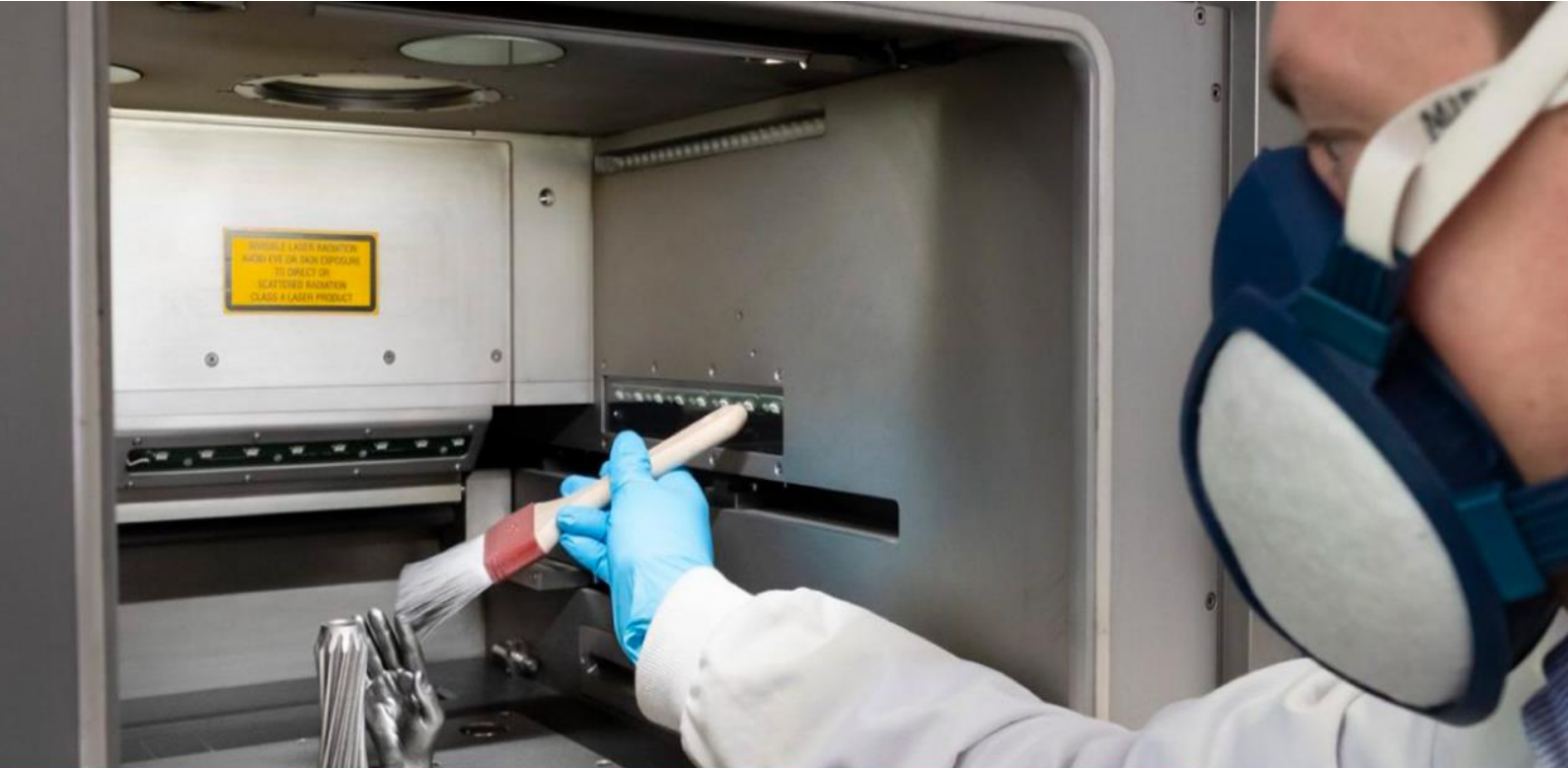




CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPADO DE PIEZAS MECÁNICAS UTILIZANDO UN CENTRO DE MANUFACTURA ADITIVA CON TECNOLOGÍA DE SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO EN EL SENA SEDE GIRARDOT



CARACTERIZACIÓN DEL PROTOTIPADO DE PIEZAS MECÁNICAS UTILIZANDO UN CENTRO DE MANUFACTURA ADITIVA CON TECNOLOGÍA DE SINTERIZADO LÁSER SELECTIVO EN EL SENA SEDE GIRARDOT

CHARACTERIZATION OF THE PROTOTYPING OF MECHANICAL PARTS USING AN ADDITIVE MANUFACTURING CENTER WITH SELECTIVE LASER SINTERING TECHNOLOGY AT THE SENA GIRARDOT

Gerson Alejandro Saavedra Molano

Magister en Mecatrónica, South Westphalia University, Alemania. Magister en Administración, Universidad del Tolima, Ibagué. Instructor de mecánica industrial SENA Girardot. saavedram@sena.edu.co.

Oscar David Romero Luzuriaga

Aprendiz Tecnólogo en Mantenimiento Electromecánico Industrial, SENA- Girardot odromero061@misena.edu.co.

