

## OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE UN SOPORTE PARA IMPRESIÓN 3D

Autor Daniel Rivas Ramos<sup>a</sup>, Marcelino Rivas Santana<sup>b</sup>, Rosinei Batista Ribeiro<sup>c</sup>,  
Jorge Carlos Benavides<sup>d</sup>

*a. Empresa Eléctrica Provincial Matanzas (Cuba)*

*b. Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible, Universidad de Matanzas (Cuba)*

*c. Centro Universitário Teresa D'Ávila (UNIFATEA) (Brasil)*

*d. Estudiante de Ingeniería Mecánica, Universidad de Matanzas (Cuba)*

---

**Resumen:** La optimización topológica permite el diseño de piezas estructurales con un menor volumen sin perder las propiedades mecánicas, sin embargo, las formas que se obtienen en ocasiones son complejas para fabricar por procesos de manufactura convencionales. En los últimos años el desarrollo de la manufactura aditiva ha venido a solucionar estos problemas. El trabajo presenta la optimización topológica de un soporte fabricado en impresión 3D usando como material el poli-(ácido láctico) (PLA). El método de impresión utilizado fue el de fabricación con filamento fundido (FDM). Finalmente se realiza una comparación entre el diseño de la pieza optimizada y el diseño de la pieza original teniendo en cuenta los indicadores de tiempo de fabricación y gasto de energía.

**Palabras claves:** Optimización topológica, impresión 3D, FDM.

**Abstract:** Topological optimization allows the design of lighter structural parts while keeping its mechanical properties; however, the obtained shapes are sometimes too complex to be manufactured through conventional processes. In recent years, the development of additive manufacturing has solved these problems. The work presents the topological optimization of a support part manufactured by 3D printing using poly-(lactic acid) (PLA) as material. The printing method used was fused deposition modeling (FDM). Finally, a comparison was carried out between the optimized part design and the original part design, taking into account the indicators of manufacturing time and energy wastes.

**Keywords:** Topological optimization, 3D printing, FDM.

---

### 1. Introducción.

Sin lugar a dudas una forma de mejorar la sostenibilidad en la manufactura aditiva es el uso de la optimización topológica (OT), la cual ha sido utilizada para mejorar los diseños iniciales mediante la variación de sus propiedades geométricas con respecto a un conjunto de objetivos y restricciones establecidas. Entre los enfoques más utilizados se encuentran el de la densidad [1], enfoque de nivel establecido [2] - [5] y enfoques evolutivos [6] - [9], siendo el enfoque de

densidad el más utilizado debido a su eficiencia computacional. Este enfoque ha sido aplicado a la solución de problemas industriales obteniéndose buenos resultados. De los estudios anteriores se puede concluir que el método de optimización topológica de Material Sólido Isotrópico con Penalización. (SIMP) puede ser aplicado con buenos resultados.

Uno de los problemas de la optimización topológica es la dificultad de lograr formas complejas por métodos convencionales de fabricación, aspecto que se resuelve con el uso de la manufactura aditiva, sin embargo, una de sus principales desventajas de la AM es el tiempo que demora en la fabricación, atentando contra la sostenibilidad del proceso. Por tal motivo el uso de la optimización topológica permitirá de conjunto, con las posibilidades de la manufactura aditiva, la obtención de diseños eficientes que hagan el proceso sostenible repercutiendo de forma positiva en los procesos de fabricación de piezas. Garaigordobil [10] presenta un procedimiento computacional para la integración directa de la optimización de topología y de fabricación aditiva (AM). Muchas de las piezas requieren material de soporte para la impresión 3D, el estudio analiza la geometría del modelo para localizar contornos y calcular su inclinación y orientación, logrando acoplar la optimización topológica a los procesos de manufactura aditiva. Jankovics, [11] propone una metodología de optimización de topología que utiliza el enfoque de minimización con restricciones en las superficies sobresalientes, desarrollado un optimizador de topología en ANSYS® utilizando el lenguaje de diseño paramétrico de APDL; el trabajo propone la solución de un ejemplo cuyo resultado es una estructura que no necesita material de soporte para ser fabricado. Silvia, [12], propone una metodología para desarrollar los problemas de OT. El enfoque seguido para desarrollar la mejor estrategia para optimizar el diseño de las piezas a fabricar por manufactura aditiva se basa en seis pasos fundamentales: pruebas mecánicas del material de la pieza original, análisis de elementos finitos de la pieza original, optimización topológica, rediseño, análisis por elementos finitos, fabricación con manufactura aditiva.

