

Metrología de pernos mediante impresión 3D con tecnologías SLA y DLP

Hugo Alexander Mejía Díaz

hamejia1@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5035-9124>

Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"
Quito-Ecuador

David Alexander Bautista Martínez

dabautista@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0002-8516-3241>

Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"
Quito – Ecuador

Jorge Luis Ledesma Reinoso

Jlledesma.tec@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0001-5155-6007>

Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"
Quito – Ecuador

Edwin Daniel Barahona Mondragón

edbarahona1@espe.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-6280-8177>

Universidad de las Fuerzas Armadas "ESPE"

RESUMEN

En esta investigación se realizó un estudio dimensional de pernos impresos en 3D utilizando dos tecnologías de impresión diferentes, estereolitografía y procesamiento digital de luz, y se utilizaron tres resinas diferentes, Las diferentes dimensiones obtenidas por los pernos impresos se compararon con las dimensiones establecidas por la norma ISO 4017 para encontrar cuál de los materiales y procesos logró fabricar el perno con menor variación dimensional, para ello se analizaron los datos utilizando ANOVA multifactorial y se compararon estos resultados con la tolerancia dimensional de un perno para finalmente encontrar que tan cercana es la calidad dimensional del perno previamente encontrado con uno comercial.

Palabras clave: *dimensional; estereolitografía; procesamiento; ISO 4017; ANOVA.*

Correspondencia: hamejia1@espe.edu.ec

Artículo recibido 15 enero 2023 Aceptado para publicación: 15 febrero 2023

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/) 

Cómo citar: Mejía Díaz, H. A., Bautista Martínez, D. A., Ledesma Reinoso, J. L., & Barahona Mondragón, E. D. (2023). Metrología de pernos mediante impresión 3D con tecnologías SLA y DLP. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9137-9150. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5041

Bolt metrology through 3D printing with SLA and DLP technology

ABSTRACT

In this investigation , a dimensional study of 3D printed bolts was carried out using two different printing technologies, stereolithography and digital light processing, and three different resins were used, The different dimensions obtained by the printed bolts were compared to the dimensions established by the ISO 4017 standard to find which of the materials and processes managed to manufacture the bolt with less dimensional variation, in order to do this the data were analyzed using multifactorial ANOVA and these results were compared with the dimensional tolerance of a bolt to finally find how close is the dimensional quality of the bolt previously found with a commercial one.

Keywords: *dimensional; stereolithography; processing; ISO 4017; ANOVA.*

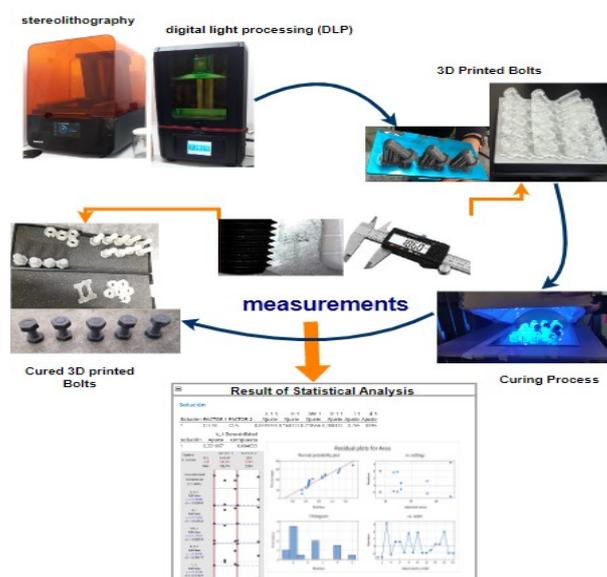
INTRODUCCIÓN

La impresión 3D ha evolucionado en los últimos años con distintas tecnologías aplicadas en el proceso de manufactura. Actualmente existen varios tipos como la Estereolitografía (SLA) y el Procesamiento de Luz Digital (DLP) para el uso de resina, y Modelado por Deposición Fundida (FDM) para el uso de filamento de material. En el desarrollo de este proyecto se utilizaron dos tipos de impresoras: la impresora de marca Formlabs que imprime en resina mediante SLA que consiste en imprimir el modelo mediante un escaneo láser en el tanque de resina (Materialise, 2022), y la impresora de marca Photon Anycubic que imprime mediante DLP, que se basa en imprimir usando un proyector como fuente de luz para solidificar el modelo por capas en todo el tanque (Martel, 2022).

