



UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DESARROLLO DE EQUIPO DE FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE
EXTRUSIÓN DE TERMOPLÁSTICOS CON CAPACIDAD DE
INSPECCIÓN Y VERIFICACIÓN EN MÁQUINA**

JULIO 2022

Autor:

**Álvarez Patón,
Jorge**

Tutor:

**Blanco Fernández,
David**

Co-Tutor:

**Peña Cambón,
Fernando**

RESUMEN

Este proyecto presentado como Trabajo Fin de Máster en el curso 2021-2022 del Máster Universitario de Ingeniería Mecatrónica consiste en el diseño, fabricación, montaje y puesta en marcha de un equipo de fabricación aditiva con capacidad de inspección. La tecnología de fabricación utilizada es la deposición de filamento termoplástico fundido, mientras que el puente de inspección queda abierto a utilizar distintos sensores. No obstante, en la duración de este proyecto el sensor instalado en dicho puente es un sensor sin contacto (sensor CIS) para la digitalización de las capas depositadas.

El diseño del equipo engloba desde el diseño mecánico y electrónico incluyendo la selección de los componentes necesarios, hasta los cálculos relativos a los esfuerzos. Además, se incluirán los planos de fabricación y de montaje, y se realizará una primera puesta a punto para dejar el sistema funcionando. En el proyecto se han utilizado principalmente SolidWorks, ANSYS y Office365. Adicionalmente se ha instalado el software de la placa utilizada para el control de la máquina (Duet 3 6HC) mediante la aplicación web del fabricante, y se han utilizado páginas web de apoyo para ampliar los conocimientos sobre algunos de los asuntos del proyecto, o para el cálculo de tolerancias de montaje.

PALABRAS CLAVE

Fabricación Aditiva – Modelado por deposición fundida de filamento – Control de impresora 3D
– Integración de inspección y fabricación

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.	12
2. ESTADO DEL ARTE	13
2.1. PROCESOS DE FFF	13
2.2. MATERIALES UTILIZADOS Y APLICACIONES MÁS RECIENTES	14
2.3. MÁQUINAS DE FDM/FFF	15
2.3.1. <i>Tipos: cartesiana, delta, polar, core xy y brazo robótico.</i>	15
2.4. ESTUDIO DE MÁQUINAS FDM COMERCIALES	18
2.4.1. <i>BCN3D Sigma R16</i>	18
2.4.2. <i>Ultimaker S5</i>	19
2.4.3. <i>Artillery Genius</i>	21
2.5. SISTEMAS DE CONTROL EN IMPRESORAS 3D	22
2.5.1. <i>Placa Ramps 1.4, 1.6 y 1.6 Plus SPI</i>	22
2.5.2. <i>Placas LERGE</i>	23
2.5.3. <i>Smoothieboards v1</i>	24
2.5.4. <i>SKR MAinboards</i>	25
2.5.5. <i>Duet 3D</i>	26
2.6. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	27
3. PLANTEAMIENTO DEL DISEÑO	29
3.1. CARACTERÍSTICAS MORFOLÓGICAS REQUERIDAS	29
3.2. RESUMEN DE RESTRICCIONES CONSTRUCTIVAS	29
3.3. PLANIFICACIÓN TEMPORAL	30
4. DISEÑO DE DETALLE	31
4.1. ESTRUCTURA DE LA MÁQUINA	31
4.1.1. <i>Elementos adicionales de la estructura</i>	32
4.2. CONJUNTO DEL CABEZAL	33
4.2.1. <i>Elección del modelo de cabezal</i>	34
4.2.2. <i>Sistema de extrusión bowden</i>	34
4.2.3. <i>Ventilación de cabezal y capa</i>	35
4.2.4. <i>Sensor capacitivo para nivelación</i>	36

