

# Manufactura aditiva enfocada en el Modelado por deposición fundida (FDM) y en el Sinterizado selectivo por láser (SLS)

Andrés Holguín Restrepo  
*Ingeniería Mecatrónica*  
*Universidad Nacional de Colombia*  
Bogotá, Colombia  
aholguinr@unal.edu.co

## I. RESUMEN

Los procesos de fabricación aditiva, como el SLS y FDM, han aumentado significativamente en popularidad en los últimos años. La elección de la tecnología de impresión 3D adecuada depende de varios factores que se pueden resumir en los KPI del producto, los cuales deben ser analizados y comprendidos de manera adecuada para que, por medio de metodología DIPP (Diseño Integrado de Producto y Proceso), se logre definir la mejor solución de diseño junto con su mejor proceso de manufactura. Ahora bien, en el caso del SLS, se ha desarrollado un nuevo algoritmo de escaneo láser llamado DMS, que utiliza un expansor de haz variable para obtener diferentes tamaños de punto de láser, lo que mejora la precisión y la velocidad del proceso. Por otro lado, el FDM, debido a su asequibilidad actualmente, se ha utilizado en la educación y capacitación de ingenieros para mejorar la comprensión del diseño y la fabricación de piezas.

## II. INTRODUCCIÓN

La manufactura aditiva, conocida coloquialmente como "impresión 3D", es un proceso de producción que se basa en la creación de objetos a partir de datos de modelos de diseño asistidos por computadora (CAD). En lugar de utilizar métodos de fabricación sustractiva, la impresión 3D agrega material capa por capa para formar el objeto deseado, lo cual podría llegar a establecerse que no es un proceso realmente 3D, sino 2.5D, ya que el movimiento Z no es simultáneo con los movimientos X y Y. Hecha esta aclaración, en los últimos años, el uso de tecnologías de prototipado rápido ha aumentado significativamente, lo que ha llevado a la necesidad de determinar cuándo es eficiente el uso de la impresión 2.5D y cuál es la tecnología adecuada en función del tamaño del lote, tamaño del elemento, complejidad y requisitos de tiempo. Estas tecnologías funcionan capa por capa con materiales en polvo, líquidos o en láminas, lo que les brinda una serie de oportunidades y ventajas, como la libertad de diseño. En comparación con la fabricación convencional, la fabricación aditiva puede reducir el impacto ambiental, permitir la fabricación de piezas con diseños geométricos novedosos y personalizados, y reducir los inventarios y los riesgos asociados con el exceso

de suministro y la obsolescencia. Ahora bien, existen muchos tipos de manufactura aditiva. En el presente manuscrito se van a hablar puntualmente de la Fused Deposition Modelling (FDM) y del Sinterizado selectivo por láser (SLS), de sus ventajas, desventajas, y aplicaciones.

Se hará mención de cómo se implementó la educación y la capacitación en manufactura digital y procesamiento de materiales como parte de un programa de ingeniería universitario. El programa se realizó mediante FDM, que permitió a los estudiantes desarrollar una comprensión del diseño, la fabricación y el rendimiento de las piezas. Los estudiantes fabricaron una parte de la turbina del turbocompresor y evaluaron su velocidad de rotación utilizando un banco de pruebas personalizado.

Cambiando el enfoque de tecnologías, en el proceso SLS la fabricación rápida y la alta precisión son factores muy importantes. Se va a hacer mención de otro artículo que se centra en el desarrollo de un sistema industrial para el SLS que utiliza un nuevo algoritmo de trayectoria de escaneo láser para fabricar objetos de manera más rápida y elaborada en comparación con el proceso SLS existente. Este nuevo algoritmo de trayectoria de escaneo láser se llama sistema de espejo digital o Digital Mirror System (DMS) y contiene un expansor de haz variable para obtener diferentes tamaños de punto de haz láser en lugar del expansor de haz fijo existente.