En la realización de este proceso se utilizan 3 resinas diferentes para la impresión de probetas, tornillos y tuercas con las tecnologías mencionadas anteriormente, utilizando diferentes parámetros de impresión como orientación y espesor de capa para determinar la tolerancia dimensional, tras la impresión y posterior curado, aplicando las correspondientes normas y ensayos necesarios para cada caso de estudio.

En este trabajo se propone realizar un estudio de metrología sobre los pernos impresos en 3D descritos anteriormente, midiendo dimensiones básicas establecidas por la norma ISO 4017 tales como diámetro del perno, ancho de cabeza, distancia entre caras y otros parámetros con el fin de identificar como las medidas difieren de las esperadas dependiendo del material y tecnología utilizada. Además, se propone un tipo de medición de la variación entre el roscado obtenido versus el roscado esperado con un paso de 1.5mm, comparando las áreas entre los hilos del roscado y un calibre de paso. El desarrollo del tema planteado se esquematiza en la figura 1.

Figura 1. - Esquema de resumen



METODOLOGÍA

1.1 Población del estudio

Se dispone de materia prima limitada, pero con varios tipos de resinas. En el trabajo se ha establecido orientaciones a 45 grados de impresión con un espesor de capa de 50um, con lo que se ha decidido solicitar hasta dos pernos impresos de cada resina para no agotar los recursos, considerando que no es una prueba destructiva la que se va a realizar. Para realizar las distintas pruebas se va a utilizar las siguientes resinas:

- High strenght
- Clear
- Gray

1.2 Definición del problema

El problema es que las piezas echas con impresión 3D en resina presentan valores que oscilan alrededor de las dimensiones de diseño, en este artículo se detallará una selección de material y proceso de fabricación, para encontrar el material en impresión 3D en resina que presente variaciones menores, respecto a las dimensiones estándar del tornillo M10X1.5

1.3 Recogida de datos

Los pernos fabricados se someterán a análisis mediante dispositivos de medición y algoritmos computacionales, donde se realizará un análisis metrológico para determinar:

- Dimensiones
- Geometría

Por otro lado, utilizando herramientas de medición como un calibrador milimétrico y algoritmos computacionales dentro del software ImageJ, se determinará el paso de la rosca y el espacio restante entre el calibre y la rosca para determinar el área.

1.4 Dimensiones

Las dimensiones de los pernos fueron tomadas con un calibrador vernier, para esto se cuenta con 3 personas dedicadas a la medición de parámetros, tales como diámetro, espesor de cabeza, distancia entre caras o vértices, los mismos que serán medidos 3 veces, para poder realizar el estudio de medición y también el respectivo ANOVA multivariable con el fin de encontrar los parámetros que minimicen la variación de las mediciones.

1.5 Geometría

Un parámetro importante de los tornillos es el paso de la rosca, donde, aunque la especificación para la fabricación de los tornillos se basa en la norma ISO 4017, la fabricación aditiva se enfrenta a los siguientes problemas:

- Falta de variedad de materiales
- Escasa precisión
- Mala repetibilidad
- Mala consistencia
- Falta de normas de cualificación y cuantificación (C. K. Chua).

Dado que estos problemas de fabricación aditiva son conocidos, la obtención de datos para verificar el paso de rosca correcto de cada perno constará de dos etapas que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1.- Etapas para la obtención de datos sobre la geometría de la rosca del perno

Etapa	Descripción
Toma de imágenes del perno	Toma de fotografías de pernos sobre un fondo cuadrulado utilizando el microscopio plug-in
Procesamiento de imágenes	Procesamiento de las imágenes obtenidas por el microscopio donde se obtendrá el área de diferencia entre la rosca y el calibre milimétrico.

La figura siguiente muestra el uso del microscopio digital enchufable para tomar fotografías de los pernos (ver figura 2).

Figura 2. - Utilización del microscopio para tomar fotografías de los pernos.



2. Métodos de análisis estadístico y computacional.

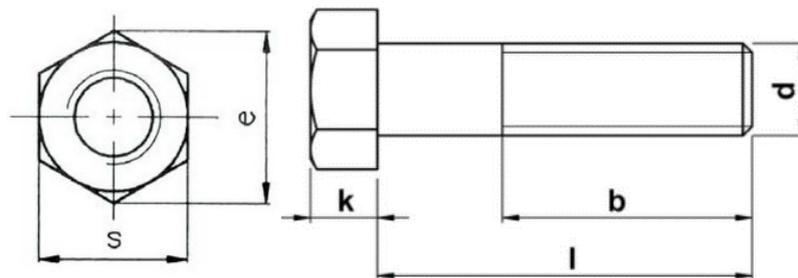
2.1 Métodos estadísticos - ANOVA multivariante

Este análisis tendrá dos factores, uno con tres niveles y otro con dos niveles, correspondientes al tipo de resina utilizada y a si el elemento ha pasado por el grifo.

