



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis y optimización del diseño mediante
optimización topológica de los herrajes de líneas áreas
de alta tensión.

Autor: Alejandra Barceló Álvarez

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título

**ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE OPTIMIZACIÓN
TOPOLÓGICA DE LOS HERRAJES DE LÍNEAS ÁREAS DE ALTA TENSIÓN**

curso académico 2022/23 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Alejandra Barceló Álvarez

Fecha: 27 / 06 / 23

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 27 / 06 / 23



MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Análisis y optimización del diseño mediante
optimización topológica de los herrajes de líneas áreas
de alta tensión.

Autor: Alejandra Barceló Álvarez

Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid

ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN DEL DISEÑO MEDIANTE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA DE LOS HERRAJES DE LÍNEAS ÁREAS DE ALTA TENSIÓN.

Autor: Barceló Álvarez, Alejandra.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

El proyecto siguiente se ha centrado en optimizar topológicamente un herraje eléctrico. Para ello, primero se han analizado los requisitos funcionales del mismo para comprender como se comporta bajo carga. A partir de dicho estudio, se ha podido rediseñar la pieza empleando para ello, estudios estáticos y diseño generativo. Finalmente, la pieza redefinida y optimizada se ha fabricado aplicando fabricación aditiva e impresión 3D.

Palabras clave: Herraje, grapa, diseño generativo, impresión 3D, optimización topológica, fabricación aditiva.

1. Introducción

Los herrajes eléctricos son elementos indispensables en las instalaciones eléctricas, desempeñando un papel crucial para prevenir cortocircuitos, sobrecargas y otros problemas relacionados con la electricidad. Además, aseguran una conexión segura y confiable, protegen los cables y garantizan un suministro eficiente de energía en diversos entornos.

Estos componentes son ampliamente utilizados en una variedad de aplicaciones, desde instalaciones residenciales hasta sistemas industriales más complejos. Sin embargo, su fabricación en masa genera una gran cantidad de residuos y exceso de material, lo que podría ser mitigado mediante un estudio de optimización, generando ahorros significativos a largo plazo.

El proyecto se ha enfocado en la optimización topológica de estos herrajes con el objetivo de mejorar su eficiencia y rendimiento, al mismo tiempo que se reduce el desperdicio de material. El prototipo resultante se alinea mejor con los objetivos de desarrollo sostenible y transición energética en comparación con la pieza original.

2. Definición del proyecto

El objetivo principal de este proyecto es desarrollar un modelo optimizado de los herrajes utilizados en las líneas de alta tensión, mejorando su geometría y distribución de masa para que cumplan con las condiciones de trabajo requeridas. Además, se busca determinar las condiciones de contorno necesarias para definir el estado tensional y los esfuerzos a los que se someten estas piezas en las líneas de alta tensión. También se pretende optimizar el proceso iterativo necesario para obtener la pieza final de manera eficiente.

Entre los objetivos secundarios se incluye adquirir un conocimiento detallado de la metodología de optimización topológica, con el fin de poder aplicar este proceso en diferentes aplicaciones. Asimismo, se busca obtener un modelo que permita reducir los

costes y los tiempos de fabricación de esta pieza esencial en las líneas de transporte y distribución eléctrica.

No obstante, antes de utilizar la optimización topológica, es crucial comprender las condiciones de trabajo de los herrajes para garantizar un modelo preciso. Algunas de las condiciones que se deben analizar incluyen cargas eléctricas y mecánicas, restricciones de movimiento, condiciones ambientales y cargas de falla. Estos aspectos se considerarán durante el proceso de optimización para garantizar que el diseño cumpla con los requisitos de rendimiento, seguridad y capacidad para soportar las cargas y condiciones reales.

Una vez que se hayan determinado las condiciones de trabajo y se haya creado un modelo inicial en CAD, el proyecto avanzará de manera iterativa. Se tomarán en cuenta los requisitos de la pieza, las reglas de fabricación en 3D o fundición, y otras restricciones. El diseño se optimizará hasta alcanzar un producto validado mediante simulación FEM. Posteriormente, se utilizará el modelo CAD optimizado para crear un prototipo mediante una técnica de fabricación, como HPMJF (polvo), SLA o FDM. También se considerará la posibilidad de probar el herraje mediante fundición de aluminio, tanto con su geometría estándar como con la geometría optimizada.

El objetivo final es fabricar un prototipo real del herraje para verificar su geometría y realizar diversos ensayos de montaje. Se utilizará un termoplástico como la poliamida como material principal. Para lograr esto, se seleccionará una de las técnicas de fabricación mencionadas anteriormente. El resultado será un producto terminado obtenido a través de la colada del molde.

Con este enfoque integral que combina la optimización topológica, el diseño generativo y diversas técnicas de fabricación, se espera obtener un herraje de línea de alta tensión con un rendimiento óptimo, una geometría precisa y una fabricación eficiente.

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

Para llevar a cabo la optimización topológica del herraje, se han seguido diferentes etapas siendo algunas de ellas iteraciones.

Para comenzar, fue necesario aplicar ingeniería inversa para obtener un modelo CAD a partir de una grapa real. De esta forma, ya se tiene una pieza a la que se puede empezar a aplicar el método de elementos finitos y diseño generativo.

Por otro lado, se hizo un análisis de los herrajes que existen en el mercado para entender sus requisitos de diseño y condiciones de funcionamiento. Para poder estudiar cómo se comporta la pieza y así poder optimizar su masa, es necesario tener un modelo de cargas que simulen su comportamiento real. A partir de la literatura, se obtuvo un valor de fuerzas, [1] y se introdujo en el programa para realizar un estudio estático de la pieza original.

Una vez entendido como se comportaba la pieza bajo carga, ya se pudo iniciar el proceso iterativo de reducción de masa, pero siempre teniendo en cuenta las condiciones límites de tensión en las que debía trabajar. Aplicando diseño generativo, se llegó a un modelo final con un porcentaje de masa mucho menor.

Finalmente, se refinó la pieza para que fuese posible imprimirla en 3D y con el modelo final, se aplicó fabricación aditiva y se obtuvo un prototipo real del herraje optimizado.

A continuación, se muestra el esquema que sintetiza los pasos que se siguieron:

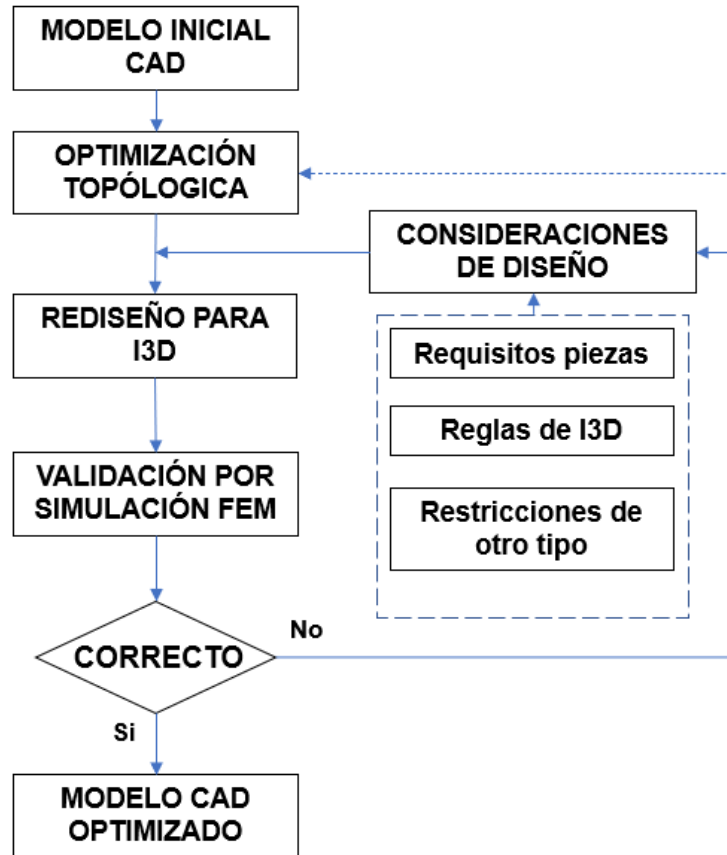


Ilustración 1. etapas de trabajo. Fuente: elaboración propia

4. Resultados

En esta sección se presentan de manera resumida los resultados y la comparación de la pieza después de la optimización. Al aplicar los criterios de diseño generativo y realizar los estudios estáticos necesarios, se logró obtener un prototipo con un 48% menos de material, manteniendo las mismas capacidades funcionales que el herraje original.

Este prototipo cumplía con los requisitos de carga y eliminaba masa y volumen innecesarios. Sin embargo, no era adecuado para la fabricación y producción debido a su irregularidad, salientes y falta de pulido. La propuesta del diseño generativo era demasiado extrema para ser impresa, por lo que se decidió utilizarla como modelo para optimizar manualmente la pieza original. Se realizaron varios cortes para obtener una pieza regular, sin áreas amorfas y con superficies y esquinas pulidas. Aunque no se logró la misma reducción de material, se agregó material en ciertas partes para redondearlas y hacerlas aptas para la impresión, lo que resultó en una optimización considerable de alrededor del 30% para una pieza de estas características.

El prototipo final logra reducir la masa y el volumen de la pieza y cumple con los criterios de resistencia necesarios. Para obtener el prototipo final, se utilizó la fabricación aditiva, específicamente la técnica MJF que utiliza impresión en polvo sin necesidad de estructuras de soporte, lo que permite crear geometrías complejas y piezas personalizadas como la analizada en este estudio.

Como se puede observar en la última ilustración, esta técnica permite crear piezas de alta precisión con tolerancias muy pequeñas, lo que evita que las piezas pierdan funcionalidad al ser impresas.

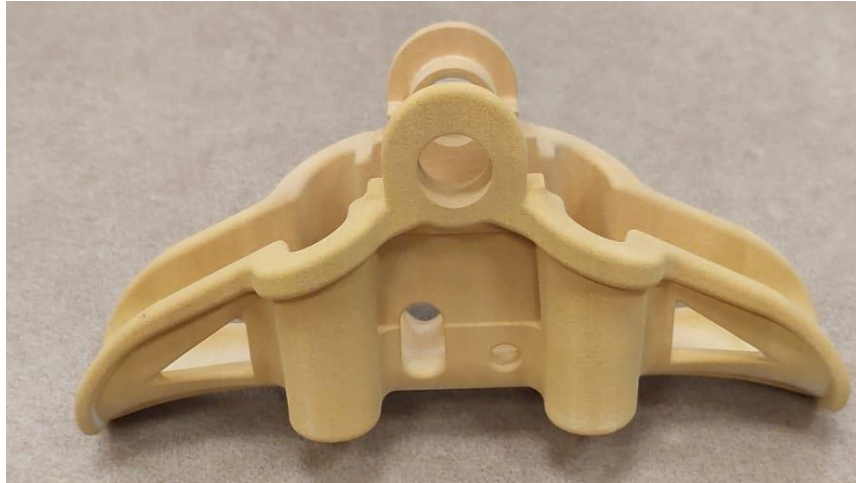


Ilustración 2. pieza final impresa. Fuente: elaboración propia

5. Conclusiones

Los herrajes eléctricos son fundamentales en las instalaciones eléctricas para evitar problemas como cortocircuitos y sobrecargas, asegurando una conexión segura y eficiente. Aunque son piezas comunes en diversas aplicaciones, su fabricación en masa genera altos residuos y exceso de material. Por ello, se ha enfocado en optimizar topológicamente estos herrajes para mejorar su eficiencia y reducir desperdicios.

El prototipo resultante se alinea con los objetivos de desarrollo sostenible y transición energética, presentando una reducción de masa del 30% manteniendo sus capacidades de carga.

Actualmente, la impresión 3D es la única opción viable para fabricar estos prototipos personalizados, aunque sus costos siguen siendo elevados. Sin embargo, se están explorando opciones mixtas entre la fabricación aditiva y la fundición para reducir costos y minimizar residuos en el futuro.

En conclusión, la optimización topológica ofrece diseños eficientes y livianos, con un mejor rendimiento estructural, aunque actualmente su implementación es costosa, pero se esperan avances en este campo en el futuro.

6. Referencias

[15] «ET-AT-305 Herrajes para líneas aéreas de alta tensión | Likinormas». https://likinormas.micodensa.com/Especificacion/otros/etat305_herrajes_lineas_aereas_alta_tension (accedido 17 de marzo de 2023).

ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE DESIGN THROUGH TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF HIGH VOLTAGE OVERHEAD LINE FITTINGS.

Author: Barceló Álvarez, Alejandra.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The following project focused on the topological optimization of an electrical hardware. To do so, first the functional requirements of the hardware were analyzed to understand how it behaves under load. From this study, the part has been redesigned using static studies and generative design. Finally, the redefined and optimized part has been manufactured by applying additive manufacturing and 3D printing.

Keywords: Ironwork, clamp, generative design, 3D printing, topological optimization, additive manufacturing.

1. Introduction

Electrical fittings are indispensable elements in electrical installations, playing a crucial role in preventing short circuits, overloads and other electricity-related problems. In addition, they ensure a safe and reliable connection, protect cables and guarantee an efficient power supply in various environments.

These components are widely used in a variety of applications, from residential installations to more complex industrial systems. However, their mass production generates a large amount of waste and excess material, which could be mitigated through an optimization study, generating significant savings in the long term.

The project has focused on the topological optimization of these fittings with the aim of improving their efficiency and performance, while reducing material waste. The resulting prototype is better aligned with sustainable development and energy transition objectives compared to the original part.

2. Project definition

The main objective of this project is to develop an optimized model of the fittings used in high voltage lines, improving their geometry and mass distribution so that they comply with the required working conditions. In addition, it seeks to determine the boundary conditions necessary to define the stress state and the stresses to which these parts are subjected in high voltage lines. It is also intended to optimize the iterative process necessary to obtain the final part in an efficient way.

Secondary objectives include acquiring a detailed knowledge of the topological optimization methodology, in order to be able to apply this process in different applications. Likewise, the aim is to obtain a model that allows reducing the costs and manufacturing times of this essential part in power transmission and distribution lines.

However, before using topological optimization, it is crucial to understand the working conditions of the fittings to ensure an accurate model. Some of the conditions to be

analyzed include electrical and mechanical loads, movement restrictions, environmental conditions and fault loads. These aspects will be considered during the optimization process to ensure that the design meets the requirements for performance, safety and ability to withstand the actual loads and conditions.

Once the working conditions have been determined and an initial CAD model has been created, the project will progress iteratively. Part requirements, 3D manufacturing or casting rules, and other constraints will be taken into account. The design will be optimized until a validated product is achieved through FEM simulation. Subsequently, the optimized CAD model will be used to create a prototype using a manufacturing technique such as HP MJF (powder), SLA or FDM. Consideration will also be given to testing the hardware using aluminum casting, both with its standard geometry and with the optimized geometry.

The ultimate goal is to fabricate a real prototype of the fitting to verify its geometry and perform various assembly tests. A thermoplastic such as polyamide will be used as the main material. To achieve this, one of the manufacturing techniques mentioned above will be selected. The result will be a finished product obtained through mold casting.

With this comprehensive approach combining topological optimization, generative design and various manufacturing techniques, it is expected to obtain a high-voltage line fitting with optimum performance, precise geometry and efficient manufacturing.

3. Description of the model/system/tool

In order to carry out the topological optimization of the hardware, different stages were followed, some of them being iterations.

To begin with, it was necessary to apply reverse engineering to obtain a CAD model from a real clip. In this way, we now have a part to which we can begin to apply the finite element method and generative design.

On the other hand, an analysis of the hardware available on the market was made to understand their design requirements and operating conditions. In order to study how the part behaves and thus be able to optimize its mass, it is necessary to have a load model that simulates its real behavior. From the literature, a value of forces was obtained, [15] and introduced into the program to perform a static study of the original part.

Once it was understood how the part behaved under load, the iterative process of mass reduction could be started, but always taking into account the stress boundary conditions in which it had to work. Applying generative design, a final model with a much lower mass percentage was reached.

Finally, the part was refined so that it could be printed in 3D and with the final model, additive manufacturing was applied, and a real prototype of the optimized hardware was obtained.

Below is the scheme that summarizes the steps that were followed:

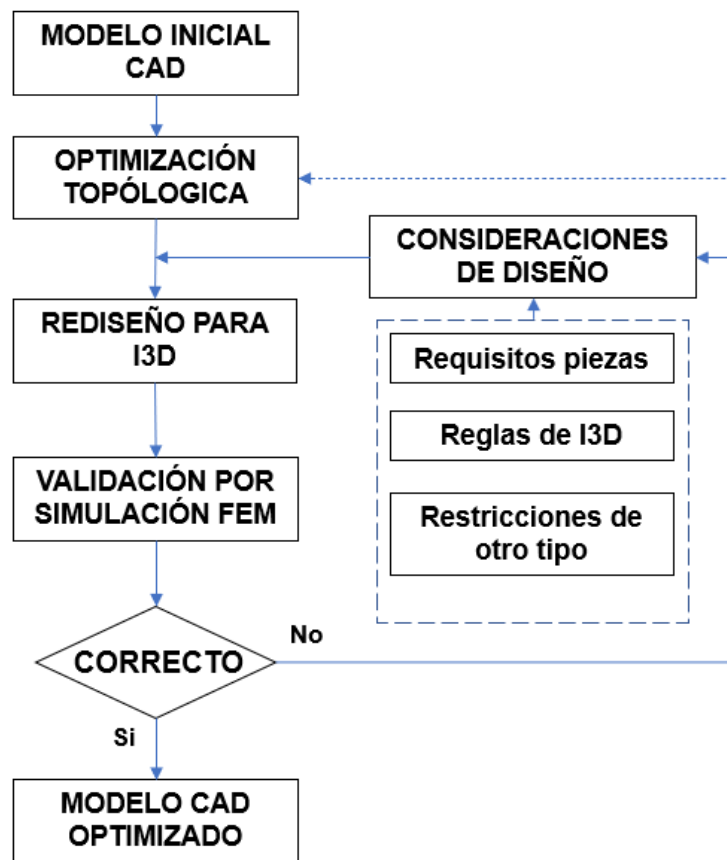


Ilustración 3. Steps. Source: Own elaboration

4. Results

This section summarizes the results and the comparison of the part after optimization. By applying the generative design criteria and performing the necessary static studies, we were able to obtain a prototype with 48% less material while maintaining the same functional capabilities as the original hardware.

This prototype met the load requirements and eliminated unnecessary mass and volume. However, it was not suitable for manufacturing and production due to its irregularity, protrusions, and lack of polish. The generative design proposal was too extreme to be printed, so it was decided to use it as a model to manually optimize the original part. Several cuts were made to obtain a regular part, without amorphous areas and with polished surfaces and corners. Although the same material reduction was not achieved, material was added in certain parts to round them and make them suitable for printing, resulting in a considerable optimization of about 30% for a part of these characteristics.

The final prototype manages to reduce the mass and volume of the part and meets the necessary strength criteria. To obtain the final prototype, additive manufacturing was used, specifically the MJF technique that uses powder printing without the need for support structures, which allows the creation of complex geometries and customized parts such as the one analyzed in this study.

As can be seen in the last illustration, this technique makes it possible to create high-precision parts with very small tolerances, which prevents the parts from losing functionality when printed.

