

IDENTIFICACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS FUERZAS INERCIALES EN UNA IMPRESORA 3D

IDENTIFYING THE EFFECTS OF INERTIAL FORCES IN A 3D PRINTER

M. R. Cruz Deviana¹
J. Cortés Pérez²
A. Aguilar Pérez³
J. García Zárraga⁴

RESUMEN

El rediseño periódico de elementos mecánicos y maquinaria es esencial para la calidad de los productos y la optimización de procesos industriales. Esta mejora permite la reducción de costos, la disminución de tiempos de manufactura y el incremento de la durabilidad de las máquinas. Un factor importante que considerar en el diseño de maquinaria, y particularmente en impresoras 3D, son las fuerzas inerciales. Estas fuerzas, generadas por la aceleración y desaceleración de los componentes móviles en un sistema, pueden afectar la precisión y estabilidad de un proceso. En el contexto de la fabricación mediante el proceso MDF, se propone un estudio para identificar los efectos de las fuerzas inerciales durante el prototipado de elementos con el propósito de mejorar la configuración de una impresora 3D cartesiana, considerando un análisis dimensional de piezas, y posteriormente, proponer una redistribución de componentes mecánicos y electrónicos para optimizar su desempeño, minimizando las fuerzas inerciales y vibraciones no deseadas, con el objetivo de mejorar la precisión y calidad de los elementos fabricados.

ABSTRACT

The periodic redesign of mechanical elements and machinery is essential for ensuring product quality and optimizing industrial processes. These improvements can lead to cost reduction, decreased manufacturing times, and increased machine durability. A critical factor in machinery design, particularly for 3D printers, is the management of inertial forces. These forces, generated by the acceleration and deceleration of moving components, can negatively impact process precision and stability. In the context of manufacturing using the MDF process, a study is proposed to identify the effects of inertial forces during element prototyping. The goal is to improve the configuration of a Cartesian 3D printer by analyzing part dimensions and subsequently proposing a redistribution of mechanical and electronic components. This redistribution aims to optimize performance by minimizing inertial forces and unwanted vibrations, ultimately improving the precision and quality of the manufactured elements.

ANTECEDENTES

Para el área de la mecánica, la manufactura mediante tecnología de impresión 3D ha revolucionado la creación de prototipos y la producción de piezas personalizadas mediante procesos como la sinterización, la estereolitografía y la deposición de material fundido. Estas técnicas, con apoyo de impresoras 3D mediante la configuración delta y cartesiana (Ahmed et al., 2020), han experimentado mejoras significativas gracias a diversas modificaciones (Nooralhoda et al., 2020) (Okezie et al., 2023). A pesar de los avances en la manufactura

¹ Profesor de Asignatura en la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Universidad Nacional Autónoma de México. ricardocruzy4@aragon.unam.mx

² Coordinador del Centro Tecnológico en la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Universidad Nacional Autónoma de México. jacop@unam.mx

³ Profesor de Asignatura en la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Universidad Nacional Autónoma de México. arturoaguilar8s5@aragon.unam.mx

⁴ Jefe de Carrera de Ingeniería Eléctrica Electrónica en la Facultad de Estudios Superiores Aragón. Universidad Nacional Autónoma de México. electricaelectronica@aragon.unam.mx

aditiva, las impresoras 3D tipo cartesiana aún presentan desafíos técnicos durante el prototipado, como la adherencia de la primera capa, la deformación de la pieza durante su fabricación, la obstrucción de la boquilla y la calidad de los elementos.

