

Productividad de granjas de manufactura aditiva en la cadena de suministro industrial Productivity of additive manufacturing farms in the industrial supply chain

J.M. Suarez-Luna ^{a,*}, J.A. Romero-Guerrero ^a, D. Arenas-Isalas ^a

^a Departamento Manufactura Virtual y Lean y Cad Cae, CIATEQ A. C., 42163 San Agustín Tlaxiaca, Hgo, México.

Resumen

En esta investigación se evalúan las variables de productividad que evidencian que la manufactura aditiva es una herramienta tecnológica que permite a la industria fabricar piezas de refaccionamiento de bajo volumen frente a tecnologías convencionales como el moldeo por inyección plástica. Se utiliza una metodología donde se analizan los costos de materiales e inventario de refacciones, se mide la productividad y escalabilidad de la granja mediante los KPI's (Tasa de utilización de la capacidad, Tiempo de ciclo de producción, Rendimiento de primera pasada (First-pass yield), Tasa de desecho (Scrap rate), Velocidad de producción, Costo por pieza producida, Tiempo medio entre fallas (Mean time between failures - MTBF). Las conclusiones demuestran que las granjas de impresión 3D son una opción viable para enfrentar los retos de suministro de refacciones que no están en stock, tardan mucho tiempo en ser enviadas por los proveedores o ya no se encuentran en el mercado por su antigüedad. Se concluye con un comparativo entre la inyección plástica y la manufactura aditiva del caso de estudio.

Palabras Clave: FDM, granja, refacciones, análisis, materiales.

Abstract

This research evaluates the productivity variables that show that additive manufacturing is a technological tool that allows the industry to manufacture low-volume spare parts compared to conventional technologies such as plastic injection molding. A methodology is used where the costs of materials and spare parts inventory are analyzed, the productivity and scalability of the farm is measured through the KPI's (Capacity utilization rate, Production cycle time, First-pass performance yield), Scrap rate, Production speed, Cost per piece produced, Mean time between failures (MTBF). The conclusions demonstrate that 3D printing farms are a viable option to address the challenges of supplying spare parts that are not in stock, take a long time to be shipped by suppliers, or are no longer on the market due to their age. It concludes with a comparison between plastic injection and additive manufacturing of the case study.

Keywords: FDM, farm, spare parts, analysis, materials.

1. Introducción

La manufactura aditiva o impresión 3D se ha popularizado gracias a la democratización de la tecnología FDM por el open source y en las últimas tres décadas, la tecnología de fabricación aditiva (AM) ha tenido un avance significativo y actualmente se utiliza en una gran variedad de sectores sociales, académicos e industriales. Esta tecnología ha sido referenciada por una serie de etiquetas, incluyendo la creación rápida de prototipos (RP), la fabricación en capas (LM) y la fabricación de sólidos, fabricación de forma libre (SFF) (Bandyopadhyay, 2019).

De acuerdo con la norma ISO/ASTM 52900-2015 la manufactura aditiva se clasifica en:

- Vat Photopolymerization (VP)
- Material Jetting (MJ)
- Binder Jetting (BJ)
- Powder Bed Fusion (PBF)
- Material Extrusion (ME)
- Directed Energy Deposition (DED)
- Sheet Lamination (SL) (Gibson *et al.*, 2015), (Saleh Alghamdi *et al.*, 2021).

La Industria 4.0 ha permitido a las empresas aprovechar soluciones tecnológicas avanzadas junto con estrategias de gestión innovadoras para satisfacer mejor las necesidades de sus clientes. Esto es especialmente importante para las operaciones de servicio, donde la disponibilidad de piezas de repuesto y componentes para mantenimiento y reparaciones

*Autor para la correspondencia: bysuarezmaker@gmail.com

Correo electrónico: bysuarezmaker@gmail.com (Johovani-Misael Suarez-Luna), jorge.romero@ciateq.mx (Jorge-Adán Romero-Guerrero) david.arenas@ciateq.mx (David Arenas-Isalas).

oportunos es crucial para minimizar el tiempo de inactividad y maximizar la eficacia operativa y la capacidad de respuesta. Más específicamente, la escasez de piezas de repuesto puede ser potencialmente catastrófica, ya que un componente fallido puede provocar prolongadas interrupciones y fallos del sistema (Huiskonen, 2001), (Rustenburg *et al.*, 2000).