4.2.5.	<i>Estructura e integración del conjunto del cabezal</i>	37
4.3.	MOVIMIENTO EJE X: PUENTE DE IMPRESIÓN	38
4.3.1.	<i>Transmisión</i>	38
4.3.2.	<i>Guiado</i>	40
4.3.3.	<i>Diseño de detalle del puente de impresión (Eje X)</i>	41
4.4.	PUENTE DE INSPECCIÓN: SENSOR CIS	42
4.5.	MOVIMIENTO EJE Y: INTEGRACIÓN DE AMBOS PUENTES	43
4.5.1.	<i>Soporte base de todo el conjunto del eje y</i>	44
4.5.2.	<i>Transmisión y guiado eje y</i>	44
4.5.3.	<i>Diseño de detalle del eje Y: puente de impresión y de inspección</i>	45
4.6.	MOVIMIENTO EJE Z: MOVIMIENTO VERTICAL	47
4.6.1.	<i>Soporte base del conjunto del eje Z</i>	47
4.6.2.	<i>Transmisión y guiado eje Z</i>	48
4.6.3.	<i>Ensamblaje de la cama de impresión</i>	50
4.6.4.	<i>Diseño de detalle del eje Z: Movimiento vertical</i>	52
4.7.	ELECTRÓNICA	53
4.7.1.	<i>Accionamientos</i>	53
4.7.2.	<i>Placa de control: Duet 3 6HC</i>	53
4.7.3.	<i>Fuente de alimentación</i>	54
4.7.4.	<i>Panel de visualización</i>	55
4.7.5.	<i>Placas de control del motor del puente de inspección y del sensor</i>	56
4.8.	DISEÑO FINAL DE LA MÁQUINA	56
5.	MONTAJE	59
5.1.	FABRICACIÓN Y PEDIDO DE COMPONENTES	59
5.2.	MONTAJE	59
5.2.1.	<i>Ensamblaje de la estructura</i>	59
5.2.2.	<i>Ensamblaje de la cama</i>	60
5.2.3.	<i>Ensamblaje del eje vertical</i>	61
5.2.4.	<i>Ensamblaje de la parte superior y final</i>	62
6.	ELECTRÓNICA	64
6.1.	CONEXIONADO DE LA DUET 3 6HC	64

6.1.1.	<i>Alimentación</i>	64
6.1.2.	<i>Finales de carrera</i>	65
6.1.3.	<i>Sensor capacitivo</i>	66
6.1.4.	<i>Ventiladores</i>	66
6.1.5.	<i>Sensores de temperatura</i>	67
6.1.6.	<i>Cama caliente</i>	67
6.1.7.	<i>Cabezal</i>	68
6.1.8.	<i>Motores</i>	69
6.1.9.	<i>Pantalla Panel Due</i>	69
6.1.10.	<i>Diagrama general de conexiones</i>	70
6.2.	ESTABLECIMIENTO DEL FIRMWARE	71
6.2.1.	<i>General</i>	71
6.2.2.	<i>Entradas / salidas</i>	72
6.2.3.	<i>Motores</i>	73
6.2.4.	<i>Finales de carrera</i>	74
6.2.5.	<i>Heaters (cama y cabezal)</i>	75
6.2.6.	<i>Ventiladores</i>	76
6.2.7.	<i>Herramientas</i>	77
6.2.8.	<i>Compensación</i>	77
6.2.9.	<i>Comunicación red</i>	77
6.2.10.	<i>Últimas configuraciones</i>	78
6.2.11.	<i>Interacción con la máquina</i>	79
7.	PUESTA EN MARCHA	81
7.1.	PRIMERA IMPRESIÓN	81
7.2.	AJUSTE DEL FLUJO DE MATERIAL	83
7.3.	AJUSTE DE RETRACCIONES	83
7.4.	TEST DE CILINDRICIDAD	84
7.5.	BENCHY	85
8.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	86
8.1.	CONCLUSIONES	86
8.2.	TRABAJOS FUTUROS	86

9.	ANÁLISIS DE COSTES.....	87
9.1.	COMPONENTES COMERCIALES.....	87
9.1.1.	<i>Componentes de transmisión de tecnopower.....</i>	87
9.1.2.	<i>Componentes mecánicos.....</i>	87
9.1.3.	<i>Componentes electrónicos.....</i>	88
9.2.	PIEZAS FABRICADAS.....	89
9.3.	REDACCIÓN Y EJECUCIÓN DEL PROYECTO.....	90
9.4.	COSTE ESTIMADO TOTAL DEL PROYECTO.....	91

ANEXOS

ANEXO A.	CÁLCULOS.....	94
A.1.	CÁLCULOS EJE X.....	94
A.1.1.	<i>Husillo.....</i>	94
A.1.2.	<i>Guías recirculantes de bolas.....</i>	96
A.2.	CÁLCULOS EJE Y.....	97
A.2.1.	<i>Husillos de bolas.....</i>	97
A.2.2.	<i>Guías recirculantes de bolas.....</i>	98
A.3.	CÁLCULOS EJE Z.....	99
A.3.1.	<i>Husillo trapezoidal.....</i>	99
A.3.2.	<i>Guías Recirculantes de bolas.....</i>	101
ANEXO B.	SIMULACIONES ANSYS.....	103
B.1.	ESTUDIO DE LA CAMA DE IMPRESIÓN.....	103

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

Los procesos de fabricación aditiva se encuentran en pleno auge en la actualidad, ya que presentan un ahorro de material en lo relativo a herramientas y elementos de fijación usualmente utilizados en la fabricación convencional. Esta tecnología se emplea actualmente en la biomedicina y la industria aeronáutica, aunque también en otros campos novedosos, como por ejemplo en la fabricación de moldes de inyección para permitir una refrigeración óptima.

