

DOI: <https://doi.org/10.70747/cr.v5i1.752>

Ingeniería Inversa y Optimización Topológica de un Brazo Robótico

Mario Ibáñez Olvera

<https://orcid.org/0000-0003-2828-5389>

mario_mecatronica@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México - México

Diana Isela Rivera Ramos

<https://orcid.org/0009-0003-9572-5505>

diana_industrial@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México - México

Bethsabet Jaramillo Sierra

<https://orcid.org/0000-0003-2232-4199>

bethsabet.jaramillo@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México - México

Iván Lenin Cruz Jaramillo

<https://orcid.org/0000-0002-7832-1686>

ivan_cj@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México - México

Omar González Brito

<https://orcid.org/0000-0001-6536-0240>

omar_g@test.edu.mx

Tecnológico de Estudios Superiores de Tianguistenco
Estado de México - México

RESUMEN

La ingeniería inversa es una técnica que consiste en el análisis detallado de un producto, sistema existente con el propósito de comprender su funcionamiento, estructura, materiales y principios de diseño, sin disponer necesariamente de su documentación original. A partir de este proceso, es posible reconstruir modelos conceptuales, geométricos que permitan mejorar, optimizar, reproducir o adaptar el objeto de estudio a nuevas aplicaciones. En la ingeniería, la ingeniería inversa se utiliza principalmente para el rediseño de piezas mecánicas, el análisis de sistemas electrónicos, el desarrollo de software, la optimización de procesos industriales y la validación de diseños mediante simulaciones numéricas. Este proyecto se hizo uso de la ingeniería inversa, con el objetivo de optimizar una pieza del robot, sin perder su funcionalidad. Para esto se utilizó un escáner para obtener la geometría del soporte de un brazo robótico, con el fin de optimizar topológicamente, y disminuir el material en la manufactura aditiva (impresión 3D), del soporte del brazo robótico. Con la geometría obtenida por el escáner, se desarrollaron las simulaciones mecánicas estructurales, para verificar el comportamiento de la pieza en un estado normal de uso dentro del brazo robótico considerando soportes, fuerzas, fijaciones de la pieza. Por último, se aplicó la técnica optimización topológica en el brazo robótico, para tratar de disminuir la mayor cantidad de material de fabricación de la pieza, sin que afecte el funcionamiento para el que fue diseñado; se valida nuevamente con simulación numérica la pieza optimizada para corroborar su correcto funcionamiento, y realizar la manufactura aditiva de la pieza definitiva. Se obtuvo como resultado la optimización topológica de la pieza, donde se demuestra un ahorro de material. Con estos resultados desarrollamos como aporta la técnica para optimizar piezas en un brazo robótico, sin afectar el correcto funcionamiento

Palabras clave: *ingeniería inversa, optimización topológica, impresión 3d, simulación numérica*

Los autores declaran no tener conflicto de intereses.

El Editor y los Revisores declararon no tener conflicto de intereses.

Licencia: 

Reverse Engineering and Topological Optimization of a Robotic Arm

ABSTRACT

Reverse engineering is a technique that involves the detailed analysis of an existing product or system with the aim of understanding its operation, structure, materials, and design principles, without necessarily having access to its original documentation. Based on this process, it is possible to reconstruct conceptual and geometric models that allow for the improvement, optimization, reproduction, or adaptation of the object of study to new applications. In engineering, reverse engineering is mainly used for the redesign of mechanical parts, the analysis of electronic systems, software development, the optimization of industrial processes, and the validation of designs through numerical simulations. This project made use of reverse engineering with the aim of optimizing a robot part without losing its functionality. To do this, a scanner was used to obtain the geometry of a robotic arm support in order to optimize it topologically and reduce the material used in additive manufacturing (3D printing) of the robotic arm support. With the geometry obtained by the scanner, structural mechanical simulations were developed to verify the behavior of the part in a normal state of use within the robotic arm, considering supports, forces, and fixings of the part. Finally, the topological optimization technique was applied to the robotic arm to try to reduce the amount of material used in the manufacture of the part without that affects the function for which it was designed; the optimized part is validated again with numerical simulation to verify its correct functioning, and the final part is manufactured using additive manufacturing. The result was the topological optimization of the part, demonstrating a saving in material. With these results, we developed how the technique contributes to optimizing parts in a robotic arm without affecting its correct functioning

Keywords: *reverse engineering, topological optimization, 3D printing, numerical simulation*

The authors declare no conflict of interest.

