

Ingeniería Inversa en el Diseño Mecánico considerando el Método de Optimización Topológica

Gabriel Jaime Gómez Orrego¹, Wilfredo Montealegre Rubio²

¹ Grupo de investigación de Diseño y Optimización Aplicada (DOA), Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Email: ggomezor@unal.edu.co

² Grupo de investigación de Diseño y Optimización Aplicada (DOA), Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Colombia. Email: wmontealegrer@unal.edu.co

Resumen

Este estudio se enfoca en la aplicación de la ingeniería inversa y la optimización topológica con el fin de crear piezas mecánicas más sustentables. Para el diseño de piezas mecánicas, con base a las instalaciones del Laboratorio de Diseño Mecánico en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, se consiguieron reducciones de peso y material que oscilaron entre el 25% y el 60%, sin comprometer la funcionalidad. La metodología incluyó escaneo 3D, simulaciones de elementos finitos y manufactura aditiva tipo FDM. Se lograron mejoras en el rendimiento estructural y una reducción en los costos de producción, además de una mayor sostenibilidad ambiental, lo que resalta la capacidad de estas técnicas para desarrollar productos más eficientes y acordes con las políticas de sostenibilidad en la industria mecánica.

Palabras clave: Ingeniería inversa; Simulaciones EF; Optimización topológica; Manufactura aditiva.

Abstract

This study focuses on the application of reverse engineering and topological optimization in order to create more sustainable mechanical parts. For the design of mechanical parts, based on Mechanical Design Laboratory of the Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, weight and material reductions ranging from 25% to 60% were achieved, without compromising functionality. The methodology included 3D scanning, finite element simulations and FDM additive manufacturing. Improvements in structural performance and a reduction in production costs were achieved, in addition to greater environmental sustainability, which highlights the ability of these techniques to develop more efficient products in line with sustainability policies in the mechanical industry.

Keywords: Reverse engineering; EF simulations; topological optimization; FDM additive manufacturing.

1. Introducción

Una exigencia actual en el diseño de productos consiste en desarrollarlos pensando, no solamente, en su funcionalidad o modos de falla; también, en su impacto en el ciclo de vida del producto, su impacto ambiental, su ajuste a filosofías de economía circular, entre otros factores de sustentabilidad [1]. En ese sentido, en la práctica industrial, principalmente en el contexto latinoamericano, se carece de ejemplos que resaltan la importancia de diseñar piezas mecánicas con una visión de sustentabilidad. En ese sentido, la ingeniería inversa, en conjunto con técnicas modernas de

optimización, prometen mejorar el diseño de piezas mecánicas para el desarrollo de productos cada vez más sustentables.

En particular, la ingeniería inversa es un proceso esencial en la modernización y mejora de componentes y herramientas mecánicas, permitiendo entender los principios de diseño y funcionalidad de un objeto existente para mejorarlo o reproducirlo [2]. La ingeniería inversa no solo facilita la reproducción precisa de un componente, sino que también abre la puerta a su optimización, esta tiene numerosas aplicaciones en diversas industrias. En medicina, se

utiliza para la personalización de implantes para reconstrucción ósea, simulaciones dentales, herramientas quirúrgicas, optometría, ortopedia, ergonomía, órtesis y prótesis [3]. Los ingenieros de software utilizan ingeniería inversa para extraer algoritmos, estructuras de datos y patrones de diseño de sistemas heredados [4]. En la ingeniería mecánica se realiza ingeniería inversa en dispositivos defectuosos para identificar fallas de diseño y garantizar la seguridad del producto [5]. Además, permite crear modelos CAD detallados de piezas mecánicas, como componentes de construcción naval [6].