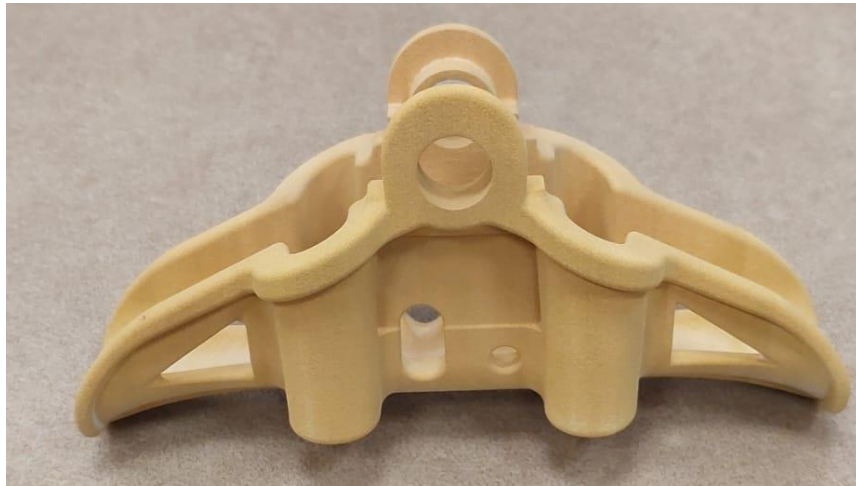


Ilustración 4. Final piece. Source: Own elaboration

5. Conclusions

Electrical fittings are essential in electrical installations to avoid problems such as short circuits and overloads, ensuring a safe and efficient connection. Although they are common parts in several applications, their mass production generates high waste and excess material. Therefore, it has focused on topologically optimizing these fittings to improve their efficiency and reduce waste.

The resulting prototype is aligned with sustainable development and energy transition objectives, presenting a 30% mass reduction while maintaining its load capacities.

Currently, 3D printing is the only viable option for manufacturing these customized prototypes, although costs remain high. However, mixed options between additive manufacturing and casting are being explored to reduce costs and minimize waste in the future.

In conclusion, topological optimization offers efficient and lightweight designs with improved structural performance, although it is currently costly to implement, but advances in this field are expected in the future.

7. References

- [15] «ET-AT-305 Herrajes para líneas aéreas de alta tensión | Likinormas». https://likinormas.micodensa.com/Especificacion/otros/etat305_herrajes_lineas_aereas_alta_tension (accedido 17 de marzo de 2023).

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	8
Capítulo 2. Estado del arte	10
2.1 Optimización topológica	10
2.1.1 Definición y origen	10
2.1.2 Utilidad y Aplicaciones	11
2.2 Elementos de una línea eléctrica	13
2.3 Aisladores	19
2.3.1 Especificaciones generales	19
2.3.2 Requisitos	23
2.4 Herrajes	27
2.4.1 Características generales y tipos de herrajes	27
2.4.2 Normas relacionadas	31
2.4.3 Características constructivas	31
2.4.4 Ensayos de montaje	35
Capítulo 3. Metodología	38
3.1 Ingeniería Inversa	38
3.2 Diagramas de flujo	43
3.2.1 Diseño pieza 3D	43
3.2.2 Diseño generativo	44
3.2.3 Simulación FEM	46
Capítulo 4. Implantación	49
4.1 Simulación FEM de la pieza original	49
4.2 Aplicación del Diseño generativo	55
4.3 Refinamiento del modelo optimizado	71
4.4 Modificación de la pieza original	75
4.5 Estudio FEM de la propuesta final	81
4.6 Fabricación de la pieza final	85
4.6.1 Características de impresión	86
4.6.2 Tipos de impresión	89

4.6.3 Impresión del prototipo	92
Capítulo 5. Resultados.....	97
Capítulo 6. Estudio económico: Proveedor vs I3D Implantación	100
6.1 Costes de Proveedor	100
6.2 Costes de Prototipado	103
6.2.1 Tiempo y Coste de la grapa optimizada y refinada	104
6.3 Costes de impresión en Aluminio.....	105
6.3.1 Coste de la grapa optimizada y refinada.....	106
6.4 Comparativa costes.....	107
Capítulo 7. Conclusiones.....	109
Capítulo 8. Anexo: Alineación con los ODS.....	111
Capítulo 9. Referencias	113

Índice de figuras

Ilustración 1. etapas de trabajo. Fuente: elaboración propia	7
Ilustración 2. pieza final impresa. Fuente: elaboración propia.....	8
Ilustración 3. Steps. Source: Own elaboration	11
Ilustración 4. Final piece. Source: Own elaboration	12
Ilustración 5. Conductor de aluminio con refuerzo de acero (ACSR), [7]	15
Ilustración 6. Aislador eléctrico, [3].....	17
Ilustración 7. Principales tipos de apoyo, [9]	18
Ilustración 8. Aislador fijo [11].....	20
Ilustración 9. Aisladores en cadena [11]	21
Ilustración 10. Tipos de aisladores en cadena [12].....	21
Ilustración 11. Aislador de campana [12].....	22
Ilustración 12. Nivel de aislamiento para gama I, [8]	24
Ilustración 13. Nivel de aislamiento para gama II, [8]	25
Ilustración 14. Tipos de herrajes[11].....	28
Ilustración 15. Abulonada tipo pistola, [14].....	28
Ilustración 16. Compresión (retención), [14]	29
Ilustración 17. Empernada, [14]	29
Ilustración 18. Preformada, [14].....	30
Ilustración 19. Normas herrajes eléctricos, [1].....	31
Ilustración 20. Grapa de suspensión para cable de guarda, [1]	34
Ilustración 21. Detalle grapa, [1].....	34
Ilustración 22. Diseño tradicional vs Ingeniería inversa, [16].....	42
Ilustración 23. Pieza real vs Modelo 3D. Fuente: elaboración propia.....	43
Ilustración 24. Diagrama de flujo Diseño 3D. Fuente: elaboración propia.....	44
Ilustración 25. Diagrama de flujo Diseño Generativo. Fuente: elaboración propia.....	46
Ilustración 26. Diagrama de flujo Simulación FEM. Fuente: elaboración propia.....	48
Ilustración 27. Modelo CAD de la grapa. Fuente: elaboración propia.....	49
Ilustración 28. Aluminio 1060. Fuente: Solid Edge	50

Ilustración 29. Características grapa. Fuente: Solid Edge	50
Ilustración 30. Diagrama de cargas. Fuente: elaboración propia	51
Ilustración 31. Restricción de punto fijo. Fuente: elaboración propia.....	52
Ilustración 32. Características del mallado. Fuente: Solid Edge	53
Ilustración 33. Mallado de la grapa. Fuente: elaboración propia	53
Ilustración 34. Resultado estudio estático. Fuente: elaboración propia	54
Ilustración 35. Detalle estudio estático. Fuente: elaboración propia.....	55
Ilustración 36. Regiones preservadas: agujeros. Fuente: elaboración propia.....	56
Ilustración 37. Región preservada: grosor. Fuente: elaboración propia	56
Ilustración 38. Perfil fuerza para el diseño generativo. Fuente: elaboración propia	57
Ilustración 39. Detalle fuerza. Fuente: elaboración propia.....	57
Ilustración 40. Restricción de movimiento del agujero central. Fuente: elaboración propia	58
Ilustración 41. Reducción de masa al 40% (1). Fuente: elaboración propia	58
Ilustración 42. Reducción de masa al 40% (2). Fuente: elaboración propia	59
Ilustración 43. Mallado al 40%. Fuente: elaboración propia.....	59
Ilustración 44. Resultados estudio estático (40%). Fuente: elaboración propia.....	60
Ilustración 45. Detalle estudio estático al 40%. Fuente: elaboración propia.....	61
Ilustración 46. Reducción de masa al 50% (1). Fuente: elaboración propia	62
Ilustración 47. Reducción de masa al 50% (2). Fuente: elaboración propia	62
Ilustración 48. Mallado al 50%. Fuente: elaboración propia.....	63
Ilustración 49. Resultados estudio estático al 50%. Fuente: elaboración propia.....	63
Ilustración 50. Reducción de masa al 45% (1). Fuente: elaboración propia	64
Ilustración 51. Reducción de masa al 45% (2). Fuente: elaboración propia	64
Ilustración 52. Mallado al 45%. Fuente: elaboración propia.....	65
Ilustración 53. Resultados estudio estático al 45%. Fuente: elaboración propia.....	66
Ilustración 54. Detalle estudio estático al 45%. Fuente: elaboración propia.....	66
Ilustración 55. Datos diseño generativo al 48%. Fuente: Solid Edge.....	67
Ilustración 56. Reducción de masa al 48% (1). Fuente: elaboración propia	68
Ilustración 57. Reducción de masa al 48% (2). Fuente: elaboración propia	68

Ilustración 58. Reducción de masa al 48% (3). Fuente: elaboración propia	69
Ilustración 59. Reducción de masa al 48% (4). Fuente: elaboración propia	69
Ilustración 60. Mallado al 48%. Fuente: elaboración propia.....	70
Ilustración 61. Resultados estudio estático al 48%. Fuente: elaboración propia.....	70
Ilustración 62. Detalle estudio estático al 48%. Fuente: elaboración propia.....	71
Ilustración 63. Pieza refinada con Altair. Fuente: elaboración propia	72
Ilustración 64. Detalle refinamiento (1). Fuente: elaboración propia.....	73
Ilustración 65. Detalle refinamiento (2). Fuente: elaboración propia.....	74
Ilustración 66. Detalle refinamiento (3). Fuente: elaboración propia.....	75
Ilustración 67. Vaciado pieza original (1). Fuente: elaboración propia	76
Ilustración 68. Vaciado pieza original (2). Fuente: elaboración propia	77
Ilustración 69. Vaciado pieza original (3). Fuente: elaboración propia	77
Ilustración 70. Planta pieza original modificada. Fuente: elaboración propia	78
Ilustración 71. Especificaciones del diseño final. Fuente: Solid Edge.....	78
Ilustración 72. Dimensiones pieza. Fuente: elaboración propia	79
Ilustración 73. Pieza final (1). Fuente: elaboración propia.....	79
Ilustración 74. Pieza final (2). Fuente: elaboración propia.....	80
Ilustración 75. Comparativa herraje original vs optimizado. Fuente: elaboración propia ..	81
Ilustración 76. Mallado pieza final. Fuente: elaboración propia	82
Ilustración 77. Resultados estudio estático pieza final. Fuente: elaboración propia	83
Ilustración 78. Detalle deformación pieza final (1). Fuente: elaboración propia.....	84
Ilustración 79. Detalle deformación pieza final (2). Fuente: elaboración propia.....	84
Ilustración 80. Ciclo de desarrollo. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI.....	85
Ilustración 81. Selección tolerancias. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI	86
Ilustración 82. Formato ".stl". Fuente: Solid Edge.....	87
Ilustración 83. Tamaño de capa. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI.....	88

Ilustración 84. Relleno de pieza. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI.....	89
Ilustración 85. Prototipo en Netfabb. Fuente: elaboración propia.....	92
Ilustración 86. Características prototipo en Netfabb. Fuente: Netfabb	93
Ilustración 87. Prototipo en el espacio de trabajo de Netfabb. Fuente: elaboración propia	94
Ilustración 88. Pieza impresa (1). Fuente: elaboración propia	95
Ilustración 89. Pieza impresa (2). Fuente: elaboración propia	95
Ilustración 90. Pieza impresa (3). Fuente: elaboración propia	96
Ilustración 91. Herraje obtenido mediante diseño generativo. Fuente: elaboración propia	97
Ilustración 92. Prototipo final vs. Pieza original. Fuente: elaboración propia	98
Ilustración 93. Pieza impresa (3). Fuente: elaboración propia	99
Ilustración 94. Proveedor 1, , [23].....	101
Ilustración 95. Proveedor 2, , [23].....	101
Ilustración 96. Proveedor 3, , [23].....	102
Ilustración 97. Proveedor 4, , [23].....	102
Ilustración 98. Comparativa I3D vs método tradicional. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI.....	104
Ilustración 99. Tiempo estimado de impresión, [25].....	104
Ilustración 100. Presupuesto impresión en aluminio, Fuente: elaboración propia.....	106
Ilustración 101. Pieza impresa en aluminio. Fuente: elaboración propia	107

Índice de tablas

Tabla 1. Carga mínima de rotura, [1]	33
Tabla 2. Requerimientos grapa de suspensión, [1]	34
Tabla 3. Solicitaciones del conductor, [1]	35
Tabla 4. Resumen proveedores. Fuente: elaboración propia.....	102
Tabla 5. Coste impresión DMLS. Fuente: elaboración propia	105

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La optimización topológica derivada del diseño generativo es una metodología basada en un modelo matemático ya integrado en la mayoría de los sistemas CAD. Se basa en la optimización del diseño del material dentro de un espacio de diseño determinado y a partir de un modelo sólido en 3D. Utiliza algoritmos de optimización para encontrar la distribución óptima de material en una estructura, sujeto a ciertas restricciones, con el objetivo de maximizar su rendimiento en términos de rigidez, resistencia, peso, etc.

En otras palabras, la optimización topológica se enfoca en determinar la forma óptima de una estructura para resistir las cargas o fuerzas aplicadas, minimizando el material utilizado y, por lo tanto, reduciendo el peso y los costos de producción.

El proceso de optimización topológica se lleva a cabo a través de iteraciones de análisis y diseño, donde el modelo de la estructura se modifica y analiza repetidamente para alcanzar un diseño óptimo. Esto se logra mediante la aplicación de técnicas de análisis numérico y simulación, así como algoritmos de optimización que buscan encontrar la mejor configuración de la estructura. Se utiliza en diversas áreas de ingeniería, incluyendo la aeronáutica, la automotriz, la arquitectura y la construcción, y ha demostrado ser una herramienta eficaz para mejorar la eficiencia estructural y reducir los costos de producción. Para ello, se simulan las cargas, condiciones de contorno y restricciones a las que estaría sometida el objeto en la vida real con el objetivo de maximizar el rendimiento del sistema.

En el presente trabajo, se pretende emplear dicha técnica para optimizar el diseño de los herrajes de las líneas de alta tensión. No obstante, antes de poder emplear dicha metodología es necesario determinar las condiciones en las que trabajan dichos herrajes para poder hacer el modelo lo más preciso posible. Entre el tipo de condiciones que se pretende analizar se encuentran, entre otras:

- Cargas eléctricas
- Cargas mecánicas

- Restricciones de movimiento
- Condiciones ambientales
- Cargas de falla

Es decir, se analizarán características como el tipo de conductor soportado, las temperaturas de trabajo, la acumulación de las tensiones o el efecto corona. Al considerar estas condiciones de contorno en la optimización topológica de herrajes eléctricos, se puede garantizar que el diseño óptimo cumpla con los requisitos de rendimiento y seguridad, y sea capaz de soportar las cargas y condiciones a las que estará expuesto.

Una vez se tengan claras las condiciones de trabajo del herraje seleccionado y se haya diseñado un primer modelo en CAD, el proyecto se llevará a cabo de manera iterativa. Se tendrán en cuenta los requisitos de la pieza, las reglas de I3D o fundición y demás restricciones y se optimizará el diseño hasta llegar a un producto validado por simulación FEM. Con el modelo CAD optimizado para fundición, se pasará a la realización de un modelo I3D o de fundición del que finalmente se obtenga el molde con el que poder sacar el producto terminado mediante colada.

Como objetivo final, se pretende fabricar un prototipo real donde se pueda comprobar su geometría y realizar diferentes ensayos de montaje. El material empleado será un termoplástico como la poliamida. Para ello, se seleccionará una de las siguientes técnicas para su fabricación: HPMJF (polvo), SLA o FDM. Además, queda abierta la posibilidad de probar el herraje en fundición en aluminio tanto con su geometría estándar como la optimizada.

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

2.1 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

2.1.1 DEFINICIÓN Y ORIGEN

La optimización topológica es un método de optimización que utiliza modelos algorítmicos para optimizar la distribución del material en un espacio definido por el usuario para un conjunto determinado de cargas, condiciones y limitaciones. Busca maximizar el rendimiento y la eficiencia del diseño eliminando el material innecesario de las zonas donde las cargas no son considerables y por tanto no necesitan tanto material. Se trata de reducir el peso de la pieza y de resolver desafíos de diseño tales como reducir el esfuerzo térmico o la resonancia.

El diseño generativo y la optimización topológica se han convertido en términos recurrentes en el universo del diseño CAD. Sin embargo, es importante destacar que no se trata de sinónimos. La optimización topológica apareció hace, al menos, 20 años y ha estado disponible en la mayoría de las herramientas habituales de software CAD. El proceso empieza con la creación de un modelo CAD al que se le aplican cargas y restricciones teniendo en cuenta los parámetros del proyecto. Con esta información introducida, el software elimina el material redundante y genera un modelo optimizado en concepto de malla que ya puede ser evaluado para ver si cumple con todos los requerimientos. Es decir, la optimización topológica necesita la intervención humana a lo largo del proceso, desde el diseño del modelo hasta la evaluación del resultado.

La optimización es la base para el diseño generativo. No obstante, el diseño generativo lleva todo este proceso un paso más allá, elimina la necesidad de la acción humana. Ya no es necesario que el modelo inicial sea creado por ingenieros y es el propio software el que asume el papel del diseñador a partir del conjunto de restricciones predefinidas.

2.1.2 UTILIDAD Y APLICACIONES

Es importante tener un buen motivo para abandonar los clásicos métodos de diseño y fabricación. Si una técnica nueva no implica reducir costes, un mejor funcionamiento o ahorrar tiempo, los fabricantes no verán razones para cambiar. Por ello, es importante indicar que ventajas conlleva la optimización topológica.

- **Ahorro de dinero:** Es cierto que muchas de las geometrías propuestas por la optimización topológica tendrían unos costes de producción desorbitados si se utilizasen los métodos tradicionales. Sin embargo, si se combina con la impresión 3D, esta complejidad no genera costes adicionales.

La fabricación de piezas impresas en 3D puede ser más caro que sus equivalentes no optimizados y fabricados tradicionalmente, sin embargo, estos nuevos diseños permitir reducir costes de otras formas: con una mayor eficiencia del combustible ya que necesita menos energía para mover las piezas gracias a su menor fricción, bajando los costes de embalaje y transporte o necesitando menos maquinaria pesada para las cadenas de montaje.

- **Resolución de desafíos de diseño:** permite dar solución a problemas comunes en el proceso de diseño. Por ejemplo, la fatiga térmica y deformaciones de un sistema provocadas por el esfuerzo térmico debido a cualquier cambio en la temperatura de un material (por fricción u otros factores).

En ciertos casos, optimizar un diseño implica funciones objetivo que compiten entre sí, como puede ser el caso de optimizar tamaño y peso. Por ejemplo, las piezas aeroespaciales son ligeras, pero también deben soportar grandes pares de torsión, esfuerzos y calor. En este caso, tener un algoritmo que permita equilibrar el diseño teniendo en cuenta cada uno de estos objetivos y encuentre el punto óptimo es una gran ventaja.

- **Ahorro de tiempo:** Trabajar con softwares de optimización topológica sigue siendo una tarea complicada, sin embargo, permiten generar diseños de alto rendimiento que un ingeniero no podría crear de forma manual. Esto implica que se gasta menos energía y tiempo en el diseño en CAD y se alcanzan resultados fiables con menos iteraciones.

En cuanto a la fabricación, los procesos de fabricación aditiva son capaces de producir piezas rápidamente ya que no requieren utillaje.

