



Universidad de Oviedo

# **ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN**

## **GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA**

### **ÁREA DE INGENIERÍA DE LOS PROCESOS DE FABRICACIÓN**

**Artefactos para determinación de errores volumétricos en máquinas de  
fabricación aditiva: estudio y caso práctico**

**D. Jorge Fernández Alonso  
TUTOR: D. Pablo Zapico García**

**FECHA: JULIO 2021**

# ÍNDICE

1.	Introducción y objetivos .....	5
2.	Estado del Arte .....	7
2.1.	TÉCNICAS DE FABRICACIÓN ADITIVA.....	7
2.2.	CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS ARTEFACTOS PARA DETERMINACIÓN DE ERRORES GEOMÉTRICOS.....	11
2.3.	ESTADO DEL ARTE DE LOS ARTEFACTOS.....	12
3.	Materiales y metodología .....	17
3.1.	BANCO DE FABRICACIÓN FFF .....	17
3.2.	DISEÑO DEL ARTEFACTO.....	18
3.3.	PREPARACIÓN DE LA MEDICIÓN DEL ARTEFACTO.....	23
3.4.	FABRICACIÓN DEL ARTEFACTO .....	32
3.5.	MEDICIÓN EN MÁQUINA.....	39
3.6.	MODELO DE ERRORES GEOMÉTRICOS.....	41
3.7.	TRATAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS.....	46
4.	Resultados y discusión. ....	51
4.1.	RESULTADOS DE LA MEDICIÓN.....	51
4.2.	CÁLCULO DE LOS COEFICIENTES DEL MODELO.....	70
4.3.	RESULTADOS CILINDROS .....	76
4.4.	PIEZA DE VALIDACIÓN.....	77
5.	Conclusiones y trabajos futuros.....	87
5.1.	CONCLUSIONES .....	87
5.2.	TRABAJOS FUTUROS .....	88
6.	Bibliografía y referencias. ....	90

7. Anexos..... 92

Glosario de acrónimos

Acrónimo	Significado
AMSA	American Medical Student Association
CAD	Computer-Aided Design
CNC	Control Numérico por Computadora
EPIG	Escuela Politécnica de Ingeniería de Gijón
FDM	Fused Deposition Modeling
FFF	Fused Filament Fabrication
IPF	Ingeniería de los Procesos de Fabricación
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas
NIST	National Institute of Standards and Technology
NPL	National Physical Laboratory
PLA	Plástico Ácido Poliáctico

# 1. Introducción y objetivos

Actualmente la Fabricación Aditiva es una tecnología interesante debido a su capacidad para producir geometrías complejas en un tiempo relativamente corto y sin incrementar de manera sustancial los costes. A pesar de que se está incrementando su uso en la industria para la fabricación de series cortas de componentes de alta complejidad geométrica o para prototipado rápido, aún quedan aspectos a mejorar que permitirían una mayor aplicabilidad. En este sentido, se pueden destacar la precisión, tanto dimensional como geométrica, así como la calidad superficial de los productos. Por ello, el estudio de los errores que se producen en este tipo de fabricación sigue siendo una cuestión latente.

Esta tecnología nació en 1976 en Nagoya, Japón, aunque no fue hasta los años 2000 cuando se empezó a utilizar y desarrollar más a fondo. La fabricación aditiva comenzó por desarrollarse para fabricar componentes de material plástico. Actualmente, existen técnicas de diferente naturaleza que permiten fabricar componentes en aleaciones metálicas, en materiales cerámicos e, incluso, en materiales compuestos.

Entre las técnicas de fabricación aditiva, cabe destacar la técnica de fabricación mediante filamento fundido, FFF de sus siglas en inglés. También conocida como modelado por deposición fundida, FDM, permite fabricar componentes en material termoplástico con un equipamiento realmente simple. Razón de ello, es que sea la técnica de fabricación aditiva más extendida, permitiendo democratizar esta tecnología, a tal punto que la ha hecho conocida mediante el término *impresión 3D*. Entre sus aplicaciones, desde un punto de vista industrial, cabe destacar el desarrollo de prototipos y la fabricación de utillajes. Para ambas aplicaciones resulta interesante abordar la problemática general comentada anteriormente para esta tecnología, de cara a mejorar la calidad de sus productos y, de este modo, su aplicabilidad. El objetivo principal de este trabajo es analizar la posibilidad de utilizar artefactos geométricos fabricados en las propias máquinas de fabricación aditiva para determinar errores volumétricos de las mismas. Esta posibilidad, aparte de caracterizar geoméricamente las máquinas, permitiría la posibilidad de compensar los errores detectados mejorando calidad dimensional y geométrica de los productos.

