatsan, T. S. (2015))

Las técnicas representativas de manufactura aditiva basadas en líquidos incluyen la fundición y la polimerización. En la polimerización, se utiliza una luz ultravioleta (UV) para curar o endurecer la resina de fotopolímero donde se requiere, mientras que una plataforma desplaza el objeto a imprimir hacia arriba o hacia abajo después de cada una nueva capa. Un ejemplo de este proceso es la estereolitografía. En el proceso de fundición, las gotas o finos hilos de material de construcción se depositan selectivamente.

Una técnica de manufactura aditiva basada en sólidos es la fabricación de objetos laminados (LOM), une láminas de materiales para formar la pieza.

Las técnicas de AM basadas en el polvo utilizan la energía térmica focalizada como el láser, el haz de electrones o el arco de plasma, para fusionar el material de impresión. Un ejemplo de este proceso es la sinterización laser.

La metodología más accesible para consumo general y con una gama más amplia de materiales es la manufactura basada en líquidos, concretamente el proceso por fundición o

modelado por depósito fundido. Por tal motivo, la revisión sobre los trabajos de investigación existentes se orienta al uso de esta metodología de impresión.

Al igual que las tecnologías de impresión 3D, los materiales de impresión 3D también pueden separar en categorías. La mayoría de los materiales de impresión 3D pueden separarse en dos grupos: polímeros y metales. nos permite visualizar la clasificación de los materiales empleados en manufactura aditiva.

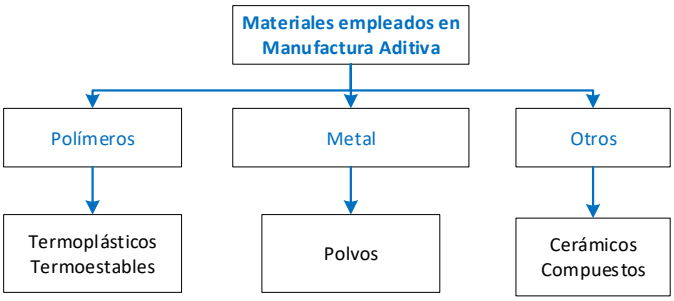

Fig. 3 Clasificación de materiales empleados en manufactura aditiva

Los polímeros en la impresión 3D se dividen generalmente en dos categorías: termoplásticos y termoestables, se diferencian principalmente en su comportamiento térmico. Los termoplásticos pueden fundirse y solidificarse una y otra vez sin perder sus propiedades y a diferencia de los termoplásticos, los termoestables no se funden. A diferencia de los polímeros, que se utilizan en diversas formas (filamentos sólidos polvo, resinas), la impresión 3D en metal utiliza casi exclusivamente polvos.

La impresión en metal permite fabricar piezas de alta calidad, funcionales y con capacidad de carga de alta calidad, funcionales y con capacidad de carga, a partir de una gran variedad de polvos metálicos.

Algunas tecnologías de impresión 3D utilizan materiales cerámicos (normalmente un polímero relleno de polvo cerámico) o compuestos (filamentos picados rellenos de carbono o polvo de metal y nailon), los cuales tienen mayor resistencia al desgaste que materiales plásticos.

El uso de la manufactura aditiva incluye campos diversos como la enseñanza a diferentes niveles, el prototipado de piezas funcionales, la medicina en el diseño de prótesis y férulas, la construcción para la creación desde maquetas hasta edificios. Ene l arte se emplea para la creación de piezas originales o la recreación de arte que se desea proteger, también es creciente su uso en la industria alimenticia con maquinas especiales cuyo material de impresión es comestible, sobre todo en el área de repostería.

La industria militar no puede escapar a esta tecnología pues ella permite el modelado y prototipado de partes desde piezas de refacción con rapidez para sus vehículos, ya sean terrestres, barcos, aviones, hasta prototipo de nuevas propuestas tecnológicas.