- **Reducción del impacto ecológico:** Optimizar la forma y cantidad de material de una pieza permite reducir la huella de carbono total de un fabricante. Si se crean productos ligeros y pequeños, la cantidad de material es mucho menor. En comparación con las herramientas de fabricación sustractiva, las piezas producidas mediante procesos aditivos también suelen requerir menos materia prima y producen menos desperdicios.

Es usual que el mayor ahorro ocurra a lo largo de la vida útil de las piezas. Por ejemplo, aligerar las piezas que utilizan los aviones reducen su impacto ecológico al disminuir la cantidad de combustible necesario.

- **Eliminación de errores:** El fin último de la optimización topológica es eliminar errores. Al realizar ensayos de esfuerzo, el proceso considera una amplia gama de variables y evita la posibilidad de realizar suposiciones arriesgadas que puedan generar productos defectuosos.

Una vez determinadas las principales ventajas es interesante analizar como diversos sectores están empezando a utilizar los diseños obtenidos mediante optimización topológica.

La significativa reducción peso de las piezas ha hecho que la optimización topológica sea una técnica perfecta para la ingeniería aeroespacial y aeronáutica. Se puede utilizar para mejorar el diseño de la organización de estructuras de fuselajes como soportes para aviones o contrafuertes, [2]. Además, esta técnica también abre la puerta a la fabricación aditiva y al empleo de materiales compuestos que son cada vez más populares en el sector.

En el sector automovilístico, el atractivo de la optimización topológica está en hacer un uso más eficiente del combustible con mayor potencia al emplear piezas más ligeras. Siempre sin dejar de lado la estabilidad y resistencia de un cuerpo capaz de soportar impactos y torsiones. Además, también permite mejorar la seguridad de los pasajeros al definir la forma de la que se derrumba una estructura en un accidente.

Otra industria donde está siendo de gran utilidad la optimización topológica es en aplicaciones médicas. La fabricación aditiva es perfecta para crear libremente formas, superficies y estructuras porosas para implantes médicos y gracias a la optimización topológica, estos diseños pueden ser más ligeros, ofrecer una osteointegración mejorada y aumentar la durabilidad.

Las herramientas de optimización topológica también pueden optimizar los diseños de andamios biodegradables para la ingeniería de tejidos, implantes porosos y productos ortopédicos ligeros. Las aplicaciones de la nanotecnología, como la manipulación celular, la cirugía, los microfluidos y los sistemas ópticos, también utilizan la optimización topológica, [2].

Por último, como se pretende mostrar en este proyecto, el sector eléctrico también tiene mucho potencial para la aplicación de la optimización topológica. Permite obtener piezas optimizadas y más ligeras, pero mejor modeladas para soportar las altas cargas y tensiones a las que normalmente están sometidas.

2.2 ELEMENTOS DE UNA LÍNEA ELÉCTRICA

Las líneas de transmisión eléctricas son el medio físico por el cual se realiza la distribución de la energía eléctrica. Aunque se trata de complejas obras de ingeniería, formadas por conductores, estructuras de soporte, aisladores, cables de guarda y accesorios de ajuste entre los aisladores y las estructuras de soporte, los principales componentes de una línea aérea se pueden dividir en tres grandes grupos, [3]:

- Conductores
- Aisladores
- Apoyos

Para poder entender en detalle el alcance del proyecto, primero, se expondrá brevemente cada una de las partes, entrando en detalle en aquellos elementos que afectan directamente a la realización de este trabajo.

Comenzando por los conductores, actualmente se utilizan varias composiciones y diseños de conductores para cumplir con las distintas especificaciones requeridas. En las primeras etapas de la industria, el cobre se usaba casi exclusivamente por su alta conductividad, pero el diámetro del alambre de cobre estaba determinado más por la necesidad de resistencia mecánica que por la necesidad de mejorar la conductividad. La baja relación resistencia-peso del cobre limita los tramos permitidos (distancia entre torres). Estos son siempre desnudos.

Debido a la mayor relación resistencia-peso del aluminio, se introdujo este material como alternativa al cobre ya que permitía tramos de mayor distancia. El cobre tiene mayor conductividad que el aluminio (el aluminio tiene el 60% de la conductividad del cobre, [4]). Sin embargo, la menor densidad del aluminio hace que la relación conductividad-peso sea dos veces mayor que la del cobre. Otro importante incentivo es que los conductores de aluminio (1,75 €/m, [5]) son más económicos de usar que el cobre (3,91 €/m, [6]).

Aunque existen diversos tipos, los conductores de aluminio típicos se componen de múltiples hilos trenzados de 1/8 de pulgada de espesor. Hay alrededor de 50 variedades de cables conductores de múltiples hilos, que llevan el nombre de flores, quizás porque las secciones transversales sugieren patrones florales y simetría. El Narciso es un conductor de 61 hilos que puede transportar más de 1.100 amperios.

Los hilos de aluminio con refuerzo de acero son los más usados ya que son más ligeros y económicos. Se introdujeron en 1907 con el objetivo de lograr una relación resistencia-peso mayor manteniendo, además, el rendimiento eléctrico del aluminio. Como se puede ver en la Ilustración 5, estos cables tienen un núcleo central de hilos de acero rodeados por hilos de aluminio.



Ilustración 5. Conductor de aluminio con refuerzo de acero (ACSR), [7]

Aunque el acero es un conductor relativamente pobre, su alta resistencia eléctrica permite aumentar la longitud de la sección, reduciendo así la inversión en la torre. Para designarlos, se hace mediante las combinaciones de trenzado. Así, si se tiene un conductor 84/7, quiere decir que tiene 84 hilos de aluminio que rodean un núcleo de 7 hilos de acero.

Es necesario instalarlos con interruptores de puesta a tierra ya que mantienen la carga al desconectar la fuente de tensión. Por ello, si se quiere trabajar en vacío y evitar accidentes graves es obligatoria la conexión a tierra.

Recientemente, se ha introducido un nuevo tipo de material compuesto que utiliza fibras cerámicas en una matriz de aluminio para lograr un peso más ligero y una mayor resistencia. Estos cables ACCR (reforzados con conductores compuestos de aluminio) fueron la primera tecnología probada en las instalaciones de pruebas aceleradas de conductores de líneas eléctricas del Instituto de Investigación de Energía Eléctrica, que se inauguró en 2003. La ventaja de esta nueva forma de conductor es la alta resistencia eléctrica incluso a altas temperaturas, y la adición de circonio a la aleación de aluminio la hace más resistente a la descomposición a altas temperaturas.

Por lo general los conductores se disponen de manera que sus secciones formen los vértices de un triángulo equilátero, de manera que la caída de tensión inductiva es igual en los tres conductores. Además, es frecuente instalar en los apoyos dos circuitos para que cada fase cuente con más de un conductor.

Analizando en segundo lugar los aisladores, son los encargados de dar apoyo y soporte a los conductores a la vez que los mantienen aislados de tierra. Suelen ser de porcelana, vidrio y materiales sintéticos como las resinas epoxi.

Los aisladores eléctricos son componentes que se utilizan en sistemas eléctricos para evitar que la corriente eléctrica fluya a través de ellos hacia otros elementos del sistema que no deben estar conectados eléctricamente. Los aisladores se utilizan para separar físicamente los elementos de los sistemas eléctricos que deben estar aislados eléctricamente, como los conductores eléctricos y las estructuras de soporte de los cables.

Los aisladores se fabrican a partir de materiales aislantes, como vidrio, cerámica o polímeros, y tienen una alta resistencia a la conducción eléctrica. La forma y el tamaño de los aisladores varían dependiendo de la aplicación para la que se utilicen y del nivel de voltaje al que se someterán.

En líneas de alta tensión, por ejemplo, los aisladores se utilizan para separar los conductores eléctricos de las torres o postes que los sostienen. Estos aisladores tienen una forma cilíndrica o de disco y están diseñados para soportar altas cargas mecánicas y eléctricas. En cambio, en aplicaciones de baja tensión, como en circuitos electrónicos, se utilizan aisladores de menor tamaño y resistencia.

Es importante que los aisladores estén limpios y secos para asegurar su correcto funcionamiento. La suciedad, la humedad y otros contaminantes pueden reducir la resistencia eléctrica del aislador y disminuir su capacidad de separar eléctricamente los elementos del sistema.

En resumen, los aisladores eléctricos son componentes críticos en los sistemas eléctricos y se utilizan para separar eléctricamente los elementos del sistema que deben estar aislados eléctricamente. Están hechos de materiales aislantes y tienen diferentes formas y tamaños dependiendo de la aplicación.



Ilustración 6. Aislador eléctrico, [3]

Más adelante se expondrá, más en detalle, esta sección de las líneas de alta tensión ya que el trabajo en cuestión se centra en optimizar el diseño de uno de los elementos que lo forman, los herrajes.

Por último, los apoyos de líneas eléctricas son las estructuras que sostienen los conductores eléctricos a lo largo de la línea de transmisión. La misión de los apoyos es mantener los conductores a una altura suficiente de tierra y separados entre sí para evitar que entren en contacto con objetos cercanos como árboles o edificios.

Los conductores de línea se unen directamente con aisladores y cables de puesta a tierra a las estructuras de soporte o apoyos. Pueden ser de metal, hormigón, madera u otro material adecuado, del mismo tipo o una combinación de los anteriores. El material utilizado debe ser altamente resistente a los distintos efectos atmosféricos. De hecho, si no presentan esta condición por sí mismo, deben ser sometidos a los tratamientos protectores necesarios para tal fin. La estructura de soporte puede ser de cualquier tipo siempre que sea la adecuada para su función. Para ello, se estudiará su diseño constructivo, si todas sus partes son accesibles a los profesionales para facilitar la inspección y el mantenimiento de la estructura. Además, se evitará la presencia de diversas cavidades no drenadas en las que se pueda acumular agua de lluvia.

Existen distintos tipos de apoyos desde apoyos de alineación hasta anclaje pasando por apoyos de ángulo, de fin de línea o especiales. Cada uno de ellos se emplea en diferentes situaciones y atendiendo a distintas características. Según el tipo de cadena de aislamiento y su función en la línea, los apoyos se pueden clasificar en, [8]:

1. Apoyos de suspensión: aquellos que tienen cadenas de aislamiento de suspensión.
2. Apoyos de amarre: aquellos que tienen cadenas de aislamiento de amarre.
3. Apoyos de anclaje: apoyos que emplean cadenas de aislamiento de amarre para, así, proporcionar un punto firme en la línea. En dicho punto, limitará la propagación de esfuerzos longitudinales de carácter excepcional. Este tipo de apoyos tendrán su propia identificación en el plano de detalle del proyecto de la línea.
4. Apoyos de principio o fin de línea: primer o último apoyo de la línea, emplean cadenas de aislamiento de amarre y están destinados a soportar, en sentido longitudinal, las distintas solicitaciones, en uno solo sentido, del haz completo de conductores.
5. Apoyos especiales: aquellos con una función distintas a las definidas anteriormente.



Ilustración 7. Principales tipos de apoyo, [9]

Los tipos definidos anteriormente pueden aplicarse a distintos usos siempre que cumplan con las condiciones de resistencia y estabilidad requeridas por el tipo de trabajo al que se destinen.

Por otro lado, según su posición relativa respecto al trazado de la línea la clasificación es la siguiente:

1. Apoyo de alineación: Apoyo de suspensión, amarre o anclaje usado en un tramo rectilíneo de la línea.
2. Apoyo de ángulo: Apoyo de suspensión, amarre o anclaje colocado en un ángulo del trazado de una línea.

En cuanto al material empleado, los apoyos pueden ser metálicos, de hormigón, de madera u otros. Sin embargo, para poder usar otros materiales en la ejecución de los apoyos, estos deben cumplir con las normas o especificaciones técnicas y su utilización deberá ser aprobada por los órganos competentes de la Administración.

2.3 AISLADORES

2.3.1 ESPECIFICACIONES GENERALES

En esta sección se analiza más en profundidad al tema central del proyecto, los aisladores. Los aisladores en líneas de alta tensión están encargados de sujetar mecánicamente los conductores para que se mantengan aislados de tierra y otros conductores. Deben ser capaces de soportar la carga mecánica que el conductor transmite al apoyo a través de ellos. Además, deben proporcionar aislamiento eléctrico a los conductores de los apoyos, soportando, en condiciones tanto normales como anormales y de sobretensión, la tensión máxima prevista en los estudios de coordinación del aislamiento según su probabilidad de ocurrencia. Esta tensión la soporta tanto el material aislante como su superficie y el aire que rodea el aislador.

Entre las condiciones exigibles a los aisladores para que se puedan emplear en líneas eléctricas, los aisladores deben satisfacer:

- La tensión de perforación: rigidez dieléctrica suficiente para que la tensión de perforación sea lo más elevada posible, [10].

- La tensión de contorneamiento: disposición adecuada de forma que la tensión de contorneamiento presente valores elevados y, por consiguiente, no se produzcan descargas entre los conductores y el apoyo a través de los aisladores, [10].
- Resistencia a las variaciones de temperatura al encontrarse expuesto a las condiciones climáticas.
- Ausencia de envejecimiento a lo largo de la vida útil de la línea.
- Resistencia combinada adecuada frente a los esfuerzos mecánicos, eléctricos y técnicos.

En cuanto a la clasificación de los aisladores según su montaje y disposición, se pueden dividir en:

- a) Aisladores fijos: este tipo de aisladores se encuentran unidos al soporte por un herraje fijo. Por ello, no pueden cambiar de posición una vez se han montado. En la Ilustración 8 se aprecia el montaje de este tipo de aisladores:



Ilustración 8. Aislador fijo [11]

- b) Aisladores en cadena: formados por un número variable de elementos según la tensión de servicio, se disponen como una cadena móvil alrededor de su punto de unión al soporte. Es el tipo más empleado en media y alta tensión. En la siguiente figura (Ilustración 9) se aprecia su montaje:

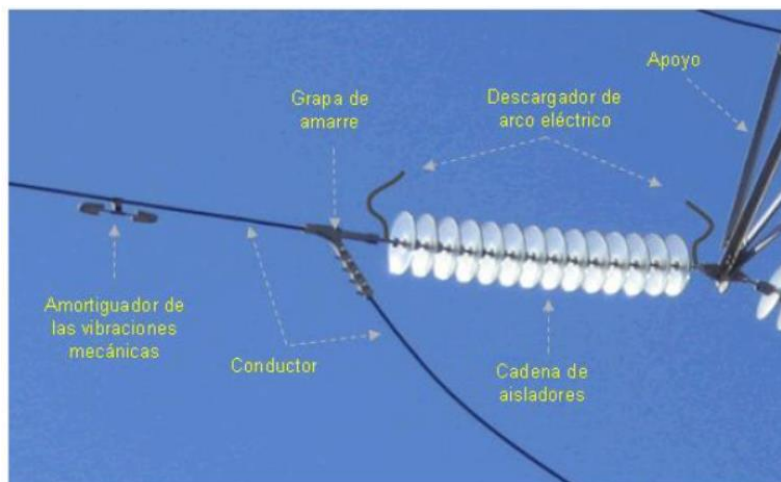


Ilustración 9. Aisladores en cadena [11]

Dentro de los aisladores en cadena, existen diversos tipos:

1. Caperuza-vástago: compuesto por una campana de porcelana o vidrio templado, lleva en su parte interior algunas ondulaciones, en la parte superior, una caperuza empotrada de fundición o acero y en la inferior un vástago sellado.

Se suelen utilizar en entornos con tensiones elevadas ya que su forma alargada permite resistir elevados esfuerzos de flexión y compresión originados por demandas de tensión elevadas.

Además, estos aisladores se pueden colocar en dos disposiciones, en una cadena de suspensión o de amarre (Ilustración 10).

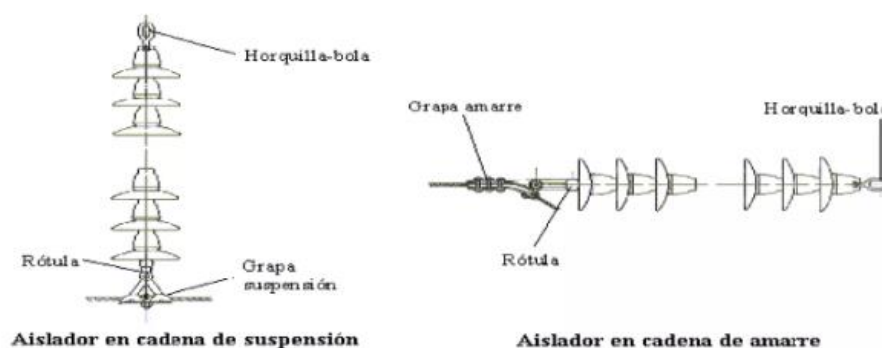


Ilustración 10. Tipos de aisladores en cadena [12]

2. Campana (discos): está constituido por un núcleo cilíndrico de porcelana y recubierto por dos faldas anchas. La unión entre ambos aisladores campana se hace mediante un pequeño vástago cilíndrico.

Se emplean en aplicaciones con tensiones bajas o medias. Además, no suelen encontrar unidos formando una cadena y no de forma aislada.

En la Ilustración 11 se muestra su montaje.



Ilustración 11. Aislador de campana [12]

La principal diferencia entre ambos tipos de aisladores se encuentra en el hecho de que el primero es imperforable durante el servicio, mientras que el segundo puede perforarse antes de ser contorneado, especialmente debido a la acción simultánea de acciones eléctricas y esfuerzos mecánicos.

Por lo general, los aisladores son cadenas de unidades de aisladores tipo caperuza y vástago o tipo bastón y aisladores rígidos de peana o columna. Para su fabricación, se emplean materiales cerámicos (porcelana), vidrio, aislamiento compuesto de goma de silicona, poliméricos u otros materiales con las características necesarias para su función. Además, en algunas líneas aéreas, se pueden usar combinaciones de estos aisladores. Históricamente los materiales más empleados eran la porcelana y el vidrio. No obstante, en los 80 se empezaron a instalar aisladores compuestos. Las condiciones que debe cumplir cualquier material empleado son gran resistencia mecánica y alta resistividad.

Los aisladores de porcelana son especialmente resistentes a la compresión, por lo que, generalmente, se han usado para diseños que tienden a estar

sometidos a grandes esfuerzos de compresión. En países como Alemania o Austria, continúa siendo el material más empleado para líneas eléctricas aéreas.

Por su lado, los aisladores de vidrio destacan por su elevada dureza, resistencia mecánica y estabilidad frente cambios de temperatura. Además, al tener un coste inferior que la porcelana, países como Francia o España los emplean de manera más habitual.

Por último, los aisladores compuestos son una solución eficaz tanto técnica como económicamente, ya que da solución a los problemas de disponibilidad ocasionados por la contaminación del aislamiento.

Para diseñar, seleccionar y ensayar los aisladores es necesario considerar los distintos esfuerzos eléctricos y mecánicos que determinan los parámetros de diseño de la línea aérea. Deben ser capaces de resistir cualquier condición atmosférica, incluso la radiación solar. Además de estar protegidos contra la polución y ser capaces de funcionar incluso bajo esa circunstancia.

No obstante, en ambos casos, la sujeción del aislador al poste se realiza por medio de herrajes.

2.3.2 REQUISITOS

En esta sección se analizan más en profundidad las condiciones que deben cumplir los aisladores y que afectan directamente al futuro diseño de los herrajes empleados.