## III. COMPARACIÓN ENTRE EL FDM Y EL SLS

En el artículo "Comparison of Cost, Material and Time Usage in FDM and SLS 3D Printing Methods" se hace una descripción de diferentes tecnologías de fabricación aditiva. Aunque el término "impresión 3D" se utiliza a menudo como sinónimo de todos los procesos de fabricación aditiva, existen muchos procesos diferentes que varían en su método de fabricación por capas, los cuales se clasifican según el material y la tecnología utilizada. Una de las tecnologías más utilizadas hoy en día es la FDM (Modelado por Deposición Fundida), que crea prototipos 3D calentando y extruyendo un filamento de material plástico por la boquilla de extrusión, que se mueve sobre la plataforma de construcción en direcciones X e Y. Cuando se enfría y endurece esta fina capa de plástico, se une

inmediatamente a la capa debajo de ella. Una vez completada una capa, se da un corrimiento del extrusor o de la plataforma en dirección Z, dando paso a la siguiente capa de plástico. En la figura 1 se evidencia un ejemplo de este método [1].

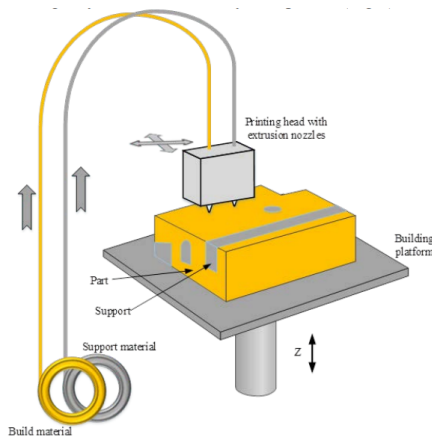


Figura 1. Método FDM [1]

En las impresoras SLS de lecho de polvo, se coloca una capa de material en polvo sobre la bandeja de construcción con un nivelador, y luego un láser sinteriza la sección transversal de la pieza. Posteriormente, la plataforma cae otros 0,1 a 0,2 mm y el proceso se repite. Las cámaras del proceso están llenas de nitrógeno y se calientan. En la figura 2 se evidencia este método.

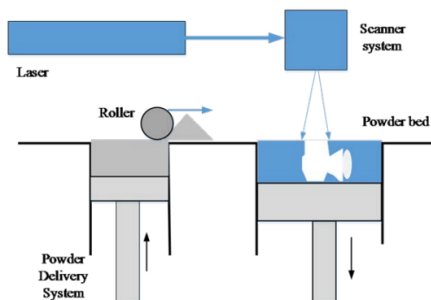


Figura 2. Método SLS [1]

Ahora bien, es necesario hacer un análisis a profundidad del producto que se desea generar, sus KPI para ser más precisos, ya que con estos es posible determinar los requerimientos funcionales del mismo. De este modo, mediante metodologías de diseño concurrente como el DIPP y el DAC, se puede determinar el mejor proceso de manufactura. Para esto, es necesario entender más a fondo las diferencias y similitudes entre el FDM y el SLS. La resolución en las impresoras FDM es un factor del tamaño de la boquilla y de la precisión de los movimientos del extrusor (ejes X/Y). La precisión y suavidad de los modelos impresos también están influenciados por otros factores: deformación, desalineación de capas, desplazamiento de capas, encogimiento de las partes

inferiores. Estos comprometen la precisión y suavidad de la superficie. Además, para estructuras complejas, suele ser necesario material de soporte para obtener la geometría deseada, esto puede generar problemas en el post proceso, ya que el material de soporte suele afectar el acabado final de la pieza. Las impresoras SLS producen objetos de mayor resolución y son más precisas que las impresoras FDM, ya que la resolución está determinada principalmente por el tamaño del punto óptico del láser. Además, durante la impresión se aplica menos fuerza al modelo. De esta manera, el acabado de la superficie es mucho más suave. Las impresiones SLS muestran detalles que una impresora FDM nunca podría producir, y es posible fabricar piezas muy complicadas en un solo proceso sin necesidad de utilizar material de soporte, ya que los polvos no sinterizados actúan como estructura de soporte para las piezas impresas [1].