Además, esta técnica se complementa con la optimización topológica, un método matemático que busca encontrar la disposición óptima del material en un dominio de diseño específico, considerando las condiciones de contorno dadas, para mejorar aspectos globales como la rigidez y las frecuencias naturales de una estructura [7]. Es prometedora para diseñar estructuras de ingeniería con menor peso y mayor rendimiento, enfrentando desafíos multidisciplinarios complejos [8]. En la industria aeroespacial, se utiliza para diseñar componentes más livianos y eficientes, como refuerzos y soportes de fuselaje, mejorando la eficiencia del combustible [9]. En el sector automotriz, equilibra la necesidad de piezas livianas para mejorar el rendimiento y la economía de combustible con la estabilidad y resistencia necesarias [10]. En el campo médico, permite el diseño de implantes ortopédicos y dispositivos protésicos con relaciones resistencia-peso [11]. Los ingenieros mecánicos también la utilizan para optimizar componentes fabricados en máquinas CNC con estructuras de soporte accesibles [12].

Este estudio se centra en la aplicación de la ingeniería inversa a una llave de máquina fresadora. Empleando tecnología de escaneo 3D proporcionada por el Laboratorio de Diseño Mecánico del Área de Mecánica Computacional de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, se realizaron escaneos a dos resoluciones diferentes para evaluar la precisión y fiabilidad de los datos obtenidos. En el estudio, se aplicaron simulaciones de elementos finitos con Inspire Altair 2023, parte del paquete de HyperWorks de Altair One [13], para identificar mejoras potenciales en la llave de máquina fresadora. Estas simulaciones permitieron analizar el estado de esfuerzos, desplazamientos y factores de seguridad de la herramienta, identificando áreas susceptibles de mejora. Posteriormente, se llevaron a cabo optimizaciones topológicas para desarrollar una versión mejorada de la herramienta, reduciendo su peso y material sin comprometer la funcionalidad.

Finalmente, con los resultados de la optimización topológica y el modelo CAD de la pieza original, se procedió a la fabricación de cinco modelos mediante

manufactura aditiva FDM, utilizando la impresora 3D FF-300 del Laboratorio de Diseño Mecánico del Área de Mecánica Computacional de la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Este proceso validó las mejoras propuestas y demostró el impacto positivo de la ingeniería inversa en el diseño y mejora de herramientas mecánicas. Los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas subrayan la importancia de la ingeniería inversa, simulaciones EF y la optimización topológica en la innovación y eficiencia en el diseño de herramientas.

2. Materiales y Métodos

En el trabajo se ha realizado una selección previa de una herramienta mecánica que es usada para montar y desmontar el husillo de una máquina fresadora UNIVERSAL FEXAC perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín identificada como ER40 NUT WRENCH que se visualiza en la Figura 1. La selección de la llave se hace a vía de ejemplo, de forma tal que se pueda resaltar las ventajas del uso de la ingeniería inversa en conjunto con técnicas de optimización. La llave de la máquina fresadora fue escaneada en 3D con dos resoluciones diferentes (0,3 mm y 0,5 mm), para un control dimensional de mayor rigurosidad en la aplicación de ingeniería inversa, es conveniente utilizar la menor resolución, utilizando un escáner EinScan HX de SHINING 3D [14]. La cual se ha convertido de un archivo STL a un archivo tipo CAD como se visualiza en la Figura 2.

Posteriormente, se definen las condiciones de frontera para realizar las simulaciones mediante elementos finitos (EF) y, en consecuencia, poder evaluar los esfuerzos, desplazamientos y factores de seguridad. Una vez realizadas las simulaciones, se identificaron mejoras potenciales en las características físicas y de desempeño de la llave, lo cual torna viable la optimización de la misma para obtener versiones mejoradas; las cuales se fabricaron mediante manufactura aditiva FDM.



Figura 1. ER40 NUT WRENCH. Fuente: elaboración propia.