The Editor and the Reviewers declared no conflict of interest.

License: 



INTRODUCCIÓN

La optimización topológica se ha vuelto una herramienta clave en el diseño moderno de robots debido a las crecientes exigencias de eficiencia, ligereza, precisión y sostenibilidad. Al reducir el peso en un robot sin perder resistencia, genera la disminución de costos, y aumenta la velocidad y aceleración en los procesos de manufactura, otra variable importante es la reducción del costo en el desgaste de piezas utilizadas en el robot, por eso de mucha importancia integrar estas herramientas en el diseño y desarrollo de robots.

La aplicación de la ingeniería inversa consiste en el análisis detallado de un producto, sistema o componente existente con el propósito de comprender su funcionamiento, estructura y diseño, permitiendo su mejora, optimización o reproducción. Esta metodología es ampliamente utilizada en el desarrollo tecnológico, la innovación y la investigación en ingeniería. En este trabajo se aplicó la ingeniería inversa para la adquisición de la geometría del elemento que se le va a aplicar la optimización topológica.

El diseño de un brazo robótico involucra múltiples factores que afectan su desempeño, como la capacidad de carga, la flexibilidad operativa y la durabilidad en condiciones exigentes. La ingeniería inversa permite analizar y replicar estructuras existentes para comprender su comportamiento y adaptarlas a nuevas aplicaciones. Por otro lado, la optimización topológica, una técnica de diseño computacional avanzada, se centra en redistribuir el material dentro de una estructura para maximizar su rendimiento estructural, manteniendo la eficiencia y reduciendo costos.

La ingeniería inversa es una técnica empleada en el diseño y fabricación de productos y dispositivos, especialmente cuando estos presentan superficies complejas o de formas libres. Como su nombre lo sugiere, este enfoque representa el proceso opuesto a los métodos tradicionales de diseño. (Rodríguez, 2011).

La digitalización 3D es el proceso de capturar la información geométrica de un objeto físico utilizando herramientas tecnológicas avanzadas para la adquisición masiva de datos. Entre estos dispositivos se incluyen escáneres láser, digitalizadores ópticos, brazos de contacto, palpadores, mesas de medición de coordenadas y tomógrafos axiales computarizados. (Basco et al., 2018)

La reconstrucción del modelo consiste en transformar la malla de triángulos en superficies NURBS, que pueden ser utilizadas en sistemas CAD/CAM/CAE. El resultado de esta fase es un modelo CAD integrado con superficies NURBS, permitiendo su uso en aplicaciones de diseño, manufactura y análisis de ingeniería.

Las superficies NURBS (Non-Uniform Rational B-Splines) son un tipo de representación matemática utilizada en modelado 3D y diseño asistido por computadora (CAD) para describir curvas y superficies con gran precisión y flexibilidad. Se basan en splines racionales y ofrecen ventajas sobre otros métodos de modelado, como los polígonos o las mallas, permitiendo formas suaves y complejas con menor cantidad de datos. (Mora, 2024)

Se realizaron simulaciones en el área de mecánica estructural con el objetivo de validar el correcto funcionamiento de la pieza mecánica, analizando su comportamiento ante diferentes condiciones de carga y esfuerzos, así como su resistencia y seguridad estructural, se utilizó un software que utiliza el Método de los Elementos Finitos (MEF), para la solución del problema. El MEF es una técnica numérica utilizada para resolver ecuaciones mediante la aproximación de variables de campo continuas, representándolas como un conjunto de valores en puntos discretos llamados nodos. En el caso específico de los problemas estructurales, que serán el enfoque de este curso, las ecuaciones en cuestión son las de equilibrio, mientras que las variables de campo corresponden a las cargas y los desplazamientos en los nodos. (Thomas, 2020)

La técnica de optimización topológica se utiliza para la disminución de material sin afectar el correcto funcionamiento del diseño, permitiendo obtener estructuras más eficientes, ligeras y con un desempeño mecánico adecuado. Se utiliza la optimización topológica para la reducción de material en el brazo, para poder ahorrar materia prima en la manufactura aditiva de la pieza del brazo robótico. (Carrillo-Pereyra et al., 2019)

