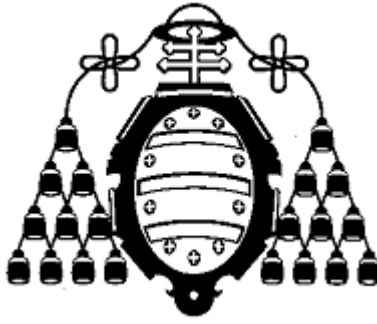




UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MASTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DESARROLLO DE UNA PLATAFORMA EXPERIMENTAL PARA LA FABRICACIÓN ADITIVA DE PIEZAS Y SU VERIFICACIÓN EN MÁQUINA

JULIO 2020

D^a Cristina Fernández Díaz

**D. Gonzalo Valiño Riestra
D. David Blanco Fernández**

RESUMEN

El Trabajo Fin de Máster (TFM) que se presenta en esta memoria se desarrolla en el marco del proyecto del Plan Nacional de I+D+i, “Compensación en Tiempo real de Errores en la Geometría de Capa para Procesos de Fabricación Aditiva”, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (DPI2017-83068-P), y recoge el **diseño y construcción de una plataforma mecatrónica experimental para la fabricación de componentes mediante FFF**, dotada de un sistema portante para desplazar y posicionar diferentes sensores de inspección sin contacto, de forma controlada, empleados para la verificación en máquina de la pieza. Es necesario dejar claro que las pruebas de los diferentes sensores no son objeto del presente TFM, sino del proyecto de investigación.

Para llevar a cabo el desarrollo de dicha plataforma, el TFM recoge los siguientes puntos:

- Estudio de la técnica y las tecnologías propias de este tipo de máquinas.
- Diseño la plataforma experimental adecuada a las futuras investigaciones.
- Planificación y realización de la fabricación y el montaje del equipo.
- Realización de las pruebas de funcionamiento y ajuste.

PALABRAS CLAVE

Fabricación mediante deposición de filamento plástico fundido (FFF) - Fabricación aditiva (FA) – Inspección dimensional sin contacto – Integración de fabricación aditiva e inspección sin contacto

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
2. ESTADO DEL ARTE.....	3
2.1. EN QUÉ CONSISTE UN PROCESO DE FFF	3
2.2. ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS DE UNA MÁQUINA DE FFF	4
2.2.1. Estructura	5
2.2.2. Motores de accionamiento.....	5
2.2.3. Sistemas y elementos de transmisión de movimiento.....	7
2.2.4. Sistemas y elementos de guiado	10
2.2.5. Sistemas de extrusión del termoplástico	10
2.2.6. Mesa o plataforma de construcción.....	12
2.2.7. Sensores	14
2.2.8. Ventilación.....	15
2.2.9. Fuente de alimentación	17
2.2.10. Placa base o de control.....	17
2.2.11. Panel de mandos	19
2.3. TIPOS DE MÁQUINAS DE FFF	19
2.3.1. Cartesiana	20
2.3.2. Delta.....	21
2.3.3. Polar	21
2.3.4. Brazo robot.....	21
2.3.5. Core XY	21
2.4. CARACTERÍSTICAS DE LAS PIEZAS FABRICADAS.....	22
2.4.1. Parámetros relativos a la calidad.....	22
2.4.2. Parámetros relativos a la carcasa exterior de la pieza (shell).....	22
2.4.3. Parámetros relativos al relleno (infill)	22
2.4.4. Parámetros relativos al material.....	23
2.4.5. Parámetros relativos a la velocidad de impresión	23
2.4.6. Parámetros relativos a la ventilación.....	24
2.4.7. Parámetros relativos al soporte	24
2.4.8. Parámetros de la capa de adhesión (build plate adhesion)	24
2.4.9. Parámetros relativos a máquinas con multi-extrusores.....	25
2.5. PRINCIPALES DEFECTOS EN PIEZAS DE FFF	25
2.5.1. Falta de extrusión en la primera capa.....	25
2.5.2. Falta de adhesión a la plataforma de impresión.....	26
2.5.3. Doblado de las esquinas inferiores de la pieza impresa (warping)	27
2.5.4. Pie de elefante.....	27
2.5.5. Flujo de material inadecuado	27
2.5.6. Huecos y agujero en las capas superiores	28
2.5.7. Relleno débil	28
2.5.8. Exudado / hilo de araña (stringing).....	28
2.5.9. Sobre calentamiento	28
2.5.10. Esquinas rugosas o dobladas (curling)	29
2.5.11. Delaminación de capas (cracking).....	29
2.5.12. Desplazamiento de capas (layer shift).....	29
2.5.13. Arañazos o surcos en la zona superior.....	30
2.5.14. Líneas en el costado de la impresión (z-wobble)	30
2.5.15. Efecto escalera.....	30
2.5.16. Vibraciones y timbre (ghosting, ringing)	31
2.5.17. Mascado del filamento (grinding)	31
2.5.18. Parada de la extrusión durante la fabricación	31

