

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA APLICADA A LA FABRICACIÓN ADITIVA
TOPOLOGICAL OPTIMIZATION APPLIED TO ADDITIVE MANUFACTURING

Est. Jorge Carlos Gutiérrez Romero¹ (0000-0003-2070-0154), Universidad de Matanzas,

jorgkrlo96@icloud.com

M.Sc. Ramón de Jesús López Suárez¹ (0000-0001-7178-2650), Universidad de Matanzas

Ing. Daniel Rivas Ramos² (0000-0002-1773-1569), Empresa Eléctrica Provincial de Matanzas

Dr.C. Marcelino Rivas Santana¹ (0000-0002-0305-515X), Universidad de Matanzas

Dr.C. Rosinei Batista Ribeiro³ (0000-0001-8225-7819), Centro Universitário Teresa D'Ávila (UNIFATEA)

(Brasil)

Resumen

La Optimización Topológica es una tendencia relativamente novedosa en la industria, con la popularización de la fabricación aditiva y otras técnicas de fabricación avanzada. Los avances de la computación han permitido el desarrollo de softwares que realizan estudios que permiten obtener las formas geométricas más eficientes para un diseño. Esta publicación pretende detallar las características, ventajas, así como la importancia de dicho recurso. De igual forma se realiza un caso práctico, donde se pone de manifiesto la esencia de esta optimización, produciendo una notable disminución en el tiempo y costes de fabricación, al necesitarse menor cantidad de materiales para su confección. Los resultados suponen un gran avance, gracias a la posibilidad de lograr elementos de la industria con formas complejas y eficaces a muy bajos costes.

Palabras claves: *optimización topológica, CAD, fabricación aditiva, impresión 3D.*

Abstract: Topological Optimization is a relatively new trend in the industry, with the popularization of additive manufacturing and other advanced manufacturing techniques. Advances in computing have allowed the development of software that performs studies that allow obtaining the most efficient geometric shapes for a design. This publication aims to detail the characteristics, advantages, as well as the importance of this resource. In the same way, a practical case is developed, where the essence of this optimization is revealed, producing a notable decrease in manufacturing time and costs, as fewer materials are needed for its preparation. The results represent a breakthrough, due to



Monografías 2021

Universidad de Matanzas © 2021

ISBN: 978 - 959 - 16 - 4681 - 1

the possibility of achieving elements of the industry with complex and efficient shapes at very low costs.

Keywords: *topological optimization, CAD, additive manufacturing, 3D printing.*

Una de las apuestas de la Ingeniería Inversa es la posibilidad de modificar para mejorar y optimizar los elementos estudiados. Una de estas mejoras convenientes en la fabricación es la optimización de la forma de las piezas, con el objetivo de hacerlas más ligeras y baratas, sin que esto comprometa su rigidez. Desde hace algún tiempo, y gracias al desarrollo de la computación, es posible realizar estudios de topología que aporten posibilidades de crear piezas mucho más eficientes e igual de resistentes, lo cual abre un campo increíble en los procesos de diseño y manufactura.

La optimización topológica (OT) es una herramienta que le permite al diseñador sintetizar topologías óptimas. En Ingeniería Mecánica se entiende como topología óptima a una pieza o parte mecánica diseñada especialmente para maximizar o minimizar alguna característica deseada. Por ejemplo, cuando se diseña un ala de avión se desea obtener el menor peso posible asegurando la rigidez y la resistencia adecuadas. El problema de la máxima rigidez es extremadamente importante para la ingeniería, pues permite reducir el peso final del elemento mecánico o estructural, y partes mecánicas de bajo peso implican menores costos por material y menor consumo de combustible en el caso de los vehículos de transporte. (Meza, 2012)

La OT es un campo de investigación de rápido crecimiento, donde intervienen distintas áreas como las matemáticas, la mecánica y las ciencias computacionales, y que cuenta con importantes aplicaciones prácticas en la industria y en el sector de manufactura. En la actualidad, la optimización topológica es usada en las industrias aeroespacial, automotriz, de obras civiles, medicina, entre otras. Además, tiene un papel muy importante en el campo de las micro y nanotecnologías, principalmente en el diseño de mecanismos flexibles.