La adopción de la impresión 3D en la fabricación de piezas de repuesto ha recibido una atención creciente recientemente, y el número de publicaciones se ha triplicado en los últimos diez años. Entre estas investigaciones, casi el 50 % se centran en áreas de ciencia de materiales e ingeniería mecánica, con un énfasis en el desarrollo de tecnología avanzada para ampliar los dominios de aplicación (McDermott *et al.*, 2021). Sin embargo, no se ha estudiado bien cómo la adopción de esta tecnología impacta en la cadena de suministro de piezas de repuesto. Algunos pocos estudios y reportes tocan este tema desde un punto de vista cualitativo. Por ejemplo, Holmström *et al.* (2010) destacaron los beneficios de la fabricación aditiva y sus soluciones para el suministro de piezas de repuesto en la industria aeronáutica a través de revisiones bibliográficas y entrevistas a expertos. Luego, en su artículo, se delineó un procedimiento de evaluación de viabilidad. Holmström y Partanen (2014) en otro estudio, señalaron que la introducción de la fabricación aditiva puede aumentar la disponibilidad de piezas de repuesto y cambiar la configuración de la cadena de suministro al acercarse más a las ubicaciones de los usuarios. Más recientemente, Gisario *et al.* (2019) revisaron la aplicación de la fabricación aditiva en la industria de la aviación comercial.

Una revisión de la literatura previa muestra que la adopción de la fabricación aditiva (AM, por sus siglas en inglés) ha atraído una atención creciente en el área de investigación operativa, pero aún se encuentra en una etapa preliminar. Muchos trabajos cualitativamente discutieron los posibles beneficios y desafíos que trae consigo la AM desde la perspectiva de la gestión de operaciones. Al elaborar un plan para investigaciones futuras, todos estos estudios cualitativos resaltaron la importancia de contar con una herramienta de verificación y gestión cuantitativa para la cadena de suministro de AM. Sin embargo, solo se puede encontrar un puñado de estudios cuantitativos. Al revisar estos trabajos cuantitativos limitados, se pueden abordar algunas brechas de investigación.

En primer lugar, los estudios cuantitativos existentes en su mayoría estudiaron un caso deducido con una estructura muy simple (Khajavi *et al.*, 2014), (Li *et al.*, 2017), (Li *et al.*, 2018).

Una cadena de suministro de un solo tramo con nodos independientes no puede reflejar bien la realidad. En segundo lugar, la mayoría de estos estudios solo compararon costos entre diferentes escenarios (Khajavi *et al.*, 2014), (Khajavi *et al.*, 2018), (Tapia-Ubeda *et al.*, 2020).

Deberían estudiarse más indicadores para dar a las partes interesadas una imagen completa del rendimiento del sistema.

En tercer lugar, casi todos los trabajos existentes centraron su atención principal en las configuraciones de la cadena de suministro. Los desafíos en la adopción de AM son más que los cambios en la configuración.

1.1. Short Running Manufacturing

Se refiere a un enfoque de fabricación que se centra en la producción de lotes pequeños de productos, generalmente con ciclos de producción cortos y rápidos cambios entre diferentes productos o variantes. Este concepto contrasta con la fabricación de grandes volúmenes de un solo producto durante períodos prolongados, como en la fabricación en masa tradicional. En la práctica, el short running manufacturing se utiliza para satisfacer demandas específicas del mercado, adaptarse rápidamente a cambios en las preferencias del cliente o en el diseño del producto, reducir los costos de inventario y minimizar el tiempo de entrega.

Este enfoque es especialmente relevante en industrias donde la personalización de productos, la variedad de productos y la rápida respuesta a la demanda son prioritarias, como en la fabricación de productos de moda, electrónica de consumo, dispositivos médicos y automóviles personalizados.

El short running manufacturing se beneficia de tecnologías avanzadas de fabricación, como la impresión 3D y la fabricación aditiva, que permiten la producción ágil y flexible de pequeños lotes de productos con tiempos de configuración mínimos y costos de producción reducidos. Este enfoque también puede integrar sistemas de fabricación automatizados y técnicas de optimización de la cadena de suministro para mejorar la eficiencia y la calidad del proceso de producción.