2.6.	TÉCNICAS DE VERIFICACIÓN DE PIEZAS DE FFF Y MÉTODOS DE COMPENSACIÓN UTILIZADOS	31
3.	ESPECIFICACIONES DE DISEÑO	33
3.1.	FUNCIONALIDADES	33
3.2.	CONFIGURACIÓN MORFOLÓGICA PROPUESTA	33
3.3.	ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS	34
4.	DISEÑO DE DETALLE.....	35
4.1.	CONFIGURACIÓN GENERAL DE LA ESTRUCTURA DE LA MÁQUINA	35
4.1.1.	<i>Elección de los perfiles de aluminio.....</i>	<i>36</i>
4.1.2.	<i>Unión de los perfiles de aluminio</i>	<i>36</i>
4.2.	SISTEMAS Y ELEMENTOS DE GUIADO DE DESPLAZAMIENTOS	38
4.3.	SISTEMAS DE TRANSMISIÓN DE MOVIMIENTO	40
4.3.1.	<i>Elección de las correas para el movimiento de los ejes X-Y y U-V.....</i>	<i>41</i>
4.3.2.	<i>Diseño de detalle de la transmisión de los ejes X-Y y U-V.....</i>	<i>42</i>
4.3.3.	<i>Elección del sistema de transmisión para el eje Z.....</i>	<i>46</i>
4.3.4.	<i>Diseño de detalle de la transmisión del eje Z.....</i>	<i>49</i>
4.4.	SISTEMAS DE ACCIONAMIENTO	53
4.4.1.	<i>Fuerzas necesarias para los movimientos.....</i>	<i>53</i>
4.4.2.	<i>Selección de los motores.....</i>	<i>55</i>
4.4.3.	<i>Selección de los drivers para los motores</i>	<i>61</i>
4.5.	SISTEMAS DE CONTROL	62
4.5.1.	<i>Sistema de control de la extrusora.....</i>	<i>64</i>
4.5.2.	<i>Sistema de control del puente de inspección</i>	<i>65</i>
4.6.	SISTEMA DE EXTRUSIÓN	66
4.7.	SISTEMA DE ATEMPERADO.....	67
4.7.1.	<i>Calentamiento de la plataforma de impresión</i>	<i>67</i>
4.7.2.	<i>Calentamiento del extrusor.....</i>	<i>68</i>
4.7.3.	<i>Enfriamiento del extrusor y de las capas depositadas</i>	<i>68</i>
4.7.4.	<i>Enfriamiento de la placa de control.....</i>	<i>69</i>
4.8.	SELECCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE POSICIONAMIENTO, CONTROL Y MANDO	69
4.8.1.	<i>Finales de carrera.....</i>	<i>69</i>
4.8.2.	<i>Sensores de nivelación de la mesa</i>	<i>71</i>
4.8.3.	<i>Selección de los termistores del extrusor y de la cama caliente</i>	<i>73</i>
4.8.4.	<i>Mando LCD del usuario para el control de funcionamiento.....</i>	<i>73</i>
4.9.	PCB DEL SUBSISTEMA ‘CONTROL DEL PUENTE DE INSPECCIÓN	73
4.10.	SELECCIÓN DE LAS FUENTES DE ALIMENTACIÓN	74
4.11.	DISEÑO DE SUBCONJUNTOS	75
4.11.1.	<i>Bastidor.....</i>	<i>76</i>
4.11.2.	<i>Mesa.....</i>	<i>82</i>
4.11.3.	<i>Puente de extrusión.....</i>	<i>84</i>
4.11.4.	<i>Cabezal de extrusión</i>	<i>85</i>
4.11.5.	<i>Puente de inspección.....</i>	<i>86</i>
4.11.6.	<i>Cabezal de inspección</i>	<i>87</i>
4.12.	DISEÑO SOFTWARE	87
5.	PLANIFICACIÓN DE LA FABRICACIÓN Y EL MONTAJE	93
5.1.	FABRICACIÓN	93
5.2.	MONTAJE DE LA ESTRUCTURA.....	93
5.3.	MONTAJE DEL CABLEADO	94