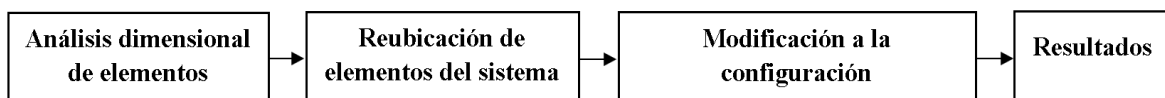
Algunos de estos problemas pueden ser ocasionados por fuerzas inerciales generadas durante el funcionamiento de la impresora. Las aceleraciones y desaceleraciones de los componentes móviles, como el cabezal ubicado en el eje x y la cama caliente que se encuentra en el eje y , generan fuerzas que pueden afectar la precisión dimensional y la estabilidad del proceso, resultando en capas irregulares y componentes no detallados. Sin embargo, mediante la propuesta de modificación a la configuración de una impresora 3D comercial, es posible mitigar estos efectos negativos y lograr una mayor precisión en las dimensiones de las piezas, reduciendo la variabilidad en las dimensiones y obteniendo resultados más detallados (Hasan et al., 2019). Un rediseño a la configuración que proporciona el fabricante puede mejorar la gestión del proceso, lo que se traduce en un menor tiempo de impresión sin comprometer la calidad de los elementos (Chalupa et al., 2023).

Es importante considerar que la impresión 3D ha emergido como una tecnología con aplicaciones tanto en la industria como en la formación de ingenieros, permitiendo la creación rápida y eficiente de prototipos y piezas personalizadas. Es posible que el impacto llegue a sectores como la medicina, la aeroespacial y la automotriz. Simultáneamente, la integración de la impresión 3D en la educación está proporcionando habilidades prácticas y conocimientos actualizados, permitiendo a los estudiantes diseñar, prototipar y fabricar, fomentando la creatividad, la resolución de problemas y el pensamiento crítico. La exposición a conceptos de fabricación digital, como CAD y fabricación aditiva, prepara a los ingenieros para diseñar procesos de producción eficientes, optimizar cadenas de suministro y desarrollar productos innovadores, satisfaciendo así las demandas del mercado (Yi Wei et al., 2017).

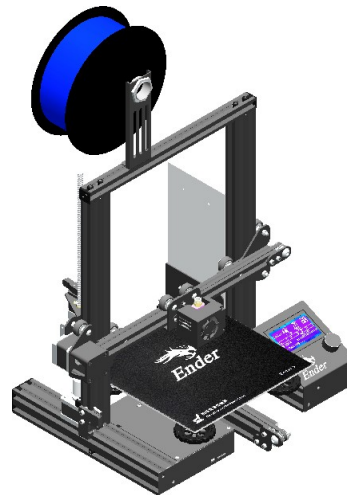
METODOLOGÍA

En la presente investigación se propone el desarrollo de la siguiente metodología, dada por la Figura 1.

Figura 1. Metodología para la disminución del efecto de las fuerzas inerciales en una impresora 3D.



Mediante el uso de CAD y una impresora 3D cartesiana, es posible analizar el diseño de una estructura y proponer soluciones de mejora. Esto se logra al observar el proceso de manufactura e identificando los elementos clave que influyen en el proceso de manufactura. La configuración de la impresora se muestra en la Figura 2.

Figura 2. Modelo CAD de impresora 3D cartesiana.

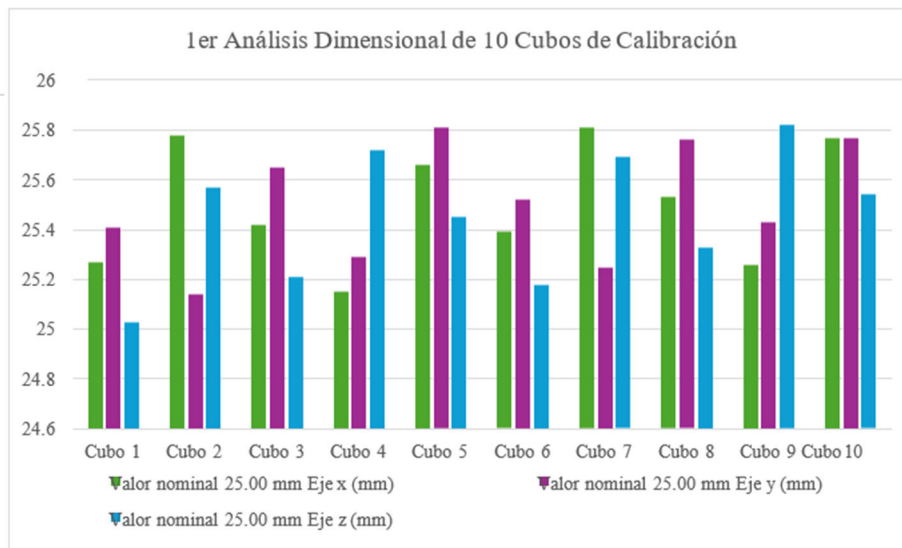
En la estructura se puede observar el soporte de la bobina, la fuente de alimentación y la estructura de aluminio que soporta el eje z y el cabezal. Para el análisis dimensional, se propone el uso de ácido poliláctico y se consideran los parámetros que se muestran en la Tabla 1 en un software convencional de manufactura aditiva 3D.