- Factor 1: Tipo de resina
 - High strenght
 - Clear (formLabs)
 - Gray (formLabs)
- Factor 2: Desbaste del tornillo / tuerca
 - Desbaste
 - Sin desbaste

Contando con 3 repeticiones, para tomar las medidas dimensionales de los pernos. Considerando según ISO 4017 (DIN 933), las siguientes medidas para pernos y tuercas (ver figura 3).

Figura 3. - Referencia de medidas a considerar en el Bolt

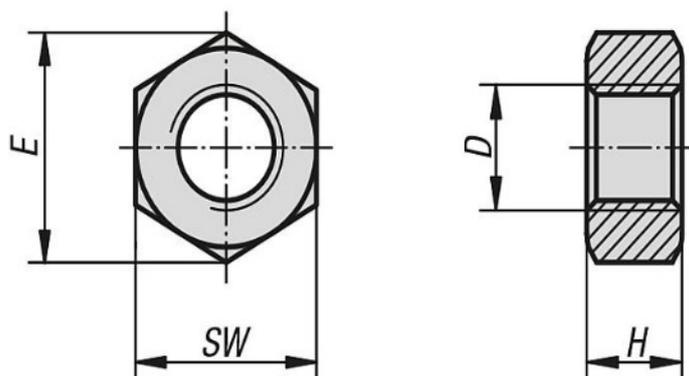


Donde:

- e: Medida entre bordes [mm]
- s: medida entre caras [mm]
- l: longitud del perno [mm]
- k: espesor de la cabeza del perno [mm]
- d: diámetro del perno [mm]

Mientras que las consideraciones para la tuerca serán las siguientes.

Figura 4. - Referencia de medidas a considerar en la tuerca



Donde:

E: Medida entre aristas [mm]

SW: Medida entre caras [mm]

H: Espesor [mm]

D: Diámetro interior de la tuerca [mm]

Se propone encontrar la resina adecuada para reducir la variación dimensional, tomando como referencia un Tornillo M10x1,5 de 1 pulgada de longitud.

Previamente, es necesario realizar un estudio del sistema de medida.

2.2 Métodos computacionales – Software ImageJ

Las imágenes obtenidas de la comparación de la galga milimétrica con los diferentes pernos de las 3 resinas utilizadas se obtuvieron utilizando el microscopio digital, con el que a simple vista se observan pequeñas variaciones y espacios que no se ajustan a la galga.

Para la determinación de la zona que no se ajusta a la galga milimétrica, se utilizará el software ImageJ, que mediante un tratamiento digital de las imágenes implementado los algoritmos preestablecidos en el programa, se podrán detectar los espacios vacíos entre el paso de la rosca. y la galga.

Así, para la manipulación y procesamiento de las imágenes, se deben considerar los siguientes parámetros que se observan en la Tabla 2.

Tabla 2. - Parámetros importantes para el procesamiento de imágenes con ImageJ.

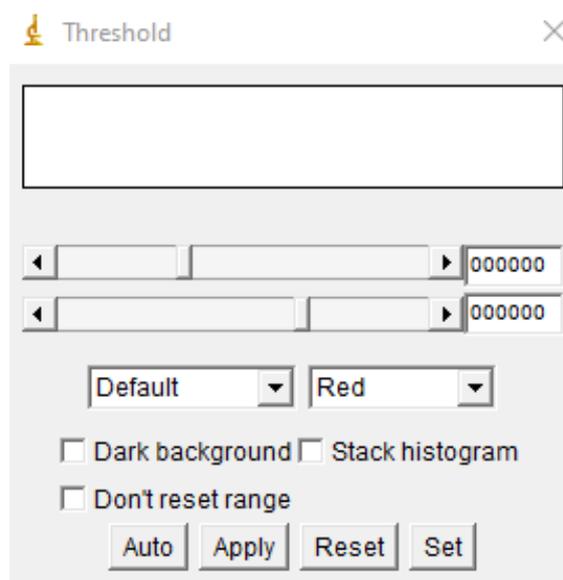
Parametros	Descripción
Escala	Definición de una medida referencial conocida de la imagen.
Tipo de Imagen	Definición de imágenes RGB a imagen de 8 bits.