El objetivo del trabajo es incrementar la sostenibilidad de un soporte impreso en 3D por el método FDM usando la optimización topológica. El artículo se divide en tres secciones, Introducción, materiales y métodos donde se describen los equipos y materiales utilizado, así como su caracterización necesaria para realizar el estudio, posteriormente se define el problema de optimización a tratar y se realiza un análisis de los indicadores de sostenibilidad utilizados en los procesos de manufactura y se definen los indicadores a utilizar para el análisis de sostenibilidad. En la sección de análisis de los resultados se presentan un caso de estudio con los cálculos de indicadores de sostenibilidad realizado a un diseño preliminar y al diseño optimizado. Finalmente, se muestran las conclusiones a las que se pudo llegar como resultado del trabajo y se delinear las futuras investigaciones en la temática.

## **2. Materiales y métodos.**

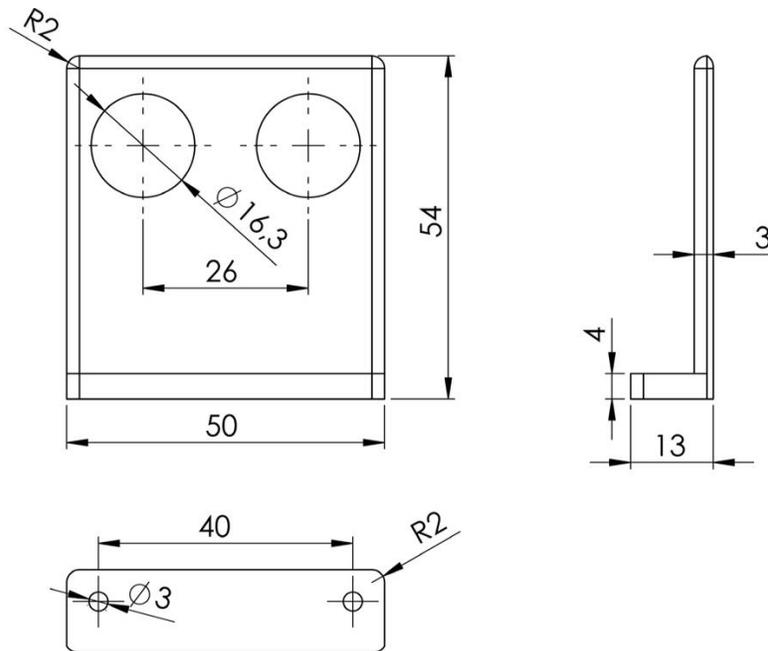
El material de impresión utilizado fue el PLA-3D FREUNDE de fabricación alemana. Las probetas para los ensayos de tracción fueron impresas en la impresora modelo 3D Maker Select IIIP, los parámetros de impresión fueron establecidos de forma que se garanticen los requisitos de precisión de la pieza, (ver tabla 1) y el software utilizado fue el CURA. Los ensayos de tracción se realizaron acorde a la norma ASTM D638, usando una máquina de ensayo EMIC modelo DL2000, equipada con garras neumáticas, con una celda de carga de 5 kN a una velocidad de 1.3 mm /

min. Las impresiones se realizaron en el plano XY. La optimización topológica se realizó con el software Solidwork.

**Tabla 1.** Parámetros de impresión

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>	<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
Altura de capa (mm)	0.12	Espesor de la capa inicial (mm)	0.8
Densidad de relleno (%)	20	Diámetro de la boquilla (mm)	0.4
Velocidad de impresión (mm/s)	50	Diámetro del filamento (mm)	1.75
Temperatura de impresión (°C)	195	Temperatura de la placa (°C)	50

El soporte seleccionado para el estudio se muestra en la figura 2. En este caso las cargas actúan sobre los agujeros a tracción con un valor de fuerza constante de 50 N y se sujeta con tornillos a la base.



**Figura 1.** Croquis del soporte

### 3. Análisis de los resultados.

Los ensayos realizados de las propiedades mecánicas mostraron los siguientes resultados. (Tabla 2).