La optimización de forma consiste en modificar la geometría del dominio preservando su topología, es decir, sin crear huecos o cavidades en su interior. Este tipo de análisis es usualmente conocido como Análisis de Sensibilidad al Cambio de Forma y sus bases matemáticas se encuentran bien

establecidas. El principal inconveniente del Análisis de Sensibilidad al Cambio de Forma es que solo permite cambios en la frontera del dominio, lo que limita su campo de aplicación.

Una manera más general de controlar un dominio es mediante modificaciones de su topología, lo que permite obtener la configuración deseada partiendo de una morfología inicial distante de la óptima. Los métodos de homogeneización son posiblemente los más utilizados para la optimización topológica. Estos consisten en caracterizar la topología a través de su densidad, es decir, los huecos se identifican con regiones de densidad nula. De esta forma la solución del programa resulta en una distribución ficticia de material, siendo necesario en muchos casos utilizar métodos de penalización o filtros para obtener un resultado de utilidad ingenieril. (Carretero Neches & Barroso Caro, 2007)

Un método alternativo de optimización topológica son los basados en Análisis de Sensibilidad Topológica o Derivada Topológica. Esta familia de métodos apunta a resolver las limitaciones de los métodos basados en técnicas homogeneización, y su idea principal es la evaluación de la sensibilidad de una dada función de costo ante la creación de una cavidad o hueco.

La figura 1 muestra un ejemplo de aplicación útil en la industria de esta tecnología mediante software, restando el 50 % de la masa a las secciones aplicadas sin comprometer la rigidez estructural de las mismas.

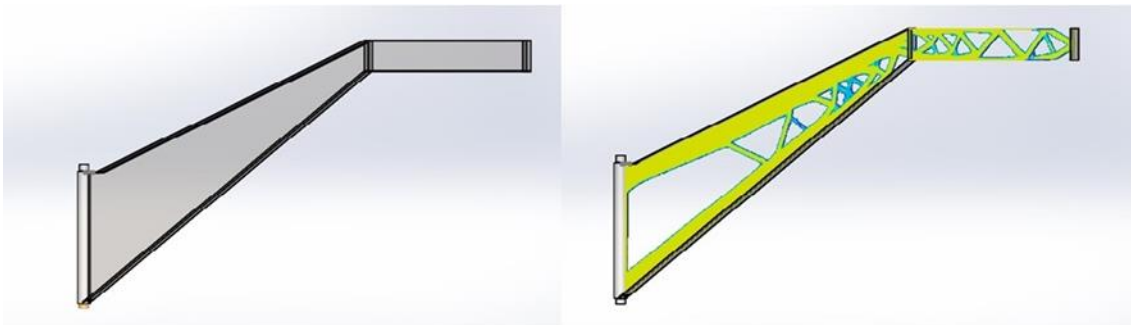


Figura 1. Propuesta de optimización topológica para la sección lateral de una grúa simple

La topología, la impresión 3D y otras soluciones emergentes están cambiando nuestras expectativas de diseño de productos. El uso del estudio de topología junto con Fabricación Aditiva permite a las empresas rediseñar una pieza existente para reducir el peso y mejorar el rendimiento (mejor relación resistencia-peso) de las piezas, así como reducir el número de piezas combinando muchas partes conectadas en una sola parte. (Ruiz, 2017)