No obstante, cada vez más, se busca incorporar esta tecnología al mundo industrial, aunque su avance se ve frenado en ocasiones por la baja precisión dimensional que se consigue en la mayoría de estos métodos, y más en concreto en la deposición de filamento fundido. Parte de estos errores se pueden corregir mediante la mejora del software de diseño o de segmentación, que convierten la pieza en un archivo de impresión. Sin embargo, el método que se atisba más útil busca una corrección ‘on-line’, es decir, una compensación de los errores que se van obteniendo mediante el estudio de las piezas capa a capa, lo que permitirá que la pieza final se adecúe siempre a las tolerancias y especificaciones marcadas.

En este contexto, el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación de la Universidad de Oviedo busca incorporar sensores de inspección en máquinas de fabricación aditiva. Para ello, dentro del plan Nacional de I+D+i (DPI2017-83068-P¹) financiado por el Ministerio de Economía, Industria, Innovación y Universidades se plantea el diseño, fabricación, montaje y puesta en funcionamiento de un equipo con la posibilidad de incorporar la tecnología de fabricación e inspección, añadiendo además una mayor precisión de movimientos en comparación con el banco de ensayos con el que ya cuenta el departamento.

¹ DPI2017-83068-P: Compensación en tiempo real de errores de la geometría de capa para procesos de fabricación aditiva

8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

8.1. Conclusiones

Este proyecto, consistió en el diseño, fabricación, montaje y puesta a punto de un banco de ensayos o máquina de impresión 3D mediante tecnología de FFF. Tras los meses de trabajo se ha obtenido una máquina plenamente funcional, y con un comportamiento satisfactorio en cuanto a resultados de impresión en general.

- ✓ La máquina es capaz de imprimir con una calidad significativamente buena y es plenamente funcional en cuanto a elementos mecánicos.
- ✓ La integración de ambos puentes es correcta, y una vez finalizado este proyecto ambos puentes se mueven a través de la placa de la impresora.
- ✓ Se ha obtenido un perfil de impresión capaz de fabricar piezas con una calidad significativamente buena.
- ✓ Se ha utilizado la placa Duet 3 consiguiendo al final del proyecto dotar de funcionalidad a todos los elementos de la impresora, algo que perseguía el departamento con el objetivo de estudiar el funcionamiento de la placa.

En conclusión, una vez finalizado este proyecto se ha conseguido un funcionamiento de la máquina. Sin embargo, tiene aspectos de mejora que han servido de aprendizaje y sobre los que trabajara el departamento en los próximos años.

8.2. Trabajos futuros

Tras las pruebas realizadas, y teniendo en cuenta la naturaleza del proyecto, donde la precisión es de vital importancia se plantea de la cara al futuro una mejora consistente en colocar doble patín en los puentes, es decir, en el eje Y. Tras realizar una prueba en el puente de inspección (por ser más sencillo) ha quedado demostrado que simplemente poniendo doble patín en el extremo más alejado mejora notablemente la rigidez a esta vibración que se produce el movimiento.

Es por ello, que, de cara al futuro, se plantea realizar un re-mecanizado de la zona más alejada de la transmisión de cada puente para albergar dos patines en lugar de uno solo, relativamente alejados para garantizar un funcionamiento preciso. En cuanto a mejora de la impresora, se plantea también incluir un sensor de final de filamento, algo que es sencillo ya que lo permite incorporar la propia Duet. En cuanto a fabricación, se plantea adecuar los ejes de trabajo de la máquina a los normalizados para máquina-herramienta, ya que actualmente se está utilizando el convenio usual en fabricación aditiva.

Adicionalmente se plantea integrar en la propia placa un control en lazo cerrado para un motor con encoder incremental para plantear el puente de inspección. Con ello, se plantea además integrar en una aplicación web tanto todo lo relativo a la impresión como al puente de inspección