2.3.2.1 Requisitos eléctricos normalizados

El diseño de los aisladores debe ser tal que respete las tensiones soportadas en las siguientes tablas según su aplicación. Es necesario tener en cuenta las tensiones que pueden aparecer en la red a la cual estos materiales están destinados además de considerar las condiciones ambientales y los dispositivos de protección disponibles.

Estas tablas especifican las tensiones soportadas normalizadas U_w para las gamas I y II. En ambas tablas, las tensiones soportadas normalizadas están agrupadas en niveles de

aislamiento normalizados asociados a los valores de la tensión más elevada del material U_m , [8].

En la gama I, las tensiones soportadas normalizadas incluyen la tensión soportada de corta duración a frecuencia industrial y la tensión soportada a impulso tipo rayo. En la gama II, las tensiones soportadas normalizadas incluyen la tensión soportada a impulso tipo maniobra y la tensión soportada a impulso tipo rayo, [8].

Niveles de aislamiento normalizados para la gama I
(1 kV < $U_m \leq 245$ kV)

Tensión más elevada para el material U_m kV (valor eficaz)	Tensión soportada normalizada de corta duración a frecuencia industrial kV (valor eficaz)	Tensión soportada normalizada a los impulsos tipo rayo kV (valor de cresta)
3,6	10	20 40
7,2	20	40 60
12	28	60 75 95
17,5	38	75 95
24	50	95 125 145
36	70	145 170
52	95	250
72,5	140	325
123	(185) 230	450 550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1 050

Ilustración 12. Nivel de aislamiento para gama I, [8]

Niveles de aislamiento normalizados para la gama II
($U_m > 245$ kV)

Tensión más elevada para el material U_m kV (valor eficaz)	Tensión soportada normalizada a los impulsos tipo maniobra			Tensión soportada normalizada a los impulsos tipo rayo (NOTA 2) KV (valor de cresta)
	Aislamiento longitudinal (nota 1) kV (valor de cresta)	Fase-tierra kV (valor de cresta)	Entre fases (relación al valor de cresta fase-tierra)	
420	850	850	1,60	1 050 1 175
	950	950	1,50	1 175 1 300
	950	1 050	1,50	1 300 1 425

Ilustración 13. Nivel de aislamiento para gama II, [8]

La tensión permanente a frecuencia industrial y las sobretensiones temporales determinan la longitud mínima necesaria de la cadena de aisladores. La forma de los aisladores se seleccionará en función del grado de polución en la zona por donde discurre la línea. En redes con neutro puesto directamente a tierra, con factores de defecto a tierra de 1,3 y menores, es normalmente suficiente diseñar los aisladores para que resistan la tensión fase a tierra más elevada de la red. Para coeficientes de falta a tierra más altos, y especialmente en redes con neutro aislado o puestos a tierra mediante bobina de compensación, puede ser necesario considerar las sobretensiones temporales, [8].

2.3.2.2 Requisitos mecánicos normalizados

Como criterio de fallo, se considerará la pérdida o rotura de sus cualidades aislantes cuando son sometidos de manera simultánea a la tensión eléctrica y la sollicitación mecánica del tipo al que realmente vayan a estar sometidos.

La característica resistente básica será la mínima carga electromecánica garantizada con una probabilidad de aparición inferior al 2%, considerando el valor medio de la distribución menos 2,06 veces la desviación típica, [8].

Si se tiene una cadena múltiple, la resistencia mecánica correspondiente será el producto del número de cadenas que la formen por la resistencia de cada cadena simple, siempre y cuando tanto en estado normal como con alguna cadena rota, la carga esté igual repartida entre las cadenas intactas.

Además, el coeficiente de seguridad no será inferior a 3. Aunque si la carga mínima de rotura se obtuviese por control estadístico en la recepción, el coeficiente se podría reducir a 2,5, [8].

2.3.2.3 Requisitos para el comportamiento bajo polución

La respuesta del aislador cuando el aislador está en un ambiente contaminado a tensiones a frecuencia industrial puede variar considerablemente. El aislador debe soportar la tensión de red más alta en un estado permanente de contaminación con un riesgo aceptable de descargas. Por lo tanto, la elección del tipo de aislador y la longitud de la cadena se realiza teniendo en cuenta el nivel de contaminación al que está sometida la línea.

2.3.2.4 Requisitos de durabilidad

La durabilidad de los aisladores está directamente influenciada por los materiales seleccionados, el diseño y los procedimientos de fabricación. Cualquier material empleado en la construcción de aisladores para líneas aéreas tiene que ser resistente a la corrosión atmosférica ya que puede afectar a su funcionamiento.

Para conocer la durabilidad de las cadenas de aisladores de porcelana o vidrio, se puede usar como indicador los ensayos termo-mecánicos especificados en la norma UNE-EN 60383-1. Para casos especiales podría ser útil y necesario comprobar las características de fatiga a través de los ensayos apropiados especificados en las Especificaciones del Proyecto.

En cuanto a los materiales férreos que no sean de acero inoxidable, deberán ser protegidos contra la corrosión por condiciones climáticas. La manera más empleada es con galvanizado en caliente, pero, además, deberá cumplir con los requisitos de ensayo de la norma UNE-EN 60383-1.

Si las condiciones en las que se instala el aislador son especialmente severas, podría indicarse un aumento del zinc en las especificaciones del proyecto.

2.4 HERRAJES

2.4.1 CARACTERÍSTICAS GENERALES Y TIPOS DE HERRAJES

Los herrajes son un elemento vital para la construcción de líneas de transmisión. Su función es asegurar la durabilidad y con ello, la resistencia del sistema eléctrico y su estructura.

Se trata de dispositivos metálicos galvanizados que tienen como fin la fijación, protección eléctrica o mecánica, reparación, separación y amortiguamiento de vibraciones. Además, se usan para sujetar los conductores y tensarlos, de forma que se ajuste la tensión a la que el conductor está suspendido, [13]. Lo que se busca es la carga sin deformación permanente, que es el valor de carga estática soportada por la pieza para la que no existen alteraciones geométricas o dimensionales que puedan perjudicar el reutilizar el herraje.

Existen dos grandes grupos dentro del tipo de herrajes:

- De alineación: se emplean en zonas de mitad de línea, donde no se requiere gran resistencia a rotura
- De amarre: se colocan en los extremos de la línea para evitar la caída en serie por solicitudes mecánicas.

La siguiente figura (Ilustración 14) muestra los principales herrajes que se encuentran actualmente en el mercado:



Ilustración 14. Tipos de herrajes[11]

Aunque se han distinguido seis herrajes distintos, a continuación, se entrará más en detalle en las grapas de suspensión y amarre ya que son las más empleadas en la industria.

Las grapas de amarre se usan para fijar el conductor y soportar su tensión. Suelen ser de hierro, acero aleación de aluminio. Según su estructura y la condición de instalación, se pueden dividir en dos tipos, [14]:

1. Abulonada tipo pistola: su diseño debe tener una forma adecuada que permita la correcta conformación del conductor cuando ya se ha instalado. El apretado del conductor no puede estar en la parte curva de la grapa.



Ilustración 15. Abulonada tipo pistola, [14]

2. Compresión (retención): este tipo de grapas están fabricadas de una aleación de aluminio de alta calidad y se utilizan para cargas de hasta 500 kV. Son grapas que se encuentran disponibles para todos los tipos de conductores.



Ilustración 16. Compresión (retención), [14]

En cuanto a las grapas de suspensión, se utilizan para colgar o apoyar el conductor en la cadena de suspensión. Normalmente, este tipo de grapa lleva principalmente la carga vertical y no la fuerza de tensión del conductor. Debido a las distintas exigencias de los clientes, existen dos tipos de grapas, [15]:

1. Empernada



Ilustración 17. Empernada, [14]

2. Preformada: son grapas que presentan grandes ventajas en relación a las grapas convencionales superando los constantes problemas mecánicos y eléctricos.



Ilustración 18. Preformada, [14]

Para la grapa de suspensión, los principales requisitos técnicos son la resistencia mecánica y la fuerza de presión en el conductor. Por ello, la grapa debe considerar el conductor y su varilla o armadura y el tipo y estructura deben ser el adecuado para el conductor.

De manera general, los herrajes deben cumplir con los siguientes requisitos de la norma técnica para la aplicación correspondiente:

1. Deben tener en diseño adecuado para la función mecánica y eléctrica de su aplicación
2. Deben estar protegidos contra la corrosión y los contaminantes; para ello, se utilizan técnicas como el galvanizado en caliente.
3. Deben tener superficies lisas y estar libres de bordes agudos que dificulten el acople. Además, no pueden tener cambios bruscos de curvatura que puedan generar puntos de concentración de esfuerzos mecánicos o de gradiente eléctrico. En el caso de líneas de 220 kV o más, deben estar diseñados para no provocar efecto corona.

Por último, será también necesario determinar los requisitos de instalación que afecten al diseño del herraje como los coeficientes de seguridad, las tensiones soportadas o los requisitos ambientales predominantes de la zona donde se vaya a instalar.

2.4.2 NORMAS RELACIONADAS

Para diseñar, fabricar y probar tanto los herrajes como sus componentes, se deberá cumplir con las prescripciones de la versión más actualizada de las siguientes normas, [1]:

IEC 60060	Técnicas para pruebas de <i>alta tensión</i>
IEC 61284	Requirements and test for fittings.
ASTM A-153	Specification for Zinc Coating (Hot-Dip) on Iron and Steel Hardware.
NTC-ISO 2859-1	Sampling procedures for inspection by attributes. Part 1. Sampling schemes indexed by acceptance quality limit (AQL) for lot by lot inspection.

Ilustración 19. Normas herrajes eléctricos, [1]

2.4.3 CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS

2.4.3.1 Materiales

En cuanto a los materiales que se utilizan, a su proceso de fabricación y acabado, deben ser inalterables en el tiempo, clima o cualquier otra condición que pueda mermar su vida útil. Por ello, los materiales utilizados tienen que satisfacer los requisitos normales de servicio, sin mostrar corrosión ni provocarla en cualquiera de las partes restantes del conductor o del cable de guarda. Debe ser capaz de superar el trabajo en frío del material debido a la compresión. Además, los elementos de acero en compresión deben tener una resistencia al impacto suficiente después de la compresión.

Es necesario tener en cuenta que, para elegir los materiales de los herrajes eléctricos, no se pueden poner en contacto materiales cuya diferencia de potencial pueda provocar corrosiones de naturaleza electrolítica. Los materiales férreos, a excepción del acero inoxidable, deben protegerse con galvanizado en caliente. Los requisitos específicos que tienen que cumplir los herrajes eléctricos galvanizados son:

- Soportar grandes cargas de tracción
- Ser de un material compatible con el cable
- Disponerse en la parte superior del apoyo

Las pastas antioxidantes usadas en los empalmes y en las grapas de retención (a compresión o preformadas) deben ser:

- Insolubles en agua
- Químicamente neutras
- Con propiedades anticorrosivas, eléctricas y mecánicas de conexión
- No tóxicos

2.4.3.2 Coeficientes de seguridad

Según la ITC-LAT 07, [8], cuando los herrajes se encuentran sometidos a tensión mecánica por los conductores y cables de tierra o por los aisladores, el coeficiente de seguridad mecánica no puede ser inferior a 3 respecto a su carga mínima de rotura. Si la carga mínima de rotura se comprueba de forma sistemática, mediante ensayos, el coeficiente de seguridad podría reducirse a 2,5.

La carga de rotura mínima será aquella con una probabilidad de que aparezcan cargas de rotura menores inferior al 2%. Para estimar la carga de rotura mínima se puede calcular el valor medio de la distribución de cargas de rotura menos 2,06 veces la desviación típica.

En el caso de las grapas de amarre, la tensión mecánica en el amarre debe ser igual o superior al 95% de la carga de rotura de este sin que se produzca deslizamiento.

2.4.3.3 Diseño y construcción

Para la definición de los herrajes es necesario considerar la resistencia mecánica a tracción determinada por la carga a rotura. Dicho valor se especifica en las tablas de características técnicas. En la Tabla 1, [1], se recogen los valores mínimos de carga de rotura de las grapas y empalmes:

Tipo de herrajes	Porcentaje de la carga mínima de rotura a tracción	
	Rotura	Deslizamiento
Grapa de suspensión para conductor o cable de guarda	60%	25%
Grapa de retención tipo pistola	80%	50%
Grapa de retención tipo compresión	100	90%
Empalme de compresión del conductor o cable de guarda		90%

Tabla 1. Carga mínima de rotura, [1]

La resistencia mecánica de las grapas de suspensión vendrá determinada por la carga de rotura vertical o de deslizamiento, establecidas en la tabla anterior.

Además, a la hora de considerar el diseño válido, para favorecer la movilidad del cable, los contornos y extremidades de la grapa deben tener una curvatura adecuada y no presentar ángulos vivos.

Por otro lado, el apriete del cable tiene que ser circunferencial de tal forma que se minimice la concentración de esfuerzos.

En cuanto al peso de la grapa, también se debe minimizar, así como, el momento de inercia de la grapa con relación a su eje de suspensión.

En el presente proyecto, la grapa que se va a modelar es una grapa de suspensión para cable de guarda (Ilustración 20, Ilustración 21).

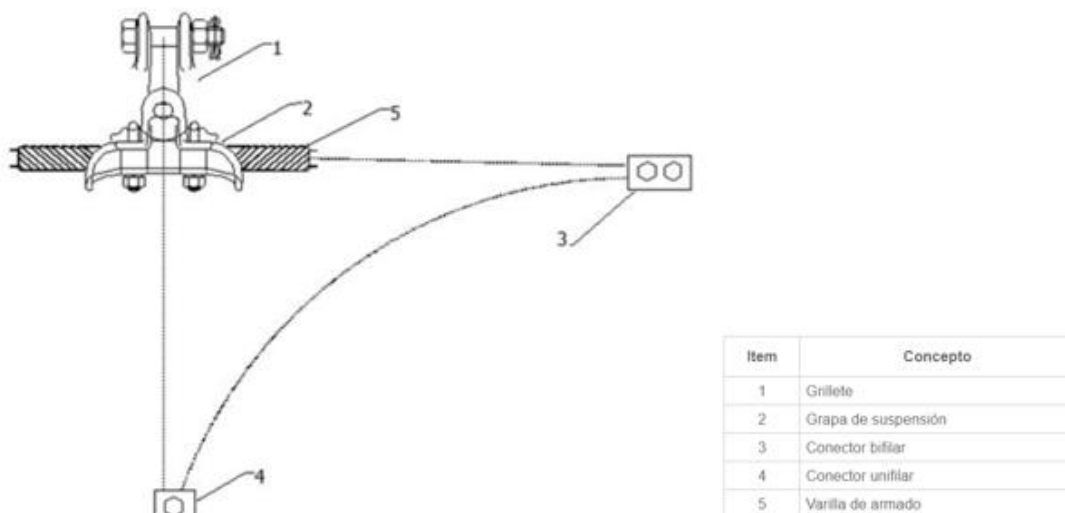


Ilustración 20. Grapa de suspensión para cable de guarda, [1]

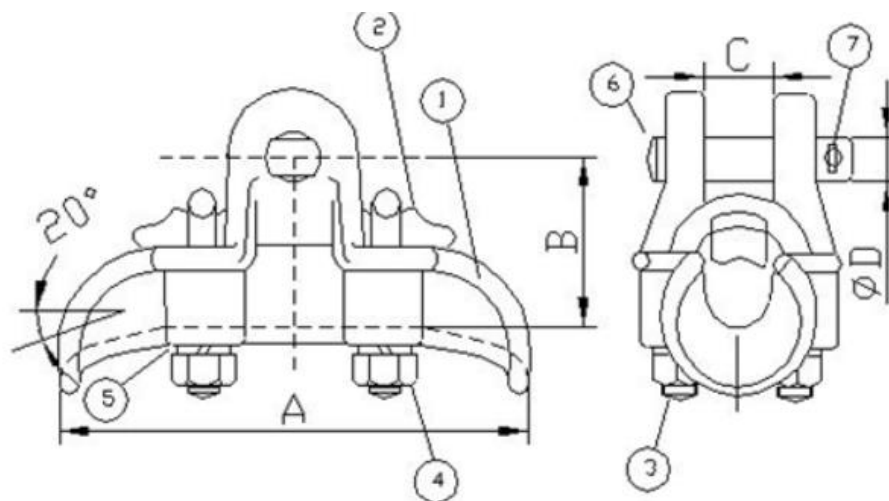


Ilustración 21. Detalle grapa, [1]

En la siguiente tabla (Tabla 2) se recogen los requerimientos que debe garantizar este tipo de herraje:

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	SOLICITADO
Norma de construcción y ensayos	-	IEC 61284
Tensión Nominal	kV	115
Carga de rotura conjunto	kN	70
Corriente de cortocircuito	kA	14

Tabla 2. Requerimientos grapa de suspensión, [1]

No obstante, dependiendo del tamaño de la grapa la carga de deslizamiento y rotura mínima difieren. Por ello, a la hora de determinar el diseño final será necesario decidir el tipo de conductor que irá sujeto a la grapa. La Tabla 3 muestra las distintas opciones de conductores a los que irá sujeta la grapa.

Conductor				
Tipo		ACSR	ACSR	AGSR
Calibre		336,4 MCM	605 MCM	1113 MCM
Diámetro	mm	18,31	24,21/24,8	31,98
Carga de deslizamiento mínima	kg-f	1600	2442	3385
Carga de rotura mínima	kg-f	3840	5862	8124

Tabla 3. Solicitaciones del conductor, [1]

2.4.4 ENSAYOS DE MONTAJE

Una vez se tenga el herraje final fabricado, es necesario comprobar su geometría, montaje y su resistencia a las condiciones de trabajo tanto rutinarias como extremas.

2.4.4.1 Ensayos electrotérmicos

A los conjuntos completos se les realizarán los ensayos indicados para determinar la influencia de todos los accesorios sobre las cadenas.

Las muestras se prepararán siguiendo la Norma VDE 0212.

Los ensayos serán:

- Tensión de descarga a frecuencia industrial en seco y bajo lluvia (Norma IEC 60383 e IEC 60060)
- Tensión crítica de impulso de 50% para las polaridades positivas y negativas (Norma IEC 60383 e IEC 60060)
- Tensión resistida a los impulsos atmosféricos en seco positivos y negativos, mediante una onda de 1,2/50 μ s (Norma IEC 61383 e IEC 60060)

2.4.4.2 Ensayos de Efecto Corona y Radiointerferencias

Estos ensayos deben seguir los procedimientos y recomendaciones establecidas en el capítulo 6 de la norma IEC 61284.

2.4.4.3 Calentamiento

Para asegurar el funcionamiento eléctrico durante un largo periodo de tiempo es necesario realizar este ensayo de tipo en los herrajes conductores de corriente. En este caso, los procedimientos y recomendaciones se tomarán del capítulo 13 de la norma IEC 61284.

2.4.4.4 Inspección visual y control dimensional

Será necesario verificar que las piezas están compuestas por todos los elementos determinados en los planos aprobados, además, de no observarse imperfecciones superficiales como grietas, rebabas, grumos o rechupes ya que son incompatibles con la terminación superficial garantizada.

Además, se comprobará que la pieza cumpla con las dimensiones y tolerancias aceptadas en los planos aprobados.