Tabla 1. Valores de los ajustes de impresión 3D para experimentación.

Ajuste	Valor
Material	PLA
Diámetro de boquilla	0.4 mm
Altura de capa	0.2 mm
Número de paredes	4
Densidad	50%
Patrón de relleno	Rejilla
Velocidad	120 mm/s
Temperatura	200 °C

De manera inicial, se llevó a cabo una recopilación de datos mediante la fabricación de 10 cubos de calibración, con dimensiones de 25 mm en cada uno de sus lados (ejes x, y, z). Estos elementos fueron impresos utilizando una velocidad máxima de impresión de 180 mm/s, según la ficha técnica del fabricante. El tiempo total de manufactura para los 10 cubos fue de 1 hora y 12 minutos, donde los resultados se muestran en la Figura 3.

Figura 3. Valores dimensionales del cubo de calibración para eje x, y, z.



La gráfica revela la disparidad entre las dimensiones nominales y las dimensiones físicas de cada uno de los ejes del cubo, un fenómeno cuantificado mediante la siguiente fórmula:

$$s = \sqrt{s^2}$$

Donde:

$$s^2 = \sum (x_i - \bar{x}) / (n-1)$$

$$\sum (x_i - \bar{x})^2$$

$$\bar{x} = (x_1 + x_2 + \dots + x_n) / n$$

La presencia de desviaciones en los ejes x, y y z con respecto al valor nominal de 25 mm indica una dispersión en las dimensiones de los cubos, siendo que la tolerancia proporcionada por el fabricante es ± 0.1 mm. Se observó una desviación de 0.2415 mm en el eje x, 0.2377 mm en el eje y, y 0.2605 mm en el eje z. Estas desviaciones, aunque parecen mínimas, pueden ser significativas, especialmente en piezas que requieren precisión milimétrica, como aquellas que se utilizan en ensambles. Un valor de desviación mayor implica una mayor dispersión en las dimensiones, lo que puede resultar en problemas de funcionamiento, necesidad de retrabajo y tiempos de fabricación prolongados.

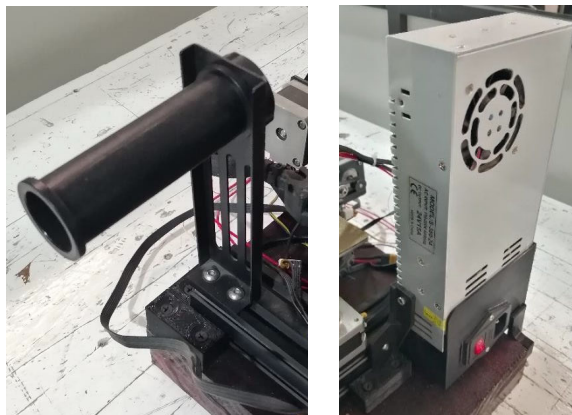
Reubicación de elementos del sistema

La reubicación de componentes de la impresora tiene como objetivo comprobar si existe una relación entre la variabilidad dimensional y la ubicación de estos elementos. En caso de ser afirmativo, es necesario encontrar una configuración óptima que permita reducir el valor de las desviaciones en los ejes mediante $s = \sqrt{s^2}$.