2. Metodología de análisis

La metodología para evaluar la productividad de una granja de impresión 3D se analiza desde diferentes perspectivas, en la Figura 1 se pueden observar cada una de ellas. El análisis planteado en este trabajo solo abarcará los indicadores claves de desempeño (KPI's por sus siglas en ingles).

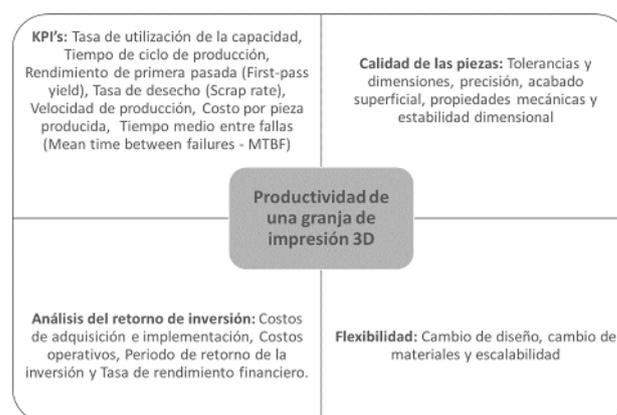


Figura 1: Metodología para evaluar la productividad de una granja de impresión 3D.

Para definir nuestra granja de impresión 3D, es necesario que seleccionemos el tipo de impresora 3D, número de máquinas, volumen de impresión y flujo volumétrico de extrusión.

Actualmente dentro de la tecnología FDM podemos acceder a máquinas de impresión 3D de FDM, de las cuales tenemos diferentes configuraciones como: delta, cartesiana y coreXY.

Para que nuestra granja de impresión 3D tenga una velocidad de impresión de alta velocidad es recomendable utilizar la configuración coreXY. Bajo esta primicia se elige el modelo KINGROON KPL1 la cual tiene las siguientes características:

Tabla 1: características de la impresora KPL1.

Característica	Valor
Volumen de impresión	210x210x210 cm
Sistema de movimiento	Guías lineales MG12
Tipo de extrusor	All metal
Velocidad de impresión	200-300 mm/s
Temperatura de extrusión	<300°C
Cerrada o abierta	Cerrada
Materiales para imprimir	PLA, PETG, ABS, ASA

El presupuesto para la implementación de la granja es el siguiente (solo incluye equipo e insumos), en pesos mexicanos:

Tabla 2: Presupuesto.

Item	Descripción	Cantidad	Costo Unitario	Costo total
1	Impresora Kingroon KPL1	10	\$6,850	\$68,500
2	Kg de Filamento PETG	20	\$350	\$7,000
3	Kit de Refaccionamiento	10	\$1,000	\$10,000

El costo total es de \$85,500.00 pesos mexicanos.

La pieza con la cual se hará el análisis es un seguro para sujetar una tapa de un sensor, actualmente la pieza es fabricada por inyección de plástico y debido a la antigüedad de la maquinaria, esta pieza ya no es comercial, adicional a este problema, la pieza sufre de una concentración de esfuerzo que sobre pasa las propiedades mecánicas y tiende a fallar. Las características actuales de la pieza son:

Tabla 3: Características del seguro.

Propiedad	Dimensión	Unidad
Largo	45	mm
Ancho	25	mm
Alto	27	mm
Peso	7.9	Gramos
Material	Polietileno de alta densidad	
Número de piezas	2500	unidades



Figura 2: Seguro de sensor.

Debido a que esta pieza no cuenta un diseño CAD, se tiene que modelar y se aprovecha para hacer cambios de ingeniería que mejoren la funcionalidad de la pieza. Para tal actividad se realiza en el software FUSION 360 de Autodesk. A continuación, se muestra el modelo 3D.

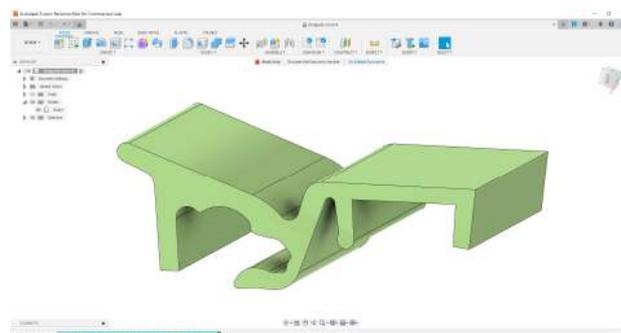


Figura 3: Modelo 3D del seguro de sensor en Fusion 360.