2 Parámetros Involucrados

De acuerdo a Redwood (2018) antes de manufacturar una pieza mediante impresión 3D, es necesario realizar algunas consideraciones, de manera similar a como ocurre con otras metodologías de fabricación algunas de ellas son la altura de capa, la contracción de material, el uso de soportes

La manufactura aditiva resulta de interes tanto para la investigación como para la industria puesto que permite la fabricación de piezas complejas sin la necesidad de un molde, lo que reduce significativamente su precio, a ello se suma, la diversidad de materiales que pueden emplearse en este tipo de procesos, algunos d elos cuales son incluso materiales reciclables o biodegradables, según refiere Carvajal, M.J. *et al.* (2019).

Sin embargo, la calidad y propiedades mecánicas de la pieza obtenida mediante un proceso de manufactura aditiva está relacionada con diversos parámetros que intervienen en el proceso de impresión tal como se muestra en la Fig. 4. La incidencia de estas variables sobre el acabado y las propiedades mecánicas de la pieza final requieren ser estudiados para obtener las condiciones óptimas durante el proceso de impresión

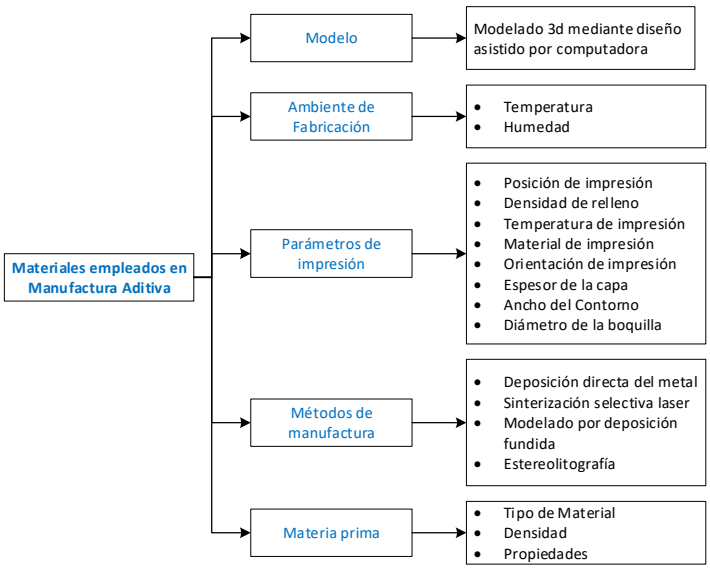

Fig. 4 Parámetros que inciden en la calidad de la pieza obtenida mediante manufactura aditiva (Adecuado de Carvajal, M. J. *et al.* (2019))

En años recientes se ha explorado el potencial de la manufactura aditiva dentro de diversos campos como la educación, la investigación, desarrollo y la industria, a través de diseños novedosos particularizados para cubrir necesidades específicas del usuario que antes resultaba difícil de implementar debido a los costos, tiempos y a la propia capacidad de otros procesos de manufactura empleados, sin embargo, existen diferentes puntos que impiden su adopción más amplia. Como se menciona en Chee Kai Chua *et al* (2017), uno de los obstáculos más importantes es la cualificación de las piezas elaboradas mediante manufactura aditiva. Diseñadores, fabricantes

y usuarios no tienen la confianza y la certeza de que las piezas fabricadas mediante este proceso mostrarán una calidad y fiabilidad constantes entre impresoras, e incluso empleando la misma impresora, no existe la certeza de repetibilidad en la calidad del producto generado.

Tal situación lleva a reevaluar el procedimiento de fabricación mediante impresión 3D. Un paso importante dentro del control de calidad ha sido el analizado por órganos de normalización como la American Society for Testing and Materials (ASTM) y la Organización Internacional de Normalización (ISO), quienes están trabajando para desarrollar normas para la manufactura aditiva.

Sin embargo, dentro de este proceso de diseñar y posteriormente implementar un diseño mediante el uso de manufactura aditiva, ya sea como un prototipo para validación de forma, espacio, aspecto o como un prototipo funcional es importante establecer la relación que guardan los parámetros de impresión, los materiales empleados y la selección en la orientación de impresión en la obtención de un producto de calidad mediante un proceso controlable y repetible.

3 Metodologías de Optimización

Los diferentes parámetros en el proceso de fabricación mediante manufactura aditiva, tales como densidad, patrón de relleno, temperatura de extrusión, afectan el diseño, calidad, funcionalidad y propiedades mecánicas de la pieza resultante.