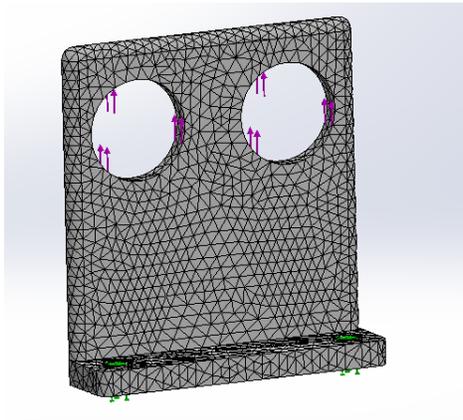
**Tabla 2.** Propiedades mecánicas de los ensayos realizados en el plano XY

<i>Límite de rotura</i> [MPa]	<i>Límite elástico</i> [MPa]	<i>Módulo de elasticidad</i> (MPa)	<i>Coficiente de Poisson</i>	<i>Densidad del PLA</i> (g/cm <sup>3</sup> )
18	15	1293	0.3	1.25

Los resultados del mallado se muestran en la tabla 3 y figura 3

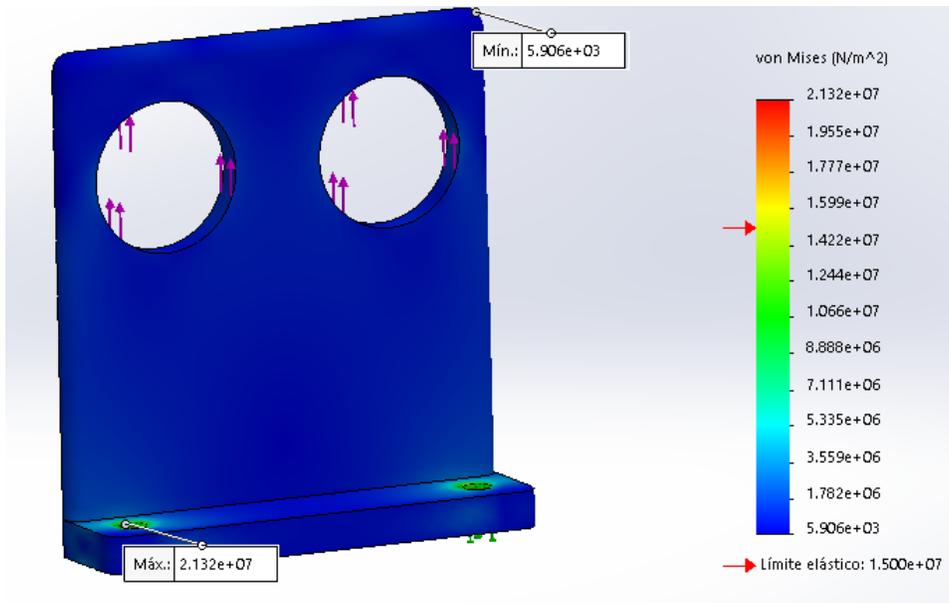
**Tabla 3.** Información de la malla

<i>Tipo de malla</i>	<i>Malla sólida</i>	<i>Puntos jacobianos</i>	<i>Tamaño máximo del elemento</i>
Malla utilizada	Malla basada en curvatura	4	2.04763
Tamaño mínimo del elemento	0.682536	Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	21747	Número total de elementos	12728

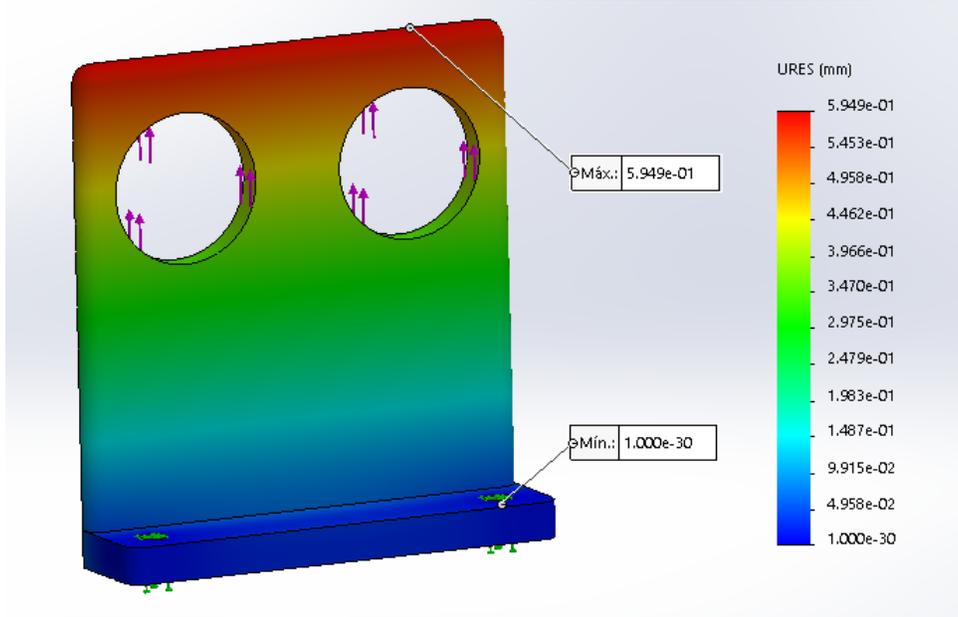


**Figura 2.** Resultados del mallado realizado

Los resultados de las tensiones de von Mises y los desplazamientos obtenidos se muestran en las figuras 4 y 5.