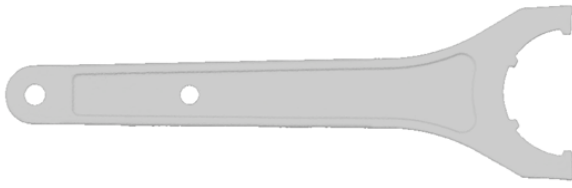


Figura 2. CAD 0.3mm. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 3 se visualiza la secuencia de la metodología que se aplicará en el presente trabajo. En ella se exploran diferentes técnicas, las cuales se detallan en las siguientes subsecciones, describiendo cada parte del proceso más minuciosamente.

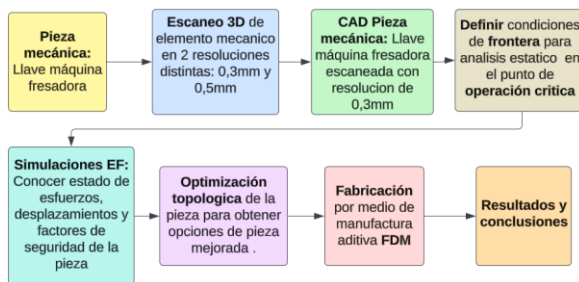


Figura 3. Metodología. Fuente: elaboración propia.

2.1. Simulaciones por elementos finitos

Partiendo del CAD obtenido mediante el proceso de escaneo 3D, se procede a definir las condiciones de frontera que regirán las simulaciones, mediante un análisis estático, para así obtener el estado de esfuerzo, desplazamiento y factor de seguridad de la pieza bajo las condiciones actuales de operación.

En esta instancia, cada diente de la herramienta será considerado como un punto de empotramiento. Además, se aplicará una fuerza límite de 50N, tomando en cuenta la norma UNE-EN 1005-3 que representa la fuerza ejercida por la mano humana en la posición que normalmente se acciona la herramienta de forma ergonómica que debe tener un valor entre 31 y 50 N [15], distribuida sobre un área de contacto aproximada de $0,0007 \text{ m}^2$. Esto resulta en una presión de contacto de $0,072 \text{ MPa}$, como se ilustra en la Figura 4, además este tipo de herramientas se fabrican de acero medio carbono por lo que para este análisis se ha decidido modelar el material de la pieza como un AISI / SAE 1045 [16].

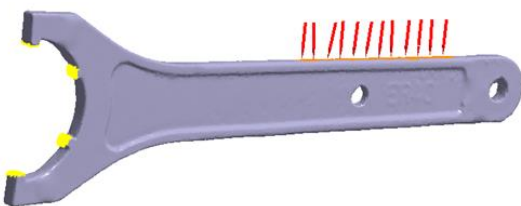


Figura 4. Condiciones de frontera. Fuente: elaboración propia.

Como se visualiza en la Figura 5, se observa que los mayores esfuerzos se concentran en los dientes, principalmente en los dos dientes interiores y el cuello de la herramienta, alcanzando un valor máximo de $1.384\text{e}+07 \text{ Pa}$ en el diente interno inferior.

El máximo desplazamiento se encuentra en la punta del mango de la herramienta, con un valor de $2.998\text{e}-05 \text{ m}$. Además, se puede observar en la Figura 6 el cambio de desplazamiento a lo largo de la herramienta desde el punto de empotramiento.

Es de esperarse que el menor factor de seguridad, que es de 25.3, se obtenga en el mismo lugar donde se registra el mayor resultado de esfuerzo, como se observa en la Figura 7.

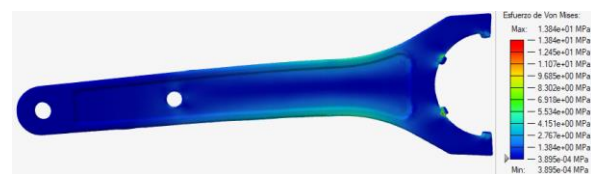


Figura 5. Resultados del esfuerzo Von mises. Fuente: elaboración propia.