El proceso de manufactura aditiva de manera general se describe en las siguientes fases:

- Modelado 3D. Durante esta fase se pueden tener 2 escenarios, el primero considera que ya se cuenta un archivo 3D que permitirá exportar una malla en formato STL para poder ser importado en el software de laminado, en el escenario 2, no se cuenta con el modelo 3D y se tiene que desarrollar tal modelo, en el caso particular del seguro, se tiene que realizar esta actividad.
- Configuración de la impresión. En esta etapa se utiliza un software que nos permiten laminar el modelo 3D y establecer los parámetros de impresión y obtener el código G que utilizará la impresora 3D.
- Enviar el código G a la impresora. Esta acción puede ser mediante una USB o vía wifi, para la impresora KPL1 se cuenta con una interfaz que permite gestionar los archivos desde una IP.
- Postprocesado de la pieza. En muchas ocasiones es necesario realizar una actividad de lijado o eliminación de soportes para obtener una mejor calidad de las piezas.

De acuerdo con la metodología propuesta, a continuación, se describen los KPI's para su análisis.

2.1. Tasa de utilización de la capacidad

Para calcular la tasa de utilización de la capacidad de una granja de impresoras 3D, se necesita conocer dos variables: la cantidad total de tiempo que las impresoras 3D están siendo utilizadas para imprimir y la cantidad total de tiempo disponible durante un período determinado. A continuación, se describe la formula a desarrollar:

$$Tasa\ de\ utilización = \frac{Tiempo\ utilizado}{Tiempo\ disponible} * 100. \tag{1}$$

Considerando que la impresora KLP1 puede trabajar 24 horas, esto no es recomendable ya que se requiere tiempo de preparación y descarga de los lotes de piezas fabricadas, por lo tanto, tendremos un 80% de tiempo disponible.

El tiempo utilizado sería igual a la capacidad máxima de producción por máquina, es decir, cuantas piezas pueden ser fabricadas en la cama de impresión. Para obtener el tiempo que se tarda en fabricar la pieza se tiene que desarrollar la configuración de laminado y obtener un estimado. A continuación, se muestra una Tabla con las principales variables de configuración.

Tabla 4: Parámetros de impresión.

Variable	Dimensión	Unidad
Altura de capa	0.2	mm
Número de paredes	3	Paredes
Porcentaje de relleno	20	%
Tipo de relleno	Giroide	
Velocidad de impresión	90	mm/s
Temperatura de impresión	235	°C
Material de impresión	PETG	
No. De piezas por lote	1	pieza
Peso de la pieza	7.9	gramos

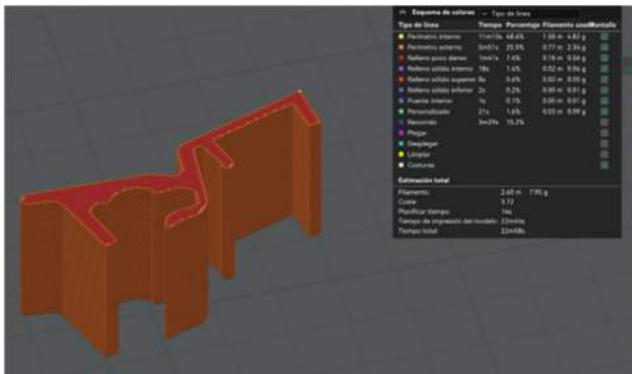


Figura 4: Configuración de parámetros para impresión por FDM en el software OrcaSlicer.

La capacidad máxima de la cama de impresión de la KLP1 es de 36 piezas y tarda 12.05 horas. La granja de impresión 3D sería capaz de producir 360 piezas en 12.05 horas.

Con estos datos nuestra tasa de utilización quedaría en un 64%.

$$Tasa\ de\ utilización = \frac{12.05}{19.2} * 100 = 63\% \quad (2)$$

Para maximizar la tasa de utilización podríamos llegar a fabricar hasta 516 piezas en un periodo de 17.3 horas y nuestra tasa de utilización quedaría de la siguiente manera:

$$Tasa\ de\ utilización = \frac{17.3}{19.2} * 100 = 90\% \quad (3)$$

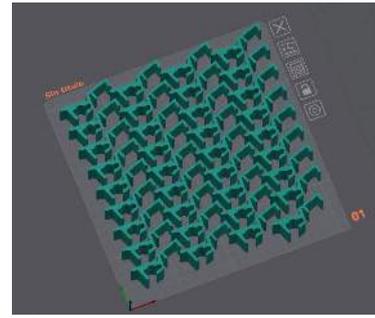


Figura 5: Distribución de la capacidad total de las piezas en la impresora KLP1 en el software OrcaSlicer.