La optimización topológica en la impresión 3D

La fabricación aditiva, a diferencia de las técnicas de mecanizado tradicionales, permite producir piezas con geometrías complejas. El peso total de las mismas se puede optimizar mediante un método digital denominado «optimización topológica». Esto también maximiza la resistencia mecánica de la pieza creada. La optimización topológica es, de hecho, un subcampo del diseño digital que permite encontrar, gracias a fórmulas matemáticas, la distribución óptima de material en un volumen determinado sometido a tensiones mecánicas más o menos significativas. Por tanto, consiste en utilizar un software concreto para «eliminar» el material que no posee los soportes. (Contreras Howard, 2020)

Los procesos tradicionales de diseño digital conllevan aplicar cargas a una pieza ya fabricada y evaluar dónde se está debilitando. Luego, los ingenieros deben repensar el diseño hasta que la pieza cumpla con las restricciones mecánicas dadas. Con la optimización topológica, el sentido es diferente: las cargas mecánicas son los datos de entrada que permitirán al software proponer una nueva geometría de la pieza. Así, en principio hay menos iteraciones, lo que reduce considerablemente los tiempos de diseño y fabricación.

Optimización Topológica mediante software

No todos los softwares CAD ofrecen esta función de optimización topológica. Aunque no se utiliza necesariamente en el proceso de modelado y fabricación, puede ser mejor optar por un programa que la incluya, para asegurarse de diseñar una pieza óptima. Es por ello que algunas empresas han decidido desarrollar un software dedicado a este proceso. Hay muchos programas de CAD que integran funciones para optimizar las piezas, como SolidWorks.

SolidWorks Simulation 2018 presenta un nuevo tipo de estudio, el estudio de Topología, que permite a los diseñadores e ingenieros desarrollar componentes innovadores de masa mínima. En función de las cargas y restricciones estáticas lineales, el estudio de topología "eliminará" elementos de la malla de elementos finitos hasta alcanzar la masa objetivo o la mejor relación entre la rigidez y el peso. Este proceso iterativo de eliminación de elementos está limitado por las restricciones del estudio, como la deflexión máxima permitida y los controles de fabricación. (Ruiz, 2017)

Caso de estudio

Analicemos este estudio considerando un ejemplo simple. El modelo, que se muestra a continuación, es un soporte muy sencillo para elementos de óptica de un vehículo autónomo (figura 2); y la tarea es refinar el diseño para reducir su masa, manteniendo su rigidez y minimizar así la cantidad de material y el tiempo de fabricación del mismo.



Figura 2. Modelo base para la optimización topológica.

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, (tabla 1) y el software utilizado fue el Ultimaker 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 Solidworks Premium 2018. (Rivas Ramos et al., 2021)

Tabla 1. Parámetros de impresión

Parámetro	Valor	Parámetro	Valor
-----------	-------	-----------	-------

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 3. 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.

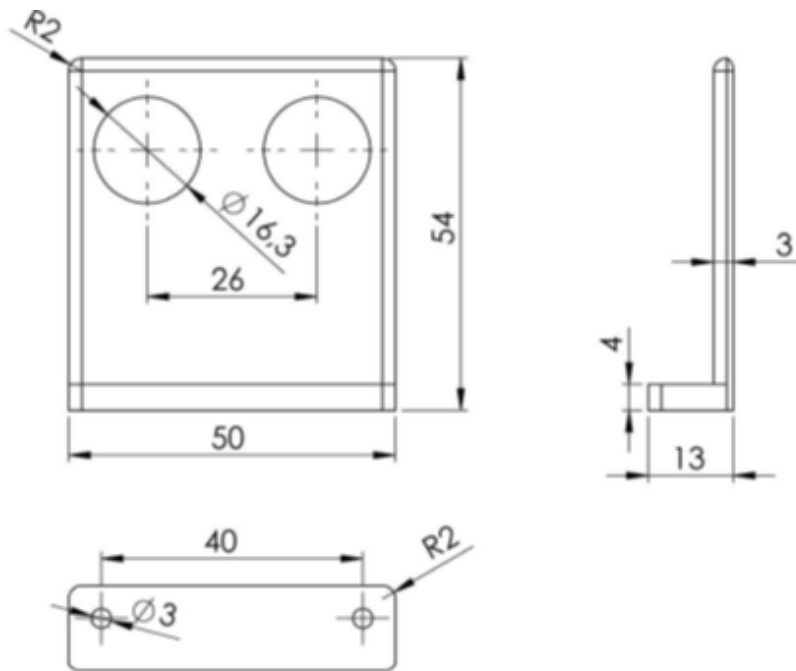


Figura 3. Croquis del soporte

Realización del Estudio de Topología.