5.4.	REGLAJE Y AJUSTES MECÁNICOS	94
5.5.	RESULTADO DEL MONTAJE DEL PROTOTIPO	95
6.	PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DEL BANCO DE ENSAYOS.....	97
6.1.	PRUEBA DE MOVIMIENTOS.....	97
6.2.	PRUEBA DE IMPRESIÓN.....	97
7.	CONCLUSIONES	101
ANEXOS	103	
ANEXO 1.	MODELADO, SIMULACIÓN Y CONTROL DEL BANCO DE ENSAYOS.....	103
ANEXO 2.	ENSAYOS MEF DE LAS PIEZAS MÁS CRÍTICAS DEL PROTOTIPO.....	111
A2.1.	ESTRUCTURA DEL BASTIDOR.....	111
A2.2.	ESTRUCTURA DE LA MESA.....	113
A2.3.	CHAPA DE UNIÓN DE LA ESTRUCTURA DE LA MESA CON LA ESTRUCTURA DEL BASTIDOR.....	114
A2.4.	PERFIL DEL PUENTE	115
A2.5.	EJE DEL MOVIMIENTO DEL PUENTE DE INSPECCIÓN	117
A2.6.	EJE SOPORTE CORREA MOVIMIENTO U	118
A2.7.	EJE SOPORTE CORREA MOVIMIENTO Y-V	119
ANEXO 3.	CONFIGURACIÓN DEL FIRMWARE MARLIN	121
A3.1.	CONFIGURACIÓN GENERAL.....	121
A3.2.	CONFIGURACIÓN DE LA TEMPERATURA DEL EXTRUSOR Y DE LA CAMA	122
A3.3.	CONFIGURACIÓN DE LOS PASOS DE LOS MOTORES.....	124
A3.4.	CONFIGURACIÓN DE LOS FINALES DE CARRERA	127
A3.5.	CONFIGURACIÓN DEL HOMING	127
A3.6.	CONFIGURACIÓN DEL AUTOLEVEL	130
A3.7.	AJUSTE DEL OFFSET EN Z.....	132
A3.8.	CONFIGURACIÓN DEL LEVEL CORNERS	133
ANEXO 4.	DISEÑO DEL SOFTWARE DE CONTROL DEL PUENTE DE INSPECCIÓN	135
A4.1.	VARIABLES Y CONSTANTES.....	135
A4.2.	FUNCIONES DISEÑADAS	136
A4.3.	FUNCIÓN SETUP	139
A4.4.	FUNCIÓN LOOP.....	139
ANEXO 5.	DISEÑO DEL SOFTWARE DEL PROGRAMA DE CONTROL DEL BANCO DE ENSAYOS	140
A5.1.	CLASE MAINWINDOW.....	140
A5.2.	CLASE COMUNICACIONMKSROMBA	145
A5.3.	CLASE COMUNICACIONMOTORESINSP	146
A5.4.	CLASE PROCESAMIENTOGCODE	147
A5.5.	CLASE RUTINACONTROL.....	149
ANEXO 6.	COMPONENTES DEL BANCO DE ENSAYOS	150
ANEXO 7.	CONEXIONES DEL CABLEADO DEL BANCO DE ENSAYOS	157
A7.1.	CONEXIONES DE LOS COMPONENTES RELATIVOS AL SUBSISTEMA 'CONTROL MÁQUINA FFF'.....	157
A7.2.	CONEXIONES DE LOS COMPONENTES RELATIVOS AL SUBSISTEMA 'CONTROL PUENTE DE INSPECCIÓN'	161

