

UNIVERSIDAD DE OVIEDO

CENTRO INTERNACIONAL DE POSTGRADO

MÁSTER EN INGENIERÍA MECATRÓNICA

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**DISEÑO DE CABEZAL DE INSPECCIÓN BASADO EN TECNOLOGÍA
CIS PARA TAREAS DE INSPECCIÓN Y VERIFICACIÓN EN MÁQUINA
EN EQUIPOS DE FABRICACIÓN ADITIVA MEDIANTE EXTRUSIÓN DE
TERMOPLÁSTICOS**

JULIO 2022

**Autor:
Fernández Suárez, Alejandro**

**Tutor:
Blanco Fernández, David**

**Co-Tutor:
Fernández Álvarez, Pedro**

RESUMEN

El presente TFM surge de un proyecto de investigación que desarrolla en la actualidad el Área de Ingeniería de los Procesos de Fabricación sobre la compensación en tiempo real de piezas fabricadas mediante procesos de fabricación aditiva.

Los procesos de fabricación aditiva están abriendo un mundo de posibilidades hacia la obtención de piezas con geometría compleja con un gasto de material menor a otros procesos de fabricación. Su impacto en sectores como la biomecánica, la industria aeroespacial y la personalización de productos es ya más que apreciable. Sin embargo, la adopción industrial de esta tecnología se ve limitada por temas económicos y, sobre todo, por la calidad de las piezas obtenidas, siendo importante destacar la falta de precisión dimensional y geométrica de las piezas fabricadas. Las soluciones adoptadas por muchos investigadores a este aspecto se quedan en métodos que, una vez fabricadas las piezas, permiten comprobar si la precisión de la pieza es lo suficientemente aceptable para darla por válida provocando que, en caso de que dicha pieza no sea aceptable, se tenga que descartarla, suponiendo así una elevada pérdida en términos de materiales y costes, más aún en un proceso industrial en el que la fabricación se tiende a realizar por lotes.

Ante esta situación, en este proyecto se tratarán de analizar dos vías para conseguir sentar las bases de lo que sería un procedimiento estable, predictivo e inteligente, que permitiese realizar la compensación de posibles defectos en tiempo real, mediante la variación de una serie de parámetros característicos del proceso de fabricación. Una de estas vías consiste en implementar un algoritmo de procesamiento de imágenes que sea capaz de detectar los contornos de las distintas piezas para poder contrastar las desviaciones observadas con un procedimiento estable y preciso, en este caso se empleó una máquina de medir por coordenadas. La segunda de las vías de estudio consistirá en integrar sensores de imagen por contacto (CIS) en un banco de ensayos que permita realizar el digitalizado off-line de piezas fabricadas con una impresora 3D, para esto se montaron dichos sensores sobre un hardware basado en FPGAs que se encargará de realizar la captura de los datos en tiempo real, pudiendo así tener control sobre distintos parámetros del proceso de captura para. Finalmente, se integrará dicho sistema sobre un equipo de Fabricación Aditiva funcional en el que poder realizar digitalizados de las distintas capas fabricadas en proceso.

PALABRAS CLAVE

Fabricación aditiva (AM) - Field-Programmable Gate Arrays (FPGAs) – System On a Chip (SoC)
– Procesamiento de Imágenes – Metrología Dimensional – Verificación en Máquina (OMM).

ÍNDICE DE LA MEMORIA.

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.	8
1.1. INTRODUCCIÓN.	8
1.2. OBJETIVOS.	8
2. ESTADO DEL ARTE.	10
2.1. FABRICACIÓN ADITIVA.	10
2.2. EQUIPOS DE FABRICACIÓN ADITIVA CON SISTEMAS DE VERIFICACIÓN.	12
2.3. PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DIGITALES.	15
2.4. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.	19
3. ESPECIFICACIONES DE DISEÑO.	20
4. ALGORITMO DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.	22
4.1. DEFINICIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA.	24
4.1.1. IDENTIFICAR REGIÓN DE INTERÉS.	25
4.1.2. DEFINIR VÉRTICES DE LA REGIÓN DE INTERÉS.	25
4.1.3. DEFINICIÓN DE SISTEMA DE REFERENCIA	26
4.2. POSICIONAR PUNTOS DE LA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.	27
4.3. OBTENER MÁSCARA ENTORNO A LOS PUNTOS DE LA CMM.	27
4.4. DEFINIR PUNTOS DE ESTUDIO.	30
4.5. APLICAR FILTRO PARA DETECCIÓN DE BORDES	31
4.6. COMPARAR PUNTOS DEL BORDE CON LOS QUE DETECTÓ LA CMM.	32
4.7. MODIFICACIONES PARA IMPLANTAR EL SEGUNDO ALGORITMO.	33
4.8. APLICACIÓN DEL ALGORITMO A MUESTRAS DE ENSAYO.	36
5. DISEÑO DEL BANCO DE ENSAYOS.	41
5.1. ESTUDIO DE ALTERNATIVAS.	41
5.1.1. SISTEMA PARA CAPTURA Y ENVÍO DE DATOS DE LOS SENSORES.	41
5.1.2. SISTEMA DE MOVIMIENTO DE LOS SENSORES.	45
5.2. FUNCIONAMIENTO DE LOS SENSORES CIS.	46
5.3. FUNCIONAMIENTO DE MOTOR PASO A PASO.	49
5.4. FUNCIONAMIENTO DE ENCÓDER ÓPTICO INCREMENTAL.	53
5.5. FUNCIONAMIENTO DE CONVERTORES AD.	55
5.6. DISEÑO DE PLACAS DE CIRCUITO IMPRESO.	58
5.6.1. PCB PARA ADAPTACIÓN DE CONEXIONES DEL SENSOR CIS.	59
5.6.2. PCB PARA EL CONTROL DEL MOTOR PASO A PASO.	60
5.6.3. PCB PARA LA CAPTURA DE LOS DATOS DE LOS SENSORES CIS.	63
5.7. DISEÑO MECÁNICO DEL BANCO DE ENSAYOS.	66
5.7.1. SISTEMA DE TRANSMISIÓN.	67
5.7.2. SISTEMA DE SOPORTE PARA LOS SENSORES CIS.	69
5.7.3. SISTEMA DE NIVELACIÓN DE PIEZAS A DIGITALIZAR.	70
5.7.4. ELEMENTOS AUXILIARES Y RESULTADO FINAL.	71