La fabricación aditiva o manufactura aditiva, más conocida como impresión 3D, es un método de producción que permite crear objetos físicos a partir de un diseño digital. Aunque existen diversas tecnologías y materiales de impresión, todas siguen el mismo principio fundamental: transformar un modelo digital en un objeto tridimensional mediante la adición progresiva de material capa por capa. (3D Hubs)

MATERIALES Y MÉTODOS

En este apartado se espera que los autores desarrollen una descripción de la metodología utilizada: Por ejemplo, dando a conocer el enfoque, el tipo de investigación, el diseño utilizado, etc. En caso de artículos que incluyen algún tipo de estudio empírico de campo se debe indicar la población de estudio, la muestra y el muestreo o los informantes con las técnicas mediante las cuales fueron seleccionados, en caso de investigaciones cualitativas. En estos casos también se deben mencionar las técnicas e instrumentos de recolección de datos.

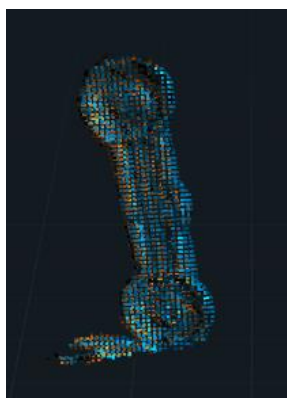
Escaneo y obtención del CAD

El modelo de robot del cual se extrajo la pieza a optimizar es el STEREN K-680 en este caso la parte correspondiente al eslabón, con ayuda del software Crality Scan se escaneó el elemento y se obtuvo su nube de puntos (véase Figura 1). Una vez escaneada la pieza se procedió a corregir su geometría.

A continuación, se enlistan las características del scanner utilizado, al igual que el tipo de filamento utilizado en la impresión, así como los softwares utilizados en este proyecto.

1. Se utilizó un escáner marca Creality modelo Cr-scan Ferret, con precisión de 0.1 mm.
2. El software utilizado para el escáner fue el Creality Scan 3.3.4.
3. El software para el modelado fue SpaceClaim 2024.
4. El software para desarrollar el proceso de optimización topológica fue Ansys Discovery 2024.
5. El software para el control de la impresora se utilizó Creality print 6, y la impresora utiliza fue Ender 3 V3 SE.
6. El PLA utilizado en la impresora fue un PLA de la marca Anmark 3D, de diametro 1.75 mm, la temperatura mínima de extrusión y temperatura máxima de extrusión 190 °C - 225 °C, y por último la temperatura mínima de cama caliente y la temperatura máxima de cama caliente 40 °C - 60 °C.

Figura 1. Escaneo de la pieza



Fuente: Autoría propia

Para el escaneo se desarrollo en una distancia de 600 mm, con 30 fotografías por segundo.

Corrección y modelado del CAD

Una vez exportado el CAD, se debe quitar el material innecesario o que no corresponde a la pieza, en este caso es Con ayuda de la herramienta “facetas” que nos ofrece SpaceClaim se comenzara a trabajar en la pieza (véase figura 2). Las herramientas utilizadas en facetas que se usaron en este proyecto fueron:

1. Selección de faceta. Herramienta que nos permite seleccionar elemento de faceta o todo

el CAD completo.

2. Corrección de faceta. Con esta herramienta se corrige los posibles errores que pudiera tener el CAD, en una forma automática.

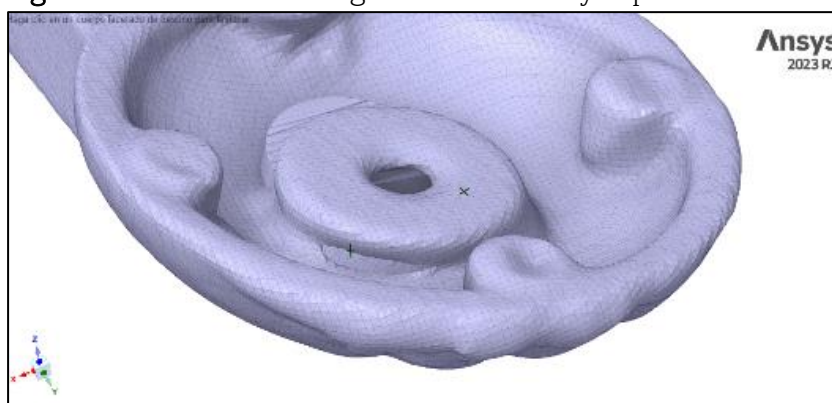
3. Borrado de faceta. Herramienta con la que se eliminó facetas no deseadas durante el escaneo.