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los procesos de fabricación aditiva (FA) están abriendo un mundo de posibilidades hacia la obtención de piezas con geometrías complejas y propiedades ajustables. Su impacto en campos como el de la biomecánica, el de la energía o el aeroespacial es ya apreciable, pero las previsiones apuntan a una auténtica revolución ligada al desarrollo de las diferentes tecnologías de fabricación aditiva. No obstante, su adopción industrial se ve condicionada por limitaciones de orden económico, tecnológico y, especialmente, por aquellos aspectos relacionados con la calidad de las piezas fabricadas, entre las que cabe destacar su falta de exactitud dimensional y geométrica. Este es un problema común a todos los procesos de FA y, en particular, de los de fabricación por fusión de filamento plástico (FFF), en los que el comportamiento del material, el ajuste de los parámetros del proceso y la propia construcción de las máquinas, tienen gran influencia.

En los últimos años ha aumentado notablemente el número de investigaciones focalizadas en este problema. Las soluciones aportadas han ido evolucionando desde una mera constatación de los errores de fabricación junto con una explicación de sus posibles causas, a trabajos más complejos en los que se ha buscado minimizarlos. Mientras algunos investigadores se han centrado en mejorar la calidad de la pieza modificando los parámetros del proceso, otros han realizado compensaciones sobre la geometría de partida o han actuado corrigiendo los errores geométricos de la máquina. Las dificultades encontradas en estos trabajos han dado lugar a resultados teóricos, con pocas posibilidades de convertirse en soluciones prácticas a nivel industrial e integradas en las propias máquinas de FA.

Ante esta situación, en el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Oviedo se está desarrollando un proyecto dentro del Plan Nacional de I+D+i, financiado por el Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades (**DPI2017-83068-P¹**), en el que se plantea una novedosa estrategia de optimización basada en la compensación de los errores dimensionales y geométricos de cada capa depositada durante el proceso de fabricación aditiva, con el fin de obtener una geometría final 3D más precisa. Para ello se propone analizar varios sistemas de inspección sin contacto e integrarlos en una máquina de FA, de forma que sea posible detectar los errores mientras la pieza se está construyendo, y compensarlos a medida que se van detectando.

Teniendo en cuenta estas consideraciones, el Trabajo Fin de Máster (TFM) que se presenta en esta memoria se desarrolla en el marco del mencionado proyecto de investigación y se plantea, como principal objetivo, el **diseño y construcción de una plataforma mecatrónica experimental para la fabricación de componentes mediante FFF**, dotada de un sistema portante para desplazar y posicionar diferentes sensores, de forma controlada. Esta máquina será utilizada en el proyecto del Plan Nacional de I+D+i para probar la utilización de diferentes sensores de inspección sin contacto aplicados a la verificación en máquina de la pieza. Es necesario dejar claro que las pruebas de los diferentes sensores no son objeto del presente TFM, sino del proyecto de investigación.