La diversidad de variables involucradas en el proceso de impresión, así como el rango de valores que estos pueden asumir, obliga a acotar la revisión a la impresión mediante la técnica de modelado por depósito fundido (FDM) o comúnmente conocida como impresión mediante filamento, y el material a considerar es el uso de termoplásticos.

En el ámbito de los termoplásticos, se han efectuado investigaciones en las cuales se asemeja a la impresión mediante filamento a estructuras laminadas, por lo cual se caracterizan mediante mecánica de laminados como lo plantea L. Li, Q. Sun (2002), C. Casavola (2016), incluso, en algunos artículos como en M. Somireddy, *et al.* (2019, 2020), S. Bhandari, *et al.* (2020), Y. Zhao, *et al.* (2019) y P.K. Mishra, *et al.* (2020) se abordan las fallas que pueden observarse en las capas formadas mediante la extrusión, mediante criterios de fallo de laminados, lo cual permite caracterizar materiales y se plantea que las características de las piezas finales se rige por la orientación de la pieza de impresión, que permite generar una estructura de capas diferente que en combinación con el orden de impresión pueden mejorar las características estructurales de las piezas

Si bien, la calidad de las piezas fabricadas en ocasiones se mejoran mediante técnicas de postprocesamiento de la pieza, esto no puede mejorar la calidad estructural del producto, por ello, Yadav, D, *et al.* (2019) ha planteado el uso de redes neuronales para mejorar la calidad estructural de la pieza fabricada, así como su rugosidad superficial, para ello primeramente se elaboraron pipetas de prueba de diferentes materiales como ABS, PETG y la combinación de estos , variando la densidad de relleno, y la temperatura de impresión, posterior a ello, se analizó su resistencia a la tracción.

De manera análoga, Deswal, S., *et al.* (2019), hace uso de la misma propuesta de uso de redes neuronales, pero desde un enfoque no estructural o de calidad en la superficie, sino en la búsqueda de minimizar las variaciones que existente entre la pieza modelada y la pieza fabricada, para ello, se han tomado en consideración otros parámetros como el grueso de la línea de impresión, la orientación de la pieza y la cantidad de líneas de filamento empleadas en la

construcción del perímetro de la pieza. La Fig. 5 muestra los parámetros a variar durante la impresión de muestras.

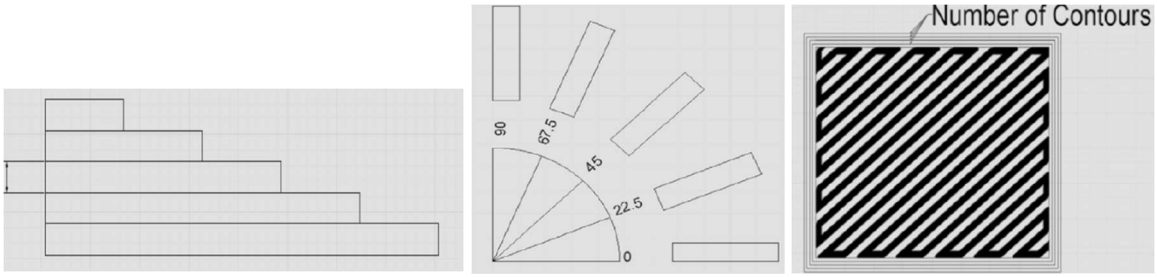

Fig. 5 Parámetros de impresión considerados. Espesor de capa (izquierda) orientación de impresión (centro) y cantidad de líneas de contorno (derecha) Imágenes obtenidas de Deswal, S., *et al.* (2019).

La consideración de estos parámetros como entradas a la red neuronal, arrojó la combinación optima de valores para disminuir la variación de magnitud entre la pieza diseñada y la pieza fabricada.