Una vez listos los parámetros con los que se trabajará con la imagen, se utilizará una técnica para dividir una imagen en dos (o más) clases de píxeles, que suelen denominarse "primer plano" y "fondo".

Esta técnica se conoce como umbral, que funciona eligiendo un valor límite, de forma que cada píxel menor que ese valor se considera una clase, mientras que cada píxel mayor que ese valor se considera de otra clase (Thresholding).

La configuración de los valores de umbral dependerá de la imagen, ya que a pesar de que existe un modo de selección automático, se debe afinar, eliminar elementos y ajustar el contraste de la imagen como se muestra en la Figura 5.

Figura 5. - Umbral dentro de ImageJ



De esta forma, con este proceso, se hará una diferencia entre el blanco y el negro de la imagen, permitiendo la detección del área de análisis mediante algoritmos internos del software.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El método de impresión 3D sigue siendo un desafío hoy en día, sin embargo, tiene características de fabricación que pueden ser beneficiosas en ciertas aplicaciones.

Entre los inconvenientes más notorios al momento de fabricar las piezas se halla la variación dimensional, más aún si nos referimos a la impresión 3D con resina. Es así como mediante pruebas previas se determinó una orientación ideal de 45 grados para la impresión con las siguientes resinas:

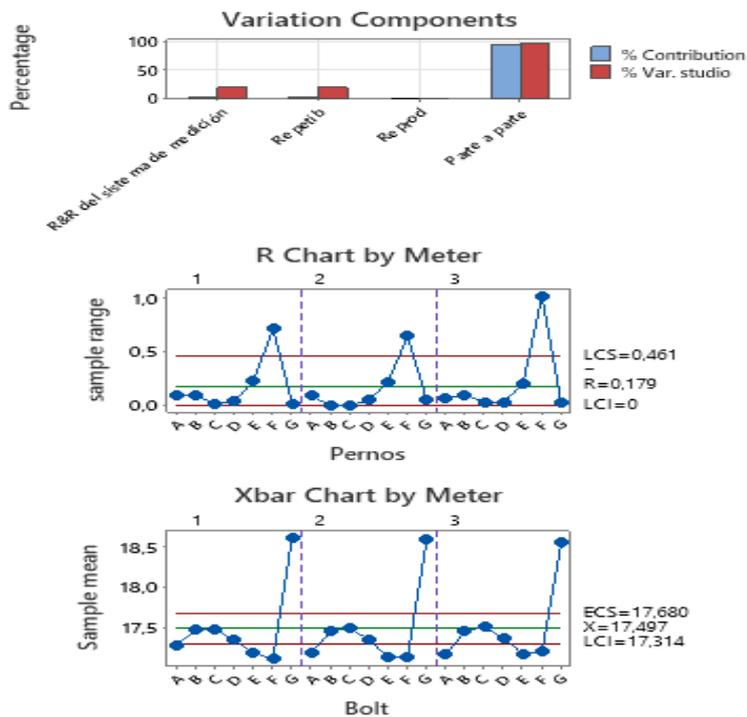
- High strenght
- Clear (formLabs)
- Gray (formLabs)

Para la fabricación de los pernos se tiene como característica de diseño esencial que estos mantengan sus dimensiones, para el perfecto encaje entre tuerca y perno. Siendo que las piezas impresas con resina presentan variaciones se recurrió a pasar una tarraja por los pernos, y un machuelo por las tuercas para mejorar su ajuste. Con estas consideraciones y debido a que las dimensiones a considerar en el perno son múltiples, se establecerá el enfoque de un análisis ANOVA multifactorial.

1. Estudio del sistema de medición

Se realizó un estudio del sistema de medida en base a un parámetro de distancia entre caras, considerando 2 pernos de cada material y un perno fabricado con PLA, por lo que se obtuvo un total de 7 pernos y 3 réplicas, con tres personas midiéndolos, dando los resultados mostrados en la figura 6.