5.8. ADAPTACIÓN PARA PROTOTIPO DE FABRICACIÓN ADITIVA.	71
6. CONTROL DEL PUENTE DE INSPECCIÓN.	74
6.1. PROGRAMACIÓN SOBRE ARDUINO NANO EVERY.	74
6.1.1. MODO DE PUESTA A CERO.	76
6.1.2. MODO DE MOVIMIENTO DISCRETO.	77
6.1.3. MODO DE DIGITALIZADO.	78
6.2. INTERFAZ GRÁFICA DESARROLLADA PARA EL CONTROL DEL PUENTE DE INSPECCIÓN.	79
6.2.1. ELEMENTOS DE LA BARRA DE HERRAMIENTAS.	81
6.2.2. CONTROL DE POSICIÓN MEDIANTE SLIDER.	81
6.2.3. MODO DE DIGITALIZADO.	82
6.2.4. CONTROL DE POSICIÓN DISCRETO.	82
6.2.5. BARRA DE ESTADO.	82
6.3. INTEGRACIÓN DEL PUENTE EN DUET 3.	82
7. ALGORITMO DE CAPTURA DE DATOS.	86
7.1. CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DE DIGITALIZADO.	89
7.2. DETECTAR POSICIÓN PARA REALIZAR NUEVA CAPTURA DE DATOS.	89
7.3. PUESTA EN MARCHA DE LOS SENSORES CIS.	93
7.4. CAPTURA DE DATOS DE LAS SEÑALAS ANALÓGICAS DE LOS SENSORES CIS.	93
7.5. PROGRAMACIÓN DE LA PARTE PS DE LA FPGA.	95
7.6. RECEPCIÓN DE DATOS EN PC Y PROCESAMIENTO.	99
7.7. IMPLEMENTACIÓN FINAL EMPLEANDO, UTILIZANDO DMA.	100
8. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.	103
8.1. CONCLUSIONES.	103
8.2. DESARROLLOS FUTUROS.	103
9. BIBLIOGRAFÍA	107

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS.

1.1. Introducción.

La fabricación aditiva permite obtener objetos tridimensionales a partir de la superposición de capas bidimensionales. Una ventaja de estos procesos de fabricación es que permiten realizar la inspección de cada capa antes de que se deposite la siguiente, no obstante, esta funcionalidad no es habitual en los equipos de fabricación aditiva que se comercializan actualmente. La integración de sensores que permitan realizar la inspección capa a capa permitiría caracterizar la calidad de la pieza de forma dimensional y geométrica, así como detectar defectos de forma precoz [1]. Con ello, se podrían implementar acciones de mejora de la calidad de las piezas fabricadas y evitar seguir fabricando piezas que ya muestran defectos en fases previas a la finalización del proceso productivo.

La integración de sistemas de inspección capa a capa obliga a evaluar previamente el desempeño de la tecnología a emplear ante los problemas específicos que aparecen al trabajar con este tipo de piezas. Si bien es cierto que existen distintas tecnologías para realizar digitalizados 2D de capas intermedias una de las más prometedoras consiste en emplear sensores de imagen de contacto (CIS) como los que se emplean en los escáneres planos de sobremesa [2]. Este tipo de sensores pueden proporcionar una imagen bidimensional de todo el espacio de trabajo, sin interferir con la pieza (evitando así un desgaste de la superficie) y empleando un tiempo de captura reducido, que será función de la resolución de digitalizado y del tamaño de la pieza. Aunque se han llevado a cabo estudios previos empleando equipos comerciales [3], su uso obliga a disponer la superficie a inspeccionar de forma invertida y en contacto con el cristal del escáner. Otra limitación es que este tipo de dispositivos están pensados para realizar el digitalizado de documentos, no para digitalizar las distintas capas de las piezas conforme se van fabricando, eliminado así en cierto modo el control sobre los sistemas de iluminación y dejando poco acceso al usuario a variar parámetros internos del funcionamiento de dichos sensores.

Un aspecto clave, por lo tanto, será conseguir analizar el funcionamiento de este tipo de sensores para tratar de adaptar su funcionamiento a la inspección de piezas. Por otro lado, con las distintas imágenes ráster capturadas, implementar un procesamiento que permita, bien localizar defectos en las piezas o bien, realizar un reconocimiento de los contornos generados. Posteriormente se realizará una verificación dimensional y/o geométrica de las piezas pudiendo así compensar las desviaciones detectadas en proceso.