¹ DPI2017-83068-P: Compensación en Tiempo real de Errores en la Geometría de Capa para Procesos de Fabricación Aditiva

Para poder alcanzar el objetivo planteado, se plantea desarrollar las siguientes acciones específicas:

- Estudiar la técnica y las tecnologías propias de este tipo de máquinas.
- Diseñar la plataforma experimental adecuada a las futuras investigaciones.
- Planificar y realizar la fabricación y el montaje del equipo.
- Realizar las pruebas de funcionamiento y ajuste.

7. **CONCLUSIONES**

En el presente TFM se ha llevado a cabo el diseño y construcción de una plataforma experimental dotada de dos sistemas integrados que permiten, por una parte, la fabricación aditiva de piezas mediante fusión de filamento plástico (FFF) y, por otra, la utilización de un sistema portante para realizar la inspección sin contacto de la pieza, a medida que ésta se va fabricando capa a capa. Enmarcado en un proyecto de investigación más amplio (DPI2017-83068-P) desarrollado en el Área de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Oviedo, el TFM se centró en el desarrollo mecatrónico que permite el funcionamiento coordinado de los dos sistemas de la máquina: el de impresión 3D y el de inspección.

Al tratarse de un banco de ensayos, el diseño no ha tenido como fin la optimización de las dimensiones del prototipo ni su fabricación en serie. Se ha diseñado de forma modular y dejando el mayor espacio posible entre elementos para facilitar la realización de cambios en el prototipo, de ser requerido en algún ensayo que se realice en el futuro.

De forma particular, se abordaron las siguientes tareas:

- Diseño de detalle de los dos subsistemas, en base al conocimiento existente en cuanto a la tecnología de impresión 3D mediante FFF y a los accionamientos y métodos de control para el funcionamiento integrado de ambos.
- Diseño y fabricación de los elementos electrónicos auxiliares, tales como PCBs.
- Fabricación, montaje y comprobación de una máquina prototipo.
- Desarrollo del sistema de control del sistema de impresión 3D y de inspección mediante un programa orientado a eventos. De esta manera permite que se implemente el control de los sensores de inspección de forma sencilla.
- Integración del funcionamiento de ambos sistemas.
- Realización de pruebas iniciales de funcionamiento.

El funcionamiento coordinado de los dos sistemas principales de la máquina se realiza desde un PC con la idea de poder gobernar también, cuando se desarrolle, el funcionamiento de los sensores de inspección que se vayan a probar en el proyecto.

A la vista de los resultados obtenidos, se han cubierto los tres ámbitos de la Mecatrónica (mecánica, electrónica y control de sistemas) y se han alcanzado todos los objetivos planteados inicialmente.

El prototipo desarrollado queda preparado para su utilización en el proyecto de investigación en el que se enmarca el TFM, a falta de elaborar un procedimiento de calibración y verificación más exhaustivo de la máquina.

Tras ello, los siguientes pasos a desarrollar serán:

- Diseño de las interfaces de adaptación de los diferentes sensores de inspección sin contacto que se van a utilizar en el proyecto, para su instalación en la máquina prototipo.
- Desarrollo de las rutinas de inspección necesarias para cada sensor.