Mateo Stiven Espinosa Salgado

Aprendiz Tecnólogo en Mantenimiento Electromecánico Industrial, SENA-Girardot msespinosa06@misena.edu.co.

Resumen

La fabricación aditiva con impresión 3D por sinterizado láser selectivo es una nueva tecnología de producción y reparación de piezas mecánicas asociada a la industria 4.0, que se ha desarrollado mundialmente y se utiliza en gran número de países industrializados (Zahera, 2012, pág. 11). Consecuentemente, y en concordancia con el plan tecnológico del centro y visión 2030, se implementó un laboratorio de manufactura aditiva para dar a conocer a los grupos de interés del SENA CTDPE una alternativa tecnológica de industria 4.0 que mejore la fabricación de piezas y se capaciten a las personas en oficios del futuro de forma adecuada y pertinente (SENA CTDPE, 2021, pág. 82). Dicho lo anterior, el objetivo de esta investigación fue caracterizar el uso de esta maquinaria y determinar la precisión en la medición de las piezas impresas por este laboratorio. Todo esto, a través de una investigación cuantitativa que arrojó como resultado una precisión en las piezas de +/-0.3 mm.

Palabras claves: Industria 4.0, impresión 3D, precisión, sinterizado láser selectivo, PA 12, prototipado

Abstract

Additive manufacturing with 3D printing by selective laser sintering is a new technology for the production and repair of mechanical parts associated with industry 4.0, which has been developed worldwide and is used in a large number of industrialized countries. Consequently, and in accordance with the technological plan of the center and vision 2030, an additive manufacturing laboratory was implemented to make SENA CTDPE stakeholders aware of a technological alternative for industry 4.0, that improves the manufacture of parts and it can train people in jobs of the future in an appropriate and relevant way. That said, the objective of this research was to characterize the use of this machinery and determine the precision in the measurement of the pieces printed by this laboratory. All this, through a quantitative investigation that

resulted in a precision in the pieces of +/- 0.3 mm.

Keywords: Industry 4.0, 3D printing, precision, selective laser sintering, PA 12, prototyping.

Introducción

El sector industrial en estos momentos enfrenta una revolución tecnológica en donde la administración de datos, tecnologías de la información y automatización de procesos forman un conjunto tecnológico logrando un aumento considerable de la eficiencia en los procesos industriales a lo que los expertos han llamado industria 4.0 (Aguilar, 2017, pág. 25). Y una de las tecnologías sobresalientes asociadas a esta industria es la fabricación aditiva por sinterizado láser selectivo (SLS), el cual es un concepto de producción a través del cual el material es depositado capa a capa de manera controlada donde sea necesario (SIEMENS, 2020, pág. 7). Este tipo de producción permite su aplicación en sectores tan variados como la medicina, la aeronáutica, la agricultura, transporte, joyería, entre otros (Mendoza de puelles, 2018, pág. 33). Por otra parte, en términos de efectividad, este proceso mejora los tiempos de producción y reparación de piezas mecánicas con un prototipado rápido bajo demanda (3D natives, 2020, pág. 2). Así mismo, esta tecnología de impresión 3D cuando es combinada con escáneres 3D facilita el modelado y prototipado de piezas mecánicas, logrando crear modelos altamente precisos de objetos con diferentes texturas, tamaños y geometrías, con la posibilidad de realizar ingeniería inversa a estas piezas mejorando el producto y su reconstrucción (Artec3D, 2020, pág. 12).

Conforme a lo expuesto, el presente trabajo de investigación tuvo como objetivo asociar los factores anteriormente descritos a través de un proyecto de modernización SENNOVA con un resultado de investigación del cual se desprendió el primer laboratorio de fabricación aditiva de la regional Cundinamarca y, a su vez, por medio de este se logró caracterizar el prototipado de piezas mecánicas por fabricación aditiva utilizando impresoras de tecnología de sinterizado láser selectivo y escáneres (Bourell, 2009, pág. 31). Esta caracterización se basó en la puesta a punto de la maquinaria, el uso de esta y la medición de la precisión métrica en longitudes de las distintas figuras geométricas diseñadas e impresas por los aprendices.

En cuanto al proceso metodológico de esta investigación en el desarrollo del primer objetivo se realizó una vigilancia tecnológica para identificar cuáles eran las tendencias en impresión 3D, en la que a través de la metodología previos y haciendo uso de plataformas de búsqueda en base datos como SCOPUS y de mapeo científico como VOSVIEWER se logró identificar que, la tecnología más viable para un laboratorio de manufactura era la de laser sinterizado ya que esta tiene la propiedad de realizar piezas de uso final y se utiliza en diversas aplicaciones industriales tales como la médica y los autopartes (COTEC, 2011, pág. 85).

Para el segundo objetivo, se definieron las variables técnicas en cuanto a maquinaria y equipos más apropiados a adquirir para la construcción del laboratorio de fabricación aditiva. En este punto de la investigación, se realizaron varias visitas a empresas en donde se encontró que la

empresa IMOCOM en Bogotá D.C., tiene una gran experiencia en este tipo de tecnología, y siguiendo varias experiencias encontradas se seleccionaron 3 impresoras de marca SINTRATEC con sus respectivos kits de limpieza y dos escáneres ARTEC para objetos pequeños y grandes (Gebhardt, 2012, pág. 50). En cuanto al objetivo número 3, al ya estar instalada la maquinaria y construido el laboratorio los aprendices del semillero de investigación SIMMEM del centro de formación, diseñaron y prototiparon diferentes piezas mecánicas con diversidad de formas geométricas en donde se realizaron mediciones de precisión en longitud y formas (IMOCON, 2020, pág. 4).