1.2. Objetivos.

Para superar estas limitaciones se ha optado por desarrollar un banco de ensayos que permita realizar la inspección de las distintas capas fabricadas, permitiendo simular las condiciones de escaneado y alcanzar una configuración estale de funcionamiento. El banco será capaz de controlar los parámetros de escaneado y la relación espacial entre sensor y pieza. Posteriormente se realizará la integración de estos sensores en una impresora 3D desarrollada por Jorge Álvarez Patón que contará con un puente de inspección en el que se podrán incluir los sensores CIS y la electrónica que se haya desarrollado, la parte mecánica será análoga entre ambos sistemas con ligeras variaciones entre ambos que se irán exponiendo en el transcurso del proyecto.

La información que se extraiga de los sensores CIS conformará una imagen digital del objeto escaneado que será procesada mediante diferentes algoritmos para detectar defectos, extraer la geometría del contorno de capa y realizar una caracterización dimensional y geométrica del mismo.

Con lo ya expuesto se resumen los cuatro principales objetivos a desarrollar del presente proyecto:

- Desarrollar un algoritmo de procesamiento de imágenes que permita superar las limitaciones de los ya existentes en lo referido a orientación de la iluminación o, en otras palabras, del contraste.
- Diseñar un banco de ensayos en el que se pueda integrar dicho sensor CIS controlando parámetros como la velocidad de digitalizado y las posiciones de inicio y fin.
- Diseñar un sistema a nivel de software y hardware para la captura de los datos generados por dichos sensores y conseguir enviar dicha información a un PC para su posterior procesamiento.
- Realizar una integración tanto del puente de inspección implementado para el banco de ensayos como del sistema de captura y envío de los datos en un equipo de fabricación aditiva (E.F.A.) diseñado por Jorge Álvarez Patón.

8. **CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.**

8.1. **Conclusiones.**

A modo de resumen del trabajo realizado se pueden establecer las siguientes conclusiones:

- Se implementó un nuevo algoritmo de reconocimiento de contornos basado en el análisis previo del contraste existente en el borde de las piezas. Se desarrollaron una serie de patrones y se implementó una convolución de orden variable sobre las muestras de ensayo para comprobar la calidad de los contornos detectados. En base a las pruebas realizadas se pudo comprobar que no se podía garantizar una mejora de los indicadores de calidad con respecto a otros métodos ya existentes y analizados. Se pudo observar una clara mejora en aquellas zonas en las que se tenía un buen contraste (piezas con altura de entre 6 y 8 mm) pero, en el momento en el que empezaba a disminuir el contraste los resultados empeoraban drásticamente.
- El tamaño de máscara aplicado al algoritmo resultó ser un parámetro poco influyente. En caso de seleccionar un tamaño demasiado elevado se podría llegar a analizar la unión entre dos líneas del perímetro de la pieza, y en caso de seleccionar uno muy pequeño podría no llegar a la posición en la que se encuentra el borde.
- Con los datos obtenidos del procesamiento de imágenes realizado se tendría que plantear un procedimiento de optimización para conseguir obtener el tamaño de máscara y nivel de convolución que garanticen un valor óptimo de los indicadores de calidad.
- Tras el análisis realizado con el procesamiento de imágenes y habiendo observado que resulta necesario incluir algún elemento que mejore o garantice en cierta forma el contraste, se procede por tanto a incluir dos sensores espalda con espalda para realizar dos digitalizados simultáneos con orientaciones del haz de luz opuestas.
- Se realizó un estudio detallado sobre las conexiones y los distintos elementos que necesita un conversor AD para trabajos en alta frecuencia y que consiguiese realizar la captura de los datos del sensor CIS.
- La integración de dicho conversor AD se realizó empleando una SoC de la marca Xilinx realizando una comunicación entre la parte FPGA que se encarga de la puesta en marcha del sensor CIS, así como de la captura de los datos provenientes de los distintitos conversores AD. Finalmente se realizará el envío a un PC mediante comunicación serie RS232.

8.2. **Desarrollos futuros.**

Como posibles mejoras a realizar en la siguiente versión, cabe destacar la necesidad de incluir el chip AM26C32 [82] que permite convertir las señales diferenciales provenientes del encoder incremental a una sola señal por cada fase, que será la que permita realizar la cuenta de flancos eliminando posibles rebotes y cualquier pequeña alteración que pudiesen sufrir las señales. El funcionamiento básico de dicho dispositivo se puede ver en la Figura 8.1