Estas investigaciones permiten observar con claridad las modificaciones que sufre una pieza impresa en 3D ante la modificación de diferentes parámetros. Sri-Amphorn, P., *et al.* (2020) muestra en su investigación como la densidad seleccionada de impresión incide directamente en el coeficiente de elasticidad o módulo de Young, por ejemplo, piezas impresas al 100% tienen un módulo de Young más elevado que piezas con un porcentaje menor. Para poder llegar a tal conclusión, se imprimieron piezas en ABS, PLA, y materiales combinados, variando su densidad y velocidad de impresión. Una vez obtenidas las piezas, estas fueron sometidas a pruebas de tracción, flexión, impacto, compresión y dureza. Esta investigación, también concluye la influencia de la velocidad de impresión en las características mecánicas de la pieza final. La **Fig.** 6 muestra los resultados obtenidos para muestras impresas en PLA

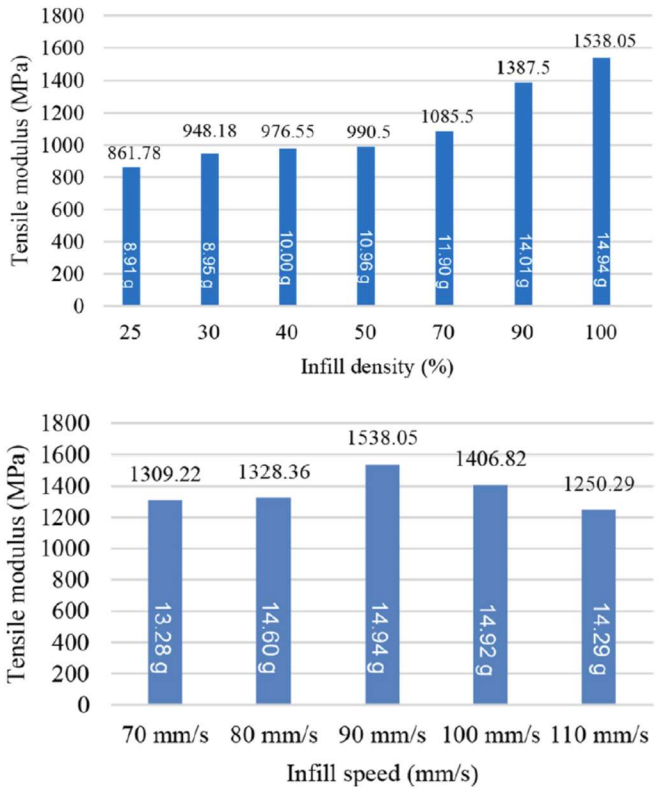

Fig. 6 Relación entre la tracción y la densidad de relleno, material PLA (izquierda). Relación entre la velocidad de impresión y la tracción de la pieza, material PLA (derecha). Gráficos obtenidos de Sri-Amphorn, P., *et al.* (2020)

El uso de redes neuronales, no ha sido el único método mediante el cual se ha buscado mejorar la calidad del producto generado. Diversos trabajos hacen mención del método de Taguchi de arreglo ortogonal para identificar valores de parámetros óptimos de acuerdo a un material específico de prueba. Nidagundi, V. B., *et al.* (2015) Los diseños de Taguchi reconocen que no todos los factores que causan variabilidad pueden ser controlados. Estos factores que no se pueden controlar se denominan factores de ruido. El método Taguchi proporciona una metodología eficiente para la optimización del diseño la cual gira en torno al uso de un arreglo ortogonal para las variables de control conocido como arreglo interno, ejemplo de estas variables o factores de control están la configuración de un equipo, el material utilizado para hacer un producto o las características de diseño de un producto. El otro arreglo ortogonal corresponde a las variables de

ruido (arreglo externo) que son parámetros de proceso o diseño difíciles o costosos de controlar durante la manufactura como la temperatura ambiente o la humedad. Ambos arreglos se cruzan para formar uno solo arreglo entrelazado de variables. El enfoque Taguchi hace énfasis en la apropiada selección de niveles de factores de control con el objeto de minimizar la variabilidad transmitida por los factores de ruido y de esta manera generar un producto o proceso robusto, lo cual permite la simplificación del plan experimental y viabilidad del estudio de la interacción entre varios parámetros del proceso. Taguchi propone un plan experimental en términos de matriz ortogonal que da diferentes combinaciones de parámetros y sus niveles para cada experimento. Para Nidagundi, V. B., *et al.* (2015) son tres los parámetros de proceso importantes: el grosor de la capa, el ángulo de orientación de la pieza y el ángulo de llenado, para estudiar sus efectos sobre características de respuesta como la resistencia a la tracción, la precisión dimensional, la rugosidad superficial y el tiempo de fabricación. La Fig. 7 muestra los parámetros a consideran en el estudio