Figura 6. - Resultados del análisis de medición



- El proceso tiene poca variación
- Hay un punto de medición fuera del rango el cual corresponde al (PLA).
- El valor por metros es una línea recta (errores similares)
- Interacciones con medidas uniformes (reproducibilidad)

2. Comparación geométrica-Áreas

Con base en el procesamiento de imágenes utilizando el software ImageJ, en la Tabla 3 se muestra el área sin contacto entre la galga milimétrica y el perno haciendo uso de los umbrales para obtener el mejor procesamiento de la imagen. Es importante saber que esta tabla de resultados muestra las áreas de los pernos con tres tipos de después de pasar la tarraja y sin pasar la tarraja sobre estos (En las Tablas que se muestra a continuación R representa los pernos que fueron pasados la tarraja y SR representa los pernos que no se pasaron la tarraja).

Tabla 3. - Resina Clear

Resina	Clear 1 R	Clear 1 SR	Clear 2 R	Clear 2 SR	Clear 3 R	Clear 3 SR
Longitud de prueba	10 mm	15,4 mm	10 mm	15,4 mm	10 mm	15,4 mm
Umbral	14,09%	10,08%	9,36%	8,20%	9,36%	8,20%
Área	28,427 mm^2	26,84 mm^2	22,784 mm^2	21,533 mm^2	22,76 mm^2	21,542 mm^2

Tabla 4. - Resina Gray

Resina	Gray 1 R	Gray 1 SR	Gray 2 R	Gray 2 SR	Gray 3 R	Gray 3 SR
Longitud de prueba	10 mm	15,4 mm	10 mm	15,4 mm	10 mm	15,4 mm
Umbral	4,95%	8,76%	4,84%	5,38%	4,84%	5,38%
Área	34,038 mm^2	51,865 mm^2	37,567 mm^2	42,393 mm^2	37,545 mm^2	42,3936 mm^2

Tabla 5. - Resina High Strenght

Resina	High Strenght 1 R	High Strenght 1 SR	High Strenght 2 R	High Strenght 2 SR	High Strenght 3 R	High Strenght 3 SR
Longitud de prueba	10 mm	15,4 mm	10 mm	15,4 mm	10 mm	15,4 mm
Umbral	10,23%	9,36%	6,58%	7,86%	6,58%	7,86%
Área	21,923 mm^2	24,944 mm^2	16,033 mm^2	26,707 mm^2	16,055 mm^2	26,7 mm^2

3. Resultados del ANOVA Multivariable

El análisis ANOVA muestra el material con las menores variaciones, donde se obtuvo los siguientes resultados (ver Tabla 6).

Tabla 6. - Solución de reducción de variación

Solución

Solución	FACTOR 1	FACTOR 2	E_1_1 Ajuste	H_1 Ajuste	SW_1 Ajuste	D_1_1 Ajuste	I_1 Ajuste	d_1 Ajuste
1	CLEAR	CON	0,0444444	0,168333	0,210556	0,208333	0,765	0,095
Solución	k_1 Ajuste	Deseabilidad compuesta						
1	0,331667	0,684635						

El siguiente margen de precisión, muestra que la resina que logra satisfacer la mínima variación de medidas entre el perno impreso y las medidas de un perno estándar es la resina CLEAR, con las probetas que se le pasaron la tarraja.

Tabla 7. - 11. 95% margen de respuesta

Predicción de respuesta múltiple

Variable	Valor de configuración		IC de 95%	IP de 95%
	FACTOR 1	FACTOR 2		
	CLEAR	CON		
Respuesta	Ajuste	EE de ajuste	IC de 95%	IP de 95%
E_1_1	0,0444	0,0247	(-0,0094; 0,0983)	(-0,0632; 0,1521)
H_1	0,1683	0,0570	(0,0440; 0,2926)	(-0,0802; 0,4169)
SW_1	0,2106	0,0184	(0,1705; 0,2506)	(0,1305; 0,2906)
D_1_1	0,2083	0,0844	(0,0244; 0,3923)	(-0,1595; 0,5762)
L_1	0,7650	0,0832	(0,5837; 0,9463)	(0,4025; 1,1275)
d_1	0,0950	0,0255	(0,0395; 0,1505)	(-0,0160; 0,2060)
k_1	0,3317	0,0263	(0,2744; 0,3889)	(0,2172; 0,4461)

La Tabla 7 muestra los rangos en los que se puede encontrar la variación de las medidas con respecto al valor real del tornillo M10X1.5.