Los ensayos realizados de las propiedades mecánicas a probetas hechas del material utilizado mostraron los siguientes resultados (tabla 2).

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

Límite de rotura (M Pa)	Límite elástico (M Pa)	Módulo de elasticidad (M Pa)	Coefficiente de Poisson	Densidad (g/cm m ³)
18	15	1293	0,3	1,25

La optimización topológica comienza con la creación de un modelo 3D en la fase de borrador, en el que se aplicaran las diferentes cargas o fuerzas para la pieza. Después, el software se encarga de calcular todas las tensiones aplicadas.

Es una buena práctica realizar un estudio estático antes de ejecutar un estudio de topología para asegurarse de que las cargas aplicadas no den como resultado una solución que viole los supuestos lineales estáticos de pequeñas deformaciones y tensiones que están por debajo del límite elástico de los componentes (figuras 4 y 5).

Crear un estudio de topología no es diferente de un estudio estático; los materiales, cargas y restricciones son iguales. Lo que es diferente son dos nuevas entradas: Objetivos, Restricciones y Controles de Fabricación (figura 6).

El objetivo del estudio de topología puede ser minimizar la masa o el desplazamiento de su pieza o maximizar su rigidez (la mejor relación rigidez / peso). Es una buena práctica comenzar con la mejor opción de Relación rigidez / peso (Maximizar la rigidez). En un caso en el que tendrá un desplazamiento máximo del componente que no desea exceder durante el estudio de topología, usa el objetivo para minimizar el desplazamiento máximo o también minimizar la masa con una opción de restricción de desplazamiento. Es notable que los tres objetivos siempre minimizan la masa. El efecto de alterar la reducción de peso objetivo se muestra en la figura 7.