2.2. Tiempo ciclo

El tiempo ciclo de producción por pieza está definido por las siguientes actividades que se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5: Tiempo ciclo de producción. Escenario A.

Actividad	Duración (hr)
Modelado 3D de la pieza	0.5
Segmentado de la pieza en slicer	0.5
Proceso de impresión	0.37
Retiro y limpieza de bandeja	0.07
Retiro de soportes en la pieza	0
Inspección visual de la pieza	0.08
Eliminación de rebabas de la pieza	0.1
Total	1.65

Diagrama de pastel para el tiempo ciclo del escenario A.

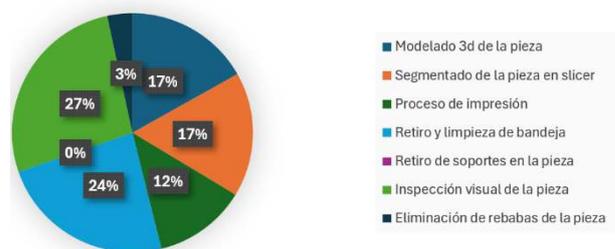


Figura 6: Diagrama de pastel para el tiempo ciclo del escenario A.

Cuando se trabaja por volumen estos valores se ven afectados de la siguiente manera:

Tabla 5: Tiempo ciclo de producción por lote de 36 piezas. Escenario B.

Actividad	Duración (hr)
Modelado 3D de la pieza	0.5
Segmentado de la pieza en slicer	0.5
Proceso de impresión	12.05
Retiro y limpieza de bandeja	0.07
Retiro de soportes en la pieza	0
Inspección visual de la pieza	0.90
Eliminación de rebabas de la pieza	0.90
Total	14.91

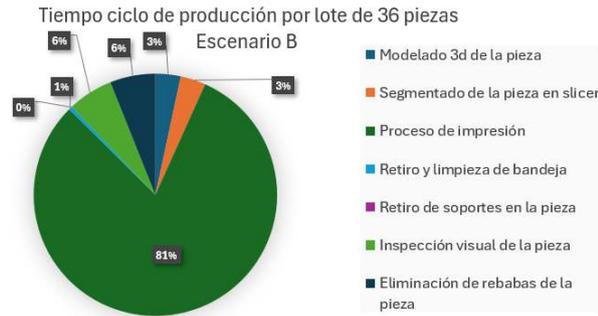


Figura 7: Diagrama de pastel para el tiempo ciclo del escenario B.

Para la granja de impresión 3D quedaría de la siguiente manera:

Tabla 6: Tiempo ciclo de producción por lote de 36 piezas en una granja de impresión 3D de 10 impresoras. Escenario c.

Actividad	Duración (hr)
Modelado 3D de la pieza	0.5
Segmentado de la pieza en slicer	0.5
Proceso de impresión	12.05
Retiro y limpieza de bandeja	0.07
Retiro de soportes en la pieza	0
Inspección visual de la pieza	9.00
Eliminación de rebabas de la pieza	9.00
Total	31.11

Tiempo ciclo de producción por lote de 36 piezas en una granja de impresión 3D de 10 impresoras - Escenario C

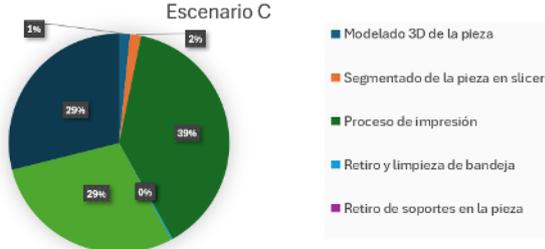


Figura 8: Diagrama de pastel para el tiempo ciclo del escenario C.

Para alcanzar la producción requerida del cliente se requieren de 4.84 servicios de impresión, traducido a 83.68 horas de impresión.