Bibliografía

- [1] “¿Qué es la tecnología de impresión 3D FDM? | Stratasys.” <https://www.stratasys.com/es/fdm-technology> (accessed Mar. 06, 2022).
- [2] “S. Scott Crump.” https://www.computerhope.com/people/s_scott_crump.htm (accessed Jul. 08, 2022).
- [3] S. Scott Crump, “Apparatus and method for creating three-dimensional objects,” 1992.
- [4] K. Rajan, M. Samykano, K. Kadirgama, W. S. W. Harun, and M. M. Rahman, *Fused deposition modeling: process, materials, parameters, properties, and applications*, no. 0123456789. Springer London, 2022.
- [5] N. A. S. Mohd Pu’ad, R. H. Abdul Haq, H. Mohd Noh, H. Z. Abdullah, M. I. Idris, and T. C. Lee, “Review on the fabrication of fused deposition modelling (FDM) composite filament for biomedical applications,” *Mater. Today Proc.*, vol. 29, no. November 2018, pp. 228–232, 2019, doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.535.
- [6] J. H. Medicine, “3D printed bone with the right mix of ingredients.” <https://healthcare-in-europe.com/en/news/3d-printed-bone-with-the-right-mix-of-ingredients.html> (accessed Mar. 16, 2022).
- [7] “Original Prusa i3 MK3S+ | Impresoras 3D Original Prusa vendidas directamente por Josef Prusa.” <https://www.prusa3d.com/es/categoria/original-prusa-i3-mk3s/> (accessed Mar. 20, 2022).
- [8] “▷ ¿Qué son los robots Delta? Aplicaciones y Precios.” <https://www.innovacion-tecnologia.com/robotica/que-son-los-robots-delta-aplicaciones-y-precios/> (accessed Mar. 20, 2022).
- [9] “TRILAB DeltiQ 2 - TRILAB.” <https://trilab3d.com/3d-printer-deltiq-2/> (accessed Mar. 20, 2022).
- [10] “Tipos de impresoras 3D FDM: Delta, Cartesiana, Polar y Brazo robótico - 3Dnatives.” <https://www.3dnatives.com/es/tipos-impresoras-3d-fdm-190620172/#!> (accessed Mar. 20, 2022).
- [11] “Polar 3D Printer and Polar Cloud | Sargent Welch.” <https://www.sargentwelch.com/store/product/21104232/polar-3d-printer-and-polar-cloud> (accessed Mar. 20, 2022).
- [12] “BCN3D Technologies: Impresoras 3D profesionales de escritorio.” <https://www.bcn3d.com/es/> (accessed Jun. 05, 2022).
- [13] “Ultimaker S5: una impresora industrial que ofrece fiabilidad a gran escala | Ultimaker.” <https://ultimaker.com/es/3d-printers/ultimaker-s5> (accessed Jun. 06, 2022).
- [14] “Tienda de impresión 3D Lerdge | Impresionantes ideas para impresión 3D - Lerdge Official Store.” <https://es.shop.lerdge.com/> (accessed Jun. 19, 2022).
- [15] “Creality Leading 3D Printer Supplier & Manufacturer | Creality 3D.” <https://www.creality.com/> (accessed Jun. 22, 2022).
- [16] “Fabricantes de Perfiles de Aluminio Modulares | MiniTec España.” <https://www.minitec.es/> (accessed Apr. 11, 2022).
- [17] “Foot M08 D45 L=69 ESD | MiniTec.” <https://www.minitec.de/en/product/foot-m08-d45-l69-esd> (accessed Apr. 11, 2022).
- [18] “MiniTec Power lock fastener 30 SF | MiniTec.” <https://www.minitec.de/en/product/minitec-power-lock-fastener-30-sf> (accessed Apr. 11, 2022).
- [19] “Square-Nut 30 M 04 with position-fixing | MiniTec.” <https://www.minitec.de/en/product/square-nut-30-m-04-with-position-fixing> (accessed Apr. 15, 2022).

- [20] “E3D HotEnd v6 Original | Filament2Print.” https://filament2print.com/es/hotends/799-e3d-hotend-v6.html#/296-tipo_de_accionamiento-bowden/305-voltaje-24_voltios/242-diametro-285_mm (accessed Apr. 12, 2022).
- [21] “QR Ultimaker 2 Kit - Bondtech.” <https://www.bondtech.se/product/qr-ultimaker-2-kit/> (accessed Apr. 15, 2022).
- [22] “XT112S1NAL2 | Sensor de proximidad Telemecanique Sensors, M12 x 1, alcance 2 mm, salida NPN, 24 V, IP67 | RS Components.” <https://es.rs-online.com/web/p/sensores-de-proximidad/2201031> (accessed Apr. 17, 2022).
- [23] “Tecnopower | Transmisión y Movimiento Lineal.” <https://www.tecnopower.es/> (accessed Apr. 19, 2022).
- [24] Tecnopower, *Husillos de bolas y accesorios.* .
- [25] Tecnopower, *Acoplamiento espiral de aluminio.* .
- [26] “Guías lineales de bolas - Series MG | Tecnopower.” <https://www.tecnopower.es/guías-lineales-de-bolas-series-mg> (accessed Apr. 24, 2022).
- [27] “SC4118L1804-ENO05K - Stepper motor – NEMA 17 | NANOTEC.” <https://en.nanotec.com/products/1333-sc4118l1804-eno05k> (accessed May 19, 2022).
- [28] “Duet 3D.” <https://www.duet3d.com/Duet3Mainboard6HC> (accessed May 19, 2022).
- [29] “Wiring your Duet 3 mainboard | Duet3D Documentation.” https://docs.duet3d.com/en/How_to_guides/Wiring_your_Duet_3 (accessed Jun. 22, 2022).
- [30] Rollon, “Guías Recirculantes de bolas,” .