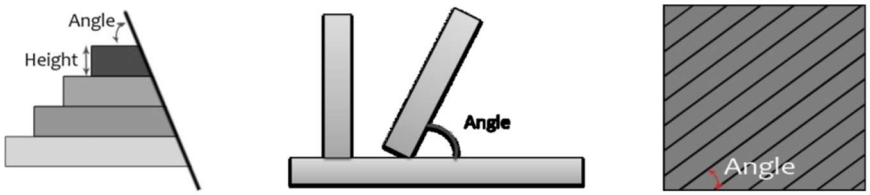

Fig. 7 Parámetros a optimizar Grueso de capa (izquierda), Orientación de la pieza (centro), ángulo de relleno (derecha). Imágenes obtenidas de: Nidagundi, V. B., et al. (2015)

Hablar de mejora en el producto obtenido mediante impresión 3D puede resultar ambiguo, puesto que existen parámetros diversos a modificar cuya importancia adquiere mayor o menor relevancia dependiendo de la aplicación de la pieza fabricada Dey & Yodo, (2019) realizan una revisión del estado del arte al 2019, donde se enlistan los parámetros comúnmente analizados en las investigaciones como orientación de construcción, geometría, temperatura de impresión, densidad, patrón de relleno, grueso de capa, velocidad de impresión o tipo de material, ello con la

finalidad de mejorar alguna característica específica de la pieza fabricada, también en ese año, Jaisingh Sheoran, A, *et al.* (2019) efectúa una revisión de artículos a la fecha en el área de manufactura aditiva, concretamente mediante depósito fundido o uso de filamentos termoplásticos, resumiendo en un listado los parámetros comúnmente modificados para observar cambios en la calidad de impresión de una pieza fabricada. La Tabla **1** muestra el listado de parámetros modificables durante la manufactura aditiva mediante filamento, resultado de la revisión de Jaisingh Sheoran, A.

Tabla 1 Listado de parámetros modificables durante la impresión 3D mediante filamento Obtenido de Jaisingh Sheoran, A, *et al.* (2019)

Núm.	Parámetro	Descripción
1	Grosor de la capa	Es la altura (o el grosor) de las capas depositadas tras la extrusión desde la punta de la boquilla, medida a lo largo de la dirección Z (o la dirección vertical de la máquina FDM). Suele ser menor que el diámetro de la punta de la boquilla del extrusor. Depende de: 1) El diámetro de la boquilla del extrusor. 2) El material
2	Orientación de la construcción	Es la forma en que la pieza se posiciona dentro de la plataforma de construcción con respecto a la dirección X, la dirección Y o la dirección Z de la impresora y también el ángulo de orientación en el que se imprimirá la pieza
3	Ángulo de trama/ Orientación de trama	Es el ángulo (dirección) con respecto a la dirección X de la plataforma de construcción, en la que se deposita el material extruido. Es el ángulo de la trama medido con respecto al eje X. Normalmente, el ángulo de la trama varía de 0 a 90
4	Espacio de aire	La distancia (o brecha) entre 2 trayectorias adyacentes en una sola capa de impresión
5	Temperatura de extrusión	La temperatura a la que se calienta el filamento termoplástico dentro de la boquilla antes de la extrusión en el proceso por depósito fundido. Este parámetro depende de la velocidad de impresión y del tipo de material termoplástico que se imprima
6	Velocidad de impresión	Es la velocidad de la punta de la boquilla que se desplaza en el plano XY de la plataforma de construcción para depositar el material
7	Patrón de relleno	El patrón en el que se deposita el material para formar la estructura interna de la pieza impresa con FDM es el patrón de relleno. Los patrones de relleno comúnmente utilizados son el diamante, la cruz, el hexagonal y los patrones de relleno lineales]. El patrón de relleno hexagonal tiene una mayor capacidad de resistencia a la carga mecánica que otros patrones de relleno.
8	Densidad de relleno / porcentaje de relleno	Las capas exteriores de las piezas impresas con depósito fundido suelen ser sólidas, pero la estructura interior no es necesariamente sólida, sino que puede ser escasa y de relleno, tamaños y formas diferentes. Por lo tanto, la densidad del relleno implica la solidez de la estructura interna de la pieza impresa.
9	Diámetro de la tobera	Diámetro de la punta de la boquilla del extrusor
10	Anchura de la trama	Es la anchura de los granos depositados a lo largo de la trayectoria de la herramienta de extrusión (que forma la trama). Depende principalmente del diámetro de la punta de la boquilla del extrusor
11	Número de capas de contorno	Es el número de capas exteriores sólidas que rodean el patrón de relleno interno (o estructura interna) de la pieza impresa
12	Ancho de contorno	El grosor de las capas exteriores (capas de contorno) que rodean la estructura interna
13	Espacio de aire contorno a contorno	Es la distancia o espacio de aire entre las capas exteriores sólidas (o contornos)