2.3. Rendimiento de primera pasada (FPY)

El rendimiento de primera pasada (FPY), se calcula de la siguiente manera:

$$FPY = \frac{\text{Numero de unidades conformes en el primer intento}}{\text{Numero total de unidades producidas}} * 100\%. \quad (4)$$

Para nuestro caso de practica el número de unidades conformes en el primer intento, es de 34 piezas de un total de 36. Por lo tanto, nuestro FPY es igual a:

$$FPY = \frac{34}{36} * 100\% = 94\%. \quad (5)$$

Tabla 7: Comparación entre los tres escenarios.

Variable	Escenario A	Escenario B	Escenario C
Modelado 3D de la pieza	0.5	0.5	0.5
Segmentado de la pieza en slicer	0.5	0.5	0.5
Proceso de impresión	0.37	12.05	12.05
Retiro y limpieza de bandeja	0.07	0.07	0.07
Retiro de soportes en la pieza	0	0	0
Inspección visual de la pieza	0.08	0.90	9.0
Eliminación de rebabas de la pieza	0.1	0.90	9.0



Figura 9: Comparación entre los 3 escenarios.

2.4. Tasa de desecho

La tasa de desecho por lote en la granja de impresión se calcula con la siguiente formula:

$$\text{Tasa de desecho} = \frac{\text{Número de unidades defectuosas}}{\text{Número total de unidades producidas}} * 100\%. \quad (6)$$

$$\text{Tasa de desecho} = \frac{10}{516} * 100\% = 1.94\%. \quad (7)$$

Para nuestro escenario tenemos una tasa de desecho del 1.94%.

2.5. Velocidad de producción (v_p)

La velocidad de producción (v_p) está definida por el número de unidades producidas por unidad de tiempo, la formula está definida de la siguiente manera:

$$v_p = \frac{\text{Número de unidades producidas}}{\text{Tiempo transcurrido}} = \frac{516}{31.11} = 16.58. \quad (8)$$

2.6. Costo de producción por lote

El costo de producción está integrado por los siguientes conceptos:

- Costo de material (C_m)
- Costo de kWh (C_{kWh})
- Tiempo de producción por lote (T_l)
- Depreciación por unidades de producción (D_{mk})

En la siguiente tabla se describen los parámetros antes mencionados.

Tabla 8: Costo de pieza.

C_m	C_{kWh}	T_l	D_{mh}
\$ 350.00	\$ 0.94	12.05	\$ 0.01957

Con la siguiente formula podríamos calcular el costo de producción:

$$C_{produccion} = N * \left(\frac{p * C_m}{1000} + T_l * C_{kWh} + D_{mh} \right), \tag{9}$$

$$C_{produccion} = 516 * \left(\frac{7.9 * 1000}{350} + 0.37 * 0.94 + 0.01957 \right),$$

$$= \$7,281.57.$$

$$C_{unitario} = \frac{\$7,281.57}{516} = \$14.11. \tag{10}$$

El costo unitario por pieza es de \$14.11, el costo total por las 2,500 piezas que requiere el usuario es de \$35,278.93 pesos mexicanos.

2.7. Tiempo medio entre fallas

El Tiempo Medio Entre Fallas (MTBF, por sus siglas en inglés: Mean Time Between Failures) es una métrica de confiabilidad que indica el tiempo promedio que un sistema o componente opera sin fallar. Para calcular el MTBF, se utiliza la siguiente formula:

$$MTBF = \frac{\text{Tiempo total de operación}}{\text{Número de fallas}}. \tag{11}$$

Tabla 9: Tiempo medio entre fallas.

Tiempo total de operación	Número de fallas
800	3

$$MTBF = \frac{800}{3} = 266.6 \text{ horas}. \tag{12}$$

Esto significa que, en promedio, la impresora 3D opera durante 266.6 horas antes de experimentar una falla.

3. Molde por inyección plástica

Para evaluar el costo del molde por inyección plástica se realiza una cotización en la plataforma ICOMOLD BY FHATOM y el resultado que nos da es un costo aproximado de: \$3,462 dólares con un tiempo de entrega mínimo de 15 días. Adicional a diseñar y fabricar el molde, es necesario considerar las siguientes variables:

- Adquisición de materia prima.
- Adquisición o renta de una inyectora,

- Transporte
- Operadores especializados.