En cuanto a los materiales, el FDM utiliza filamentos de materiales termoplásticos como PLA, ABS, PETG, Nylon, TPU, entre otros. Para el SLS, además de la posibilidad de usar materiales termoplásticos como en el FDM, este se destaca por ser capaz de generar piezas metálicas como el aluminio o cerámicas como la alúmina.

Con todo y lo anterior, se puede establecer que cuando se quiere imprimir un objeto con un bajo nivel de complejidad, FDM es la mejor opción: es más rápido, más barato, tiene un buen resultado, la única desventaja es una fuerza bastante pobre, especialmente en la dirección Z. Ahora bien, el SLS tiene mejores resultados en términos de precisión, acabado y resistencia, con la contraparte de ser un proceso de mayor duración y de mayor costo.

#### IV. USO DEL FDM EN LAS AULAS

El artículo “Application of Additive Manufacturing in Design Manufacturing Engineering Education” describe un estudio que involucra a una clase de 90 estudiantes universitarios de ingeniería. Los estudiantes fueron divididos en grupos de tres y se les dio entre 4 y 7 semanas para diseñar y probar cuchillas de turbocompresores utilizando la impresión 3D. Se les proporcionó información de fondo sobre la fabricación digital, la fabricación aditiva y sustractiva, y los procesos de diseño e impresión, así como ejemplos de publicaciones en la literatura técnica sobre el diseño de turbinas. Los estudiantes tuvieron que usar sus conocimientos de investigación y diseño para abordar el desafío de diseño. Se les dio poca orientación en cuanto al diseño en sí, pero se les proporcionaron tutoriales y notas detalladas sobre cómo descargar y operar el software necesario para la fabricación de piezas de impresión 3D. El estudio se llevó a cabo utilizando una impresora 3D de la marca Zmorph vista en la figura 3 y el filamento utilizado fue ácido poliláctico, conocido por sus siglas PLA [2].

Se hicieron pruebas de las cuchillas de los turbocompresores utilizando un conjunto de pruebas impreso en 3D y un sistema de prueba de bajo costo. Los estudiantes también recibieron retroalimentación sobre el rendimiento de sus diseños y se proporcionaron detalles sobre el rendimiento general de los diseños de turbinas y los factores que influyen

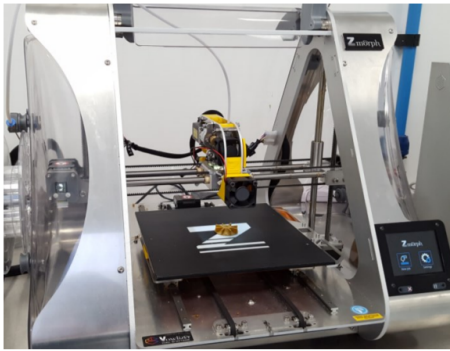


Figura 3. Impresora Zmorph [2].

en el rendimiento de las turbinas. Los estudiantes también tuvieron que presentar informes individuales sobre su diseño y la razón detrás de sus decisiones de diseño, como se puede ver en la figura 4, se tienen dos ejemplos de diseño de los estudiantes: (Izquierda) Turbina diseñada e impresa con 8 álabes, inclinación pronunciada del álabes y espesor de 1021μm. (Derecha) Turbina diseñada e impresa con 10 álabes, menor inclinación que en la turbina izquierda y 1561μm de (barra de escala de 1000 m). Fueron este tipo de diferencias en el diseño que los estudiantes debían sustentar sus decisiones y mediante las pruebas de rendimiento es que podían analizar la eficiencia de sus resultados.

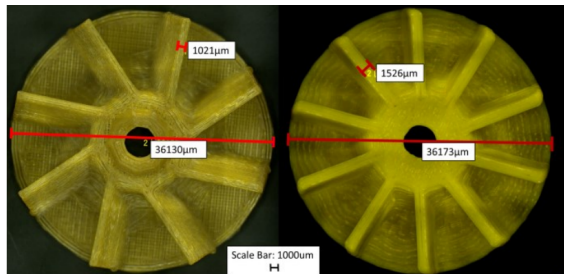


Figura 4. Turbinas de diversos equipos de trabajo [2].