Por último, en el cuarto objetivo se realizó una caracterización del uso de la tecnología y del nuevo ambiente de formación en donde se dejaron lineamientos claros del tipo de material a usar y calibración de las impresoras (Hopkinson, 2006, pág. 37). Por otro lado, es importante recalcar que en esta primera investigación solo se quería determinar algunas características físicas de las piezas impresas tales como acabado y precisión en las dimensiones. No obstante, para futuras investigaciones se pueden realizar experimentos en cuanto a la tenacidad o dureza del material (García, 2018, pág. 293).

Dicho lo anterior, el presente artículo tiene como objetivo mostrar a profundidad el funcionamiento de este tipo de tecnología asociada a la industria 4.0 desde la impresión 3D de diversas piezas mecánicas que fueron diseñadas en Solid Works por aprendices del semillero del SENA Girardot.

Fundamento teórico

Industria 4.0

Desde la perspectiva del acervo teórico relacionado con el objeto de estudio, se puede decir que la industria 4.0 se refiere a una nueva fase en la revolución industrial en donde la combinación de la automatización, el aprendizaje automatizado, el internet de las cosas, el tiempo real y la interconectividad interactúan directamente con todos los sistemas de la cadena de producción logrando establecer la manufactura inteligente (EPICOR, 2020, pág. 102). Otra definición indica que esta es una revolución que converge tecnologías digitales, físicas y biológicas, resultando en internet de las cosas, la nube, coordinación digital, sistemas ciberfísicos, entre muchos otros (Del Val, 2019, pág. 3).

Fabricación aditiva

La fabricación aditiva es un concepto de producción en el cual un material es depositado capa a capa de manera controlada hasta donde sea necesario para lograr la forma deseada (Hernández, 2018, pág. 225). Otro autor define este concepto, como un proceso basado en la simple idea de convertir un modelo digital en un objeto tridimensional sólido (3DNATIVES, 2020, pág. 18).

Sinterizado láser selectivo

En cuanto al término de sinterizado láser selectivo es aquella tecnología que es capaz de fabricar elementos mecánicos con múltiples materiales gracias a la aplicación de un láser que fusiona polvos por la temperatura generada por este (Héndrick, 2018, pág.

10). En donde, el primer paso del proceso consiste en preparar el depósito del polvo y el área de construcción calentándolos por debajo de la temperatura de fusión del polímero (Kruth, 2013, pág. 358). Después, se descarga la primera capa de polvo sobre la plataforma de construcción y un láser de CO₂ escanea el contorno de la siguiente capa y sinteriza selectivamente las partículas del polímero en polvo, entonces, la sección transversal completa del componente se escanea, por lo que cada parte se construye de manera sólida, y cuando la capa se completa, la plataforma de construcción se mueve hacia abajo y se vuelve a recubrir la superficie de material. Este proceso se repite hasta que toda la pieza está completa (Chaparro, 2017, pág. 44).

Propiedades de los materiales

En cuanto a conceptos asociados a la ingeniería mecánica y propiedades de los materiales podemos destacar los siguientes términos: La dureza es la resistencia de un material a ser rayado (Powney, 2010, pág. 168). Fragilidad es la propiedad de un material que llega a la rotura sin mucha deformación (Sastre, 2010, pág. 88). Ductilidad es aquel material que al llegar a la rotura ha sufrido deformaciones grandes (Arias, 2005, pág. 40).

Resiliencia es la energía necesaria para aplicar una unidad de volumen de un cuerpo para deformarla hasta su límite elástico (Cortés, 2015, pág. 122). Por su parte, la tenacidad es la energía de deformación total que puede absorber o acumular un material antes de alcanzar la rotura en condiciones de impacto o también como la capacidad de absorber energía plástica antes de fracturarse (Prontubeam, 2020, pág. 2).

Métodos

Para la realización de la siguiente investigación se utilizó el enfoque cuantitativo, soportado por una tarea exhaustiva de vigilancia tecnológica que definieron las características técnicas para la instalación y adopción de la tecnología de sinterizado láser selectivo. Es importante recordar que el enfoque cuantitativo “es lineal y demostrativo, sigue una secuencia y cada una de sus fases precede la posterior, no se pueden evitar las distintas etapas de este, además, expone el método científico clásico y trata de tener el mayor control posible” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, pág. 63).

En cuanto a los tipos de estudio, en primera instancia se llevó un tipo de estudio exploratorio del entorno en donde se abordaron los campos poco conocidos del problema como tipos de tecnologías de fabricación aditiva todo esto a través de datos e información secundaria (Jiménez, 1998, pág. 128). Seguido de esto, con la información recopilada se caracterizaron las variables físicas de longitud y diámetros, además, características de mecanizado como tiempos de fabricación a figuras geométricas tales como cilindros, cubos, trapecios entre otras, llevando a cabo un estudio descriptivo para especificar las propiedades y características que fueron sometidas a un análisis.