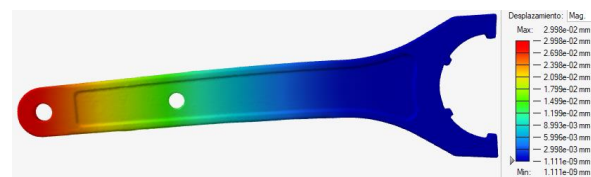


Figura 6. Resultados desplazamientos. Fuente: elaboración propia.



Figura 7. Resultados Factor de seguridad. Fuente: elaboración propia.

2.2. Optimización topológica

Los desplazamientos y esfuerzos máximos son insignificantes y no afectan la funcionalidad de la pieza, indicando un alto factor de seguridad. Esto permite optimizar la herramienta, reduciendo la cantidad de material utilizado. Para ello se hace uso de la técnica de optimización topológica [17]. Se realizaron diferentes optimizaciones en el programa Inspire de Hyperworks, variando el porcentaje del volumen total del espacio de diseño de 30% a 80% de la pieza original. Además, se usaron controles de forma, como la opción de simetría para generar simetrías a través de la pieza, y restricciones de espacios de diseño, manteniendo la forma de la boca de la herramienta sin cambios para preservar su funcionalidad.

Luego de analizar las diferentes optimizaciones, aunque todas cumplen con las condiciones de carga aplicadas, algunas formas dejan de ser prácticas como herramienta manual para la aplicación requerida. Por lo tanto, se seleccionan la optimización al 70% sin controles de forma y la del 75% con restricciones de espacio de diseño, ya que mantienen resultados de factor de seguridad de 45.9 y 44.1, respectivamente, además de que conservan la forma de los dientes que se insertan en el husillo de la máquina fresadora. Se puede apreciar mejor la forma de esas topologías en la Figura 8 y 9, respectivamente, las cuales son apropiadas para un proceso posterior de fabricación.



Figura 8. Optimización del 70% sin restricciones de forma. Fuente: elaboración propia.



Figura 9. Optimización del 75% con restricciones de espacio de diseño. Fuente: elaboración propia.

Con el resultado obtenido en la optimización del 70% sin restricciones de forma, mostrado en la Figura 8, se propone realizar un análisis de elementos finitos a una modificación de esta optimización. Para ello se añade material a la ranura de la herramienta en el interior, área denotada en color gris, como se observa en la Figura 10.

El factor de seguridad obtenido es menor que el de la optimización del 70% inicial, con un valor de 41.6. Se puede concluir que la flexibilidad que proporciona la ranura en la parte interna de la herramienta alivia ligeramente los esfuerzos solicitados a la herramienta.

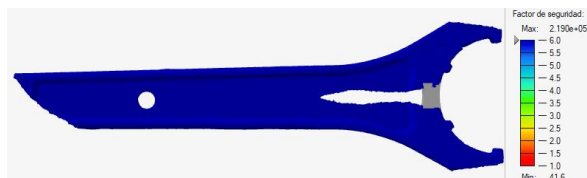


Figura 10. Resultados de factor de seguridad. Fuente: elaboración propia.

En concreto, se observa que los mayores esfuerzos como los demás resultados se concentran en los dientes, principalmente en los dos dientes interiores y el cuello de la herramienta, alcanzando un valor máximo de $8.423e+06$ Pa, como se visualiza en la Figura 11.

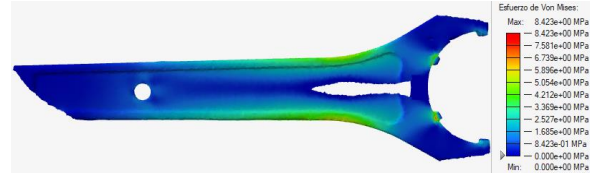


Figura 11. Resultados de esfuerzos. Fuente: elaboración propia.

Por otro lado, con el resultado obtenido de la optimización del 30% sin restricciones de forma, mostrado en la Figura 12, se realiza un análisis de elementos finitos para modificar esta optimización. Se añade material a la herramienta para reconstruir la boca y recuperar su funcionalidad. Esta área se denota en color gris en la Figura 13.