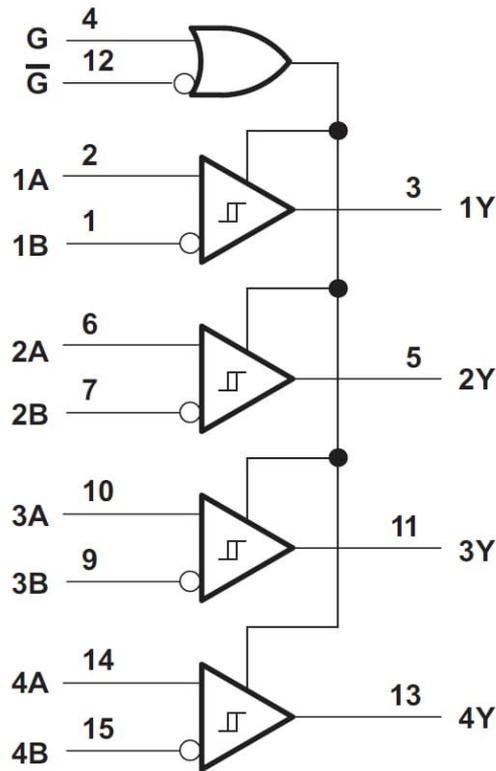
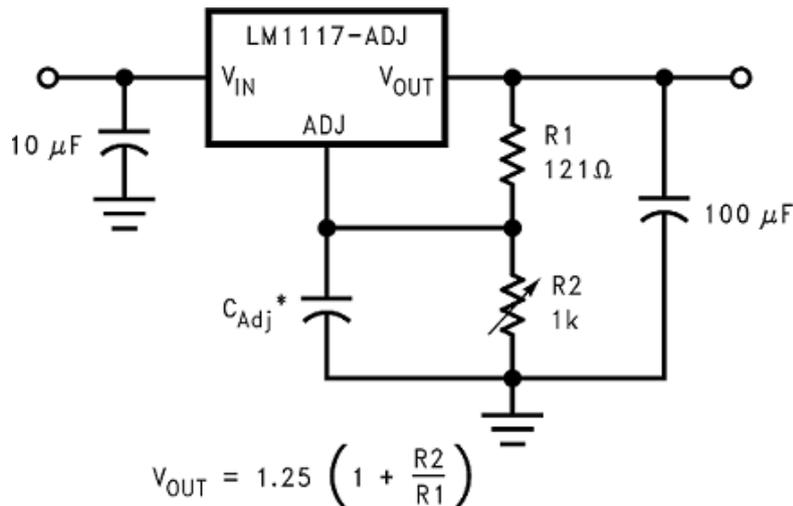


Figura 8.1. Esquema de funcionamiento del chip AM26C32 para el tratamiento de los datos del encoder.

Otra mejora consistiría en implementar una etapa de adaptación de tensión de los niveles del encoder asegurar una salida a una tensión de 3.3V asumible por la FPGA. Una posibilidad sería incluir convertidores lineales LM1117 cuyo esquema de funcionamiento es el que se puede ver en la Figura 8.2. Cabe destacar que las dos resistencias y la expresión que se pueden ver en la figura se corresponden al caso de emplear un convertor variable; en caso de utilizar uno con un rango fijo estas resistencias estarían integradas en el propio convertor.



* C_{Adj} is optional, however it will improve ripple rejection.

Figura 8.2. Esquema de funcionamiento de convertor lineal LM1117.

En lo que se refiere a la parte de la FPGA, se pudo comprobar que existía un problema a la hora de almacenar los distintos datos capturados en dispositivo para su posterior envío al PC, por ello, se presenta la alternativa que se muestra de forma esquemática en la Figura 8.3.