Si bien, existe gran cantidad de literatura, cuya investigación se centra en tomar los parámetros de impresión como variables de entrada de un sistema a controlar, obteniendo como salida la mejora en la calidad de impresión, Carlier, E., *et al.* (2019) proponen en su trabajo de investigación, mejorar la calidad del producto haciendo modificaciones al material termoplástico a emplear, en este caso el material empleado para la investigación fue PLA. El interés en esta investigación en mejorar la impresión reside en el uso clínico que puede darse a piezas impresas, por lo que, resulta relevante el control sobre la flexibilidad del material de impresión. En su estudio se demuestra que la adición de ATEC (citrato de acetilo) reduce la rigidez del PLA y la adición de TA (triacetina) promueve una mejor adhesión entre capas. Además, la rigidez del material también puede ser modulada por la elección de los parámetros y la orientación de la impresión.

Existen diferentes metodologías enfocadas a la mejora de piezas impresas en 3d mediante depósito fundido, un resumen de tales metodologías se muestra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** como resultado de la investigación de Jaisingh Sheoran, A.

Tabla 2 Tipos de Experimentos diseñados para mejora de características de piezas impresas en 3D. Obtenido de Jaisingh Sheoran, A, *et al.* (2019)

Optimización, técnica y método	Precisión de la predicción	Objetivo de optimización	¿Se requiere un modelo matemático?	Enfoque en el que se obtiene la solución óptima	Modelo dinámico (lineal o no lineal)	Grado de exigencia de los datos necesarios para un determinado resultado	Capacidad para encontrar la interacción entre variables	Dificultad para entender el proceso de la técnica
Algoritmo genético (GA)	Alta	Posible	No requerido	Directamente	Dinámica lineal y no lineal	Mayor alcance	No es posible	Comparativamente mayor dificultad
Redes neuronales artificiales (ANN)	Superior	Posible	Requerido	A través del modelo matemático simulado	Dinámica lineal y no lineal	Mayor alcance	No es posible	Dificultad media
Método de diseño factorial	Moderada	No es posible	Requerido	Directamente	Solo dinámica lineal	Alcance moderado	Posible	Fácil
Método de un factor a la vez (OFAT)	Baja	No es posible	No requerido	Directamente	Solo dinámica lineal	Mayor alcance	Posible	Fácil
Lógica difusa	Alta	Posible	Requerido	A través del modelo matemático simulado	Dinámica lineal y no lineal	Mayor alcance	Posible	Comparativamente mayor dificultad
Método de diseño de Taguchi	Baja	No es posible	No requerido	Directamente	Solo dinámica lineal	Alcance moderado	Posible	Menor dificultad
Análisis relacional de Gray	Moderada	Posible	No requerido	Directamente	Solo dinámica lineal	Alcance moderado	Posible	Menor dificultad