En general, el estudio demuestra la efectividad del uso de la impresión 3D como una herramienta para el aprendizaje de los estudiantes de ingeniería. El enfoque en el diseño y la fabricación de piezas de turbocompresores utilizando la impresión 3D permitió a los estudiantes explorar los procesos de fabricación y adquirir habilidades prácticas, así como mejorar su comprensión de los conceptos teóricos para generar mejores diseños en cada prueba que realizaban. Como se puede ver en la figura 5, se evidencia la velocidad generada por las turbinas según el orden de prueba de las turbinas, demostrando la curva de aprendizaje durante el transcurso del grupo [2].

Con todo y lo anterior, la implementación del FDM en este curso de diseño les permitió a los estudiantes utilizar su creatividad y habilidades de investigación y diseño para resolver problemas reales en tiempos considerablemente cortos. Esto les dio la oportunidad de aprender de manera autónoma y descubrir nuevas formas de pensar y de abordar los problemas

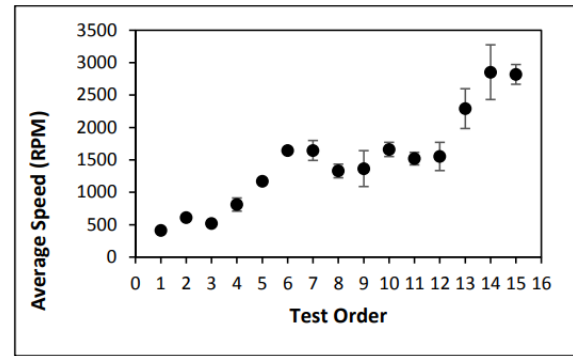


Figura 5. Turbinas de diversos equipos de trabajo [2].

de fabricación mediante el uso de tecnologías FDM de bajo costo.

#### DESARROLLO DEL ALGORITMO DMS PARA MEJORAR EL SLS

El artículo “An experimental study for rising manufacturing time and accuracy on SLS process” se centra en los sistemas de manufactura aditiva, los cuales son utilizados no solo para la fabricación de archivos CAD sólidos en 3D, sino también para el escaneo de objetos en 3D de forma rápida y precisa. Dentro de estos sistemas, se encuentra el SLS (Selective Laser Sintering), un proceso de fabricación aditiva que produce piezas directamente a partir del modelo CAD mediante la fusión o sinterización de capas de polvo con el uso de un láser. Este proceso proporciona alta precisión y se caracteriza por no requerir estructuras de soporte. A pesar de sus ventajas, el sistema SLS existente presenta limitaciones para la fabricación de modelos con detalles microscópicos debido a que el tamaño del punto del láser es fijo al escanearlo en múltiples lados, este sistema de punto de láser fijo se puede evidenciar en la figura 6 [3].

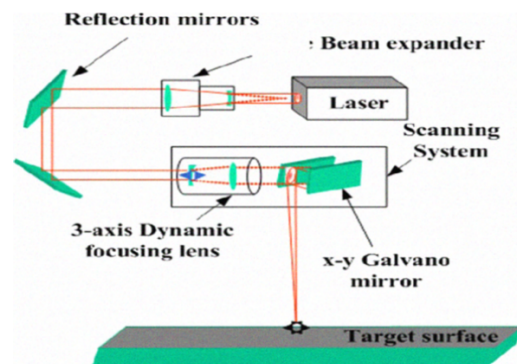


Figura 6. Configuración de sistema de láser para SLS tradicional [3].

Por lo tanto, en este estudio se introduce un método para fabricar modelos con mayor detalle y rapidez en comparación con los estudios existentes. En este método se utiliza un tamaño de punto de haz pequeño para las partes microscópicas y uno grande para las partes de mayor extensión, empleando

un sistema de espejos digitales que permite cambiar el tamaño del punto del láser. No obstante, al aplicar este sistema a la tecnología SLS, la sinterización se convierte en un factor crítico debido a la distribución de energía térmica, que afecta la tasa de sinterización y puede generar encogimiento, deformación, flexión y distorsión en el modelo. Por lo tanto, se requiere un método de generación de trayectorias de escaneo láser que permita reducir el tiempo total de procesamiento y mantener el equilibrio térmico para garantizar la eficiencia y precisión del sistema.