Para el análisis del sistema de medida podemos observar que:

- El proceso tiene poca variación.
- Hay un punto de medición fuera del rango de medición, correspondiente al PLA.
- El valor por metros es una línea recta (errores similares)
- Interacciones con medidas uniformes (reproducibilidad)

Mientras que para el análisis de la variación de las dimensiones de los pernos después de la impresión 3D en resina, se debe requerir una resina y un proceso de terrajado que logre minimizar la variación de estas dimensiones.

CONCLUSIONES

El resultado obtenido en el ANOVA multifactorial para el diámetro del perno tendrá menor variación con respecto al valor de medida estándar (M10X1.5) con la resina CLEAR y con el proceso de desbaste, dando como resultado, con un nivel de confianza del 95%, que las variaciones de medida estarán entre $10-0.0160$ y $10+0.2060$ [mm]. Con base a estos resultados se establece que las tuercas y pernos no logran cumplir las dimensiones establecidas en su rosca simplemente con el proceso de impresión 3D, lo cual se puede evidenciar fácilmente al intentar acoplar un perno con una rosca, por lo que se concluye que en el caso de tener piezas que requieran un grado de exactitud milimétrico tal como es el paso de la rosca, será necesario realizar una etapa de adecuación de la pieza al post

curado, con el fin de corregir dimensionalmente los errores que se repiten en la manufactura de cada capa durante la impresión.

Por último, se indica que la resina Clear es la que mejor se adecua dimensionalmente a los parámetros luego de corregir los errores utilizando una tarraja, esto puede deberse a las propiedades mecánicas que presenta al finalizar la impresión y antes del curado, lo que permite una mejor trabajabilidad en la pieza para alcanzar las dimensiones requeridas.

LISTA DE REFERENCIAS

- 3D Systems. (2023, 7 febrero). *Estereolitografía*.
<https://es.3dsystems.com/stereolithography>
- Bautista Pérez, S. R. (2006). *METROLOGIA DIMENCIONAL PARA LAS APLICACIONES EN LA INGENIERIA AGRICOLA.* <https://1library.co/document/yr21owjz-metrologia-dimencional-aplicaciones-ingenieria-agricola.html>
- Christoph, R. (2016). *Manufactura Aditiva | Realidad y Reflexión*.
<https://www.camjol.info/index.php/RyR/article/view/3552>
- Chua, C. K., Wong, C. H., & Yeong, W. Y. (2017). *Standards, Quality Control, and Measurement Sciences in 3D Printing and Additive Manufacturing (English Edition)* (1.ª ed.). Academic Press.
- Dym, C. L. (2013). *Engineering Design: A Project-Based Introduction*. Wiley.
- Fuente Fernandez, S. (s. f.). *Modelos de Análisis de varianza* (1.ª ed.). Facultad Ciencias Económicas y Empresariales.
<https://www.estadistica.net/ECONOMETRIA/ANALISIS-VARIANZA/analisis-varianza.pdf>
- Gargiulo, P. (2023). *Handbook of Surgical Planning and 3D Printing: Applications, Integration, and New Directions* (1.). Academic Press.
- Kirkup, L. (2019). *Experimental Methods for Science and Engineering Students: An Introduction to the Analysis and Presentation of Data*. Cambridge University Press.
- Marchante, A. (2021, 8 abril). *SLA vs DLP: ¿Qué tecnología 3D de resina escoger?* 3Dnatives. <https://www.3dnatives.com/es/sla-vs-dlp-resina-080420212/>
- Materialise. (s. f.). *Estereolitografía (SLA) | Tecnología de impresión 3D | Materialise*.
<https://www.materialise.com/es/industrial/tecnologias-impresion-3d/estereolitografia>

- Newer ImageJ. (2022, 19 noviembre). *ImageJ*. <https://imagej.nih.gov/ij/download.html>
- Norma ISO 4017 (DIN 933) (pernos hex milimétricos). (s. f.). Imporpernos. <https://www.imporpernos.com/blog/norma-iso-4017-din-933>
- Senthilnathan, R., Nandhini, M., Ranjani, R., & Sridevi, S. (2017). Vision based orientation invariant measurement of metric screw thread parameters. *2017 Trends in Industrial Measurement and Automation (TIMA)*. <https://doi.org/10.1109/tima.2017.8064811>
- Thresholding*. (s. f.). ImageJ Wiki. <https://imagej.net/imaging/thresholding>
- Zhao, Z., Tian, X., & Song, X. (2020, 22 octubre). *Engineering materials with light: recent progress in digital light processing-based 3D printing*. *Journal of Materials Chemistry C* (RSC Publishing). <https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/TC/D0TC03548C>