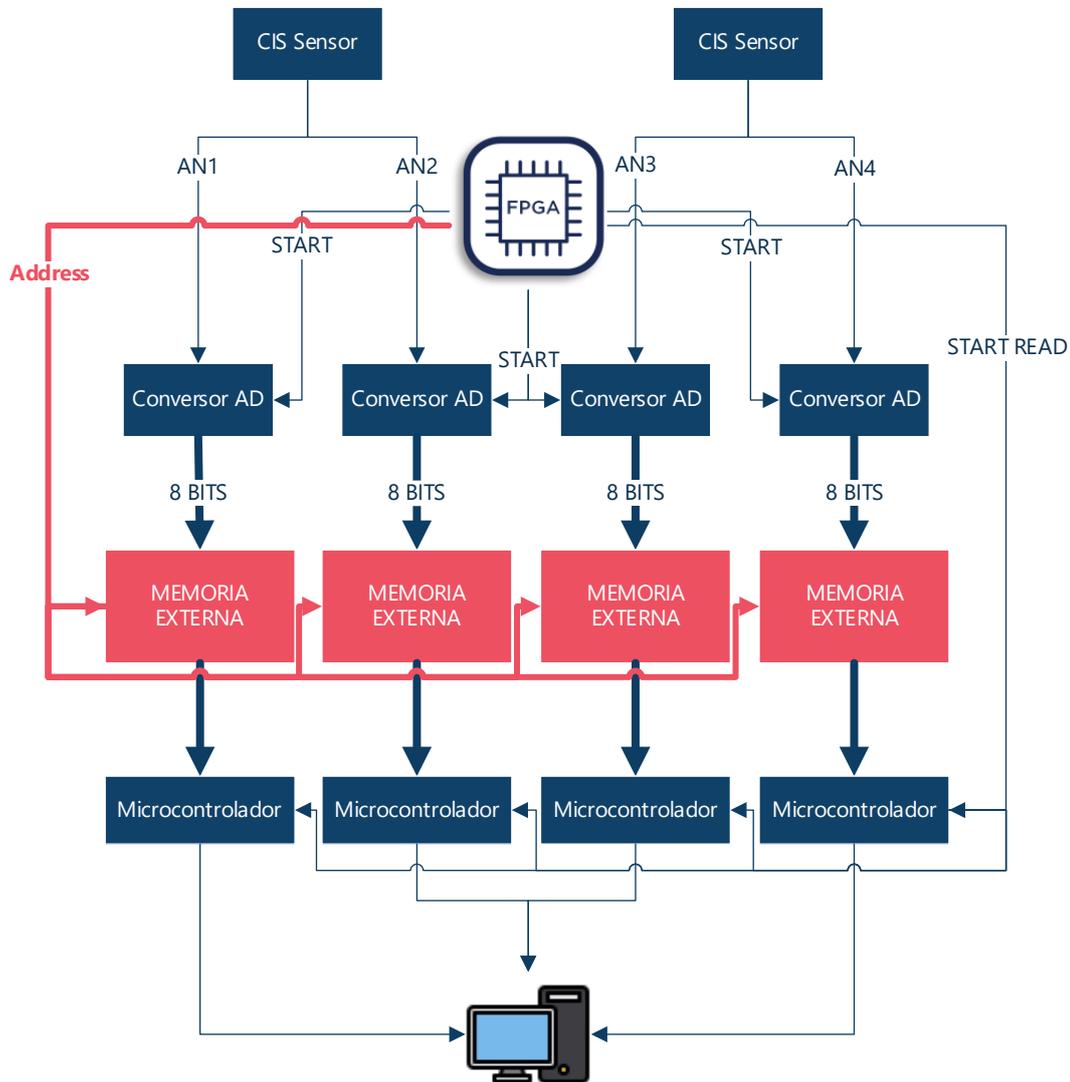


Figura 8.3. Alternativa al uso de DMA mediante integración de memorias físicas cableadas al PL.

Esta alternativa consiste en diseñar un nuevo dispositivo que contenga múltiples memorias RAM de 1 Gb capaces de almacenar los distintos datos capturados y que posteriormente pudiesen ser enviados al propio PC.

Otra alternativa estudiada consistía en cambiar la forma de digitalizar las distintas capas de las piezas, dejando de lado el uso de sensores CIS y pasar a disponer un puente de inspección con un array de cámaras de pequeño tamaño, como las que se muestran a modo de ejemplo en la Figura 8.4. Dentro de esta categoría las más destacadas por su capacidad de trabajo a pequeñas distancias y su alta resolución sería emplear lentes macros controladas por un dispositivo como la Raspberry Pi o la Nvidia Jetson Nano consiguiendo así sin prácticamente modificaciones al diseño actual, siendo necesario solamente cambiar el soporte de los sensores CIS por un nuevo sistema que oriente las cámaras de forma apropiada.



Figura 8.4. Cámaras compatibles con Nvidia Jetson Nano

En base a este trabajo se plantea una futura tesis que dará comienzo el curso siguiente bajo el título: “Optimización de la calidad geométrica en fabricación aditiva por extrusión de material en base a la caracterización en proceso de la desviación local del contorno de capas”. En esta tesis se tratará de analizar las distintas imágenes ráster de las capas bidimensionales digitalizadas para tratar de detectar defectos y desviaciones geométricas con respecto al modelo teórico, realizando una compensación adaptativa y predictiva que funcione de modo simultáneo al propio proceso de fabricación.

9. **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] W. P. Syam, K. Rybalcenko, A. Gaio, J. Crabtree, and R. K. Leach, “Methodology for the development of in-line optical surface measuring instruments with a case study for additive surface finishing,” *Opt. Lasers Eng.*, vol. 121, no. April, pp. 271–288, 2019, doi: 10.1016/j.optlaseng.2019.04.015.
- [2] J. De Vicente, A. M. Sánchez-Pérez, P. Maresca, J. Caja, and E. Gómez, “A model to transform a commercial flatbed scanner into a two-coordinates measuring machine,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 73, pp. 304–312, 2015, doi: 10.1016/j.measurement.2015.05.029.
- [3] D. Blanco, P. Fernández, A. Fernández, B. J. Alvarez, and J. Carlos Rico, “The influence of image processing and layer-to-background contrast on the reliability of flatbed scanner-based characterisation of additively manufactured layer contours,” *Appl. Sci.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–27, 2021, doi: 10.3390/app11010178.
- [4] TWI, “What is Additive Manufacturing? Definition and Processes,” *The Welding Institute*, 2020. <https://www.twi-global.com/technical-knowledge/faqs/what-is-additive-manufacturing> (accessed Jul. 04, 2022).
- [5] 3D Printing Expert, “Additive vs Subtractive Manufacturing: Difference, Pros & Cons,” 2021. <https://www.3de-shop.com/post/additive-vs-subtractive-manufacturing-difference-pros-cons/.html> (accessed May 26, 2022).
- [6] C. Chen *et al.*, “Additive Manufacturing of Piezoelectric Materials,” *Adv. Funct. Mater.*, vol. 30, no. 52, 2020, doi: 10.1002/adfm.202005141.
- [7] T. Wohlers and T. Gornet, “History of Additive Manufacturing 2014,” *Wohlers Rep. 2014 - 3D Print. Addit. Manuf. State Ind.*, pp. 1–34, 2014.
- [8] L. Koester, H. Taheri, L. J. Bond, D. Barnard, and J. Gray, “Additive manufacturing metrology: State of the art and needs assessment,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1706, no. February, 2016, doi: 10.1063/1.4940604.
- [9] B. Blakey-Milner *et al.*, “Metal additive manufacturing in aerospace: A review,” *Mater. Des.*, vol. 209, p. 110008, 2021, doi: 10.1016/j.matdes.2021.110008.
- [10] S. Lim, R. A. Buswell, T. T. Le, S. A. Austin, A. G. F. Gibb, and T. Thorpe, “Developments in construction-scale additive manufacturing processes,” *Autom. Constr.*, vol. 21, no. 1, pp. 262–268, 2012, doi: 10.1016/j.autcon.2011.06.010.
- [11] X. Wang *et al.*, “Topological design and additive manufacturing of porous metals for bone scaffolds and orthopaedic implants: A review,” *Biomaterials*, vol. 83, pp. 127–141, 2016, doi: 10.1016/j.biomaterials.2016.01.012.
- [12] J. den Boer, W. Lambrechts, and H. Krikke, “Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in the spare parts supply chain,” *J. Clean. Prod.*, vol. 257, p. 120301, 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.120301.
- [13] A. K. Pal, A. K. Mohanty, and M. Misra, “Additive manufacturing technology of polymeric materials for customized products: Recent developments and future prospective,” *RSC Adv.*,

vol. 11, no. 58, pp. 36398–36438, 2021, doi: 10.1039/d1ra04060j.