4. Suave. Herramienta que permite mejorar el CAD, aumentando el número de facetas en el CAD, haciendo más preciso el CDA.

5. Comprobar facetas. Herramienta para comprobar que no existan intersecciones, o errores en el CAD.

6. Conversión faceta a sólido. Convierte el CAD en facetas. En un CAD sólido.

Figura 2. Corrección de la geometría en Ansys SpaceClaim



Fuente: Autoría propia

Preparación e impresión de la pieza

Una vez exportada la pieza, con ayuda del software Creality Print se manda a imprimir la pieza con material PLA con una densidad de relleno del 20% y soportes de árbol con una densidad del 30% dejando ver una vista previa de los recursos y tiempo que utilizara para la impresión (véase figura 3), posteriormente se exporta el G-code listo para imprimir la pieza.

A continuación, se enlistan algunos parámetros de la impresora utilizados para esta impresión.

1. La altura de 0.2 mm

2. La altura de la segunda 0.2 mm.
3. Boquilla de impresión 0.4 mm.
4. Las condiciones ambientales de impresión, fueron las normales de entre 20°C y 25°C.

Figura 3. Vista previa de los parámetros de impresión final

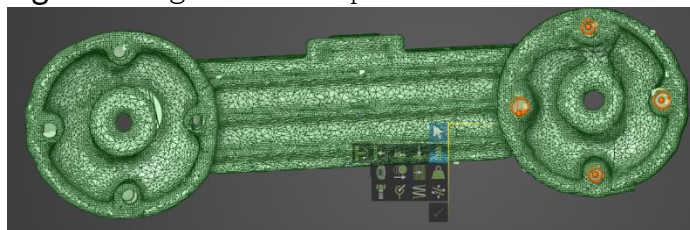
■ Perímetro interno	13m12s	11.6%	1.27 m	3.79 g	✓
■ Perímetro externo	18m27s	16.3%	1.23 m	3.65 g	✓
■ Perímetro de voladizo	1m10s	1.0%	0.02 m	0.06 g	✓
■ Relleno poco denso	22m10s	19.6%	1.76 m	5.24 g	✓
■ Relleno sólido interno	11m11s	9.9%	0.82 m	2.45 g	✓
■ Relleno sólido superior	43s	0.6%	0.05 m	0.15 g	✓
■ Puente	2m12s	2.0%	0.05 m	0.15 g	✓
■ Puente Interior	55s	0.8%	0.05 m	0.16 g	✓
■ Soportes	18m14s	16.1%	0.87 m	2.61 g	✓
■ Interfaz de soporte	38s	0.6%	0.03 m	0.10 g	✓
■ Personalizado	17s	0.3%	0.03 m	0.09 g	✓
■ Desplazamientos	24m11s	21.3%			✓
■ Retracciones					✓
■ Des-retracción					✓
■ Purgas					✓
■ Costuras					✓
Estimación total					
Filamento total:	6.19 m		18.45 g		
Modelo Filamento:	5.28 m		15.74 g		
Coste:	0.37				
Tiempo estimado:	12s				
Tiempo de impresión del modelo:	1h53m				
Tiempo total:	1h53m				

Fuente: Autoría propia

Simulación Numérica

Una vez exportada la geometría al software Ansys Discovery, es importante convertir el cuerpo facetado en un sólido, ya que trabajar con facetas no es posible, ya que las facetas no son un sólido, por lo que es necesario convertir en sólido. Las condiciones de frontera son las restricciones que se colocaron en la pieza, y se asignaron 6 soportes en los huecos de la pieza (véase figura 4), se caracterizó el CAD colocando en el software PLA. (Savas, 2012) Se aplicó una fuerza de 0.5; Esta fuerza fue colocada por experiencia previa medida experimental, en piezas con las características similares. La malla cuenta con 150,000 Tetraedros, para este experimento. La forma de los elementos de la malla (tetraedros), fue utilizada por el tipo de geometría utilizada en este proyecto, que sin duda es una geometría compleja.