Figura 12. Resultados de esfuerzos. Fuente: elaboración propia.

El factor de seguridad obtenido es el menor de todas las optimizaciones, con un valor de 13.1. Aunque es el más pequeño, sigue mostrando un sobredimensionamiento aceptable para que la herramienta cumpla su función.

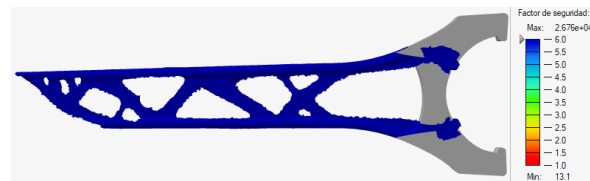


Figura 13. Resultados de factor de seguridad. Fuente: elaboración propia.

En la Figura 14 se visualiza un desplazamiento mayor en comparación con el modelo de la pieza original, esto se diferencia de los demás resultados donde los desplazamientos siempre eran menores al original. El valor obtenido es de $4.138e-05$ m.

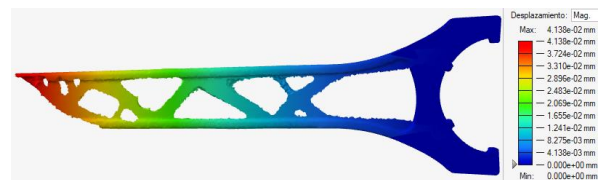


Figura 14. Resultados de desplazamiento. Fuente: elaboración propia.

Se observa que los mayores esfuerzos como los demás resultados se concentran en los dientes, principalmente en los dos dientes interiores y el cuello de la herramienta, alcanzando un valor máximo de $2.678e+07$ Pa, como se visualiza en la Figura 15.

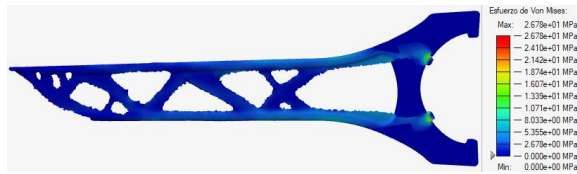


Figura 15. Resultados de esfuerzos. Fuente: elaboración propia.

2.3. Prototipado

Luego de tener los 4 resultados de la optimización topológica y el CAD de la pieza original se procede a realizar la fabricación de los 5 modelos en el material PLA [18], por medio de la manufactura aditiva FDM a través del empleo de la impresora 3D FF-300 [19], brindada por el Laboratorio de Diseño Mecánico del Área de Mecánica Computacional de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.

3. Resultados

En la Figura 16 se presentan los prototipos resultados de la manufactura aditiva FDM, que incluyen tanto el escaneo 3D de la pieza original como los cuatro resultados de las optimizaciones topológicas. Estos resultados están organizados de izquierda a derecha, comenzando con la herramienta de menor masa y culminando con la pieza original.

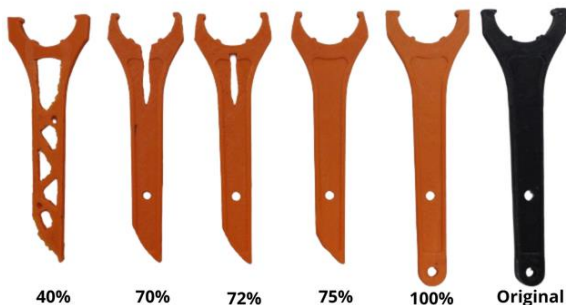


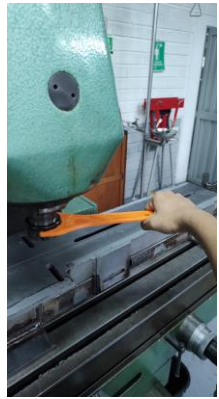




Figura 16. Comparativa resultados impresión 3D con la herramienta real. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se resumen los diferentes resultados de la impresión 3D en la Tabla 1. Además, se incluye la prueba experimental de cada una de las herramientas en la máquina fresadora universal FEXAC, perteneciente al laboratorio de procesos de manufactura de la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín.