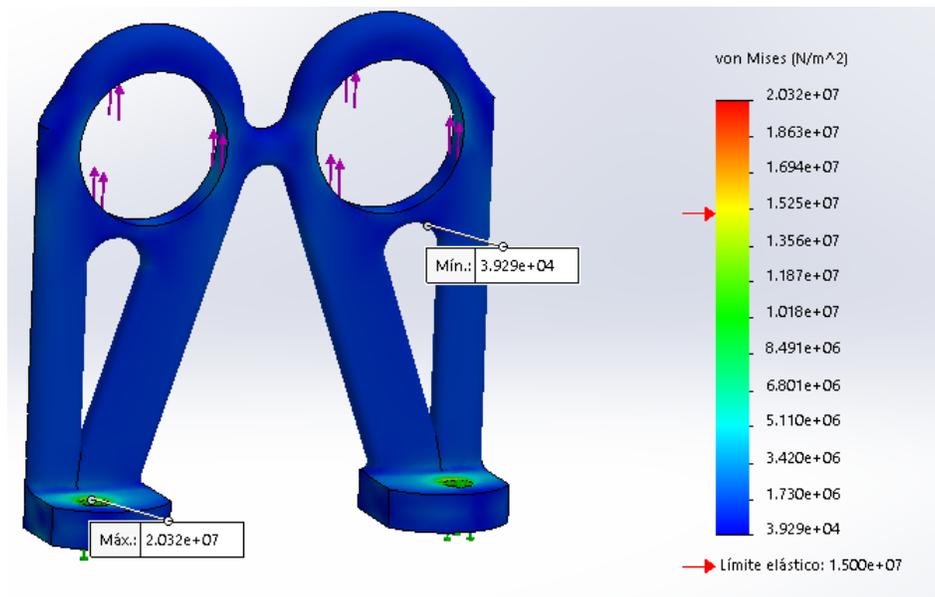


**Figura 3.** Tensiones equivalente de von Mises en el diseño original

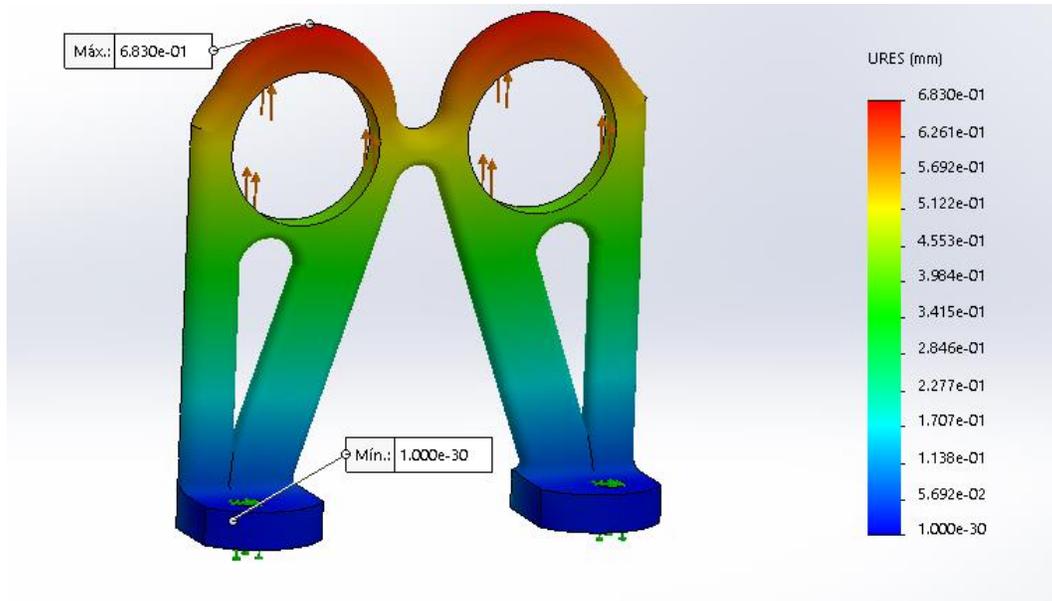


**Figura 4.** Desplazamientos en el diseño original

Para el análisis de optimización topológica utilizó como función objetivo la reducción de la masa hasta un 60% manteniendo la rigidez de la pieza. Los resultados del análisis de estático realizado al soporte se muestran en las figuras 6 y 7.