Figura 4. Asignación de soportes



Fuente: Autoría propia

Optimización topológica

Una vez realizada la simulación del estudio de mecánica estructural de la pieza, y con ayuda de la opción de optimización topológica que brinda el software comienza este proceso, donde la intención prioritaria es disminuir el material de fabricación, las restricciones las proporciona el software conforme a la validación de la simulación. El método utilizado o técnica de optimización topológica que utiliza Ansys Discovery, es el método basado en conjuntos de niveles. (Zienkiewicz-Taylor, 2014) Por defecto, el programa optimiza los cuerpos a un 60% de la geometría original, sin embargo, en este caso se optó por una optimización del 30% y 20% con respecto a la geometría original mientras que la profundidad mínima se establece por defecto. Una vez establecidos estos parámetros el software realizará la optimización, cuando la optimización esté terminada se deberá agregar el modelo optimizado al árbol del modelo.

Impresión del elemento optimizado.

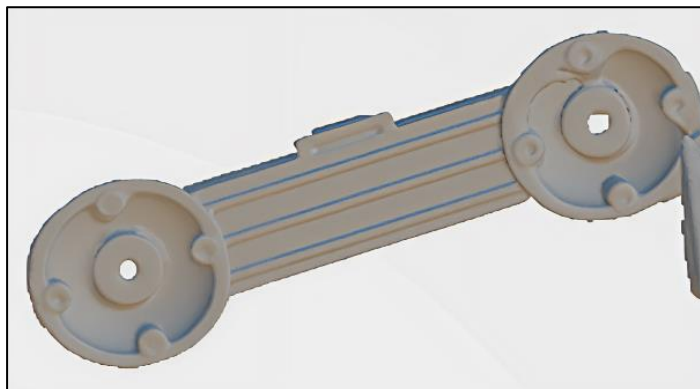
Una vez exportada la pieza en formato STL, se configura la impresión de la pieza con los mismos parámetros de la impresión de la pieza con la geometría corregida. Se utiliza una temperatura de cama caliente de 80 centígrados y para el extrusor 235 grados centígrados. La impresión del elemento optimizado, fue obtenido de la simulación realizada en Ansys Discovery, mismo que se tiene certeza del resultado por la validez que nos proporciona Ansys en sus simulaciones, ya que Ansys ya tiene experimentado y corroborado la metodología que utiliza en la optimización topológica, por lo que en este trabajo no se realiza la validación física del producto. (Bends-Sigmond, 2014)

RESULTADOS

Una vez terminado el escaneo de la pieza y habiendo optimizado la nube de puntos generada, se exporta el archivo en formato STL para poder trabajar con la geometría en Ansys

SpaceClaim (véase figura 5).

Figura 5. Modelos STL de la pieza con la geometría escaneada

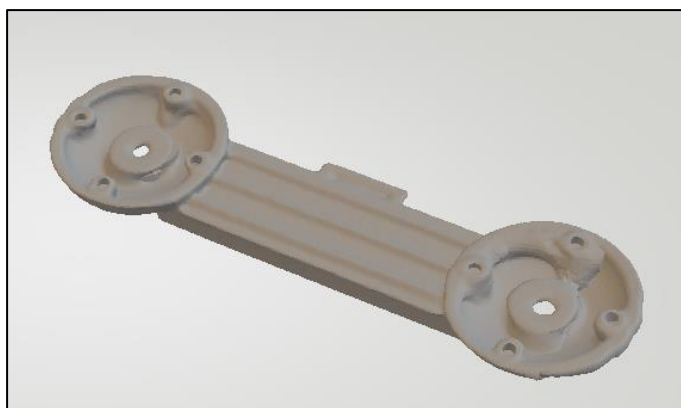


Fuente: Autoría propia

Resultados de la corrección y modelado del CAD

Después de realizar todo el proceso de eliminación de malla sobrante y corrección del CAD, la corrección de la malla ha sido satisfactoria, si bien es cierto que hay detalles en la geometría que no se encuentran en la geometría original, sus características importantes para el correcto funcionamiento del brazo robótico están ahí (véase figura 6).

Figura 6. Pieza con la geometría corregida exportada en formato STL



Fuente: Autoría propia

Resultados de la impresión del modelo con la geometría corregida

Se muestran las comparaciones de ambas piezas tanto en su vista inferior como superior respectivamente, la pieza del lado derecho (pieza color negro) se encuentra la pieza con la geometría corregida y del lado izquierdo (pieza color blanco) la pieza original, pudiendo visualizar que la geometría coincide entre ambos elementos (véase Figura 7).