Tabla 1. Resultados impresión 3D.

Resultados		
Nombre	Prototipo	Prueba experimental
Pieza Original		
Optimización topológica 75% de material		
Optimización topológica 70% de material		



Fuente: elaboración propia.

4. Conclusiones

La ingeniería inversa, en conjunto con las técnicas de optimización, ofrecen una herramienta efectiva para mejorar el diseño de componentes mecánicos, nuevos o ya existentes en el mercado, al reducir su peso mientras se mantiene o mejora su rigidez, lo que resulta en una mejora significativa en el rendimiento estructural. La obtención de estos modelos optimizados puede complementarse con la manufactura aditiva, ya que las formas irregulares no aumentan el costo de fabricación en este proceso. Además, la reducción de entre el 25% y 60% de la masa de las diferentes optimizaciones, no solo disminuye el costo de la materia prima utilizada, sino también el tiempo de fabricación.

Después de evaluar todos los resultados, se concluye que las cuatro geometrías optimizadas son viables y funcionales para el montaje y desmontaje del husillo en la máquina fresadora, cumpliendo con los requisitos de la herramienta original. Estas optimizaciones ofrecen la ventaja de utilizar menos material, mejorando la eficiencia en términos de recursos. Aunque el material del prototipo no alcanza la misma resistencia que una pieza metálica, la geometría obtenida en las optimizaciones podría ser factible para procesos de manufactura en metal, como el forjado o la fundición.

Finalmente, es de resaltar que la herramienta original tiene una masa de aproximadamente 450 gramos.

Mediante la optimización topológica se logra una reducción de masa del 60%, resultando en una nueva herramienta con una masa de 180 gramos. Esto implica un ahorro de 270 gramos de acero por herramienta. Extrapolando este ahorro a nivel mundial, se podría concluir que se ahorran en total 621 toneladas de acero, evitando a su vez la emisión de 1148 toneladas de CO₂ [20-21].

Como trabajo futuro, se propone utilizar estos resultados como base para el diseño conceptual, refinando la geometría de la pieza en términos estéticos y ergonómicos. Además, se explorará la posibilidad de manufacturar prototipos de las optimizaciones topológicas en metal mediante procesos convencionales como el corte láser, forja, fundición, o mediante nuevas técnicas como la manufactura aditiva metálica [22]. De igual manera, se busca extrapolar la metodología usada en este trabajo a otros componentes y productos para mejorar su sustentabilidad e impacto ambiental.

5. Referencias

- [1] Den Hollander, M. C., Bakker, C. A., & Hultink, E. J. (2017). Product Design in a Circular Economy: Development of a Typology of Key Concepts and Terms. *Journal of Industrial Ecology*, 21(3), 517–525. <https://doi.org/10.1111/jiec.12610>
- [2] Buonomici, F., Carfagni, M., Furferi, R., Governi, L., Lapini, A., & Volpe, Y. (2017). Reverse engineering of mechanical parts: A template-based approach. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(2), 145–159. <https://doi.org/10.1016/j.jcde.2017.11.009>
- [3] Bhatti, A., Syed, N. A., & John, P. (2018). Reverse Engineering and Its Applications. *Omics Technologies and Bio-Engineering*, 95–110. doi:10.1016/b978-0-12-804659-3.00005-1
- [4] Monroy, M. E., Arciniegas, J. L., & Rodríguez, J. C. (2016). Recuperación de Arquitecturas de Software: Un Mapeo Sistemático de la Literatura. *Información tecnológica*, 27(5), 201–220. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642016000500022>
- [5] Shabani, Betim & Pandilov, Zoran. (2017). Analyzing and application of reverse engineering for design and development of mechanical parts. 35.
- [6] Deja, M., Dobrzyński, M., & Rymkiewicz, M. (2019). Application of Reverse Engineering Technology in Part Design for Shipbuilding Industry. *Polish Maritime Research*, 26(2), 126–133. <https://doi.org/10.2478/pomr-2019-0032>