Optimización, técnica y método	Precisión de la predicción	Objetivo de optimización	¿Se requiere un modelo matemático?	Enfoque en el que se obtiene la solución óptima	Modelo dinámico (lineal o no lineal)	Grado de exigencia de los datos necesarios para un determinado resultado	Capacidad para encontrar la interacción entre variables	Dificultad para entender el proceso de la técnica
Método de respuesta a la superficie (RSM)	Muy alta	Posible	Requerido	A través del modelo matemático simulado	Dinámica lineal y no lineal	Menor alcance	Posible	Dificultad media
Método de grupo de tratamiento de datos (GMDH)	Alta	Posible	Requerido	A través del modelo matemático simulado	Dinámica lineal y no lineal	Mayor alcance	Posible	Dificultad media
Optimización de búsqueda de bacterias (BFO)	Alta	Posible	Requerido	A través del modelo matemático simulado	Dinámica lineal y no lineal	Mayor alcance	Posible	Comparativamente mayor dificultad
Optimización de enjambre de partículas (PSO)	Muy alta	Posible	Requerido	A través del modelo matemático simulado	Dinámica lineal y no lineal	Mayor alcance	Posible	Comparativamente mayor dificultad

Sin embargo, aún con la claridad de los parámetros involucrados, y las metodologías existentes, las características a mejorar, también se diversifican, y van desde la precisión entre el diseño y la impresión, la rugosidad de la superficie, resistencia a la tracción, resistencia a la compresión o flexibilidad.

4 Conclusiones

En muchos casos en la industria, la obtención de una pieza con mayor calidad de acuerdo al resultado útil para su aplicación, es consecuencia del ensayo y la experimentación, con esta revisión es observable que debe abordarse mediante la investigación una metodología que permita disminuir la cantidad de pruebas de impresión necesarias antes de llegar a un producto que de acuerdo a el uso que se espera se considere adecuado. También queda de manifiesto que las vertientes de una investigación pueden ser muchas, por ello es necesario acotar una línea de investigación:

- Características importantes del producto esperado: Una de las principales causas del auge actual de la manufactura aditiva en la investigación y la industria es contar con la opción de una manufactura rápida de prototipos funcionales que validen formas,

tamaño características mecánicas y sirvan al mismo tiempo para su uso con prontitud y a bajo costo. Con esta perspectiva, se buscará disminuir las diferencias de formas y dimensiones entre el diseño y la pieza impresa, minimizar rugosidad y conseguir una alta adherencia entre capas.

- Parámetros medibles y controlables involucrados en la impresión:
    - Es posible medir condiciones ambientales como temperatura y humedad.
    - Es posible conocer las características mecánicas de cada material empleado
    - Es posible medir la temperatura y velocidad de impresión

5 Referencias

Sánchez, N. y Lira, I. (2020) *La Manufactura aditiva como potencializador de los sistemas productivos*. Inventum, vol. 15, No. 28, 2 - 13. doi: 10.26620/uniminuto.inventum.15.28.2020. 104-112.

Huang, Y., Leu, M.C., Mazumder, J., Donmez A. 2015. *Additive manufacturing: current state, future potencial, gaps and needs, and recommendations*. Journal of Manufacturing Science and Engineering-Transactions of the ASME, 137(1), 014001-1–014001-10.

Yang, S., Zhao, Y.F. *Additive manufacturing-enabled design theory and methodology: a critical review*. Int J Adv Manuf Technol 80**,** 327–342 (2015). doi: 10.1007/s00170-015-6994-5

Garg A, Lam JSL, Savalani MM. 2015. *A new computational intelligence approach in formulation of functional relationship of open porosity of the additive manufacturing process*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 80(1–4), 555–565.

Guessasma S, Zhang W, Zhu J, Belhabib S & Nouri H: *Challenges of additive manufacturing technologies from an optimisation perspective*. Int. J. Simul. Multisci. Des. Optim., 2015, 6, A9. doi: 10.1051/smdo/2016001

Li S, Yuan S, Zhu J, Wang C, Li J, Zhang W, *Additive Manufacturing-driven Design Optimization: Building Direction and Structural Topology*, Additive Manufacturing (2020), doi: 10.1016/j.addma.2020.101406

Redwood, B., Filemon Schöffer, & Garret, B. (2018). *The 3D printing handbook : technologies, design and applications*. Amsterdam, The Netherlands: 3D Hubs B.V.