Figura 7. Comparación de ambos elementos



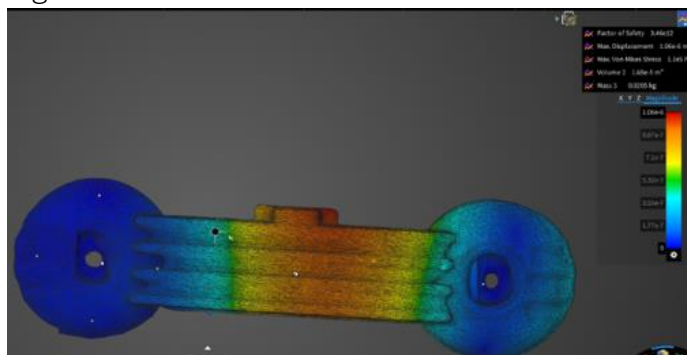
Fuente: Autoría propia

Para terminar con esta sección se compararon los pesos de ambas piezas, el peso del eslabón original, siendo este 13 g mientras que el peso del eslabón con la geometría corregida terminó siendo de 13 g, comprobando así que ambas piezas coinciden en su geometría y el peso.

Resultados de simulación numérica, validación de la pieza optimizada

En este apartado simplemente muestra la simulación de mecánica estructural para la pieza cuando se ejerce una fuerza de 0.5 N en la zona central de la pieza, la gráfica del desplazamiento máximo generado por la carga aplicada en la pieza el cual es de $3.15 \times 10^{-6}m$ lo cual es un desplazamiento mínimo en la realidad (véase figura 8).

Figura 8. Resultado del análisis de mecánica estructural



Fuente: Autoría propia

Se muestran los parámetros del factor de seguridad el cual es de 3.46×10^{12} , un desplazamiento máximo de $1.06 \times 10^{-6}m$, el estrés máximo de Von Mises de $1.1 \times 10^5 Pa$, un volumen inicial de $1.65 \times 10^{-5}m^3$ una masa inicial de 0.0205g, la cual con respecto a la realidad es diferente, estos datos son importantes para la comparación con la pieza

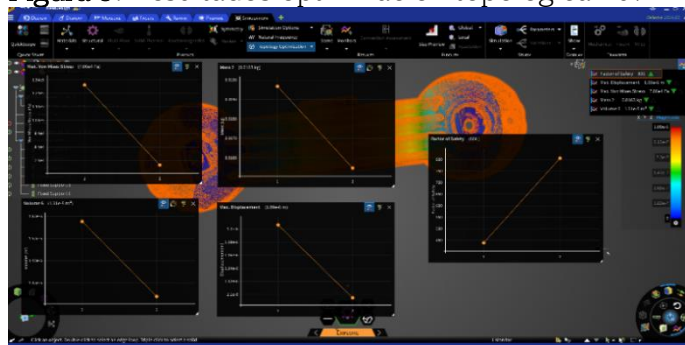
optimizada, ya que al haber un cambio en la geometría habrá variaciones en estas características. Los factores de seguridad son altos debido a que la fuerza que se utilizó en la pieza no es grande, por lo que los resultados de factor de seguridad son correctos.

Resultados de la optimización topológica 20% para la pieza del brazo

Gracias a la optimización de la geometría algunas de las propiedades físicas sufrieron variaciones respecto al modelo original, entre los resultados generados por la optimización se muestra en la gráfica del desplazamiento máximo de la pieza optimizada al 20% la cual es de $1.09 \times 10^{-6} m$ la cual señala un decremento con respecto modelo original. Se tiene el factor de seguridad el cual se muestra en la figura 9, en ella se muestra una gráfica en la que se puede visualizar el aumento de dicho factor de 450 a 800 con la optimización de la geometría al 20% respecto a la pieza original. Se muestra una gráfica que representa la variación del desplazamiento máximo en la pieza optimizada con respecto al modelo original pasando de $1.2 \times 10^{-6} m$ a $1.1 \times 10^{-6} m$. se muestra el estrés máximo de Von Mises el cual disminuyo con respecto al modelo original, bajando de $1.34 \times 10^5 Pa$ a $7.6 \times 10^4 Pa$.