Es importante recalcar que, el análisis descriptivo “pretende medir o recoger información de manera independiente o conjunta sobre los conceptos o las variables a las que se refieren” (Hernández, Fernández, & Baptista, 2014, pág. 92).

“La población es la totalidad del fenómeno a estudiar en donde estas unidades poseen una característica común, la cual se estudia y da origen a los datos de la investigación” (Tamayo, 2012, p.114). Así mismo, se puede definir como “el grupo de personas o cosas similares en uno o varios aspectos que forman parte del objeto de estudio” (Eyssautier, 2002, p.196). Por lo tanto, la población de esta investigación estuvo compuesta por las 3 piezas mecánicas con diferentes figuras geométricas internas que servirán para realizar las mediciones correspondientes de precisión en sus longitudes y distancias entre puntos.

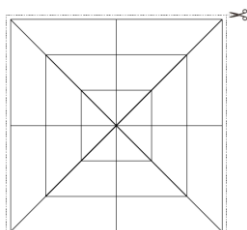
Resultados

La caracterización de la tecnología de impresión 3D por sinterizado láser se realizó en diferentes etapas. A continuación, se explicará en que consiste cada etapa y su resultado obtenido.

Etapas de calibración

En esta etapa se realizó la calibración del láser en las máquinas de impresión ya que de este depende la precisión en las dimensiones de las piezas impresas. Para desarrollar esta actividad fue necesario utilizar un patrón de calibración que debe tener una forma cuadrada y unas dimensiones de 12 cm de largo por 12 cm de ancho tal, como se puede observar en la figura 1.

Figura 1. Patrón de calibración



Nota. Tomada de SINTRATEC manual de usuario patrón de calibración (p.28), por SINTRATEC.

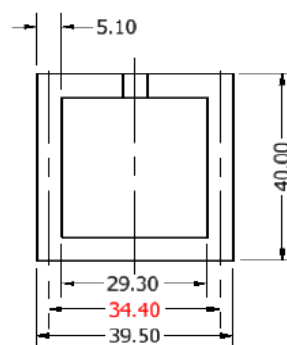
De esta forma y como se observa en la ilustración 2 el láser de las máquinas fue calibrado realizando ajustes en las perillas de dos potenciómetros de entrada al circuito de potencia del láser.

Figura 2. Calibración del láser en máquina



Después de realizar esta operación se procedió a imprimir la primera pieza de calibración la cual tiene unas dimensiones específicas que ayudan a determinar la precisión y calibración de la máquina, en la ilustración 3 se observa la forma de esta pieza de calibración con medidas en espesor de 5.10 mm, un ancho de 40 mm y un largo de 39.50 mm.

Figura 3. Cubo de medición



Nota. Tomada de SINTRATEC manual de usuario guía de parámetros (p.15), por SINTRATEC.

El resultado final de esta calibración indico que la escala del eje X debe ser incrementada 1.74%, para poder obtener una buena precisión.

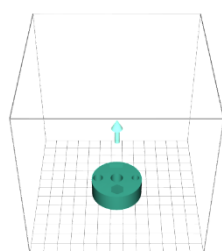
Etapas de preparación del material

En esta etapa se realizó la preparación del material de adición para la impresión de las piezas mecánicas, en donde el polvo utilizado fue el PA12 el cual fue tamizado y mezclado. Es importante recalcar que, para una correcta impresión de piezas el fabricante recomienda una mezcla de 70% de material nuevo y 30% de material ya usado.

Etapas de configuración del área de impresión

Este paso es muy importante ya que de este depende la cantidad de material a utilizar en la impresión y la ubicación de la pieza digital en el área de impresión. De la ubicación de la pieza es importante considerar que el área de trabajo de las impresoras no debe superar los 9 cm en los ejes X, Y y Z. Por otra parte, la figura debe ser ubicada como se muestra en la figura 4. En donde la figura cilíndrica es ubicada en el centro del área de impresión para que el láser no afecte la compactación de las capas del material. También, es transcendental revisar que la figura a realizar no quede por fuera del área de impresión y si existen dos figuras diferentes en esta, se deben llevar como mínimo dos milímetros de separación entre pieza y pieza.

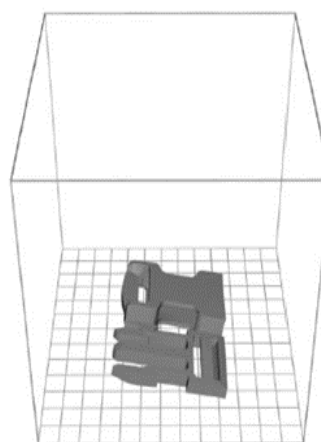
Figura 4. Ubicación espacial optima de la pieza a imprimir



Todos los pasos de posicionamiento de las figuras se hacen en el programa principal del fabricante el cual se llama SINTRATEC CENTRAL en la opción place, la cual posee varias herramientas para facilitar la ubicación de las piezas como el de posicionamiento automático o movimientos en los ejes a través de comandos.

Como resultado principal en esta fase se logró identificar que la mejor posición para imprimir una pieza es en el centro y que si la figura tiene un diseño complejo se le debe dar una inclinación no mayor a 15 grados como se muestra en la ilustración 8, en donde se ubican dos chapas con una ligera inclinación en el centro del área de trabajo.