Para lograr esto, se propone reubicar el soporte de la bobina de filamento hacia el lado

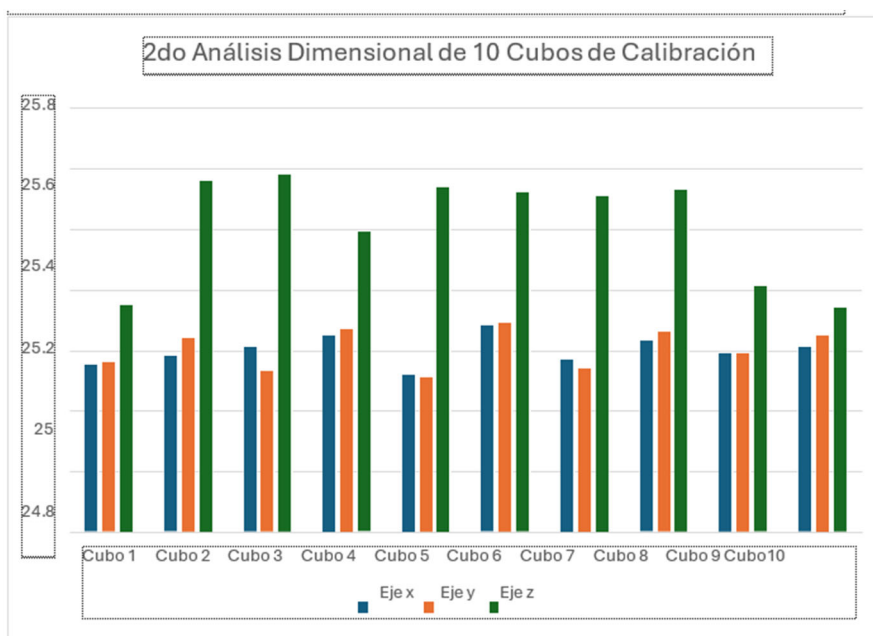
izquierdo de la base, y al mismo tiempo, desplazar la fuente de alimentación eléctrica hacia el extremo derecho de la base, tal como se muestra en la Figura 4.

Figura 4. Reubicación de componentes de una impresora 3D.



Para la reubicación de la fuente de alimentación fue necesario el desarrollo de componentes que permitan su integración en la estructura mediante manufactura aditiva. Al realizar una segunda impresión de 10 cubos de calibración, considerando los mismos valores en los ajustes de impresión, se obtuvieron las siguientes gráficas que se muestran en la Figura 5.

Figura 5. Valores dimensionales del cubo de calibración para eje x, y, z posterior a la reubicación del soporte de la bobina y fuente de alimentación.



En el segundo análisis de variabilidad se observó una disminución en los valores del eje x y y, mientras que el eje z mantuvo una desviación similar al primer análisis. La desviación estándar para el eje x fue de 0.2179 mm, para el eje y de 0.2563 mm y para el eje z de 0.4220

mm. Se puede observar una correlación entre la desviación de cada eje, lo que sugiere que, si un eje no está funcionando de manera adecuada o no está calibrado, puede influir en el comportamiento de los demás ejes.

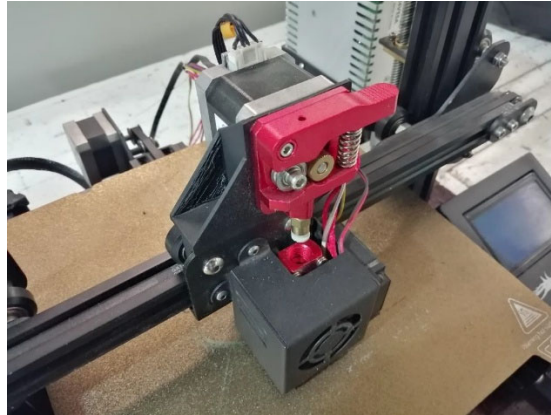
Para realizar un tercer análisis, donde se pueda apreciar si existe una disminución en la desviación en el eje z, se instaló un segundo motor con varilla apoyado en el marco de aluminio de la impresora, con el fin de generar una extrusión estable. La configuración predeterminada de la impresora, al trabajar con un solo motor para el eje z, generaba un esfuerzo importante en esta parte del sistema de ascenso, ya que dicho dispositivo permite la elevación o descenso del eje x. El sistema integrado en el marco de la impresora incluye un motor nema 17 con un torque de 3.7 kg.cm, una varilla roscada de 3/8 de pulgada de acero galvanizado y un adaptador, como se muestra en la Figura 6.