Se muestra la variación entre la masa con respecto a la pieza original, pasando de 20.05 g a 16.8 g, observando así que hubo un decremento de aproximadamente 4 gramos. Finalmente, en la figura 9 se muestra la diferencia de volumen con respecto a la figura original, pasando de $1.65 \times 10^{-5} m$ a $1.31 \times 10^{-5} m$. (Véase figura 9).

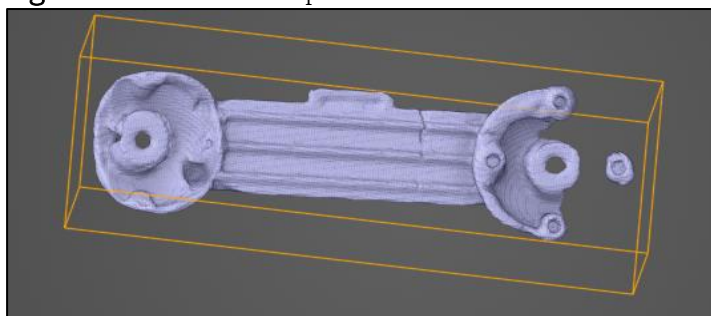
Figura 9. Resultados optimización topológica 20%



Fuente: Autoría propia

Posteriormente se encuentra el resultado de la geometría optimizada y lista para su impresión.
(Véase figura 10)

Figura 10. Geometría optimizada al 20%



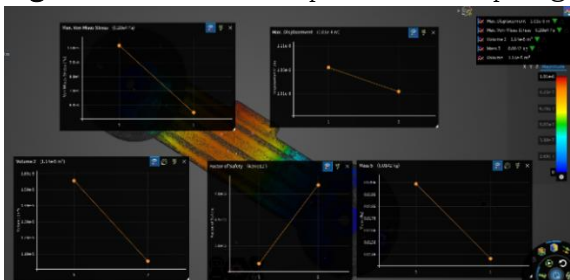
Fuente: Autoría propia

Resultados de la optimización topológica 30% para la pieza del brazo

La optimización de la geometría al 30% del modelo original, se muestra el desplazamiento máximo de la pieza optimizada al 30% la cual es de $1.01 \times 10^{-6} m$, resultando ser igual con respecto modelo original, el factor de seguridad se puede visualizar el aumento de dicho factor de 3.8×10^{12} a 4.97×10^{12} con la optimización de geometría al 30% respecto a la pieza original, la variación del desplazamiento máximo en la pieza optimizada con respecto al modelo original pasando de $1.06 \times 10^{-6} m$ a $1.01 \times 10^{-6} m$, el estrés máximo de Von Mises el cual disminuyo con respecto al modelo original, bajando de $1.34 \times 10^5 Pa$ a $6.28 \times 10^4 Pa$.

La variación entre la masa con respecto a la pieza original, pasando de 20.05 g a 14.2 g, observando así que hubo un decremento de aproximadamente 6 gramos, la diferencia de volumen con respecto a la figura original, pasando de $1.65 \times 10^{-5} m$ a $1.14 \times 10^{-5} m$. (Véase figura 11)

Figura 11. Resultados optimización topológica 30%

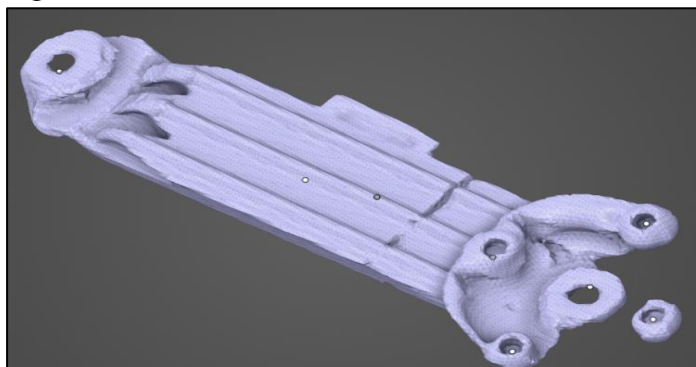


Fuente: Autoría propia

Posteriormente se encuentra el resultado de la geometría optimizada y lista para su impresión.

(Véase figura 12)

Figura 12. Geometría optimizada al 30%



Fuente: Autoría propia

Resultados de la comparación física de las piezas.

El peso real de la pieza con la geometría corregida es de 13 gramos, coincidiendo con la vista previa de la impresión 3D, el peso real de la pieza optimizada al 20% fue de 10 gramos aproximadamente, teniendo así una disminución de 3 g aproximadamente con respecto al modelo sin optimizar.