Figura 5. Posicionamiento de figura con geometrías complejas



Etapas de parametrización

En esta parte del proceso se ajustaron los parámetros en el software SINTRATEC CENTRAL de el diámetro entre capa, número de perímetros, espesor de las líneas del láser y diámetro de las líneas del láser. Estos ayudan a definir la textura de la pieza y la exactitud en las dimensiones.

Como resultado principal se lograron definir estos parámetros los cuales

fueron los recomendados por el fabricante y que se pueden evidenciar en la ilustración 9 en donde el espesor de capa quedó definido en 100µm y el número de perímetros en 1.

Figura 6. *Parámetros de hatching*

Layer Height	100	µm
Number of Perimeters	1	
Perimeter Offset	200	µm
Hatching Offset	120	µm
Hatching Spacing	250	µm
Reset		

Etapas de alistamiento de la impresora

El alistamiento de la máquina consiste en el llenado de las impresoras de material, el cual debe estar preparado previamente. Este material se aplica como se vislumbra en la ilustración 10, en donde la caja de la izquierda debe estar 2 milímetros por debajo de cero de máquina y la caja de la derecha tiene que estar con la longitud de altura de la figura a imprimir más 10 milímetros. Esto se ejecuta para que la impresora pueda usar algunas capas para preparar la impresión.

Figura 4. Llenado de las impresoras 3D



El resultado más importante de esta

etapa consistió en que el usuario debe dejar el material totalmente llano para que el láser no tenga inconvenientes cuando pase sobre el polvo.

Etapas de impresión

En esta parte de la configuración se deben parametrizar los valores de temperatura de la cama de la impresora y la velocidad del láser.

Como resultado se estableció la temperatura de cama en 150 grados y velocidad del láser en 550 mm/s los cuales son los valores más precisos para este tipo de impresión.

No obstante, se debe tener cuidado con estas variables cuando se cambie a otro tipo de material, ya que fácilmente con una temperatura mayor se puede derretir el material de aporte, además, si no se tiene en cuenta la velocidad del láser las capas se pueden pegar unas a otras.

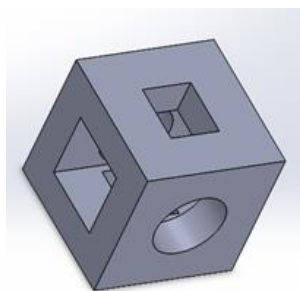
Es importante tener en cuenta que, antes de empezar la impresión la máquina tarda 2 horas en calentar y prepararse para imprimir.

Etapas de validación de la precisión de longitudes, espesores y diámetros con el calibrador vernier

Para poder saber la precisión de las impresoras 3D después de su puesta a punto, fue necesario diseñar en Solid Works tres piezas geométricamente distintas con agujeros y redondeos de diferentes dimensiones las cuales se pueden apreciar en las figuras 8, 9 y 10.

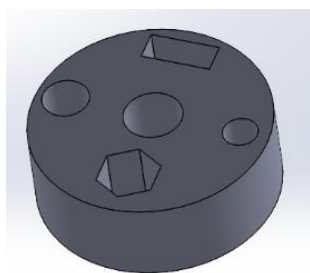
La primera figura es un cubo que tiene agujeros de forma cuadrada, rectangular y redonda.

Figura 8. Cubo de prueba



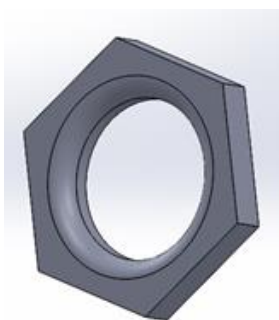
Por su parte, la segunda figura es un cilindro que también posee un agujero en el centro y, a los costados, un rectángulo en su parte superior y hexágono en su parte inferior.

Figura 9. Cilindro de prueba



Finalmente, la última figura diseñada fue un hexágono con un agujero centrado y este tiene un redondeo en una de sus caras.

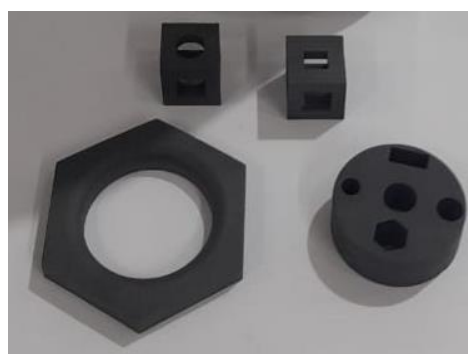
Figura 10. Hexágono de prueba



Posteriormente del diseño en Solid Works, estas figuras fueron impresas en las máquinas SINRATEC para corroborar algunas de sus medidas con el calibrador. En la ilustración 11 se pueden observar cómo quedaron después de su fabricación usando como material el

PA12.