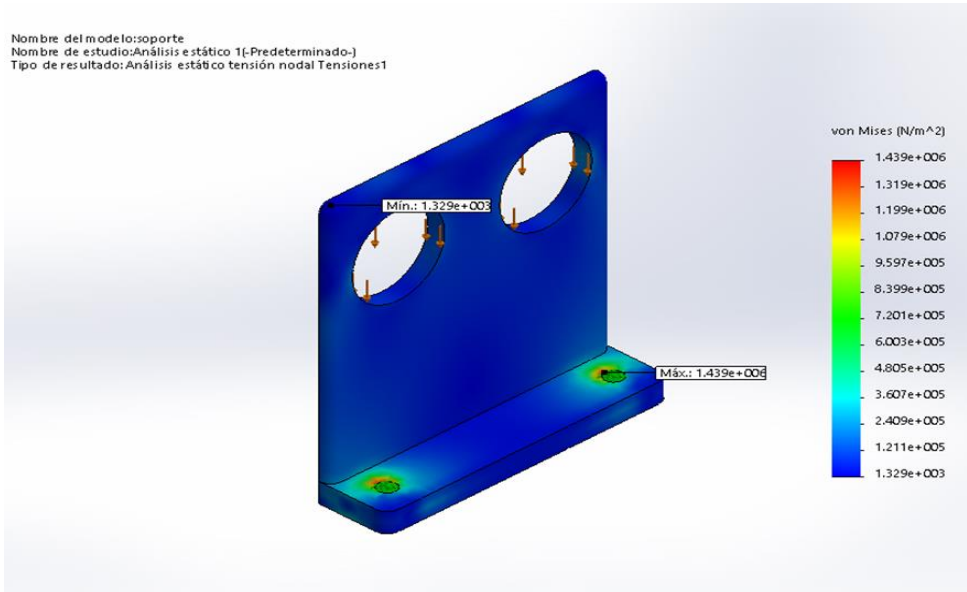


Figura 4. Tensiones equivalentes de Von Mises en el modelo original

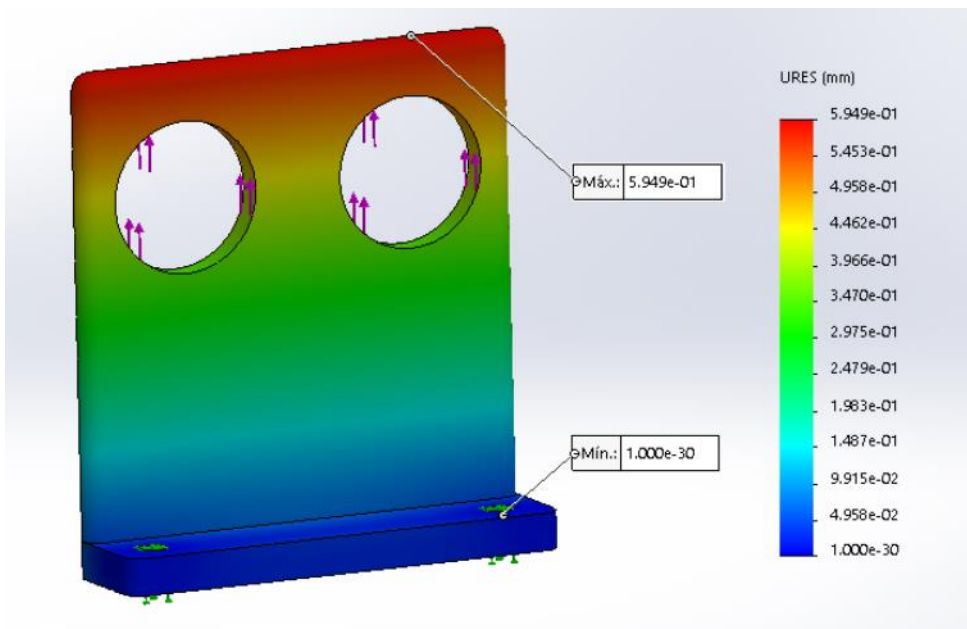


Figura 5. Desplazamientos unitarios en el modelo original

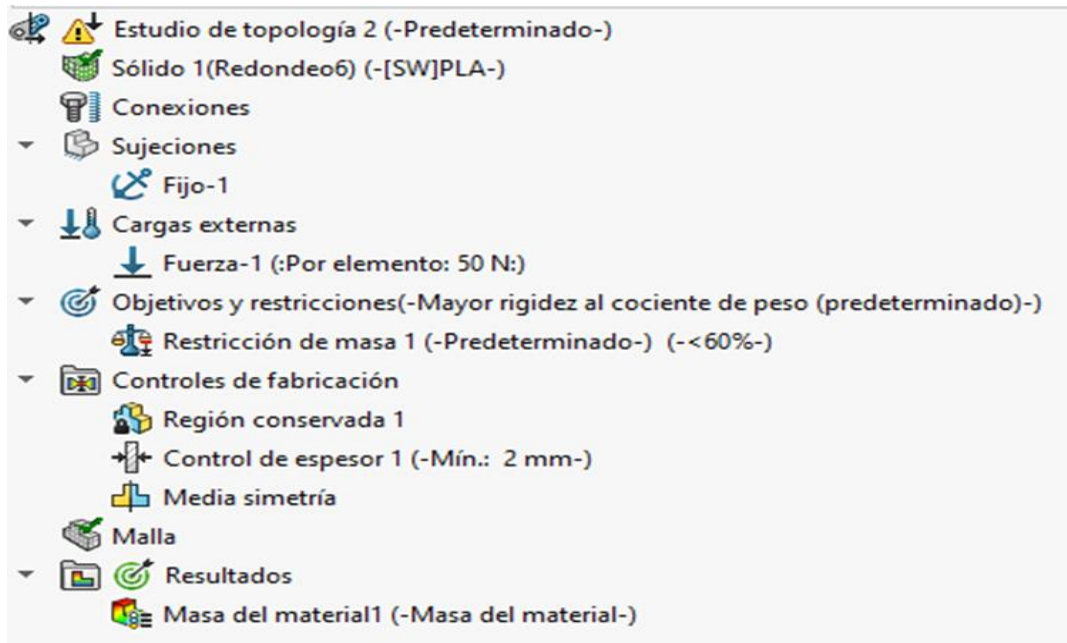


Figura 6. Aspectos y Variables del Estudio de Topología en SolidWorks (Ruiz, 2017)

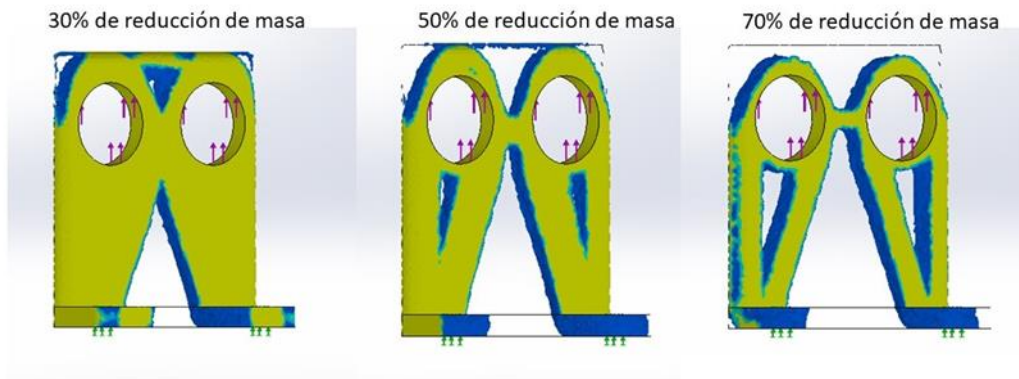


Figura 7. Reducción de la masa para diferentes grados de optimización

El último paso en la configuración del estudio es agregar cualquier control de fabricación. Este es un paso opcional y no es necesario para que se ejecute el estudio, pero te permite tener control sobre la forma resultante y también considerar los métodos de fabricación posteriores. Los controles de fabricación son muy rígidos, y te permiten excluir áreas del modelo del proceso de topología, Control de espesor, para establecer grosores mínimos de características, así como Simetría de modelo y definición de una Dirección de extracción de molde.

Resultará bastante conveniente establecer parámetros de mallado, cuya calidad pudieran afectar los resultados de este estudio. Las mallas de triangulación se aproximan a una geometría suavizada de la superficie, aunque nunca exacta. Esa exactitud mejora siempre que los triángulos sean más pequeños, aunque mientras menores sean, mayor será su cantidad para cubrir dicha superficie. Esto implica que el archivo necesite almacenar un mayor número de vértices y vectores normales, así que mejores aproximaciones significan incrementar el tamaño del archivo, requiriendo más potencia de hardware en su procesamiento. (Chakravorty, 2019) Una malla basada en curvatura permitirá aproximarse con mayor exactitud a las geometrías curvas del modelo, al utilizar el método de representación NURBS (Non uniform rational B-Spline).

Los resultados del mallado se muestran en la tabla 3 y figura 8.