Estos errores volumétricos, también conocidos como errores geométricos, son aquellos producidos por imperfecciones mecánicas de la cinemática de la máquina. Estos errores pueden provenir de imperfecciones de los diferentes elementos mecánicos que intervienen, tales como, problemas de rectitud de guías lineales o relación de transmisión variables por imperfecciones de fabricación, entre otros; así como de imperfecciones en el montaje, como errores de perpendicularidad entre ejes lineales.

Para abordar el objetivo principal de este TFG, además de realizar un análisis del estado del arte, se plantea desarrollar un procedimiento para determinar los errores volumétricos de una máquina real para su posible compensación a partir de un artefacto fabricado por la misma, a modo de caso de estudio. En este caso, se utiliza un banco de ensayos desarrollado en el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Oviedo, que permite fabricar utilizando la técnica aditiva FFF. Este banco, al igual que el presente TFG, se han desarrollado enmarcados en el proyecto de investigación financiado del Plan Nacional “Compensación en tiempo real de errores en la geometría de capa para procesos de fabricación aditiva” (código DPI2017-83068-P), que está siendo desarrollado actualmente por investigadores del citado área de la Universidad de Oviedo.

Por tanto, para conseguir el objetivo principal de este TFG y la aplicación al caso de estudio comentado, se plantean una serie de objetivos parciales o hitos que habrá que ir consiguiendo en el desarrollo de este trabajo:

- Análisis del estado del arte en busca de trabajos centrados en determinar errores volumétricos de máquinas de fabricación aditiva a partir de artefactos fabricados en las mismas.
- Diseño de artefacto para determinación de errores volumétricos.
- Fabricación del artefacto.
- Medición del artefacto.
- Análisis de resultados de medición del artefacto y propuesta de modelo de errores geométricos específico.
- Demostración de la valía del modelo de errores geométricos propuesto.
- Elaboración de conclusiones acerca del trabajo desarrollado y establecimiento de líneas futuras.

# 5. Conclusiones y trabajos futuros

## 5.1. CONCLUSIONES

En este trabajo fin de grado se ha analizado la posibilidad de utilizar artefactos fabricados en máquinas de fabricación aditiva para determinar los errores geométricos de las propias máquinas. Además, se ha realizado un procedimiento para determinación de estos errores mediante estos artefactos en un caso de estudio real.

Tras realizar una revisión del estado del arte, a pesar de encontrar diversos trabajos que tratan la utilización de artefactos fabricados en máquinas de fabricación aditiva, se constató que pocos de ellos tienen por objeto determinar los errores geométricos de estas máquinas. Estos artefactos más bien están orientados a determinar la calidad alcanzable en la fabricación de diferentes geometrías, ciertamente específicas en algunos casos. Por lo que el artefacto desarrollado en este trabajo prácticamente se inició sin ideas extraídas de trabajos anteriores.

El artefacto diseñado, además de estar orientado a determinar los errores geométricos de la máquina en la que es fabricado, permite proteger en cierto modo los resultados alcanzados con el mismo de efectos específicos del proceso de fabricación que pueden alterar su geometría, utilizando para este fin puntos virtuales en lugar de puntos materializados físicamente.

Tras fabricar y medir el artefacto diseñado, salvando, como se ha descrito, diferentes problemas acontecidos durante el proceso pero de interés para la técnica, se implementó un modelo de errores geométricos. Este modelo, a pesar de no contemplar todos los errores geométricos posibles, sí tiene en cuenta los más importantes, es decir, aquellos derivados de inexactitudes tanto en el montaje de diferentes elementos de guiado, como en las relaciones de transmisión de los sistemas de accionamiento de la máquina.

Este modelo fue más tarde aplicado a una pieza de ejemplo diferente al artefacto anterior, denominada pieza de validación, con el objeto de demostrar la validez del modelo y la ventaja de su utilización. Esta aplicación del modelo consiguió mejorar satisfactoriamente la calidad geométrica de la pieza de validación.