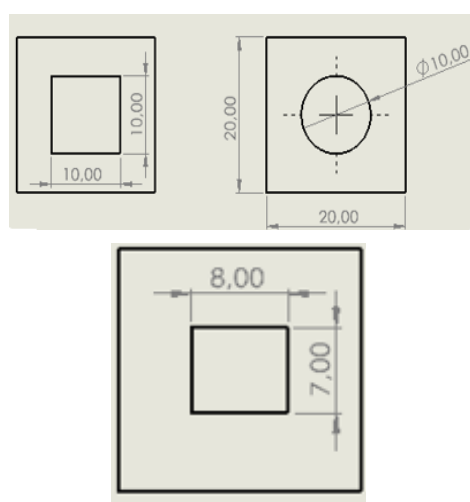
Figura 11. Piezas fabricadas con la impresora 3D



Es necesario recalcar, que las mediciones realizadas con el calibrador fueron de longitud, espesor, diámetros interiores y exteriores cuyos resultados para el cubo, el cilindro y el hexágono se muestran en las ilustraciones 12, 13 y 14.

En la figura 12 se observa que las dimensiones del cubo impreso en sus lados exteriores son de 20 mm y en los interiores es de 10 mm. Además, que la medición del diámetro del agujero es de 10 mm.

Figura 12. Resultado de medición del cubo



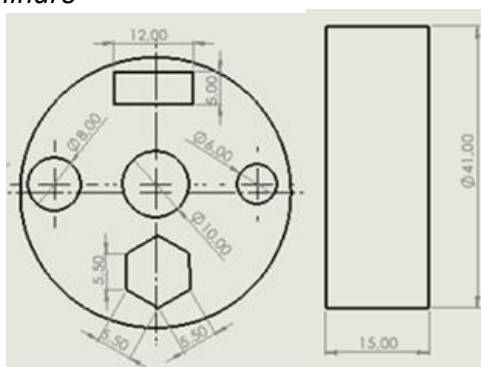
Como resultado en esta medición con el calibrador se puede decir que la impresora en esta pieza tiene una precisión de +/- 0.3 mm en longitudes y

diámetros.

En la figura 13 se muestra que el diámetro exterior del cilindro es de 41 mm y el interior es 10 mm, además, los agujeros internos tienen radios de 4 mm y 3 mm.

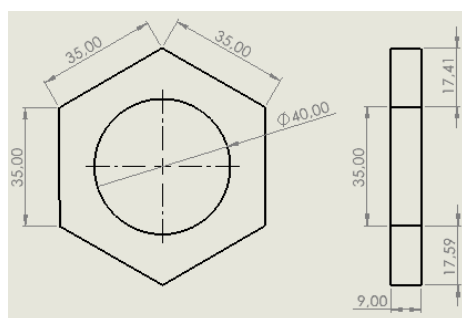
Esta medición indica como resultado que la máquina tiene una precisión en diámetros internos y externos de ± 0.3 mm.

Figura 13. Resultado de medición del cilindro



La figura 14 muestra que las medidas de las longitudes de los lados del hexágono impreso son de 35 mm, el diámetro del agujero es de 40 mm y el espesor de la figura tiene una medida de 9 mm.

Figura 14. Resultado de medición del hexágono



El resultado de precisión para esta pieza fabricada con la impresora 3D por láser sinterizado fue de ± 0.3 mm,

después de realizar las medidas de espesor, longitud, diámetros exteriores e interiores con un calibrador vernier.

Discusión

Este proyecto de investigación tenía un claro resultado, el cual era poder realizar a través de un proyecto de modernización un laboratorio de fabricación aditiva para el SENA de Girardot y que por medio de este laboratorio se lograra caracterizar el prototipado de piezas mecánicas usando la tecnología adoptada. Lo que lograría no solo poder tener la infraestructura física del ambiente de formación, si no poder apropiarse el proceso de diseño, parametrización, calibración, impresión y limpieza de cualquier forma física que se ingenie cualquier persona usando esta tecnología de impresión 3D por láser sinterizado. Esto en aras de que el laboratorio tenga un uso claro y eficaz por parte de los aprendices, instructores y demás grupos de interés del centro de formación.

Por otra parte, un resultado que pertenecía a la caracterización del prototipado era conocer que tanta precisión en dimensiones como diámetros exteriores, interiores, espesores y distancias entre puntos podía llegar a alcanzar este tipo de impresión 3D. Siendo cierto que, en esta investigación ese resultado arrojó ± 0.3 mm en mediciones tomadas con un calibrador. Sin embargo, esta medida puede llegar a ser más precisa si utilizara instrumentos de medición con mayor precisión como un micrómetro o un comparador de caratula. Inclusive en algunas investigaciones se ha encontrado que este tipo de tecnología puede llegar a alcanzar una precisión de ± 0.1 mm usando materiales de adición

con las mismas características del PA12 (3DNATIVES, 2020).

Por último, el proceso de impresión 3D con esta tecnología tiene ciertas limitaciones y una de estas es el área de impresión ya que no permite realizar piezas mecánicas mayores a 9 cm por cada eje y si se requiere una impresora con mayor área de trabajo su costo aumenta significativamente (Formlabs, 2021). Así mismo. El costo del material de adición PA12 supera los 800 mil pesos por 2 litros lo que no permitiría tan fácilmente el uso masificado de esta técnica. Sin embargo, al ser una tecnología asociada a la industria 4.0 es muy pertinente que el SENA tenga este tipo de equipos para acercarla a sus grupos de interés ya que en un futuro cercano será el tipo de fabricación más usado en la industria (EISI, 2018).