Tabla 3. Información de la malla

Tipo de Malla	Malla sólida	Trazado de calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Malla utilizada	Malla basada en curvatura	Número total de elementos	12728
Tamaño mínimo del elemento	0,682536	Tamaño máximo del elemento	2,04763
Número total de nodos	21747	Puntos jacobianos	4

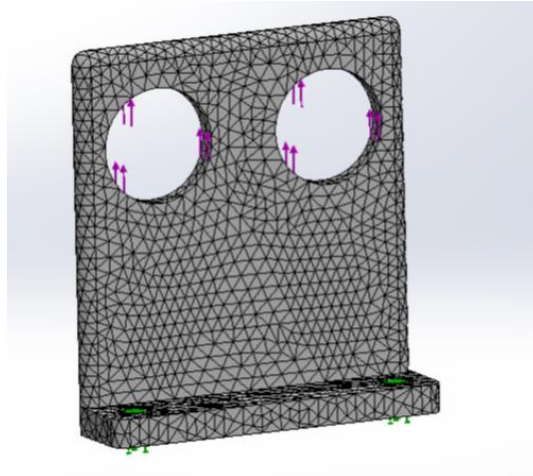


Figura 8. Resultados del mallado realizado

En este nivel, se puede realizar un corte de la pieza con el fin de retirar las partes no sometidas a las fuerzas. La geometría final, que cumple con los requisitos mecánicos y de diseño, se puede obtener finalmente después de alisar la pieza. De esta forma, la optimización topológica responde a la necesidad de reducción de masa además del aumento de la resistencia mecánica de la pieza.

Resultados del estudio

Los resultados del Estudio de Topología del modelo en SolidWorks permiten obtener una pieza con una reducción del 60 % de la masa sin comprometer la rigidez y resistencia de la misma. Esto se demuestra gráficamente en las figuras 9 y 10.

A partir del software Ultimaker 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.