2.4.4.5 Ensayos mecánicos

Se realizarán las siguientes pruebas:

- Ensayos de Resistencia Mecánica para elementos de acople con las cadenas o aisladores poliméricos: los herrajes galvanizados se someten al 60% de su carga de rotura nominal durante 1 minuto. Transcurrido este tiempo, se examinan y se rechazan aquellos que presentan deterioros en el galvanizado o deformaciones permanentes. Finalmente, la carga se aumenta hasta rotura
- Verificación de carga de deslizamiento y rotura de las grapas de suspensión, retención y empalmes: Para verificar el deslizamiento, se aplica de manera gradual, carga hasta llegar al valor de deslizamiento y se mantiene durante 1 minuto. Una vez finalizado el ensayo, la pieza no puede presentar ninguna deformación.

Posteriormente, se comprobará la carga de rotura. Se comienza aplicando una carga equivalente al 80% de su carga de rotura nominal durante 1 minuto. Se examinan y se rechazan las que presenten deformaciones. A continuación, se aumenta la carga hasta rotura y se comprueba que cumpla con la Tabla 1.

- Se realizarán dos medidas de la longitud de la grapa, una antes y otra después del ensayo. Se admitirá una tolerancia del 2% respecto a la longitud inicial
- Par de apriete de tornillos y/o bulones: se aplicará un momento torsor del 200% del par de apriete nominal. Una vez finalizado del ensayo, se comprobará que no haya daños apreciables a simple vista y que no se produzcan deformaciones que impidan el desmontaje del herraje.

Capítulo 3. METODOLOGÍA

La optimización topológica suele ser de los últimos pasos en el proceso de diseño, cuando se requiere que la pieza tenga un peso menor o utilice menos materiales.

Lo primero es establecer los parámetros fundamentales que determinan las condiciones de trabajo de la pieza como las cargas aplicadas, el tipo de material, las limitaciones del modelo y su organización en el espacio. Es necesario establecer el espacio de diseño mínimo permisible para optimizar la forma del objeto. Con dicha información, de forma virtual, el software aplica presión sobre el diseño desde diferentes ángulos y así, pone a prueba su integridad estructural e identifica el material innecesario.

El método de elementos finitos (MEF), es la técnica más empleada y práctica en la optimización topológica. El MEF tiene en cuenta el diseño geométrico para el mínimo espacio permitido y procede a dividir el diseño en distintas partes. A continuación, pone a prueba cada elemento finito para definir su conformidad, rigidez y el material innecesario. Por último, reconstruye la pieza para finalizar el diseño completo.

Para validar el modelo es necesario definir un umbral entre 0 y 1 para el campo de densidad de los elementos. El 0 convierte en vacío el material de una región designada. El 1, por su lado, identifica la región designada como material sólido. De esta forma, el diseñador ya puede eliminar el material redundante y así finalizar la parte de optimización topológica.

Es importante destacar que, antes de la fabricación aditiva, se descartaban muchos de los diseños propuestos por la optimización topológicas ya que fabricarlas no era factible y su potencial quedaba sin realizarse.

3.1 INGENIERÍA INVERSA

Hoy en día, la ingeniería inversa es un enfoque válido para crear o recrear nuevos productos basados en productos existentes, incluso aquellos que pueden estar obsoletos.

Permite copiar modelos sin la necesidad de tener planos y también se utiliza para evaluar la conformidad de modelos CAD 3D con los modelos originales o realizar pruebas de fabricación, [16].

Aunque los modernos sistemas de CAD simplifican el proceso de diseño de productos, es necesario desarrollar nuevas aplicaciones que permitan obtener diseños confiables y funcionales, al mismo tiempo que reducen los tiempos de diseño. Esto se hace con el objetivo de minimizar el aumento de los costos de fabricación.

Aunque se cree comúnmente que la ingeniería inversa surgió en el siglo XVIII con la aparición del sistema de fábrica, en realidad ha existido desde los albores de la humanidad. Desde el momento en que los seres humanos comenzaron a fabricar objetos como ruedas, carruajes e infraestructuras arquitectónicas, se utilizó la ingeniería inversa, aunque en sus formas más rudimentarias. Consistía en tomar las dimensiones del objeto, ya sea en su totalidad o por partes, y reconstruirlo.

Un ejemplo de ello es el ejército romano, que, sin tener una armada permanente hasta después de la Primera Guerra Púnica, aplicó ingeniería inversa a un quinquerreme cartaginés en el año 264 a.C. Gracias a la notable inventiva de los romanos, lograron crear y optimizar una flota de 300 barcos en tan solo 3 meses, superando tanto en número como en maniobras navales intrincadas a los cartagineses.

A lo largo del tiempo, las técnicas de ingeniería inversa han evolucionado enormemente. Si bien inicialmente se aplicaba en contextos militares, actualmente se utiliza en una amplia variedad de campos, incluyendo la fabricación.

A lo largo de los años, los fabricantes han utilizado diversas tecnologías para adquirir medidas de un objeto e importarlas al software CAD para el modelado en 3D.

Máquinas de medición por coordenadas (MMC), sistemas de sonda y brazos articulados montados en robots han sido ampliamente utilizados en la ingeniería inversa, eliminando los problemas asociados con los métodos manuales. La elección de una tecnología de medición en 3D sobre otra depende de los niveles de tolerancia

requeridos, la densidad y velocidad de los datos, las características de la pieza, la línea de visión y la facilidad de uso del dispositivo.

En la actualidad, los fabricantes cada vez más utilizan escáneres 3D portátiles para la ingeniería inversa. ¿Por qué? Estos escáneres generan resultados altamente precisos, confiables y repetibles, al igual que las tecnologías mencionadas anteriormente, pero con una mayor velocidad. Además, son fáciles de usar para operadores de cualquier nivel de habilidad y los datos 3D de una pieza se pueden adquirir directamente en el taller.

Para los fabricantes, la ingeniería inversa es un proceso crucial con diversos usos comunes. Frecuentemente, se recurre a la ingeniería inversa cuando hay conocimiento limitado sobre la ingeniería de una pieza, falta documentación original o no se dispone de esquemas/modelos CAD en 2D o 3D. Es especialmente importante cuando la información de diseño de una pieza se encuentra únicamente en papel o se basa en la memoria humana.

Las empresas también recurren a la ingeniería inversa cuando las piezas de repuesto de un fabricante de equipos originales (OEM) no están disponibles, ya sea porque el OEM ya no las produce o porque el OEM ya no existe.

La ingeniería inversa también se utiliza para optimizar ensamblajes para la producción y mejorar productos con nuevas características. Además, los fabricantes emplean técnicas de ingeniería inversa para mejorar una pieza que está presentando fallas o reproducir piezas o conjuntos hechos a mano. En ocasiones, la ingeniería inversa se utiliza simplemente para crear un archivo digital de piezas o crear un entorno virtual para referencias futuras.

La ingeniería inversa ofrece beneficios significativos al reducir los riesgos asociados con productos heredados y productos vulnerables. Permite la reproducción de piezas de repuesto y la detección y corrección de fallos en los productos. Además, la ingeniería inversa impulsa la innovación de productos al permitir a los equipos de ingeniería explorar diseños existentes en busca de oportunidades para mejorar el rendimiento, características y reducir los costes de producción.

Los fabricantes aprovechan la ingeniería inversa para una producción ágil de piezas en lugar de depender de proveedores OEM con plazos de entrega largos y costos elevados.

La ingeniería inversa también es una estrategia clave en el plan de mantenimiento proactivo de los fabricantes. Al realizar ingeniería inversa de componentes críticos antes de que falle, los fabricantes pueden tener piezas de repuesto disponibles, reduciendo así los tiempos de inactividad no planificados.

Son diversos los sectores donde se aplica la ingeniería inversa para optimizar la producción, obtener una ventaja competitiva y reducir costes. Las industrias que más aplican esta metodología se encuentran, la aeroespacial, automotriz, las empresas de utillaje, los bienes de consumo o la conservación de arte y patrimonio.

Antes de iniciar un proyecto de ingeniería inversa, es crucial que el fabricante defina sus necesidades específicas. Esto implica decidir si se desea reproducir un componente exactamente como está construido, incluyendo fallos y desgaste, con el propósito de analizar problemas o reproducir una herramienta existente. También se puede optar por comprender la intención del diseño, creando un modelo 3D perfecto y corrigiendo todos los parámetros del objeto.

Una vez definidas las necesidades, se elige la tecnología de medición 3D más adecuada según la aplicación y el entorno. En este caso, supongamos que se utiliza un escáner 3D portátil. Se prepara la pieza para el escaneo y se capturan todas sus dimensiones. Luego de escanear completamente la pieza, se importa el archivo STL resultante a un software de escaneo a CAD, como VXmodel, para realizar el proceso de postratamiento. Este proceso implica la limpieza, reparación y refinamiento de los datos, así como la división del objeto en regiones y formas para facilitar la construcción del modelo 3D y su alineación en el sistema de coordenadas adecuado. El archivo STL actualizado se importa a un software CAD con herramientas de ingeniería inversa, donde un experto en ingeniería inversa o un diseñador industrial puede crear el modelo 3D fiel a la realidad, realizar modificaciones y, de ser necesario, integrarlo en un ensamblaje.

Para evaluar el modelo 3D, se puede producir un prototipo utilizando una impresora 3D. Si es necesario, se continúa trabajando en el modelo hasta obtener el resultado deseado.

Una vez creado el modelo 3D ideal, el fabricante puede proceder a fabricar la pieza, ya sea en una producción única o por lotes.

La siguiente imagen resume el flujo de trabajo aplicando ingeniería inversa en comparación con el método tradicional de fabricación:

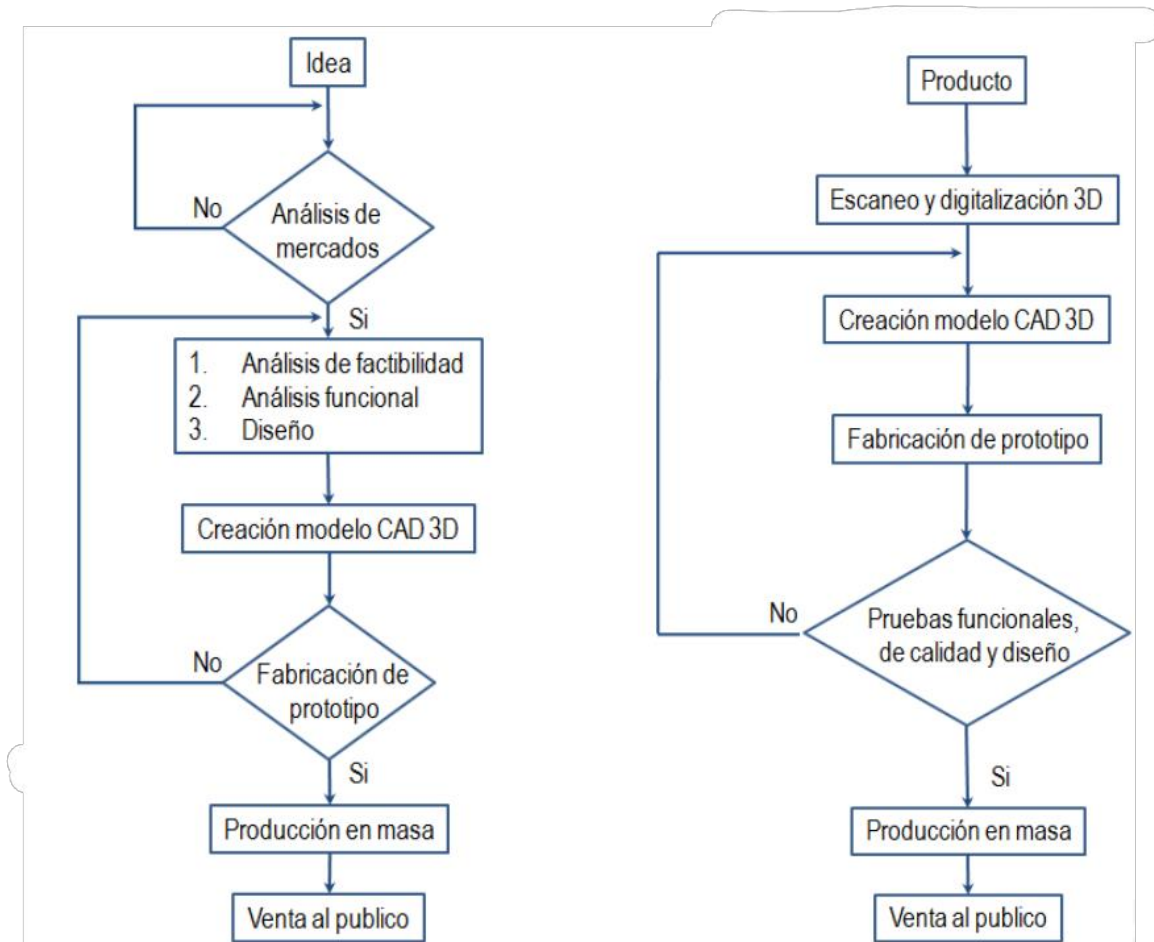


Ilustración 22. Diseño tradicional vs Ingeniería inversa, [16]

El futuro de la ingeniería inversa parece prometedor y lleno de posibilidades. A medida que sigan surgiendo avances tecnológicos tanto en equipos de medición 3D como en software de ingeniería inversa, los procesos de ingeniería inversa se volverán más eficientes y sofisticados. Los fabricantes buscarán aprovechar estas mejoras para aumentar la efectividad de sus productos, desarrollar nuevas soluciones y mejorar sus procesos de producción y resultados finales.

La importancia de la ingeniería inversa en la industria manufacturera es indiscutible, ya que abre las puertas a una innovación sin precedentes.

En el caso del proyecto realizado, se ha aplicado la ingeniería inversa para obtener a partir de un herraje real un modelo en CAD. De esta forma se ha obtenido un modelo al que ya se puede aplicar el diseño generativo y la simulación FEM para optimizar la geometría tradicional de la pieza.

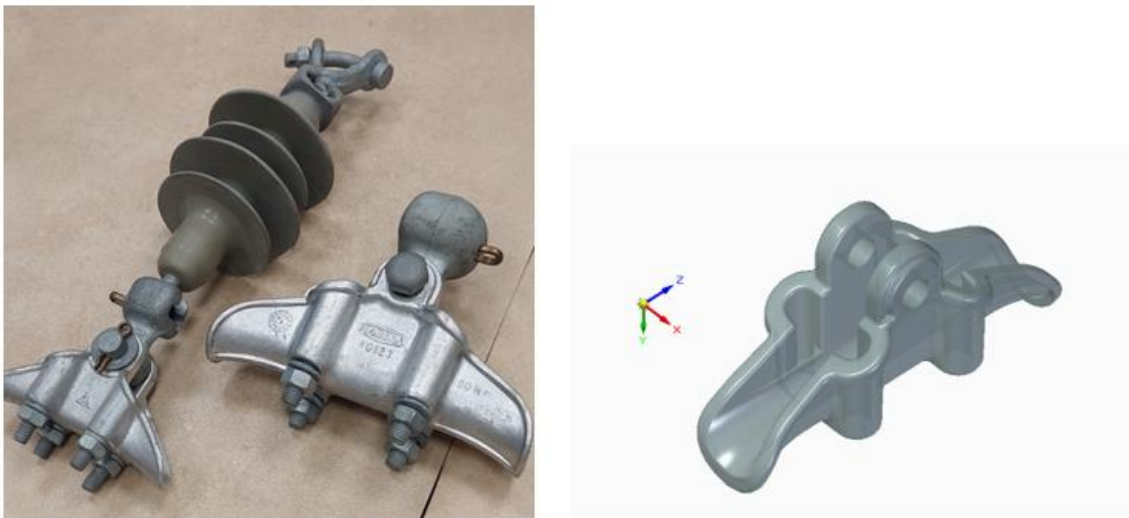


Ilustración 23. Pieza real vs Modelo 3D. Fuente: elaboración propia

3.2 DIAGRAMAS DE FLUJO

En esta sección se van a exponer los distintos diagramas de flujo que se van a seguir para la obtención de una pieza final optimizada y que cumpla con las restricciones de diseño.

3.2.1 DISEÑO PIEZA 3D

Este primer diagrama muestra el proceso de diseño en su totalidad para más tarde entrar en detalle en la parte de diseño generativo o de simulación FEM.

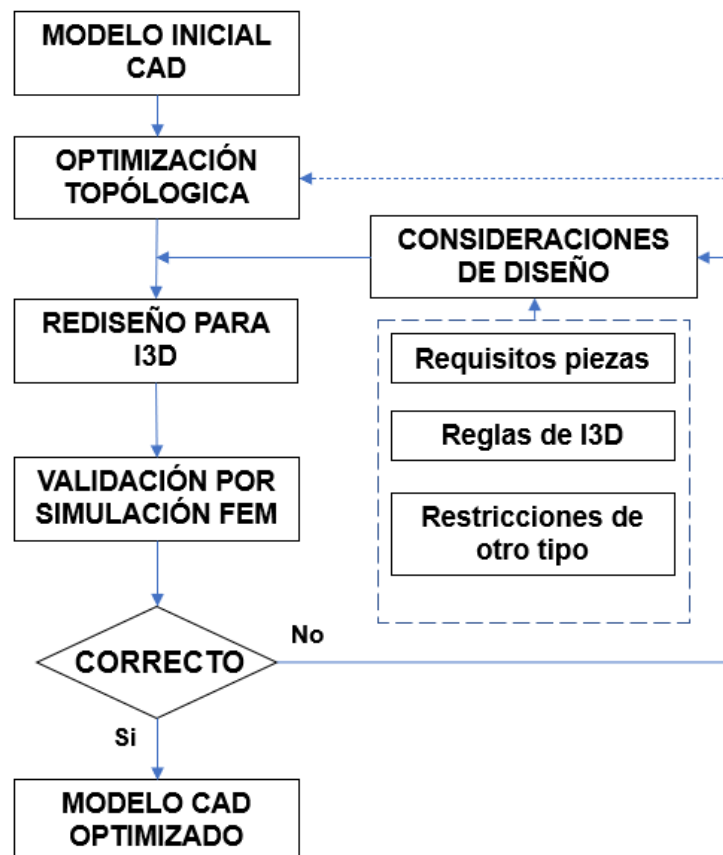


Ilustración 24. Diagrama de flujo Diseño 3D. Fuente: elaboración propia

3.2.2 DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo es un procedimiento que busca la manera más efectiva considerando el material, las limitaciones y las fuerzas preestablecidas. Este enfoque, también llamado "optimización de la topología", trasciende los métodos tradicionales de modelado asistido por computadora y produce formas que imitan la naturaleza de manera impresionante.

En el diseño convencional, normalmente se generan diversos conceptos y luego se evalúa y optimiza uno o más de ellos en función de los objetivos de diseño establecidos.

Por otro lado, el diseño generativo parte de los objetivos de diseño y utiliza algoritmos para generar y optimizar automáticamente opciones de diseño que los cumplan. Este

enfoque permite crear múltiples iteraciones de diseños e identificar opciones que satisfagan las necesidades específicas, como la reducción de peso, por ejemplo. Con frecuencia, este proceso da como resultado formas orgánicas similares a las que se encuentran en la naturaleza.

El diseño generativo tiene como objetivo la creación de modelos que cumplan con los objetivos de diseño y se adapten a las limitaciones mediante el uso de componentes más ligeros y un consumo mínimo de material. Este proceso tiene el potencial de impulsar la innovación al eliminar ideas preconcebidas sobre cómo debería ser un diseño y generando formas optimizadas para su propósito específico. El usuario solo necesita guiar el software en el entorno de trabajo mediante la definición de entradas o puntos fijos, cargas y materiales.