Conclusiones

Con relación al objetivo general, se concluye que el uso y caracterización de estas tecnologías permitió la gestión, el control, la descripción y establecer estándares para que los aprendices e instructores del SENA Girardot logren hacer uso del laboratorio de fabricación aditiva con mayor facilidad, permitiendo vincular este, a los proyectos formativos de tituladas como mantenimiento electromecánico industrial, mecánica de maquinaria industrial y además permitió la formulación de nuevos proyectos de investigación por parte del semillero SIMMEN que pertenece al grupo de investigación tecnología y productividad del centro de formación.

En cuanto al proceso de fabricación e impresión se evidencio que la etapa de calentamiento y enfriamiento de la máquina en algunas ocasiones puede

llegar a gastar el doble de tiempo que el mismo proceso de impresión llegando a alcanzar las 4 horas. Por otro lado, Los procesos de fabricación aditiva por sinterizado láser selectivo son mucho más rápido que tecnologías de impresión 3D como FDM o Poliyet. Así mismo, al realizarse el proceso de impresión en una cama totalmente cubierta con el material de aporte esto facilita la realización de figuras con vaciados y elementos que no tiene una estructura que lo sostengan.

Finalmente, la precisión alcanzada por las impresoras 3D de SLS es de $\pm 0,3$ mm en mediciones de espesores, longitudes, diámetros interiores y exteriores en figuras geométricas como cuadrados, cilindros, hexágonos en diferentes operaciones de extrusión y vaciado, utilizando el software de diseño de Solid Works. Es importante recalcar que, esta medida fue realizada por medio de un calibrador vernier y muestra unos resultados óptimos para piezas mecánicas y prototipos que puedan tener una tolerancia igual o mayor a la alcanzada en este tipo de tecnología.

Referencias bibliográficas

- 3D natives. (22 de Septiembre de 2020). 3D natives. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/tecnologias-3d/#!>
- 3DNATIVES. (22 de Septiembre de 2020). 3DNATIVES. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/tecnologias-3d/#!>
- 3DNATIVES. (22 de Septiembre de 2020). 3DNATIVES. Obtenido de <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/#!>

- ACERA. (2019). Estadísticas sector de generación de energía eléctrica renovable. Santiago de Chile. Obtenido de <https://acera.cl/estadisticas/>
- Aguilar, L. (2017). Industria 4.0: la cuarta revolución industrial. Bogotá: Alfaomega.
- Amacher, R., Cugnoni, J., Botsis, J., Sorensen, L., Smith, W., & Dransfeld, C. (2014). Thin ply composites: Experimental characterization and modeling of size-effects. *Composites Science and Technology*, 121-132.
- Ambrogio, G., Filice, L., & Gagliardi, F. (2012). Formability of lightweight alloys by hot incremental sheet forming. *Materials and Design*, 501-508.
- Arias, O. (2005). Nuevas propiedades físicas de materiales. *Ingeniería*, 39-46.
- Artec3D. (15 de Noviembre de 2020). Artec3D. Obtenido de <https://www.artec3d.com/es/cases/reverse-engineering>
- Bourell, D. (2009). Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing. Texas: Texas University.
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., & Pambaguian, L. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 430-450.
- Chaparro, B. (2017). Impresora de Moldes. Instituto politécnico de pomar, Lisboa.
- Cortés, O. (2015). Propiedades que definen los materiales resilientes en arquitectura. *Tecnología*, 117-126.
- COTEC. (2011). Fabricación aditiva. Madrid: Documentos Cotec de Oportunidades Tecnológicas.
- CUI, H., Nowicki, M., Fisher, J. P., & Zhang, L. G. (2017). 3D Bioprinting for Organ Regeneration. *Advanced Healthcare Materials*.
- Del Val, J. (2019). Industria 4.0: la transformación digital de la industria. Madrid.
- Domingo-Espin, M., Puigoriol-Forcad, J. M., Garcia, G. A., Lluma, J., Borros, S., & Reyes, G. (2015). Mechanical property characterization and simulation of fused deposition modeling Polycarbonate parts. *Materials and Design*, 670-677.
- Dorothal, M. (22 de mayo de 2018). SOLAR PLAZA. Obtenido de <https://www.solarplaza.com/channels/top-10s/11883/top-30-latin-american-solar-pv-plants-2018-update/>
- EISI. (1 de Febrero de 2018). Fabricación aditiva: qué es y qué valor nos aporta. Obtenido de <https://www.esic.edu/rethink/tecnologia/fabricación-auditiva-que-es-y-que-valor-nos-aporta>
- EPICOR. (22 de Septiembre de 2020). EPICOR. Obtenido de <https://www.epicor.com/es-mx/resource-center/articles/what-is-industry-4-0/>
- FAO. (1995). BOSQUES, ÁRBOLES Y COMUNIDADES RURALES - FASE II. Obtenido de <http://www.fao.org/3/x5600s/x5600s05.htm#el%20concepto%20del%20desarrollo%20sostenible>
- Formlabs. (14 de Enero de 2021). Formlabs. Obtenido de <https://formlabs.com/latam/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/>
- Fu, Q., Saiz, E., Rahaman, M. n., & Tomsia, A. P. (2013). Toward strong and tough glass and ceramic scaffolds for bone