- [14] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, no. June, pp. 545–554, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [15] H. Ko, S. K. Moon, and J. Hwang, “Design for additive manufacturing in customized products,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 16, no. 11, pp. 2369–2375, 2015, doi: 10.1007/s12541-015-0305-9.
- [16] Z. X. Low, Y. T. Chua, B. M. Ray, D. Mattia, I. S. Metcalfe, and D. A. Patterson, “Perspective on 3D printing of separation membranes and comparison to related unconventional fabrication techniques,” *J. Memb. Sci.*, vol. 523, no. May 2016, pp. 596–613, 2017, doi: 10.1016/j.memsci.2016.10.006.
- [17] B. Technologies, “Introduction to Fused Filament Fabrication (FFF) 3D printing technology,” pp. 1–15, 2019, [Online]. Available: <https://www.bcn3d.com/introduction-fff-3d-printing-technology-additive-manufacturing-basics/>.
- [18] L. University, “About Additive Manufacturing | Additive Manufacturing Research Group.” <https://www.lboro.ac.uk/research/amrg/about/materials/> (accessed May 04, 2022).
- [19] Bitfab, “The definitive guide to solving 3D printing problems.” <https://bitfab.io/blog/3d-printing-problems/> (accessed Jun. 26, 2022).
- [20] R. Anitha, S. Arunachalam, and P. Radhakrishnan, “Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modelling,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 118, no. 1–3, pp. 385–388, 2001, doi: 10.1016/S0924-0136(01)00980-3.
- [21] I. El-Katatny, S. H. Masood, and Y. S. Morsi, “Error analysis of FDM fabricated medical replicas,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 16, no. 1, pp. 36–43, 2010, doi: 10.1108/13552541011011695.
- [22] T. Brajljih, B. Valentan, J. Balic, and I. Drstvensek, “Speed and accuracy evaluation of additive manufacturing machines,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 17, no. 1, pp. 64–75, 2011, doi: 10.1108/135525411111098644.
- [23] D. Y. Chang and B. H. Huang, “Studies on profile error and extruding aperture for the RP parts using the fused deposition modeling process,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 53, no. 9–12, pp. 1027–1037, 2011, doi: 10.1007/s00170-010-2882-1.
- [24] A. Noriega, D. Blanco, B. J. Alvarez, and A. Garcia, “Dimensional accuracy improvement of FDM square cross-section parts using artificial neural networks and an optimization algorithm,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 69, no. 9–12, pp. 2301–2313, 2013, doi: 10.1007/s00170-013-5196-2.
- [25] G. Häußge, “OctoPrint. The snappy web interface for your 3D printer.” <https://octoprint.org/> (accessed Jun. 27, 2022).
- [26] 3DMaker Engineering, “Auto Bed Leveling (ABL) Sensor Comparison.” <https://www.3dmakerengineering.com/blogs/3d-printing/auto-bed-leveling-sensor-comparison> (accessed Jun. 27, 2022).

- [27] C. Shemelya *et al.*, “3D printed capacitive sensors,” *Proc. IEEE Sensors*, no. 3, pp. 7–10, 2013, doi: 10.1109/ICSENS.2013.6688247.
- [28] Jackson O’Connell, “Inductive Sensor (3D Printer): All You Need to Know,” 2021. <https://all3dp.com/2/inductive-sensor-3d-printer-ender-3-inductive-sensor/> (accessed Jun. 27, 2022).
- [29] Filament2Print, “BLTouch Smart,” 2022. <https://filament2print.com/es/repuestos-extras/1150-bltouch-smart.html> (accessed Jun. 27, 2022).
- [30] Kickstarter, “Bambu Lab X1: CoreXY Color 3D Printer with Lidar and AI by Bambu Lab.” <https://www.kickstarter.com/projects/bambulab/bambu-lab-x1-corexy-color-3d-printer-with-lidar-and-ai?lang=es> (accessed Jun. 27, 2022).
- [31] F. Pena, J. C. Rico, G. Valino, P. Zapico, and V. M. Meana, “A Procedure to Integrate a CIS Sensor in an Additive Manufacturing Machine for In-Situ Digitizing of Deposited Material Layers,” *IEEE/ASME Trans. Mechatronics*, pp. 1–9, 2021, doi: 10.1109/tmech.2021.3121077.
- [32] L. Tan Phuc and M. Seita, “A high-resolution and large field-of-view scanner for in-line characterization of powder bed defects during additive manufacturing,” *Mater. Des.*, vol. 164, p. 107562, 2019, doi: 10.1016/j.matdes.2018.107562.
- [33] D. Blanco, P. Fernandez, A. Noriega, B. J. Alvarez, and G. Valiño, “Layer contour verification in additive manufacturing by means of commercial flatbed scanners,” *Sensors (Switzerland)*, vol. 20, no. 1, 2020, doi: 10.3390/s20010001.
- [34] E. Optics, “2" x 2" 0.25mm Dot, Low Reflect Grid Distortion Target.” <https://www.edmundoptics.es/p/2quot-x-2quot-025mm-dot-low-reflect-grid-distortion-target/17568/> (accessed Jun. 09, 2022).
- [35] A. C. Majarena, J. J. Aguilar, and J. Santolaria, “Development of an error compensation case study for 3D printers,” *Procedia Manuf.*, vol. 13, pp. 864–871, 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.09.145.
- [36] J. Canny, “A Computational Approach to Edge Detection,” *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. PAMI-8, no. 6, pp. 679–698, 1986, doi: 10.1109/TPAMI.1986.4767851.
- [37] R. O. Duda and P. E. Hart, “Pattern classification and scene analysis,” 1973.
- [38] J. M. S. Prewitt, “*Object enhancement and extraction*,” *Picture Processing and Psychopictorics*, B. Lipkin and A. Rosenfeld, Eds., New York. 1970.
- [39] L. G. Roberts, “Machine perception of three-dimensional solids,” no. January 1963, 1963, [Online]. Available: <http://dspace.mit.edu/handle/1721.1/11589>.
- [40] M. Perez, C. Pagliari, and T. Dennis, “A zero-crossing edge detector with improved localization and robustness to image brightness and contrast manipulations,” in *IEEE International Conference on Image Processing 2005*, 2005, vol. 2, pp. II–482, doi: 10.1109/ICIP.2005.1530097.
- [41] MathWorks, “Detectar bordes en una imagen en escala de grises - MATLAB edge,” 2022.