En la siguiente imagen se muestra el diagrama de flujo que se va a seguir para aplicar el diseño generativo a la optimización topológica del herraje seleccionado:

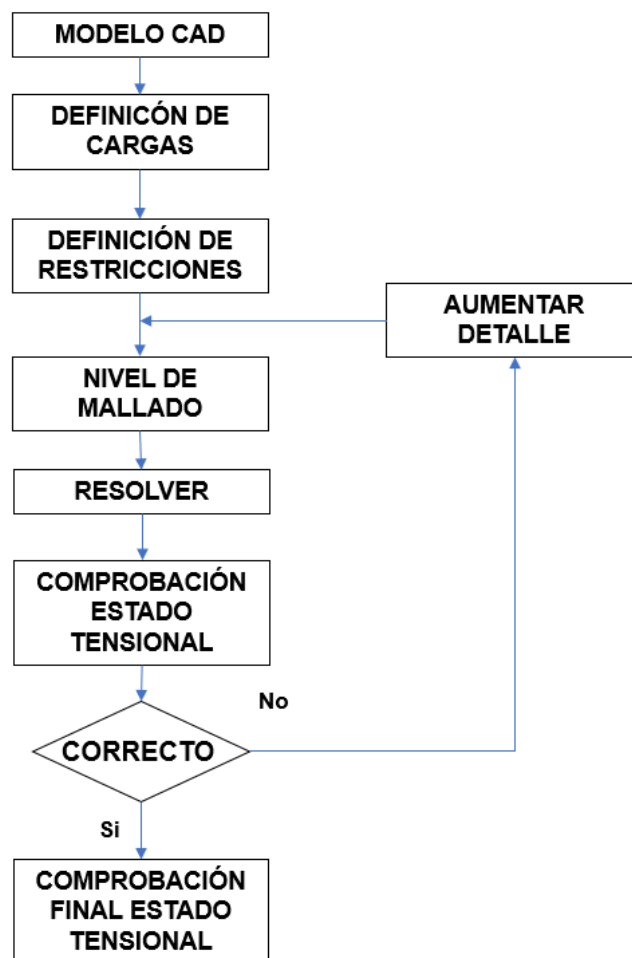


Ilustración 25. Diagrama de flujo Diseño Generativo. Fuente: elaboración propia

3.2.3 SIMULACIÓN FEM

La simulación FEM (Método de Elementos Finitos, por sus siglas en inglés Finite Element Method) es una técnica de análisis numérico utilizada para resolver problemas de ingeniería y ciencia que implican el comportamiento de estructuras y sistemas físicos complejos.

En la simulación FEM, se divide el dominio o estructura en pequeños elementos finitos. Estos elementos son segmentos geométricos simples, como triángulos o cuadriláteros en el caso de problemas bidimensionales, o tetraedros o hexaedros en el caso de problemas

tridimensionales. Estos elementos se conectan en nodos, que son los puntos donde se calculan las propiedades y las variables del sistema.

El primer paso en la simulación FEM es discretizar el dominio en elementos finitos. Se definen las propiedades del material, como la rigidez, la conductividad térmica o la permeabilidad magnética, y se asignan a cada elemento. Además, se establecen las condiciones de contorno, que pueden incluir fuerzas aplicadas, temperaturas fijas o desplazamientos prescritos.

Luego, se formulan las ecuaciones que describen el comportamiento del sistema en función de las propiedades del material y las condiciones de contorno. Estas ecuaciones pueden ser ecuaciones de equilibrio estructural, ecuaciones de transferencia de calor, ecuaciones de flujo de fluidos, entre otras, dependiendo del tipo de problema que se esté resolviendo.

Una vez formuladas las ecuaciones, se procede a discretizarlas utilizando técnicas matemáticas y se obtiene un sistema de ecuaciones algebraicas. Este sistema se resuelve utilizando métodos numéricos, como el método de eliminación de Gauss, para obtener los valores de las variables desconocidas en los nodos, como desplazamientos, temperaturas o presiones.

El resultado de la simulación FEM es una solución aproximada del problema original, que proporciona información detallada sobre el comportamiento y las propiedades del sistema en estudio. Esto incluye distribuciones de tensiones, deformaciones, temperaturas, campos de flujo, entre otros.

La simulación FEM se utiliza ampliamente en diversas áreas de la ingeniería, como la mecánica estructural, la ingeniería civil, la ingeniería eléctrica, la ingeniería térmica y la ingeniería de fluidos. Permite analizar y optimizar diseños, evaluar el rendimiento de sistemas y predecir el comportamiento en diferentes condiciones y cargas antes de su construcción o fabricación.

En la siguiente imagen se muestra el diagrama de flujo que se va a seguir para aplicar la simulación FEM a la optimización topológica del herraje seleccionado:

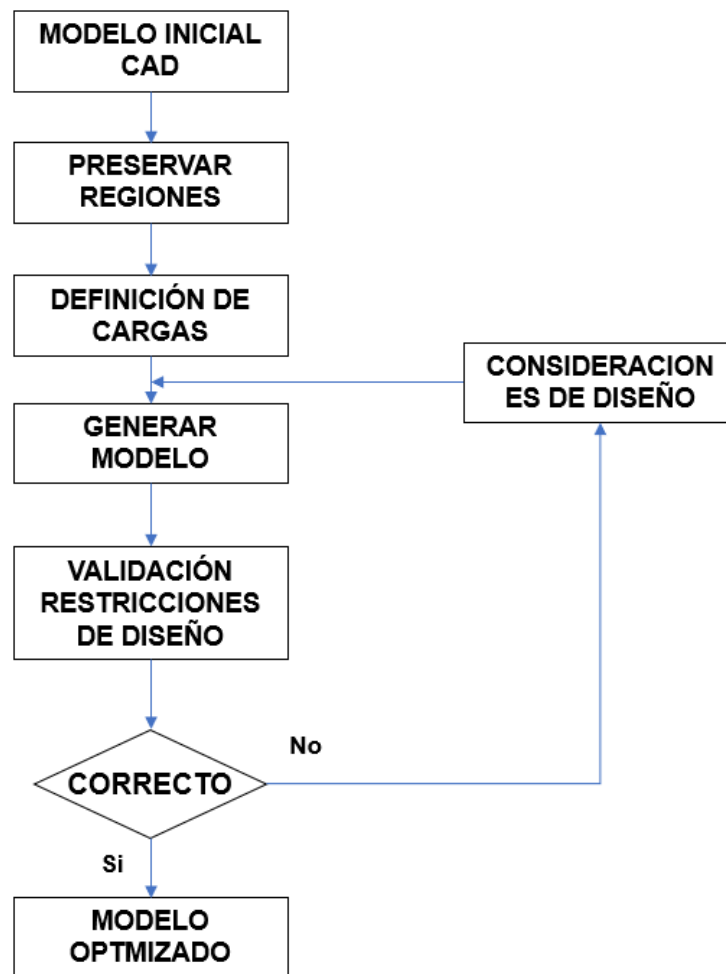


Ilustración 26. Diagrama de flujo Simulación FEM. Fuente: elaboración propia

Capítulo 4. IMPLANTACIÓN

4.1 *SIMULACIÓN FEM DE LA PIEZA ORIGINAL*

Antes de comenzar con la optimización de la pieza, se hizo un estudio estático para entender cómo se comportaba dicho elemento ante los esfuerzos sufridos. De esta forma, se entiende mejor como se deformaría la pieza y donde se encuentran los puntos más débiles de la estructura.

Para ello, después de aplicar ingeniería inversa a la pieza para poder sacar un modelo en CAD, se ha realizado la simulación del estado tensional de la grapa.

En la siguiente imagen se observa el modelo de Solid sobre el que se va a realizar todo el estudio.

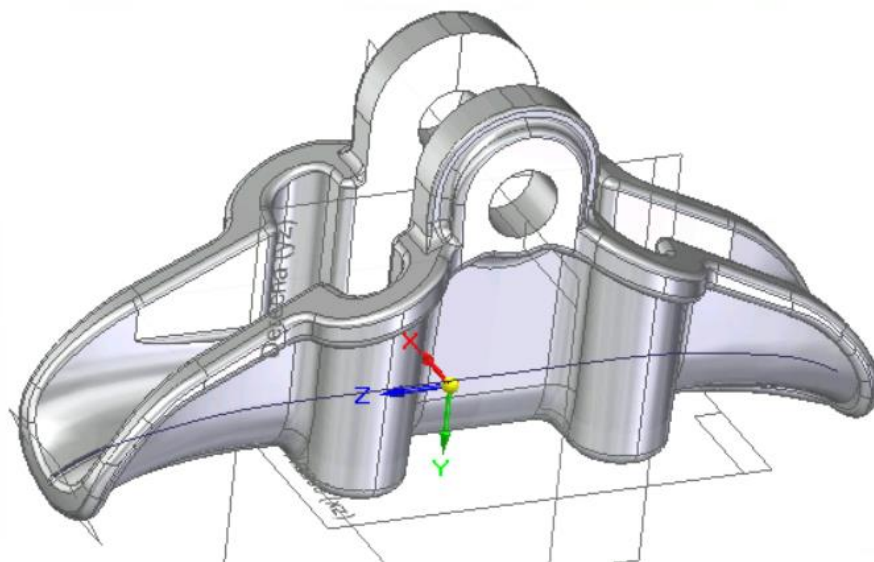


Ilustración 27. Modelo CAD de la grapa. Fuente: elaboración propia

Además, antes de comenzar con el estudio, se tuvo que seleccionar el material de diseño. En este caso, se ha decidido utilizar un aluminio 1060 ya que es el que se tiene en el laboratorio. Las características de dicho material se resumen a continuación:

5.1 Aluminio 1060, plancha estriada

Propiedad	Valor
Densidad	2712,000 kg/m ³
Coefficiente de expansión térmica	0,0000 /C
Conductividad térmica	0,221 kW/m-C
Calor específico	920,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	68947,570 MPa
Coefficiente de Poisson	0,330
Límite elástico	27,579 MPa
Tensión de rotura	68,948 MPa
% de elongación	0,000

Ilustración 28. Aluminio 1060. Fuente: Solid Edge

Aplicando dicho material a la pieza, las características finales de la grapa serían las siguientes:

Nombre del sólido	Material	Masa	Volumen	Peso
fig_v3_est.par	Aluminio 1060, plancha estriada	0,564 kg	207938,810 mm ³	5526,515 mN

Ilustración 29. Características grapa. Fuente: Solid Edge

Como ya se ha analizado con antelación, una grapa de suspensión se utiliza en líneas de alta tensión para suspender y soportar conductores eléctricos. La principal función de una grapa de suspensión es proporcionar un punto de fijación seguro y confiable para el conductor eléctrico. Estas grapas están diseñadas específicamente para resistir las cargas mecánicas generadas por el propio peso del conductor, así como las fuerzas dinámicas causadas por el viento y otros factores ambientales.

Este trabajo se va a centrar en las cargas debidas al peso del conductor. Por ello, para simplificar la acción de dicha fuerza, se va a suponer un valor de carga vertical a lo largo del eje central de la grapa como se muestra en las siguientes imágenes.

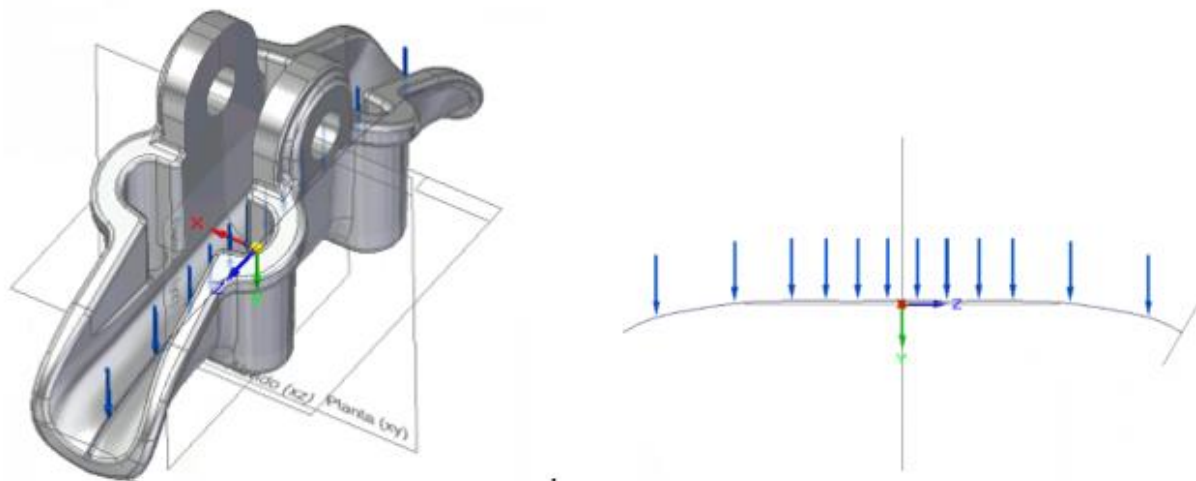


Ilustración 30. Diagrama de cargas. Fuente: elaboración propia

Para seleccionar el valor de la carga, se ha partido de la carga máxima de rotura obtenida de la literatura. En la sección 2.4.3.3, se especifica que para una grapa de suspensión como la del proyecto, y siguiendo la norma IEC 61284, la carga de rotura del conjunto es de 70 kN.

El siguiente paso ha sido añadir las restricciones que simulen el estado real de funcionamiento del herraje.

Cuando se coloca la grapa de suspensión en la línea eléctrica, se mantiene fija a través de un tornillo pasante que atraviesa ambos agujeros del herraje. Por ello, para simular dicho comportamiento, se ha añadido la restricción de punto fijo a la simulación. En la Ilustración 31, se ve como el agujero por el que va el tornillo se ha limitado su movimiento.

De esta forma, la pieza tiene las cargas y restricciones necesarias para simular su estado tensional. De hecho, al hacerse con la carga de rotura, se está simulando el caso máximo de funcionamiento del herraje.

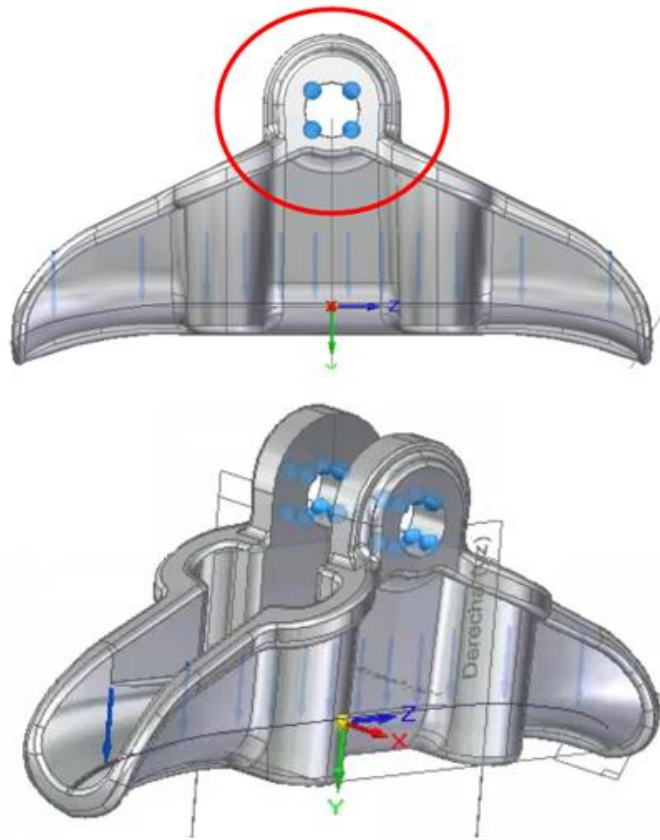


Ilustración 31. Restricción de punto fijo. Fuente: elaboración propia

Una vez establecidas las condiciones de contorno, se realizó el mallado de la pieza. No obstante, al ser una pieza con mucho nivel de detalle ha sido necesario redondear algunas zonas para poder obtener un mallado óptimo.

En la siguiente imagen se resumen las características de la malla. Se ha elegido un mallado basto ya que más nivel de detalle no era viable con la geometría de la pieza. Para el tamaño subjetivo de la malla se ha dejado el valor predeterminado de 3,22 mm.

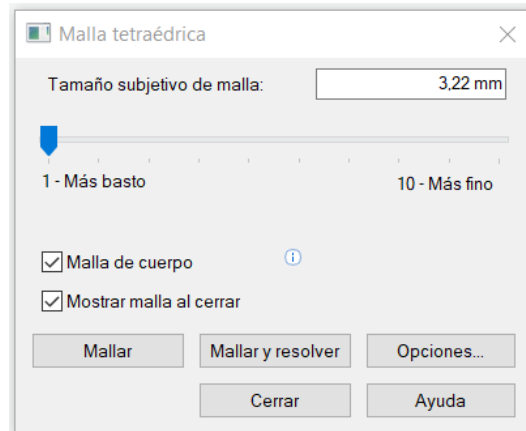


Ilustración 32. Características del mallado. Fuente: Solid Edge

Con dichos parámetros, se obtuvo el siguiente mallado de la pieza:

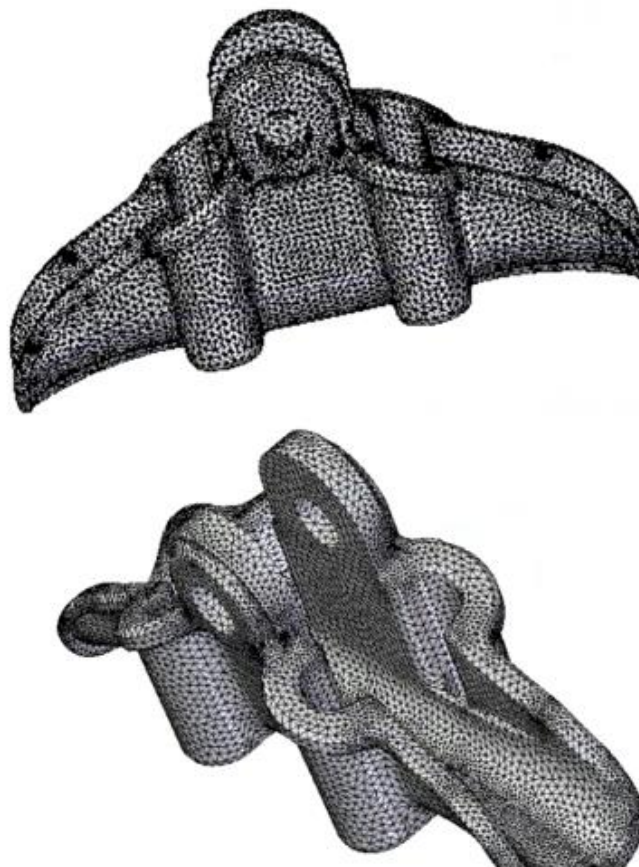


Ilustración 33. Mallado de la grapa. Fuente: elaboración propia

El último paso del estudio estático fue la resolución de la malla. De esta manera se analiza el estado tensional ante las cargas introducidas y se determinan las condiciones que debe cumplir el diseño obtenido por optimización topológica.

Sabiendo cómo se comporta la pieza real, ya se puede aplicar el diseño generativo teniendo en cuenta los resultados de tensión.