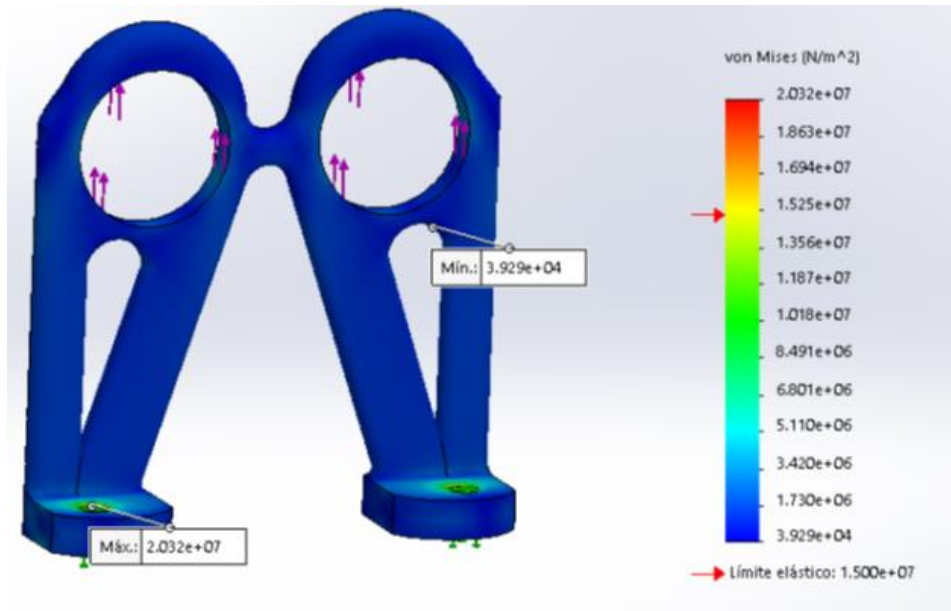


Figura 9. Tensiones equivalentes de von Mises en el diseño optimizado

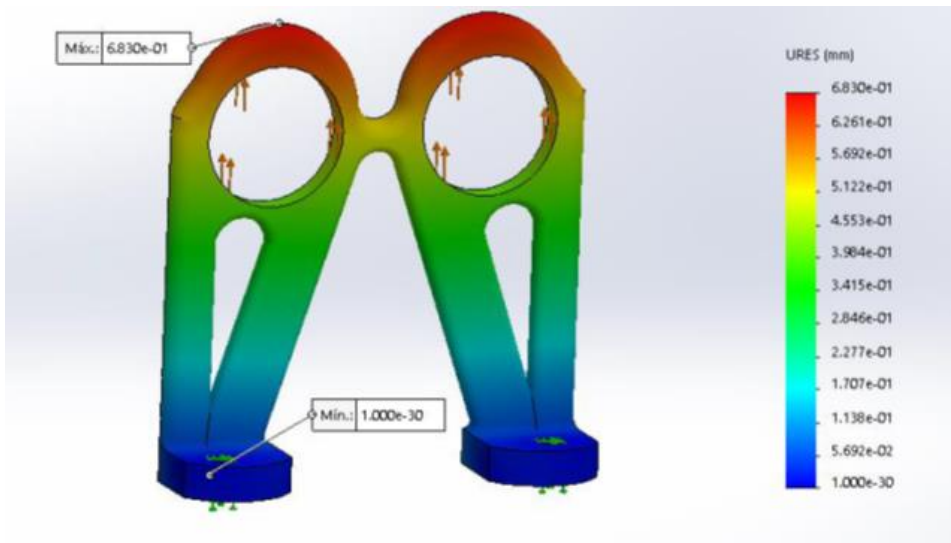


Figura 10. Desplazamientos en el diseño optimizado

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

Variante	Tiempo de impresión [h]	Gasto de energía [kW-h]
Soporte inicial	1,88	0,42
Soporte con reducción del 60 % de la masa	1,3	0,29
% de reducción	31 %	

La optimización topológica realizada muestra que es posible realizar una reducción notable de masa manteniendo la resistencia de la pieza, con herramientas gráficas que permiten mantener factores de seguridad conveniente. Los resultados demuestran las ventajas de usar estos métodos en los procesos de impresión 3D u algún otro tipo de fabricación con herramientas de control numérico, pues se logran geometrías que son muy complejas para métodos convencionales, pero mucho más ligeras y resistentes. Se puede observar que como consecuencia de la reducción de la masa se logra una reducción del tiempo de impresión, obviamente de la cantidad de materiales, y del consumo de energía, lo que implica una reducción de los costos de fabricación de la pieza.

Referencias bibliográficas

- Carretero Neches, L., & Barroso Caro, A. (2007). *Optimización topológica de problemas elásticos planos utilizando el método de los elementos de contorno*. Universidad de Sevilla. Escuela Técnica Superior de Ingenieros.
- Chakravorty, D. (2019). The Most Common 3D File Formats. *ALL3DP The World's #1 3D Printing Magazine for Beginners and Professionals*. <https://m.all3dp.com/3d-file-format-3d-files-3d-printer-3d-cad-3d-stl-obj/> 9/
- Contreras Howard, L. (2020). La optimización topológica en la impresión 3D. *3D natives. El sitio web de la impresión 3D*. <https://www.3dnatives.com/es/optimizacion-topologica-10012017/>
- Meza, C. A. (2012). *Optimización Topológica en el diseño de elementos estructurales mecánicos*.

Universidad Autónoma de Occidente.

Rivas Ramos, D., Rivas Santana, M., Batista Ribeiro, R., & Gutierrez Romero, J. C. (2021).

OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE UN SOPORTE PARA IMPRESIÓN 3D. X *Convención Científica Internacional de la Universidad de Matanzas, CIUM '2021 VII Taller Internacional de Ingenierías.*

Ruiz, P. (2017). *SolidWorks Simulation 2018: Estudio de Topología.*

<https://intelligy.com/blog/2017/10/20/solidworks-simulation-2018-estudio-de-topologia/>