<https://es.mathworks.com/help/images/ref/edge.html#d123e4392> (accessed Apr. 28, 2022).

- [42] M. hr, S. Madireddi, and K. Murthy, “Performance analysis of various filters for De-noising of Handwritten Kannada documents,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 48, pp. 30–38, 2012, doi: 10.5120/7402-0334.
- [43] C. Saxena, “Noises and Image Denoising Techniques : A Brief Survey,” *Int. J. Emerg. Technol. Adv. Eng.*, vol. 4, no. 3, pp. 878–885, 2014, [Online]. Available: http://www.ijetae.com/files/Volume4Issue3/IJETAE_0314_157.pdf.
- [44] G. Ravi and A. Kumar, “Comparision of Various Noise Removals Using Bayesian Framework,” *Int. J. Mod. Eng. Res. www.ijmer.com*, vol. 21, no. 1, pp. 265–270, 2012, [Online]. Available: www.ijmer.com.
- [45] D. Balamurugan, P. Sengottuvelan, and S. K., “An Empirical Evaluation of Salt and Pepper Noise Removal for Document Images using Median Filter,” *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 82, pp. 17–20, 2013, doi: 10.5120/14104-2139.
- [46] MathWorks, “Filtrar mediana de 2D - MATLAB medfilt2,” 2022. https://es.mathworks.com/help/images/ref/medfilt2.html?searchHighlight=medfilt2&s_tid=srchtitle_medfilt2_1 (accessed Apr. 29, 2022).
- [47] P. V. C. Hough, “A method and means for recognition complex patterns; US Patent: US3069654A,” *US Pat.*, p. 6, 1962.
- [48] N. Chaki, S. H. Shaikh, and K. Saeed, *Exploring Image Binarization Techniques*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2014.
- [49] MathWorks, “Detect and replace outliers in data - MATLAB filloutliers,” 2022. <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/filloutliers.html#bvml247> (accessed Jun. 29, 2022).
- [50] MathWorks, “Inverse complementary error function - MATLAB erfcinv,” 2022. https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/erfcinv.html?s_tid=doc_ta (accessed Jun. 29, 2022).
- [51] Series Innovation, “Difference between Microprocessor and Microcontroller,” *Embedded Lab: 8051 Micro-Controller*, 2014. http://www.zseries.in/embedded_lab/8051_microcontroller/difference_between_microprocessor_and_microcontroller.php#.VE9_MPmsXfi (accessed Apr. 16, 2022).
- [52] WELLPCB, “FPGA y microcontroladores: cuál es mejor para sus necesidades.” <https://placapcb.com/fpga-y-microcontroladores.html> (accessed Apr. 16, 2022).
- [53] ARM, “Cortex-A9.” <https://developer.arm.com/Processors/Cortex-A9> (accessed Mar. 04, 2022).
- [54] L. A. R. M. Holdings, “AMBA Specifications - ARM.” 2016, Accessed: Apr. 04, 2022. [Online]. Available: <https://www.arm.com/architecture/system-architectures/amba/amba-specifications>.
- [55] <https://www.arduino.cc/>, “Arduino - Home,” *Hardware*, 2016. <https://www.arduino.cc/>