Por último, el peso real de la pieza optimizada al 30% fue de 9 gramos, teniendo una variación 4 gramos con respecto al modelo sin optimizar. (véase figura 13)

Tabla 1. Porcentaje de pieza optimizada y peso

Porcentaje de pieza optimizada	Peso
20 %	10 g
30 %	9 g
Pieza corregida	13 g

Fuente: Autoría propia

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante la aplicación de la ingeniería inversa permitieron comprender la geometría, los materiales y los principios de diseño del brazo robótico original, proporcionando una base sólida para su análisis y mejora.

Este enfoque facilitó la identificación de áreas críticas en términos de esfuerzo y distribución de material, las cuales fueron consideradas en etapas posteriores del diseño.

La implementación de simulaciones de mecánica estructural permitió validar el comportamiento del brazo robótico bajo diferentes condiciones de carga, confirmando que el diseño optimizado mantiene un desempeño mecánico adecuado. Los análisis mostraron que las deformaciones y esfuerzos se mantuvieron dentro de límites aceptables, garantizando la integridad estructural del componente.

Por otra parte, la aplicación de la optimización topológica contribuyó significativamente a la reducción de material, logrando un diseño más ligero sin comprometer su funcionalidad ni su resistencia. Esta reducción tiene un impacto positivo en el consumo de material y en la eficiencia del sistema, lo que resulta especialmente relevante en aplicaciones robóticas.

En conjunto, los resultados demuestran que la combinación de ingeniería inversa, simulaciones estructurales y optimización topológica constituye una metodología efectiva para el rediseño y mejora de componentes mecánicos en sistemas robóticos.

CONCLUSIONES

En conclusión, la ingeniería inversa permitió la manipulación del elemento sobre todo en su geometría, esto permitió a su vez la optimización del elemento por medio de la metodología realizada basándonos en el software Ansys Discovery, ya que las propiedades físicas del elemento fueron mejoradas, un gran ejemplo de esto es el factor de seguridad puesto que este ha ido aumentando con la optimización generada permitiendo que el elemento soporte mayores cargas con respecto al elemento original, por otra parte, el desplazamiento máximo fue disminuyendo, comprobando que optimizar la geometría es una gran herramienta para mejorar las propiedades físicas de los elementos mejorando así su eficiencia.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Rodríguez, M. A. B. (2011). *Ingeniería inversa aplicada: metodología y aplicaciones industriales*.

<https://repository.eafit.edu.co/handle/10784/9080>

Basco, A. I., Beliz, G., Coatz, D., & Garnero, P. (2018). Industria 4.0: fabricando el futuro.

En *Inter-American Development Bank*

eBooks. <https://doi.org/10.18235/0001229Mora>

M. G. (2024). *Modelado geométrico de estructuras anatómicas para análisis por elementos*

finitos. <https://doi.org/10.69740/ud.9789587877205.9789587877229>

Napoles.

Thomas G. (2020). *Introduction of finite element methods in the Lower Division Mechanical*

Engineering Technology Curriculum. <https://doi.org/10.18260/1-2--6653>

Carrillo-Pereyra, F., Villalobos-López, R. D., Lira-Martínez, M. A., & Caldiño-Herrera, U.

(2019). *Optimización topológica del brazo de suspensión inferior mediante*

elemento finito. *Mundo FESC*, 9 (18), 47-52. <https://doi.org/10.61799/2216->

[0388.447](https://doi.org/10.61799/2216-0388.447)

3D Hubs. (s.f.). *¿Qué es la fabricación aditiva?* <https://www.hubs.com/guides/3d-printing/>

Martin Philip Bends e and Ole Sigmund (2014). *Topology Optimization: Theory, Methods and*

Applications. Springer.

O.C. Zienkiewicz and R.L. Taylor (2000). *The Finite Element Method: Fluid Dynamics*, 3.

Butterworth-Heinemann.

Savas (2012), Sedat. *Evolutionary Topological Design of Two Dimensional Composite Structures*.

American International Journal of Contemporary Research, 2 No. 3:7688.

La Revista utiliza códigos para identificar al Revisor y al equipo de
PARES REVISORES. Si tiene dudas o consultas, contacte a:

contacto@cienciayreflexion.org

Código de Editor: 107

Código de Revisores: 752