- repair. *Advanced Functional Materials*, 5461-5476.
- Garcia, A. (2018). Propuestas para la optimización de piezas para fabricación aditiva. *Ingeniería e Industria*, 293-300.
- Gebhardt, A. (2012). *Understanding Additive Manufacturing*. Hanser Gardner Publications., 50.
- Gómez, R. (2012). Del desarrollo sostenible según Brundtland a la sostenibilidad como biomimesis. Bilbao: Hegoa.
- Héndrick, M. (2018). Estudio de la resistencia a la tracción y a la flexión de materiales compuestos de matriz polimérica fabricados mediante impresión 3D. Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima.
- Hernández, P. (2018). Tecnologías de fabricación aditiva. Las Palmas: Servicio de Publicaciones y Difusión Científica de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.
- Hopkinson, N. (2006). *Rapid Manufacturing - An Industrial revolution for the digital age*. John Wiley and Sons Ltd UK., 36-46.
- IMOCON. (22 de Septiembre de 2020). Layer3D. Obtenido de <https://imocom.com.co/tecnologias-y-productos/>
- Khorasani, A. M., Goldberg, M., Doeven, E. H., & Littlefair, G. (2015). Titanium in biomedical applications—properties and fabrication: A review. *Journal of Biomaterials and Tissue Engineering*, 593-619.
- Kruth, J. (2013). Lasers and materials in selective laser sintering. *Assembly Automation*, 357-371.
- Mendoza de puelles, B. (2018). Uso, desarrollo, perspectivas y repercusión de la fabricación aditiva. Universidad de Sevilla, Sevilla.
- Ministerio del Trabajo. (2016). Plan de Empleo del Departamento de Cundinamarca. Bogotá: Opciones Gráficas Editores Ltda. Obtenido de <http://www.cundinamarca.gov.co/wcm/connect/00b375db-d4c7-47e8-8071-4f253797e4bf/Plan+Dptal+Empleo+Cun d.pdf?MOD=AJPERES&CVID=kzdrQoW>
- Observatorio Laboral SENA. (2019). Observatorio Laboral SENA . Obtenido de <https://observatorio.sena.edu.co/Tendencia/Informes>
- Perasso, V. (12 de Octubre de 2016). BBC Mundo. Qué es la cuarta revolución industrial. Obtenido de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-37631834>
- Portafolio. (12 de Diciembre de 2019). América Latina con el peor crecimiento económico en 7 décadas. Obtenido de <https://www.portafolio.co/internacional/cepal-crecimiento-america-latina-536483>
- Powney, D. (2010). *Propiedades mecánicas y termicas de los materiales*. Bogotá: Reverté.
- Prontubeam. (22 de Septiembre de 2020). prontubeam. Obtenido de https://www.prontubeam.com/articulos/12_2015_PROP_MAT/12_2015_PROP_MAT_articulo.pdf
- Rankouhi, B., Javadpour, S., Delfanian, F., & Letcher, T. (2016). Failure Analysis and Mechanical Characterization of 3D Printed ABS With Respect to Layer Thickness and Orientation. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 467-481.
- Rodríguez, C. (20 de Mayo de 2012). Escuela de Organización Industrial. Obtenido de

<https://www.eoi.es/blogs/carollirenero-driguez/2012/05/20/sostenibilidad-en-las-empresas/>

desarrollo de productos. Valencia: XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos.

Sastre, R. (2010). Propiedades de los materiales y elementos de construcción. Barcelona: UPC edicions.

SCULPTEO. (15 de Noviembre de 2020). SCULPTEO. Obtenido de [https://www.sculpteo.com/es/material-es/sls-materiales/#:~:text=SLS%20\(Selective%20Laser%20Sintering%20%E2%80%93%20Sinterizaci%C3%B3n,acuerdo%20con%20su%20modelo%203D](https://www.sculpteo.com/es/material-es/sls-materiales/#:~:text=SLS%20(Selective%20Laser%20Sintering%20%E2%80%93%20Sinterizaci%C3%B3n,acuerdo%20con%20su%20modelo%203D).

SENA CTDPE. (2021). Plan Tecnológico 2020-2030 Centro de la Tecnología del Diseño y la Productividad Empresarial. Girardot.

SIEMENS . (22 de Septiembre de 2020). SIEMENS ENERGY. Obtenido de https://www.siemens-energy.com/global/en/news/key-topics/additive-manufacturing.html?stc=wwgp100148&s_kwid=AL!462!3!343516721726!b!!g!!%2Badditive%20%2Bmanufacturing&ef_id=EA!a!QobChM!iJPPnJv96wIVDDiGCh1LWgleEAAYASAAEgI5afD_BwE:G:s

UMNG. (7 de Octubre de 2019). Universidad Militar Nueva Granada. Obtenido de http://virtual.umng.edu.co/distancia/ecosistema/odin/odin_desktop.php?path=Li4vb3Zhcy9yaWVwL2Vjb25vbWlhX2NvbG9tYmlhbmEvdW5pZGFkXzlv#slide_6

Unidad de Planeación Minero Energética. (22 de Octubre de 2019). Unidad de planeación minero energética. Obtenido de https://www1.upme.gov.co/SalaPrensa/ComunicadosPrensa/Comunicado_05_2019.pdf

Zahera, M. (2012). La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y