Figura 6. Integración de un segundo eje z en el marco de la impresora 3D (lado derecho).



Para calibrar los ejes x e y, se tensó la banda elástica para que el motor pueda mover el extrusor y la cama caliente, respectivamente. En el eje z se integró un sensor de auto nivelación que ajusta de manera automática la altura respecto a la cama caliente, utilizando un sensor de distancia que hace contacto con diferentes puntos distribuidos en toda la superficie. Para esto, se actualizó el software de la impresora con recursos de la página oficial del fabricante. La extrusión de filamento se modificó implementando un adaptador en el cabezal que mejora la salida de material al omitir el tubo bowden entre el extrusor y el cabezal, como se ve en la Figura 7.

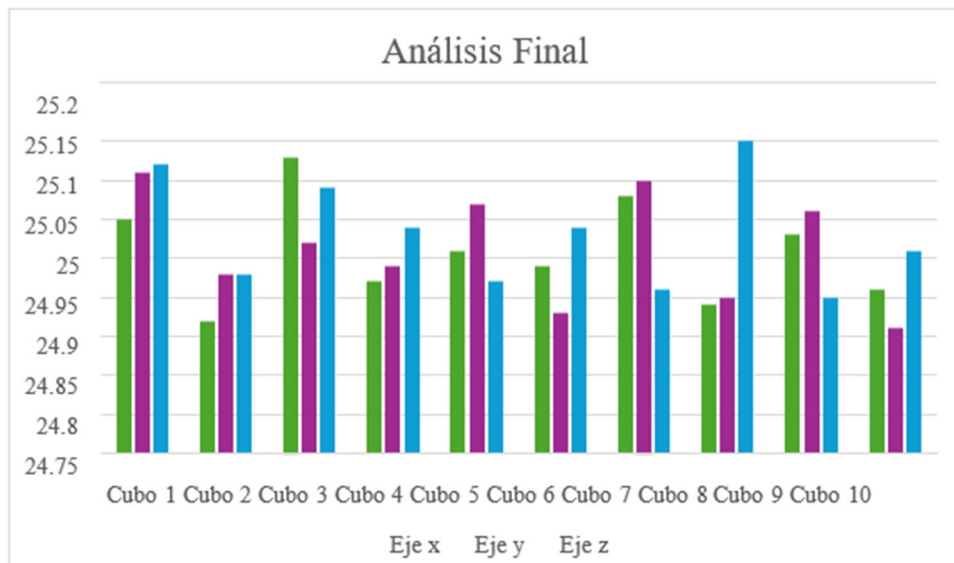
Figura 7. Soporte para motor en el extrusor.



RESULTADOS

Un análisis final proporciona los datos que se pueden observar en la Figura 8. La desviación del eje z disminuyó a un valor de 0.0699 mm.

Figura 8. Análisis final de dimensiones de 10 cubos de calibración.



Los valores que se pueden observar se encuentran de 25.12 mm a 24.95 mm, con una desviación cercana al valor nominal que no supera los valores de 24.9 mm y 25.20 mm. Considerando la precisión de una máquina CNC de este tipo en +/- 0.1 mm, se observa que el valor nominal de la pieza está en función de la velocidad de trabajo, influenciado por las fuerzas inerciales generadas durante su funcionamiento, específicamente por el movimiento de los ejes al posicionar el cabezal o al realizar cambios de movimiento que involucran aceleraciones en un corto tiempo.

Análisis de deformación del soporte

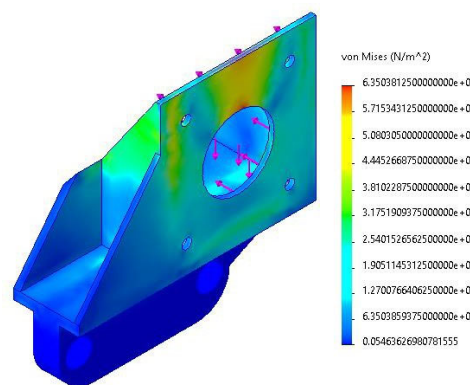
En la fabricación del soporte del extrusor se consideran los siguientes valores, que se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Ajustes de impresión para soporte de extrusor.