En la siguiente imagen se observa cómo se comporta la pieza y cuáles son las zonas donde más tensión se concentra. Además, se lee la tensión máxima de Von Mises, $1.13e+3$ MPa. Este valor marca el límite tensional que debe cumplir la nueva geometría propuesta.

fig_v3_est.par, Estudio estático 1, Aluminio 1060, plancha estriada
Tensión - Elemental
Contorno: Tensión de Von Mises
Deformación: Traslación total
Fecha: miércoles, 7 de junio de 2023 10:16

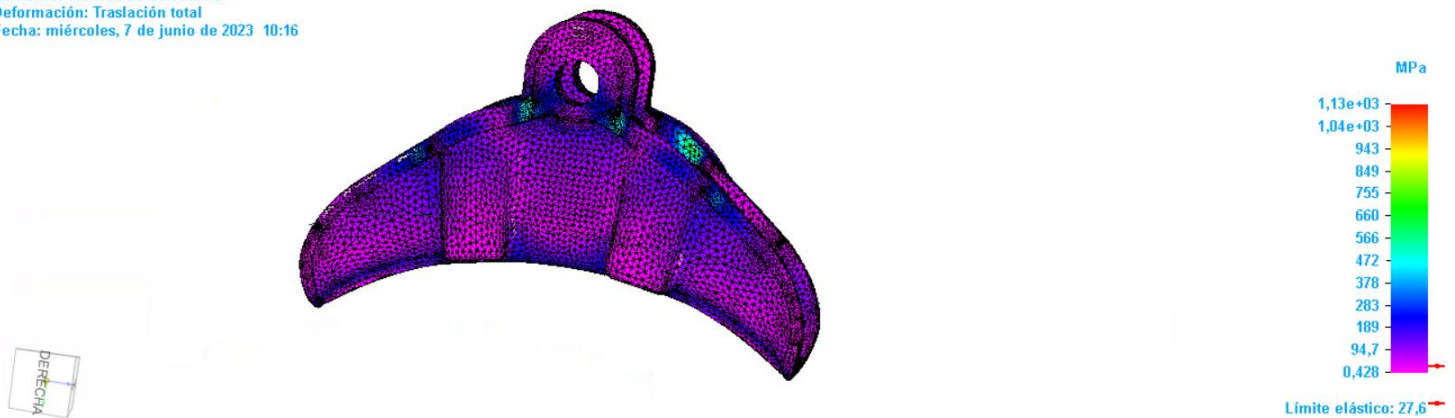


Ilustración 34. Resultado estudio estático. Fuente: elaboración propia

Se incluye con más detalle las zonas más sufridas y que más riesgo tienen a fracturarse. Por ello, habrá que prestar especial atención a dichas partes para que no se elimine material en exceso y deje de cumplir con las condiciones de trabajo.

Como se observa en la imagen, las zonas más estresadas se encuentran en el soporte de los 4 tornillos que van perpendiculares a los cables de la línea.

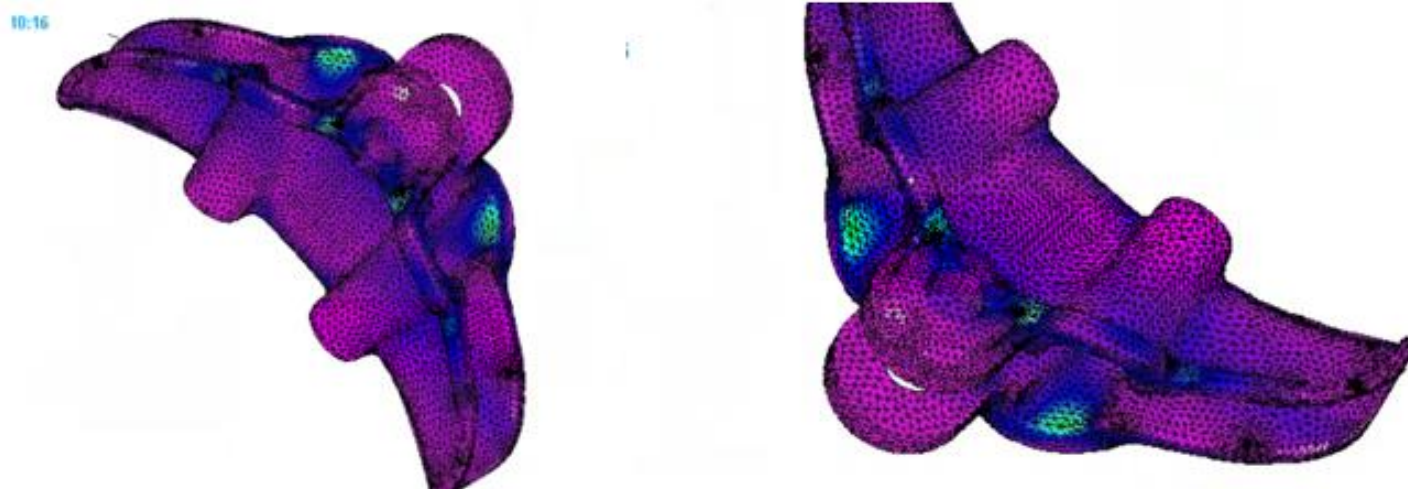


Ilustración 35. Detalle estudio estático. Fuente: elaboración propia

4.2 APLICACIÓN DEL DISEÑO GENERATIVO

En esta fase del proceso, se ha llevado a cabo la iteración de la pieza original hasta obtener la máxima reducción de masa que permite mantener las condiciones de trabajo límite definidas con anterioridad.

Para poder aplicar el diseño generativo es necesario definir primero aquellas secciones que deben sufrir alteración, ya sea porque van atornilladas, unidas a otras piezas o porque reducir masa en dichas zonas puede suponer peligro de rotura.

En este caso, las primeras regiones preservadas han sido, el agujero central por el que va sujeto el herraje a la torre de alta tensión y los agujeros para los tornillos que permiten tener la grapa fija a la línea eléctrica. De esta forma, se asegura que dichas zonas, cuando se realice la optimización de material, no sufran modificaciones y sigan permitiendo el enganche con las otras piezas.

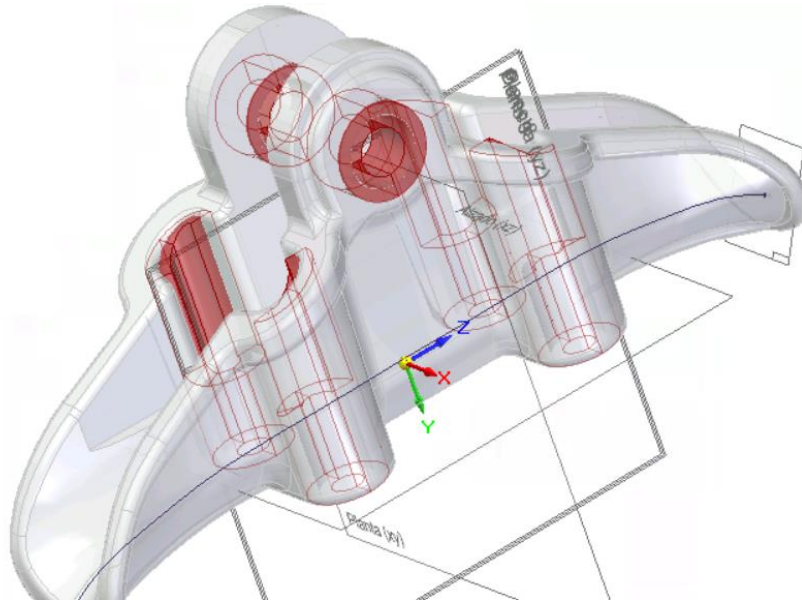


Ilustración 36. Regiones preservadas: agujeros. Fuente: elaboración propia

Otra sección que se ha decidido no modificar, ha sido la forma exterior del agujero central. De primeras, esta limitación no se añadió y la optimización eliminaba demasiado material de la zona superior haciendo que limitase mucho las condiciones de trabajo y convirtiéndolo en una zona clara de rotura.

Por ello, se decidió darle ese margen de grosor de tal forma que dejase de ser una zona excesivamente frágil de la pieza.

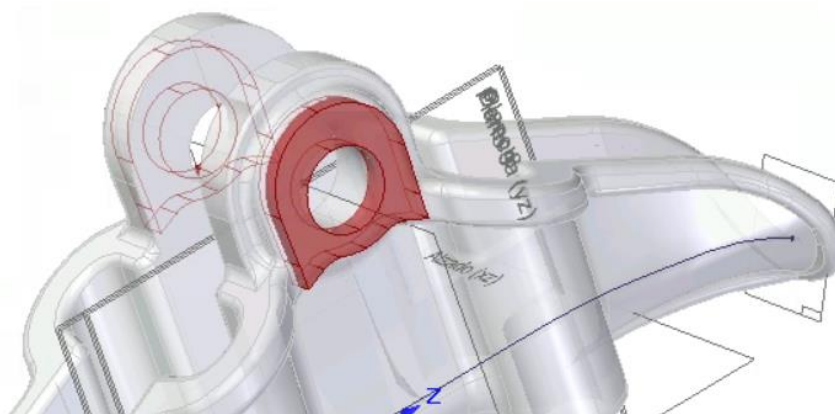


Ilustración 37. Región preservada: grosor. Fuente: elaboración propia

El siguiente paso fue, al igual que se hizo con el estudio estático, añadir el perfil de fuerzas que actúa sobre la grapa y al que está sometido de forma permanente. Se trata de la misma fuerza que se aplicó en el estudio de elementos finitos, sección 2.4.3.3, 70 kN

aplicados a lo largo de todo el eje central de la pieza. En las Ilustración 38 e Ilustración 39 se puede ver el detalle de dicha carga.

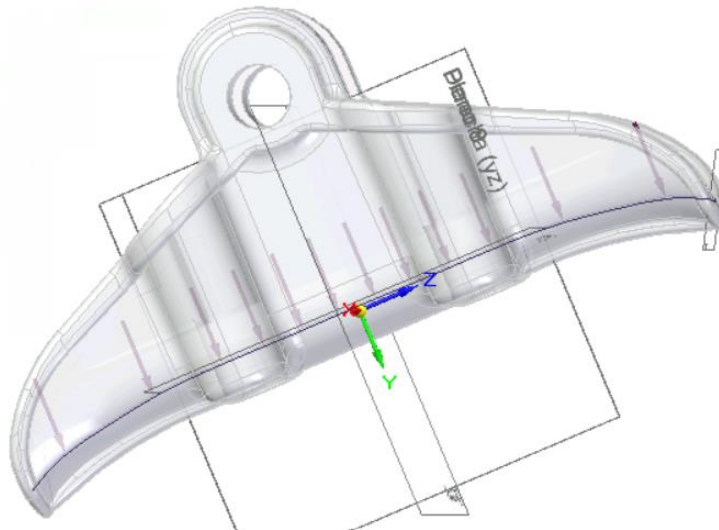


Ilustración 38. Perfil fuerza para el diseño generativo. Fuente: elaboración propia

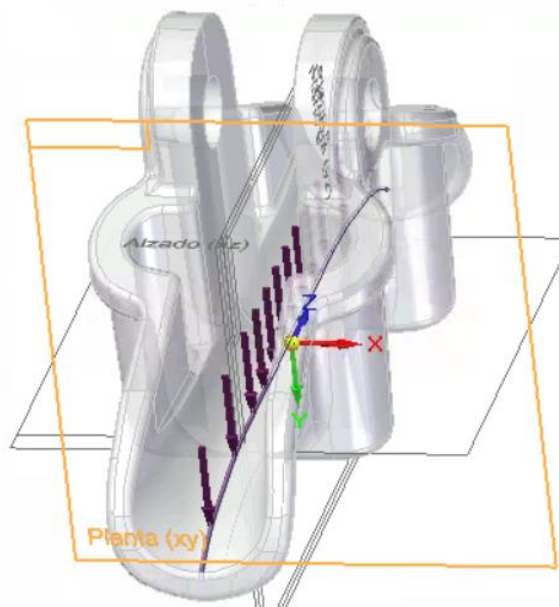


Ilustración 39. Detalle fuerza. Fuente: elaboración propia

Por último, como ya se hizo también en el estudio estático, se ha restringido el movimiento del agujero para que la simulación sea lo más realista posible.



Ilustración 40. Restricción de movimiento del agujero central. Fuente: elaboración propia

Una vez establecidas las condiciones iniciales, ya se puede iniciar el proceso iterativo para obtener el modelo optimizado de la pieza de estudio.

Como punto de partida, se decidió de forma aleatoria, empezar con una reducción de carga del 40%. Con dicho valor, se comprueba si la pieza sigue siendo viable para la tensión máxima y si es así se repite el proceso hasta que se llega a un valor donde el herraje rompe para dicho valor.

- Iteración nº1: Como se ha mencionado anteriormente, en esta primera iteración se decidió imponer una reducción de carga del 40%. Con ello, la solución encontrada fue la siguiente:

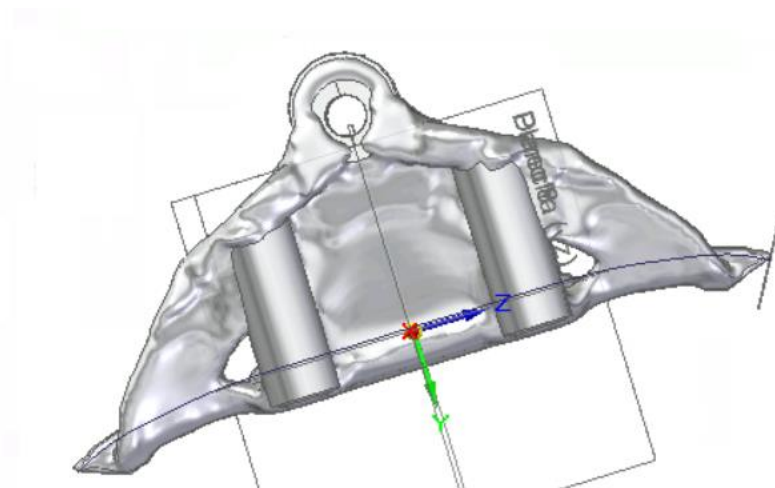


Ilustración 41. Reducción de masa al 40% (1). Fuente: elaboración propia

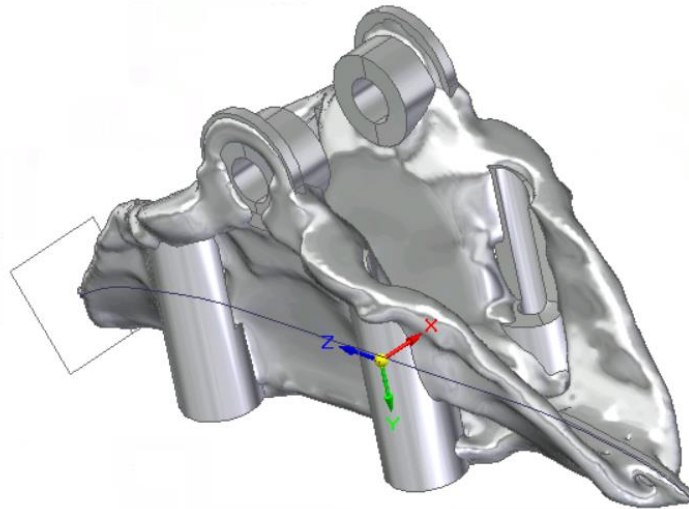


Ilustración 42. Reducción de masa al 40% (2). Fuente: elaboración propia

No obstante, una vez realizada la optimización, es necesario comprobar si la nueva pieza sigue cumpliendo con los requisitos de diseño de un herraje. Por ello, se debe realizar un estudio estático de la nueva grapa para comprobar su límite de tensión y asegurarse de si no supera el máximo, $1.13\text{e}+3$ MPa.

Se vuelven a realizar los pasos pertinentes del estudio FEM, limitación de puntos fijos, imposición de cargas y, por último, realización del mallado.

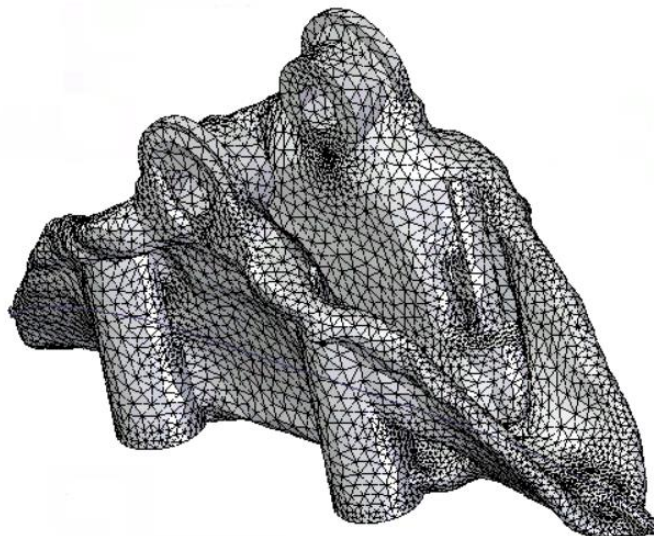


Ilustración 43. Mallado al 40%. Fuente: elaboración propia

Una vez obtenido el mallado final ya se pueden observar los resultados del estudio estático.

Como se puede observar en la Ilustración 44, la tensión de Von Mises para una grapa con una reducción de masa del 40% es 776 MPa. Dicha tensión está muy por debajo del valor máximo impuesto por la estructura por lo que se puede seguir probando a reducir más masa.

Además, se observa como las zonas más sufridas siguen siendo los apoyos finales y los agujeros para los cuatro tornillos. Por ello, se va a tener que vigilar con mucho cuidado dichas zonas y quizás reforzar para que no sean peligrosas para la estructura.