Carvajal, M.J. et al. (2019) *Influencia de la posición de impresión y la densidad de relleno en las propiedades mecánicas de probetas fabricadas en ABS*. Revista ingenierias Universidad de Medellin, 19(37) 179-193 doi.org/10.22395/rium.v19n37a9

Chee Kai Chua, Chee How Wong, & Wai Yee Yeong. (2017). *Standards, quality control, and measurement sciences in 3D printing and additive manufacturing*. London ; San Diego, Ca: Academic Press, An Imprint Of Elsevier.

L. Li, Q. Sun, C. Bellehumeur, P. Gu, (2002) *Composite modeling and analysis for fabrication of FDM prototypes with locally controlled properties*, J. Manuf. Process. 4 (2) 129–141.

C. Casavola, A. Cazzato, V. Moramarco, C. Pappalettere, (2016) *Orthotropic mechanical properties of fused deposition modelling parts described by classical laminate theory*, Mater. Des. 90 453–458.

M. Somireddy, C.V. Singh, A. Czekanski, (2019) *Analysis of the material behavior of 3D printed laminates via FFF*, Exp. Mech. 59 (6) 871–881.

S. Bhandari, R.A. Lopez-Anido, L. Wang, D.J. Gardner, (2020) *Elasto-plastic finite element modeling of short carbon fiber reinforced 3D printed acrylonitrile butadiene styrene composites*, JOM 72 (1) (2020) 475–484, https://doi.org/10.1007/s11837-019-03895-w.

Y. Zhao, Y. Chen, Y. Zhou, (2019) *Novel mechanical models of tensile strength and elastic property of FDM AM PLA materials: experimental and theoretical analyses*, Mater. Des. 181.

P.K. Mishra, P. Senthil, (2020) *Prediction of in-plane stiffness of multi-material 3D printed laminate parts fabricated by FDM process using CLT and its mechanical behaviour under tensile load*, Mater. Today Commun. 23.

Yadav, D., Chhabra, D., Kumar Garg, R., Ahlawat, A., & Phogat, A. (2019). *Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network*. Materials Today: Proceedings. doi:10.1016/j.matpr.2019.11.225

Deswal, S., Narang, R., & Chhabra, D. (2019). *Modeling and parametric optimization of FDM 3D printing process using hybrid techniques for enhancing dimensional preciseness*. International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM). doi:10.1007/s12008-019-00536-z

Sri-Amphorn, P., Abeykoon, C., & Fernando, A. (2020). *Optimization of Fused Deposition Modeling Parameters for Improved PLA and ABS 3D Printed Structures*. International Journal of Lightweight Materials and Manufacture. doi:10.1016/j.ijlmm.2020.03.003

Nidagundi, V. B., Keshavamurthy, R., & Prakash, C. P. S. (2015). *Studies on Parametric Optimization for Fused Deposition Modelling Process*. Materials Today: Proceedings, 2(4-5), 1691–1699. doi:10.1016/j.matpr.2015.07.097

Dey, A., & Yodo, N. (2019). *A Systematic Survey of FDM Process Parameter Optimization and Their Influence on Part Characteristics*. Journal of Manufacturing and Materials Processing, *3*(3), 64. https://doi.org/10.3390/jmmp3030064

Jaisingh Sheoran, A., & Kumar, H. (2019). *Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research*. Materials Today: Proceedings. doi:10.1016/j.matpr.2019.11.296

Carlier, E., Marquette, S., Peerboom, C., Denis, L., Benali, S., Raquez, J.-M., … Goole, J. (2019). *Investigation of the parameters used in fused deposition modeling of polylactic acid) to optimize 3D printing sessions*. International Journal of Pharmaceutics, 565, 367–377. doi:10.1016/j.ijpharm.2019.05.008

Sampieri, R. H., Collado, C. F., & del Pilar Baptista Lucio, M. (2010). *Metodología de la investigación* (5th ed.). New York, NY: McGraw-Hill.