- [7] Zhang, W., Gao, T., & Zhu, J.-H. (2016). *Topology Optimization in Engineering Structure Design*. Elsevier.
- [8] Zhu, J.-H., Beckers, P., Dahan, M., Yan, J., & Jiang, C. (2015). Shape and topology optimization for complicated engineering structures. *Mathematical Problems in Engineering*, 2015, 1–2. <https://doi.org/10.1155/2015/723897>
- [9] París, J., Martínez, S., Navarrina, F., Colominas, I., & Casteleiro, M. (2010). Topology optimization of structures with stress constraints: Aeronautical applications. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 10, 012206. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/10/1/012206>
- [10] Khan, F., Hossain, N., Mim, J. J., Rahman, S. M. M., Iqbal, M. J., Billah, M., & Chowdhury, M. A. (2024). Advances of Composite Materials in Automobile Applications – A Review. *Journal of Engineering Research*. <https://doi.org/10.1016/j.jer.2024.02.017>
- [11] Wu, N., Li, S., Zhang, B., Wang, C., Chen, B., Han, Q., & Wang, J. (2021). The advances of topology optimization techniques in orthopedic implants: A review. *Medical & Biological Engineering & Computing*, 59(9), 1673–1689. <https://doi.org/10.1007/s11517-021-02361-7>
- [12] Mirzendehtdel, A. M., Behandish, M., & Nelaturi, S. (2021). Topology Optimization for Manufacturing with Accessible Support Structures. *Computer-Aided Design*, 103117. <https://doi.org/10.1016/j.cad.2021.103117>
- [13] Altair | Discover Continuously. Advance Infinitely - Only Forward. (s.f.). Default. <https://altair.com/>
- [14] EinScan HX - EinScan. (s.f.). EinScan. <https://www.einscan.com/einscan-hx-es>
- [15] Fuerzas - EN 1005-3 Evaluación del riesgo ergonómico por fuerzas ejercidas. (s.f.). Ergonomía en el trabajo y prevención de riesgos laborales. <https://www.ergonautas.upv.es/metodos/fuerzas/fuerza-maxima-ayuda.php>
- [16] ER40 Collet Wrench for ER40 Hex Nuts MariTool. (s.f.). Tool Holders, Collets and Machine Accessories - MariTool. https://www.maritool.com/p99/ER40-Collet-Wrench/product_info.html
- [17] Optimización topológica aplicada al diseño de componentes estructurales mecánicos de peso reducido. (2015). *El hombre y la máquina*, (46), 72–79.
- [18] Filamento PLA para impresión 3D / Envío Gratis. (s.f.). 4D-Lab Colombia | Impresión 3D. <https://4dlab.co/products/pla?variant=42221742391456>
- [19] Impresora 3D profesional FF-300. - Impresoras 3D Fused Form. (s.f.). Impresoras 3D Fused Form. <https://fusedformcorp.com/impresoras-3d/impresora-3d-doble-extrusor-ff300/>
- [20] What is the carbon footprint of steel? — Sustainable Ships. (s.f.). Sustainable Ships. <https://www.sustainable-ships.org/stories/2022/carbon-footprint-steel#:~:text=Steel%20carbon%20footprint&text=The%20IEA%20estimates%20that%20direct,of%20CO2%20per%20ton%20steel.>
- [21] Wrenches (HS: 8204) Product Trade, Exporters and Importers | The Observatory of Economic Complexity. (s.f.). The Observatory of Economic Complexity. <https://oec.world/en/profile/hs/wrenches>
- [22] Toyserkani, E., Sarkar, D. K., Russo, P., Ibadod, O. O., & Liravi, F. (2021). *Metal Additive Manufacturing*. Wiley & Sons, Limited, John.