Por otro lado, cabe destacar la detección desviaciones detectada en los diámetros de los cilindros del artefacto inicial, los cuales no afectan a la correcta determinación del modelo de errores geométricos gracias a la utilización de puntos virtuales. A pesar de que estas desviaciones dimensionales no se han abordado en este trabajo, debido a que son errores de proceso, no errores geométricos de máquina, el artefacto diseñado ha permitido detectarlos y se pretenden abordar en trabajos futuros.

En conclusión, se puede afirmar que en este Trabajo Fin de Grado se ha cumplido holgadamente el objetivo de analizar la posibilidad de obtener errores geométricos de máquinas de fabricación aditiva a partir de artefactos fabricados en las propias máquinas, ya que, además de determinar estos errores de una máquina real mediante un artefacto de este tipo diseñado exprofeso, se ha demostrado tanto la valía del modelo implementado con este artefacto como la ventaja de su aplicación mediante una pieza genérica diferente a la del artefacto utilizado para su implementación.

## 5.2. TRABAJOS FUTUROS

A pesar de los logros alcanzados en este TFG se plantean una serie de mejoras respecto al trabajo realizado susceptibles de ser abordadas en el futuro:

- Diseño de artefacto sin base para medición sobre placa de fabricación, evitando que éste se combe una vez fabricado.
- Diseño de artefacto que ocupe un mayor volumen, es decir, mayores rangos de los ejes de máquina.
- Estudio de modelos de errores geométricos más complejos, con más errores, como rectitudes, y con funciones modelizadoras más complejas, como polinomios de grado mayor que uno.

Por otro lado, se pueden destacar algunos aspectos interesantes no tratados en este TFG que pueden ser abordados en el futuro:

- Desarrollo de modelos para compensación de errores geométricos derivados del proceso, como los observados en los diámetros de los cilindros del artefacto.

- Análisis de diferentes parámetros de proceso para mejorar la calidad de los artefactos cuyo objeto sea implementar un modelo de errores geométricos.

## 6. Bibliografía y referencias.

- [1] «3dnatives,» [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/#!>. [Último acceso: 14 2 2021].
- [2] «additive blog,» [En línea]. Available: <https://www.additive.blog/knowledge-base/3d-printers/photopolymer-jetting-3d-printers-polyjet-multijet/>. [Último acceso: 14 2 2021].
- [3] «hb3d.fr,» 14 2 2021. [En línea]. Available: <https://www.hb3d.fr/en/pages/technology/sla-printing-2.html>.
- [4] «[https://blog.laminasyaceros.com/blog/las-7-categor%C3%ADas-de-la-manufactura-aditiva,](https://blog.laminasyaceros.com/blog/las-7-categor%C3%ADas-de-la-manufactura-aditiva/)» [En línea]. Available: <https://blog.laminasyaceros.com/blog/las-7-categor%C3%ADas-de-la-manufactura-aditiva/>. [Último acceso: 12 julio 2021].
- [5] «[https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/,](https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/)» [En línea]. Available: <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/>. [Último acceso: 12 julio 2021].
- [6] C. A. S. J. A. D. M. Moylan S., «A Review of Test Artifacts for Additive Manufacturing,» pp. 2-14, 2012.
- [7] A. Townsend, «Surface-specific additive manufacturing test,» pp. 2-11, 218.
- [8] P.-F. A. ,. A. N. Mehdi-Souzani C., «Comparative Study for the Metrological Characterization of Additive Manufacturing artefacts,» pp. 2-11, 2016.
- [9] S. J. S. D. V. J. Cajal C., «Efficient volumetric error compensation technique for additive manufacturing machines,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 22, pp. 2-19, 2016.
- [10] «Giorgetti A., Ceccanti F., Citti P., Ciappi A., Arcidiacono G.,» pp. 2-7, 2019.

- [11] T. S. N. de Pastrea M., «Test artefacts for additive manufacturing: A design methodology review,» pp. 2-11, 2020.
- [12] Marlin, «Marlinfw,» [En línea]. Available: <https://marlinfw.org/>. [Último acceso: 15 febrero 2021].
- [13] R. J. H. y. P. H. Pereira, Coordinate Measuring Machines and Systems, CRC Press, 2011.
- [14] [En línea]. Available: <https://makerex.es/es/14-impresoras-fdm>. [Último acceso: 14 2 2021].