El sistema DMS (Digital Mirror System) propuesto escanea el láser en diferentes tamaños de punto para resolver estos problemas, seleccionando el tamaño óptimo para cada área para reducir el tiempo total de procesamiento y mantener el equilibrio térmico, como se puede evidenciar en la figura 7. Se ha desarrollado un sistema DMS industrial basado en el proceso SLS, que ha permitido aumentar la precisión y el tiempo de fabricación de modelos en 3D.

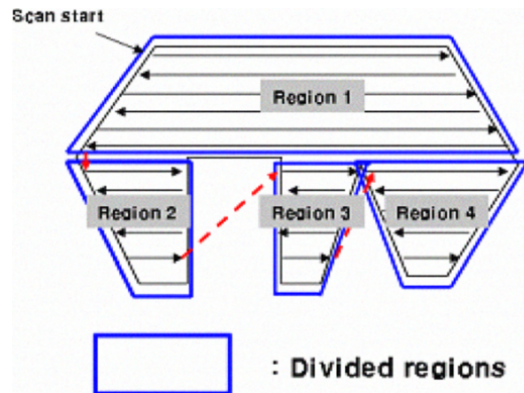


Figura 7. Configuración de sistema de láser para SLS tradicional [3].

Entrando en detalle con este sistema, un DMS es un componente óptico que se utiliza para controlar la fase y la amplitud de un haz de luz. Se compone de una matriz de pequeños espejos, cada uno de los cuales puede ser inclinado individualmente para reflejar el haz de luz en una dirección específica. Al controlar los ángulos de inclinación de los espejos, se puede modificar la forma y el tamaño del haz de luz. Por otro lado, los lentes motorizados son lentes que se pueden mover eléctricamente para cambiar su posición y enfoque. Al cambiar la posición del lente, se puede alterar la distancia focal y, por lo tanto, el tamaño del punto focal del láser. Esto se logra mediante la activación de un motor que desplaza la lente a lo largo de su eje óptico. Este sistema de láser se evidencia en la figura 8 [3].

En resumen, tanto los DMS como los lentes motorizados son componentes ópticos que se utilizan para controlar el tamaño y la forma del haz de luz láser. Los DMS controlan la fase y la amplitud del haz de luz mediante una matriz de pequeños espejos, mientras que los lentes motorizados cambian la posición de la lente para controlar la distancia focal y, por lo tanto, el tamaño del punto focal del láser. Con todo y lo anterior, al aplicar este sistema a la impresión SLS, se logra

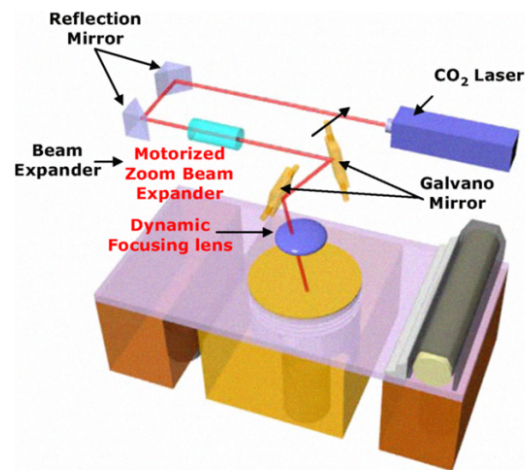


Figura 8. Configuración de sistema de láser para SLS implementando sistema DMS [3].

mejorar la precisión y la eficiencia de impresión. En el artículo ponen a prueba la eficiencia de impresión mediante un diseño de una llave relativamente sencilla, la cual se imprime en SLS tradicional y en SLS con DMS. En la figura 9 se evidencia mediante fotografías los resultados de impresión. Ahora bien, al analizar los resultados de impresión, las variaciones de los sistemas DMS generaron una reducción de tiempo de aproximadamente la mitad, a comparación del método SLS tradicional.