- (accessed May 30, 2022).
- [56] Arduino, “Arduino Nano Every.” <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano-every> (accessed May 30, 2022).
- [57] Epson, “Epson Perfection V39 scanner.” Accessed: May 15, 2022. [Online]. Available: https://www.epson.es/es_ES/support/sc/epson-perfection-v39/s/s1349?cid=ps:google:gen22-es:::&gclid=Cj0KCQjwyYKUBhDJARIsAMj9lkG6_3IrHpdR0ig7seEl8JspDnWzef7pCRZ7-36ArDRRweC-UGrBMPQaAtrKEALw_wcB&gclsrc=aw.ds.
- [58] T. Masuzawa, M. Osa, and M. Mapley, “Chapter 11 - Motor design and impeller suspension,” in *Mechanical Circulatory and Respiratory Support*, S. D. Gregory, M. C. Stevens, and J. F. Fraser, Eds. Academic Press, 2018, pp. 335–377.
- [59] R. Crowder, “8 - Stepper motors,” in *Electric Drives and Electromechanical Systems (Second Edition)*, Second Edi., R. Crowder, Ed. Butterworth-Heinemann, 2020, pp. 209–226.
- [60] C. J. Fraser, “2 - Electrical and electronics principles,” in *Mechanical Engineer’s Reference Book (Twelfth Edition)*, Twelfth Ed., E. H. Smith, Ed. Butterworth-Heinemann, 1994, pp. 2–57.
- [61] NANOTEC, “SMCP33 stepper motor controller plug-in card,” 2022. <https://en.nanotec.com/products/1029-smcp33-closed-loop-stepper-motor-controller-plug-in-card> (accessed Jun. 29, 2022).
- [62] Allegro, “A4988 DMOS Microstepping Driver with Translator And Overcurrent Protection,” *Allegro Microsystems, LLC*, pp. 1–19, 2014, Accessed: Jun. 29, 2022. [Online]. Available: <https://www.allegromicro.com/en/products/motor-drivers/brush-dc-motor-drivers/a4988>.
- [63] Collins Danielle, “Microstepping for Stepper Motors - Linear Motion Tips,” 2017. <https://www.linearmotiontips.com/microstepping-basics/> (accessed Jun. 29, 2022).
- [64] Ardufocus, “A4988 motor current tuning.” <https://ardufocus.com/howto/a4988-motor-current-tuning/> (accessed Jun. 29, 2022).
- [65] Eltra-Encoder, “Quadrature encoders. How does it Work?,” 2020. <https://forum.digikey.com/t/quadrature-decoder-vhdl/12671> (accessed May 05, 2022).
- [66] Dynapar, “Quadrature Encoders - The Ultimate Guide,” *Knowledge Center*. https://www.dynapar.com/technology/encoder_basics/quadrature_encoder/ (accessed May 05, 2022).
- [67] A. Devices, “AD7822/AD7825/AD7829.” [Online]. Available: www.analog.com.
- [68] JLCPCB, “PCB Prototype & PCB Fabrication Manufacturer - JLCPCB,” *JLCPCB*, 2012. <https://jlcpcb.com/> (accessed Apr. 16, 2022).
- [69] T. Power, “THL 15WI Series, 15 Watt,” 2007. [Online]. Available: www.tracopower.com/overview/thl15wi.

- [70] T. Power, “TEN 6WIN Series, 6 Watt,” no. 3000 Vdc, pp. 1–9, 2005.
- [71] eepower, “Resistors for LED Circuits | Resistor Applications | Resistor Guide,” 2020. <https://eepower.com/resistor-guide/resistor-applications/resistor-for-led/#> (accessed May 15, 2022).
- [72] D. 3D, “Duet 3 Main Board 6HC,” 2022. <https://www.duet3d.com/Duet3Mainboard6HC> (accessed Jun. 30, 2022).
- [73] T. Q. Company, “Qt | Cross-platform software development for embedded & desktop,” *qt.io*, 2017. <https://www.qt.io/?hsLang=en> (accessed Jun. 30, 2022).
- [74] MDN, “Introducción a XML - XML: Extensible Markup Language,” 2021. https://developer.mozilla.org/es/docs/Web/XML/XML_introduction (accessed Jun. 02, 2022).
- [75] F. Pezoa, J. L. Reutter, F. Suarez, M. Ugarte, and D. Vrgoč, “Foundations of JSON schema,” in *Proceedings of the 25th International Conference on World Wide Web*, 2016, pp. 263–273.
- [76] PlatformIO, “Professional collaborative platform for embedded development,” *PlatformIO*. 2022, Accessed: Jun. 30, 2022. [Online]. Available: <https://platformio.org/>.
- [77] Marlin, “Gcode | Marlin Firmware.” <https://marlinfw.org/meta/gcode/> (accessed Jul. 07, 2022).
- [78] Duet3D, “HTTP requests Duet3D.” <https://github.com/Duet3D/RepRapFirmware/wiki/HTTP-requests> (accessed Jul. 07, 2022).
- [79] M. Hostetter, D. A. Kranz, C. Seed, C. Terman, and S. Ward, “Curl: a gentle slope language for the Web,” *World wide web J.*, vol. 2, no. 2, pp. 121–134, 1997.
- [80] C. Quintáns, J. Fariña, and J. Marcos-Acevedo, “Improving the performance of incremental encoders with conditioning circuits based on FPGA,” *Meas. J. Int. Meas. Confed.*, vol. 90, pp. 1–3, 2016, doi: 10.1016/j.measurement.2016.04.031.
- [81] V. Boed, “Serial communications,” in *Networking and Integration of Facilities Automation Systems*, Elsevier, 1999, pp. 69–80.
- [82] T. Instrument, “Am26C32 Quadruple Differential Line Receiver,” no. 892571, 2015.
- [83] 3D Hubs, “3D Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days,” 2019. <https://www.hubs.com/> (accessed Jul. 03, 2022).
- [84] T. Sharma, “What is RS232 Serial Communication Protocol? RS232 Basics, Working & Specifications,” 2018. <https://circuitdigest.com/article/rs232-serial-communication-protocol-basics-specifications> (accessed May 29, 2022).