Ajuste	Valor
Diámetro de boquilla	0.4 mm
Altura de capa	0.2 mm
Densidad de relleno	100%
Temperatura de extrusión	210 °C
Velocidad	90 mm/s

El tiempo de prototipado inicial para el soporte es de 2 horas y 5 minutos, sin embargo, se puede reducir al modificar algunos parámetros específicos. Se propone aumentar la altura de capa de 0.2 mm a 0.32 mm. La densidad se mantendrá sin cambios, ya que influye significativamente en la estructura del elemento. La temperatura de extrusión se eleva al límite máximo en 220 °C y se aumenta la velocidad de impresión a 120 mm/s. Este último ajuste se debe a la correlación existente entre temperatura y velocidad, lo que resulta en un tiempo de fabricación estimado de 1 hora y 17 minutos. Posteriormente, se realizó un análisis de elementos finitos para confirmar que estos cambios no comprometan el rendimiento del soporte, cuyos resultados se mostrarán en la Figura 9.

Figura 9. Estudio de elemento finito del soporte para motor nema 17.



En la Figura se puede observar el área donde se sitúa el esfuerzo ubicado en la parte central del círculo, el esfuerzo máximo dado por una fuerza de 6.35 Nm^2 . Se puede apreciar que el esfuerzo generado por el motor NEMA 17 no interfiere de manera significativa con la estructura del soporte.

CONCLUSIÓN

El efecto generado por las velocidades de los elementos pertenecientes a las máquinas de impresión 3D cuando están trabajando genera errores. Algunas soluciones son el rediseño y la modificación de la configuración de fábrica de estos dispositivos.

En este caso, la redistribución de elementos permitió disminuir el efecto de las fuerzas

inerciales ocasionadas por la bobina y la fuente de alimentación, sin embargo, este aspecto requiere un análisis más amplio, donde se considere las vibraciones generadas a una velocidad superior de 100 mm/s, utilizando un acelerómetro. Mediante un análisis dimensional, es posible deducir el comportamiento de una máquina, lo que permite corregir o atenuar los errores y estandarizar el proceso a través de una reconfiguración que implique la reubicación de los elementos de mayor peso.

BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, W., Alabdouli, H., Alqaydi, H., Mansour, A., Al Khawaja, H., & Al Jassmi, H. (2020, 10–12 de marzo). *Open source 3D printer: A case study*. En Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM 2020) (pp. 2995–3004). IEOM Society International. <https://www.ieomsociety.org/ieom2020/papers/865.pdf>
- Ahmed Altayeb, A. N., & Abdelgader Elagib, A. A. (2020). Build low cost 3D delta printer using fused deposition modeling technology. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, 9(2). <https://doi.org/10.17577/IJERTV9IS020047>
- Chalupa, V., Stanek, M., Vanek, J., Strnad, J., & Ovsik, M. (2023). Design of dual-head 3D printer. *Manufacturing Technology*, 23(2), 177–185. <https://doi.org/10.21062/mft.2023.032>
- Okezie, R. C., Nwaogu, C., Ikechukwu, I. F., Kadurumba, C. H., & Durumbah, E. (2023). The design and development of a low-cost Cartesian 3D printer. *Advances in Engineering Design Technology*, 5(3). <https://doi.org/10.5281/zenodo.10340709>
- Tasneem, M. H. B., & Amer, G. T. (2019, 23–26 de julio). *Design, fabrication and testing of a 3D printer*. En Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM 2019) (pp. 2334–2344). IEOM Society International. <https://ieomsociety.org/pilsen2019/papers/508.pdf>
- Tay, Y. W. D., Panda, B., Paul, S. C., Noor Mohamed, N. A., Tan, M. J., & Leong, K. F. (2017). 3D printing trends in building and construction industry: A review. *Virtual and Physical Prototyping*, 12(3), 261–276. <https://doi.org/10.1080/17452759.2017.1326724>