Si solo se contemplara el costo del molde y se dividiera entre las 2500 piezas que solicita el cliente, se tendría un costo por unidad de: 1.3848 dólares y su equivalente en pesos mexicanos sería de: \$25.6188 pesos mexicanos.



Figura 10: Cotización en la plataforma ICOMOLD BY FHATOM.

4. Conclusiones

La manufactura aditiva o impresión 3D en tecnología FDM es una herramienta capaz de satisfacer volúmenes de producción cortos a bajo costo, con una flexibilidad que permite cambios en el diseño de piezas y materiales. En nuestro caso de estudio, se demostró que una granja de impresión 3D de 10 impresoras puede producir 2500 piezas en 83.68 horas, equivalente a 4.3 días, con un costo de \$7,281.57 pesos mexicanos. La fabricación de un molde de inyección para una pieza de este tipo, debido al bajo volumen, no es viable por la alta inversión requerida.

La producción mediante impresión 3D permite una rápida adaptación a las necesidades cambiantes del mercado y la personalización de productos sin incrementar significativamente los costos. Esto ofrece una ventaja competitiva, especialmente en industrias donde la disponibilidad inmediata de repuestos es crítica.

En futuros trabajos, se analizarán las características geométricas y propiedades mecánicas de las piezas producidas para integrar estos aspectos en el estudio, fortaleciendo la investigación y validando aún más la viabilidad y eficiencia de la manufactura aditiva. Además, se explorará la implementación de granjas de impresión 3D en sistemas de manufactura más amplios y su impacto en la cadena de suministro y logística industrial.

Comparando la tecnología convencional de inyección plástica nos arroja un costo mínimo de al menos 2 veces el costo unitario por pieza en referencia con la manufactura aditiva o impresión 3D.

Referencias

Bandyopadhyay, A., Bose, S. (2019). Additive Manufacturing. CRC Press.

Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., & Mehrpouya, M. (2019). Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review. Journal of Manufacturing Systems, 53, 124-149.

Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., & Walter, M. (2010). Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. Journal of manufacturing technology management, 21(6), 687-697.

Holmström, J., & Partanen, J. (2014). Digital manufacturing-driven transformations of service supply chains for complex products. Supply Chain Management: An International Journal, 19(4), 421-430.

- Huiskonen, J. (2001). Maintenance spare parts logistics: Special characteristics and strategic choices. *International journal of production economics*, 71(1-3), 125-133.
- Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). *Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing*. Springer.
- Khajavi, S. H., Partanen, J., & Holmström, J. (2014). Additive manufacturing in the spare parts supply chain. *Computers in industry*, 65(1), 50-63.
- Khajavi, S. H., Deng, G., Holmström, J., Puukko, P., & Partanen, J. (2018). Selective laser melting raw material commoditization: impact on comparative competitiveness of additive manufacturing. *International Journal of Production Research*, 56(14), 4874-4896.
- Li, Y., Jia, G., Cheng, Y., & Hu, Y. (2017). Additive manufacturing technology in spare parts supply chain: a comparative study. *International Journal of Production Research*, 55(5), 1498-1515.
- Li, Y., Cheng, Y., Hu, Q., Zhou, S., Ma, L., & Lim, M. K. (2019). The influence of additive manufacturing on the configuration of make-to-order spare parts supply chain under heterogeneous demand. *International journal of production research*, 57(11), 3622-3641.
- McDermott, K. C., Winz, R. D., Hodgson, T. J., Kay, M. G., King, R. E., & McConnell, B. M. (2021). Performance tradeoffs for spare parts supply chains with additive manufacturing capability servicing intermittent demand. *Journal of Defense Analytics and Logistics*, 5(2), 179-213.
- Rustenburg, W. D., van Houtum, G. J., & Zijm, W. H. M. (2000). Spare parts management for technical systems: resupply of spare parts under limited budgets. *IIE transactions*, 32(10), 1013-1026.
- Saleh Alghamdi, S., John, S., Roy Choudhury, N., & Dutta, N. K. (2021). Additive manufacturing of polymer materials: Progress, promise and challenges. *Polymers*, 13(5), 753.
- Tapia-Ubeda, F. J., Miranda, P. A., Roda, I., Macchi, M., & Durán, O. (2020). Modelling and solving spare parts supply chain network design problems. *International Journal of Production Research*, 58(17), 5299-5319.