BIBLIOGRAFÍA

LIBROS Y ARTÍCULOS

- [1] The 3D Printing Handbook. Technologies, design and applications. Autores: Ben Redwood, Filemon Schöffner, Brian Garret. Editorial: 3D HUBS.
- [2] "Mechanical engineering design". Autores: Joseph Edward Shigley, Charles R. Mischke. Editorial: McGraw-Hill
- [3] Stepping motors fundamentals. Microchip AN907. Autores: R. Condit (Microchip Tech. Inc.), D. W. Jones (Universidad de Iowa)
- [4] Chang DY, Huang BH (2011) Studies on profile error and extruding aperture for the RP parts using the fused deposition modelling process. *Int J Adv Manuf Technol* 53(9–12):1027–1037
- [5] Brajlili T, Valentan B, Balic J, Drstvensek I (2011) Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines. *Rapid Prototyp J* 17(1):64–75
- [6] El-Katatny I, Masood SH, Morsi YS (2010) Error analysis of FDM fabricated medical replicas. *Rapid Prototyp J* 16(1):36–43
- [7] Masood SH, Rattanawong W, Iovenitti P (2000) Part build orientations based on volumetric error in fused deposition modeling. *Int J Adv Manuf Technol* 16(3):162–168
- [8] Hong-Seok Byun, Kwan H. Lee. Determination of the optimal build direction for different rapid prototyping processes using multi-criterion decision making. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 22 (2006) 69–80
- [9] Lee BH, Abdullah J, Khan ZA (2005) Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *J Mater Process Technol* 169(1):54–61
- [10] Kumar VV, Tagore GRN, Venugopal A (2011) Some investigations on geometric conformity analysis of a 3-D freeform objects produced by rapid prototyping (FDM) process. *Int J Appl Res Mech Eng* 1(2):82–86
- [11] Sood AK (2011) Study on parametric optimization of fused deposition modelling (FDM) process. Ph.D. Thesis. National Institute of Technology, Rourkela, India.
- [12] Tong K, Joshi S, Lehtinen EA (2008) Error compensation for fused deposition modeling (FDM) machine by correcting slice files. *Rapid Prototyp J* 14(1):4–14
- [13] Cajal C, Santolaria J, Velazquez J, Aguado S, Albajes J (2013) Volumetric error compensation technique for 3D printers. *Procedia Engineering* 63 (2013) 642–649
- [14] Zhu Z, Keimasi S, Anwer N, Mathieu L, Qiao L. (2016) Review of Shape Deviation Modeling for Additive Manufacturing. HAL Archives-Ouvertes. (<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01363769>)
- [15] Anwer N, Ballu A, Mathieu L. (2013) The skin model, a comprehensive geometric model for engineering design. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 62(1), 143-146.
- [16] Huang Q, Zhang J, Sabbaghi A, Dasgupta T, Optimal offline compensation of shape shrinkage for three-dimensional printing processes. *IIE Transactions on Quality and Reliability*, 2013.
- [17] Rao, P. K. et al. (2015) Online Real-time Quality Monitoring in Additive Manufacturing Processes using Heterogeneous Sensors. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 137(6)
- [18] Mani, M. et al. Measurement Science Needs for Real-time Control of Additive Manufacturing Powder Bed Fusion Processes. NISTIR 8036 (<http://dx.doi.org/10.6028/NIST.IR.8036>)

PÁGINAS WEB

- [19] <https://www.bcn3d.com/es/bcn3d-filamentos/> (último acceso: 17/03/20)
- [20] <http://www.dima3d.com/motores-paso-a-paso-en-impresion-3d-i-nociones-basicas-2/> (último acceso: 18/03/20)
- [21] <https://tropical-labs.com/mechaduino/> (último acceso: 18/03/20)
- [22] <https://www.youmagine.com/designs/dc-motor-closed-loop-control-software#!design-information%20Copiado%20de:%20https://descubrearduino.com/> (último acceso: 18/03/20)
- [23] <https://bitfab.io/es/blog/extrusor-impresora-3d/> (último acceso: 18/03/20)
- [24] <https://filament2print.com/es/blog/36-tipos-extrusores-y-hotend.html> (último acceso: 18/03/20)
- [25] <https://www.spainlabs.com/foros/tema-Autolevel-paso-a-paso-II-el-sensor> (último acceso: 20/03/20)
- [26] <https://filament2print.com/es/repuestos-extras/828-ventilador-axial.html> (último acceso: 20/03/20)
- [27] <http://deimpresoras3d.com/fuentes-de-alimentacion-de-impresoras-3d/> (último acceso: 20/03/20)
- [28] <https://www.3dnatives.com/es/creadores-impresora-3d-de-6-ejes-160320172/> (último acceso: 17/03/20)