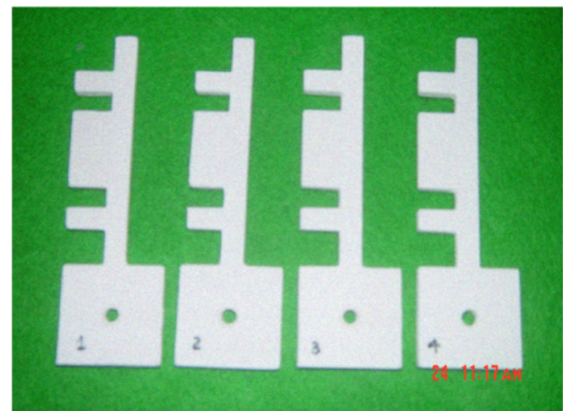


Figura 9. Impresión de llave con diferentes métodos DMS.

Sin embargo, las características de sinterización son una desventaja importante cuando se aplica el DMS al sistema SLS existente para acortar el tiempo total de procesamiento, ya que la tasa de sinterización cambia por la distribución de energía térmica correspondiente al tiempo. La contracción, flexión y distorsión pueden afectar negativamente la eficiencia del sistema en general, así como influir en la precisión de los productos fabricados. A partir de las llaves impresas mencionadas anteriormente, se realizaron ensayos de tensión en las mismas, donde los resultados se pueden evidenciar



en la figura 10. Como era de esperarse, la llave impresa por SLS tradicional obtuvo unas propiedades de resistencia considerablemente mayores a los sistemas SLS con DMS, ya que logró tener un mayor límite de deformación, soportando esfuerzos considerablemente mayores a los límites alcanzados por los métodos SLS con DMS.

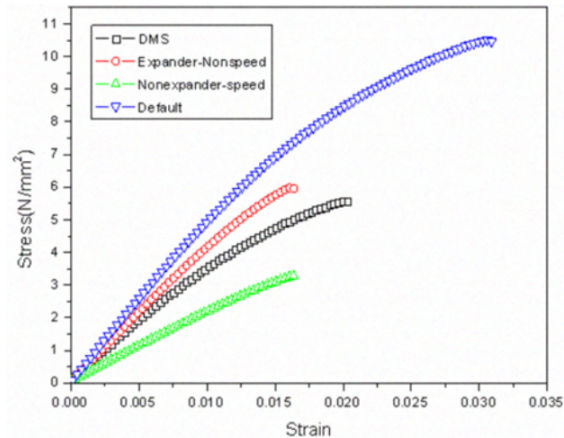


Figura 10. Ensayos de tensión para las diversas llaves impresas.

En conclusión, el DMS es una tecnología útil que mejora la precisión y la eficiencia del sistema SLS, particularmente en el proceso de sinterización de polvo de láser, lo que puede reducir el tiempo total de procesamiento. Ahora bien, la implementación exitosa del DMS en el sistema SLS existente requiere una cuidadosa consideración de las características de sinterización para garantizar una eficiencia y precisión óptimas en la fabricación de modelos 3D, teniendo en cuenta una posible disminución de las propiedades mecánicas de los modelos impresos.

#### REFERENCIAS

- [1] R. Kudelski, J. Cieslik, M. Kulpa, P. Dudek, K. Zagorski and R. Rumin, "Comparison of Cost, Material and Time Usage in FDM and SLS 3D Printing Methods," 2019 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Melbourne, VIC, Australia, 2019, pp. 630-634, doi: 10.1109/ICIT.2019.8755013.
- [2] Keaveney, S. G., Dowling, D. P. (2015). Application of Additive Manufacturing in Design Manufacturing Engineering Education. In 2015 IEEE International Symposium on Innovations in Intelligent Systems and Applications (INISTA) (pp. 1-6). IEEE.
- [3] S. W. Bae, J. S. Kim, D. S. Kim, and S. Y. Yoo, "An experimental study for rising manufacturing time and accuracy on SLS process," in Proceedings of 2009 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing, Suwon, Korea, 2009, pp. 486-491, doi: 10.1109/ISAM.2009.5352823.