**Figura 5.** Tensiones equivalentes de von Mises en el diseño optimizado (reducción de masa del 60%)



**Figura 6.** Desplazamientos en el diseño optimizado (reducción de masa del 60%)

A partir del software CURA se puede estimar el tiempo de impresión. El consumo de energía de la impresora según catalogo es de 0.222 kW. La tabla 4 muestra los resultados obtenidos.

**Tabla 4.** Resultados obtenidos para el soporte inicial y el soporte diseñado a partir de la optimización topológica

<i>Variante</i>	<i>Tiempo de impresión [h]</i>	<i>Gasto de energía [kW-h]</i>
Soporte inicial	1.88	0.42
Soporte con reducción del 60% de la masa	1.30	0.29
<i>% de reducción</i>	31%	

#### 4. Conclusiones.

La optimización topológica realizada muestra que es posible realizar una reducción de masa del 60% manteniendo la resistencia de la pieza, ya que las tensiones de von Mises máximas aparecen cercanas a los agujeros de fijación tomando valores de 5 MPa, lo cual está muy por debajo del límite elástico del material 15 MPa, dando como resultado un coeficiente de seguridad de 3. Los valores de 20.3 MPa se alcanzan dentro del agujero de fijación, por lo que no son tenidos en cuenta. Los resultados demuestran las ventajas de usar la optimización topológica en los procesos de impresión 3D, donde la complejidad queda resuelta debido a que la impresión se realiza capa a capa. Se puede observar que como consecuencia de la reducción de la masa se logra una reducción del tiempo de impresión y del gasto de energía en un 31%, lo que implica una reducción de los costos de fabricación de la pieza. En trabajos futuros se debe realizar un análisis del diseño a partir de los presupuestos de diseño para manufactura aditiva (DfAM), donde se incluyen otros aspectos como la posición de la pieza y estructuras con soportes entre otros.

## Referencias.

- [1] M.P, Bendsøe, and O, Sigmund. Material interpolation schemes in topology optimization. *Archive of applied mechanics* 69, 635-654. 1999.
- [2] Liu, Shutian, Li, Quhao, Liu, Junhuan, C, Wenjiong and Z, Yongcun. Realization Method for Transforming Topology Optimization Design to Additive Manufacturing Structures. *Engineering*. Doi.org/10.1016/j.eng.2017.09.002.
- [3] G. Allaire, F, Jouve, and A, Toader. Structural optimization using sensitivity analysis and a level-set method, 194 (1) 2004.
- [4] M.Y, Wang, X, Wang, and D, Guo. A level set method for structural topology optimization. *Computer methods in applied mechanics and engineering* 192, 227-246.2003.
- [5] L. Shutian, Li. Quhao, Liu, Junhuan, C. Wenjiong and Z. Yongcun. Realization Method for Transforming Topology Optimization Design to Additive Manufacturing Structures. *Engineering*. Doi.org/10.1016/j.eng.2017.09.002.
- [6] Y. Xie, and G. Steven. A simple evolutionary procedure for structural optimization. *Computers & structures* 49, 885-896, 1993.
- [7] M. Zhou and G. Rozvany. The COC algorithm, Part II: Topological, geometrical and generalized shape optimization. *Comput Methods Appl Mech Engrg* 1991;89(1-3):309-36.
- [8] Y. Xie and G. Steven. Shape and lay out optimization via an evolutionary procedure. In: *International conference on computational engineering science*. 1992, p. 471.
- [9] R. Ansola, E. Veguería, J. Canales and J.A. Tárrago. A simple evolutionary topology optimization procedure for compliant mechanism design. *Finite Elem Anal Des* 2007;44(1 2):53-62.
- [10] A. Garaigordobil, R. Ansola, E. Veguería and I. Fernández. Overhang constraint for topology optimization of self-supported compliant mechanisms considering additive Manufacturing. *Computer-Aided Design* 109 (2019) 33-48 doi.org/10.1016/j.cad.2018.12.006.
- [11] D. Jankovics, H. Gohari, M. Tayefeh and A. Barari. Developing Topology Optimization with Additive Manufacturing Constraints in ANSYS. *IFAC PapersOnLine* 51-11 (2018) 1359-1364.
- [12] F. Silvia, R. Campilho, R. Gouveia, G. Pinto and A. Batista. A novel Approach to Optimize the Design of Parts for Additive Automation and Intelligent Manufacturing (FAIM 2018). Columbus; OH, USA. *Procedia Manufacturing* 17 (2018) 53-61.