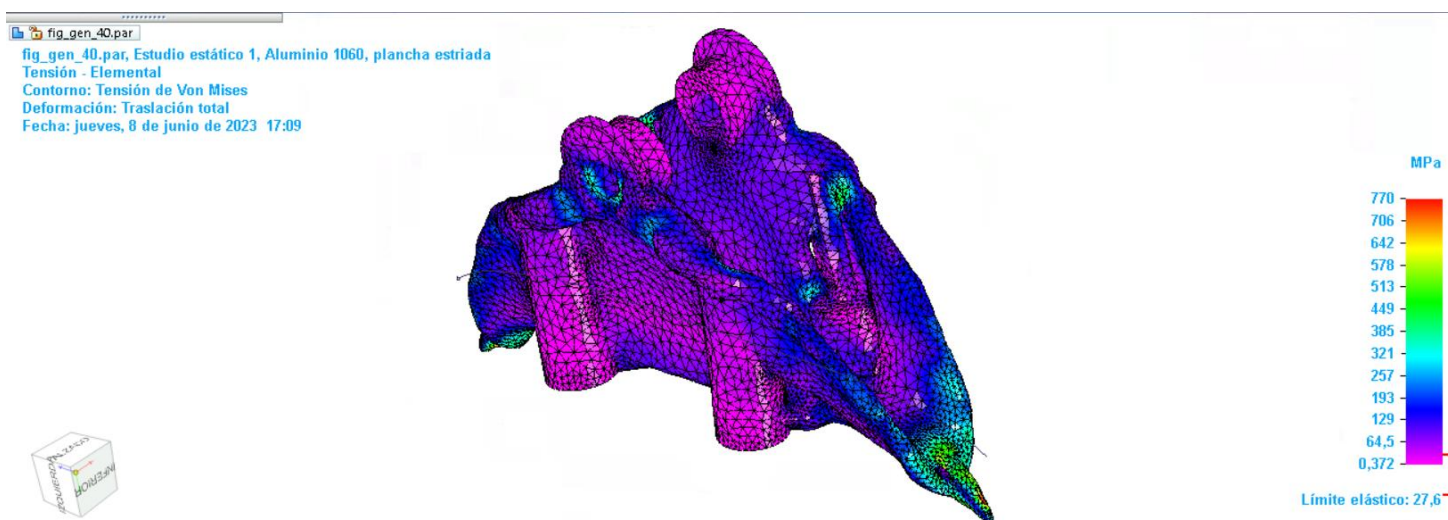


Ilustración 44. Resultados estudio estático (40%). Fuente: elaboración propia

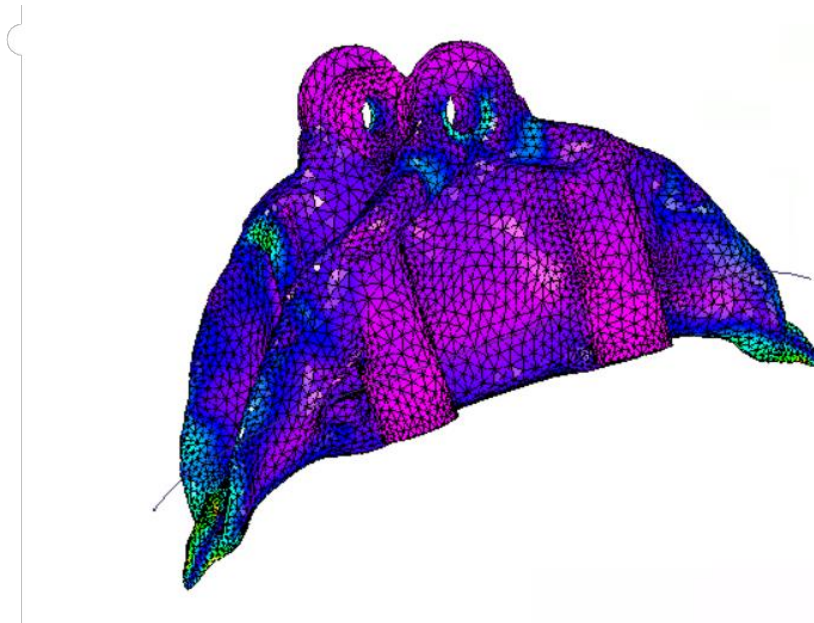


Ilustración 45. Detalle estudio estático al 40%. Fuente: elaboración propia

Como se ha concluido con el estudio al 40%, se puede seguir eliminando masa ya que aún no se ha llegado al límite de tensión de la estructura.

Se va a realizar una segunda iteración al 50% para ver si con dicho valor se llega ya al valor máximo.

- Iteración nº2: En esta segunda iteración se ha aumentado en un 10% la reducción de masa. En este caso, los resultados obtenidos se muestran en la Ilustración 46 y la Ilustración 47.

Como se puede observar, la masa se elimina de la zona central y alrededor de los enganches de los tornillos, una de las zonas más sufridas de la estructura como ya se ha mencionado con antelación.

Por ello, lo más probable es que la pieza no soporte la carga prevista con tan poca masa en una zona peligrosa. No obstante, es necesario llevar a cabo el estudio de elementos finitos para comprobar dicha teoría.

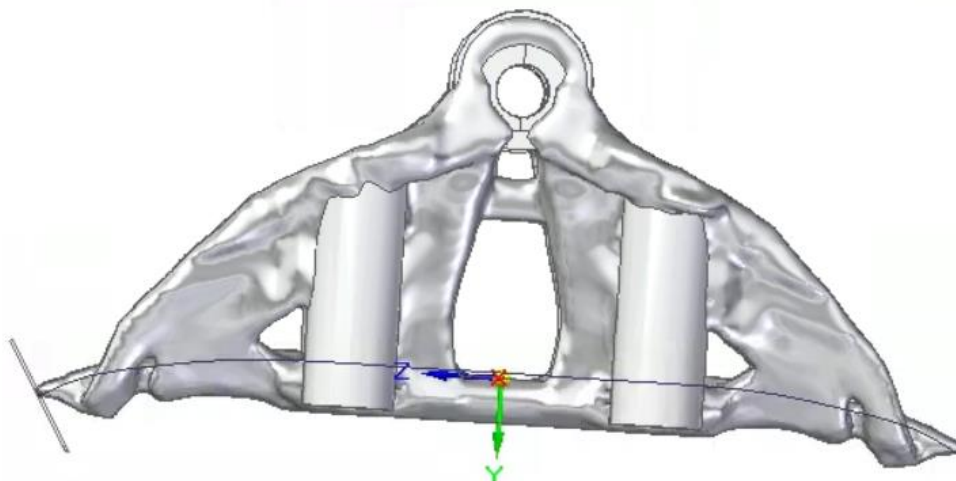


Ilustración 46. Reducción de masa al 50% (1). Fuente: elaboración propia

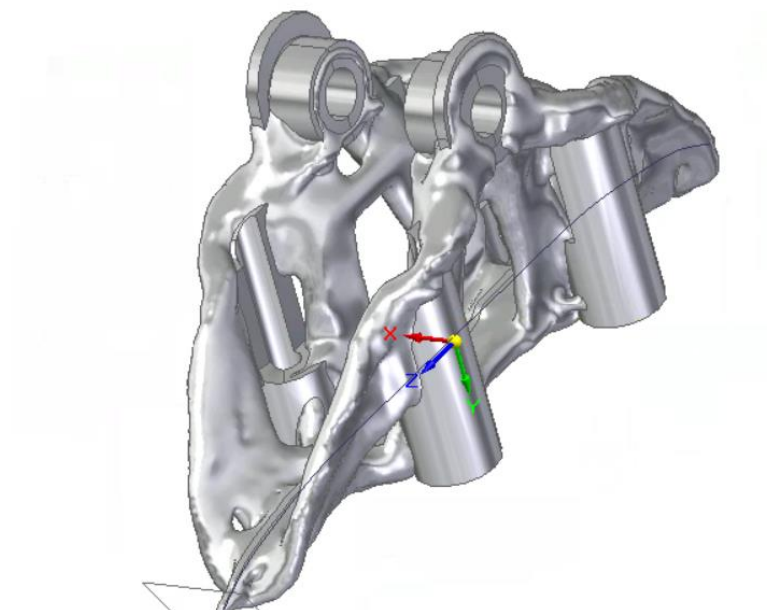


Ilustración 47. Reducción de masa al 50% (2). Fuente: elaboración propia

Como en la iteración anterior, para validar este diseño, es necesario realizar un estudio estático de la pieza y ver si sigue cumpliendo con las condiciones de trabajo máximas.

Primero, se vuelve a realizar el mallado, como se muestra en la siguiente ilustración:



Ilustración 48. Mallado al 50%. Fuente: elaboración propia

Una vez realizado el mallado, se procede a analizar los resultados de la simulación del estudio estático.

Como se supuso que podía pasar, en este caso, la reducción de masa es excesiva y la estructura no soporta las condiciones de trabajo máximas. La tensión máxima de Von Mises es de $1,16e03$ MPa (Ilustración 49). Este valor está muy por encima del límite de la pieza original que es $1,13e03$ MPa. Por tanto, se concluye que no es posible realizar una reducción de masa tan elevada ya que deja de cumplir con los requisitos iniciales.

fig_gen_50_v2.par, Estudio estático 1, Aluminio 1060, plancha estriada
 Tensión - Elemental
 Contorno: Tensión de Von Mises
 Deformación: Traslación total
 Fecha: jueves, 8 de junio de 2023 17:13

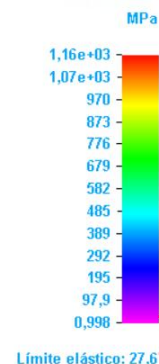
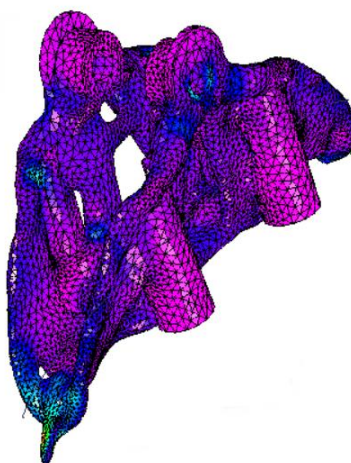


Ilustración 49. Resultados estudio estático al 50%. Fuente: elaboración propia

Por ello, para la siguiente iteración, se elegirá un valor entre 40% y 50% para seguir acotando la máxima reducción de masa que se puede conseguir.

- Iteración nº3: En este caso, se ha decidido tomar el valor medio entre los dos casos ya probados y así continuar con el proceso iterativo.

Los resultados obtenidos fueron los siguientes:

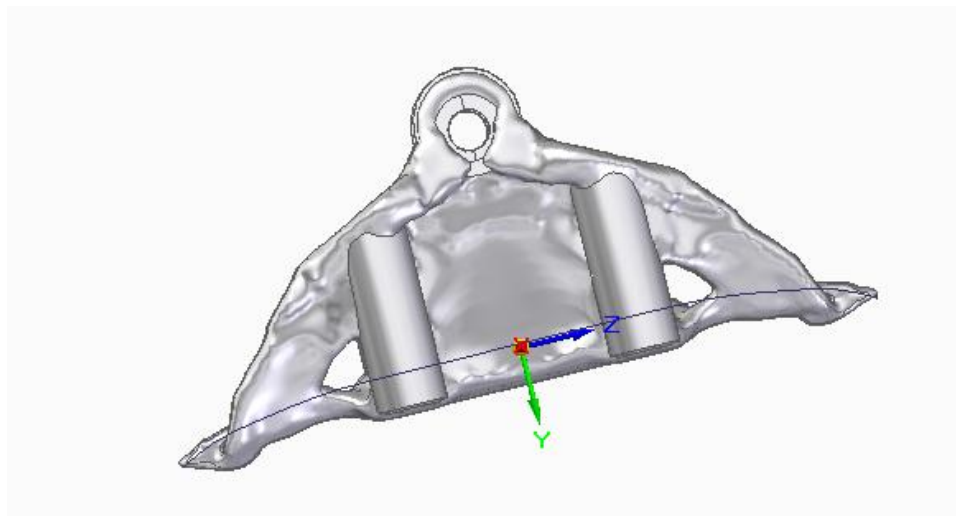


Ilustración 50. Reducción de masa al 45% (1). Fuente: elaboración propia

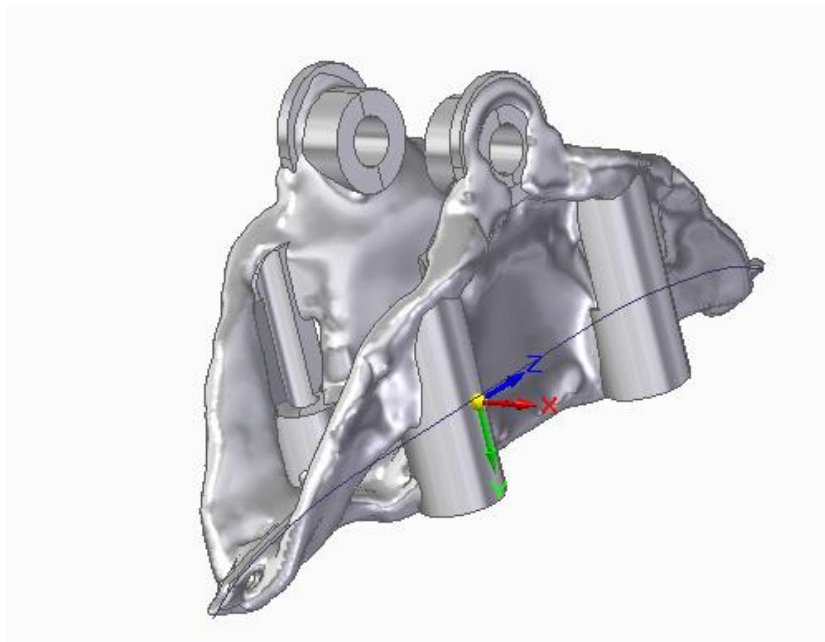


Ilustración 51. Reducción de masa al 45% (2). Fuente: elaboración propia

Como se puede observar en la Ilustración 50 y la Ilustración 51 la reducción de masa se produce en las mismas zonas que en caso del 50% pero la masa eliminada es mucho menor por lo que tiene menos riesgo de romper la pieza.

En este caso, también es necesario comprobar si la estructura soporta las condiciones iniciales, por ello se vuelve a realizar el estudio estático.

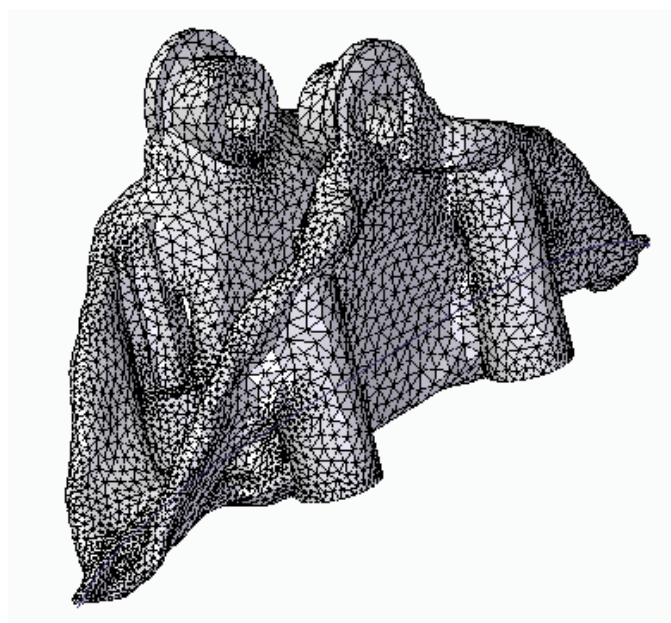


Ilustración 52. Mallado al 45%. Fuente: elaboración propia

Después de realizar el mallado (Ilustración 52), se analizaron los resultados del estudio estático y se observó (Ilustración 53 e Ilustración 54) que se sigue teniendo margen de mejora ya que el límite de tensión, 1.02×10^3 MPa, es menor que el máximo de la pieza original.

fig_gen_45.par, Estudio estático 1, Aluminio 1060, plancha estriada
Tensión - Elemental
Contorno: Tensión de Von Mises
Deformación: Traslación total
Fecha: jueves, 8 de junio de 2023 17:21

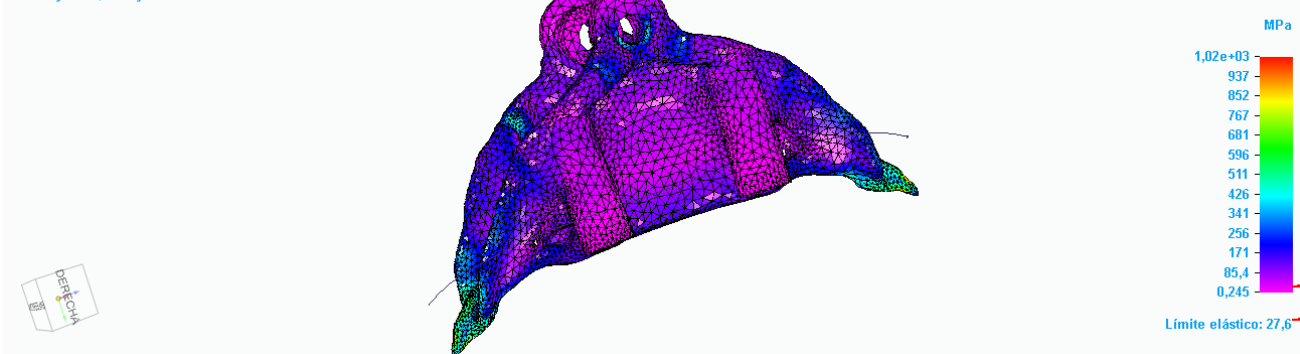


Ilustración 53. Resultados estudio estático al 45%. Fuente: elaboración propia

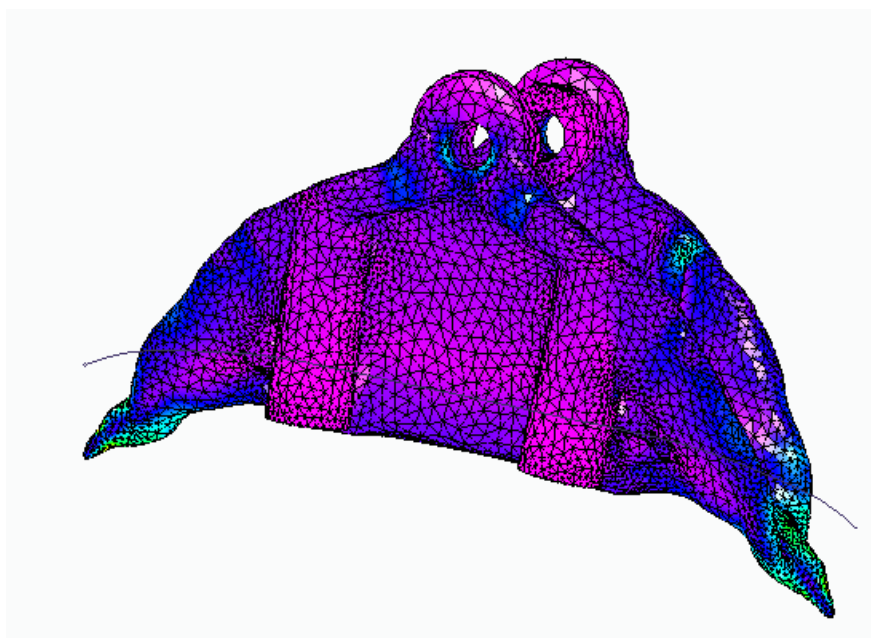


Ilustración 54. Detalle estudio estático al 45%. Fuente: elaboración propia

Como aún sigue habiendo margen de mejora, se va a realizar otra simulación para ver cuál es el caso límite. Por ello, se aumentó un poco más la reducción de masa, pero obviamente, sin pasar el límite de 50% ya que se comprobó que dicho valor ya no cumple con los requisitos de diseño.

- Iteración nº4: Para esta iteración, el valor elegido fue del 48%, una reducción de masa que no sobrepasa el límite de 50%.

Los detalles de dicha simulación se muestran en la Ilustración 55.

Como se puede observar, se ha impuesto una calidad de estudio del 50 y la masa se reduce de 0.564 kg a 0.293 kg.

Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Alto

Tamaño de vóxel: 1,07 mm

Reducción de masa

☒ Reducir por este porcentaje

5% 95%

Masa original: 0,564 kg Masa objetivo: 0,293 kg

☐ Utilizar Factor de seguridad

Límite elástico

Límite elástico: 27,579 MPa / Factor de seguridad: 1,000 = Esfuerzo permitido: 27,579 MPa

Visualización de resultados

☒ Ocultar el espacio de diseño al visualizar los resultados

Generar Cerrar Ayuda

Ilustración 55. Datos diseño generativo al 48%. Fuente: Solid Edge

En este caso los resultados obtenidos fueron los siguientes:

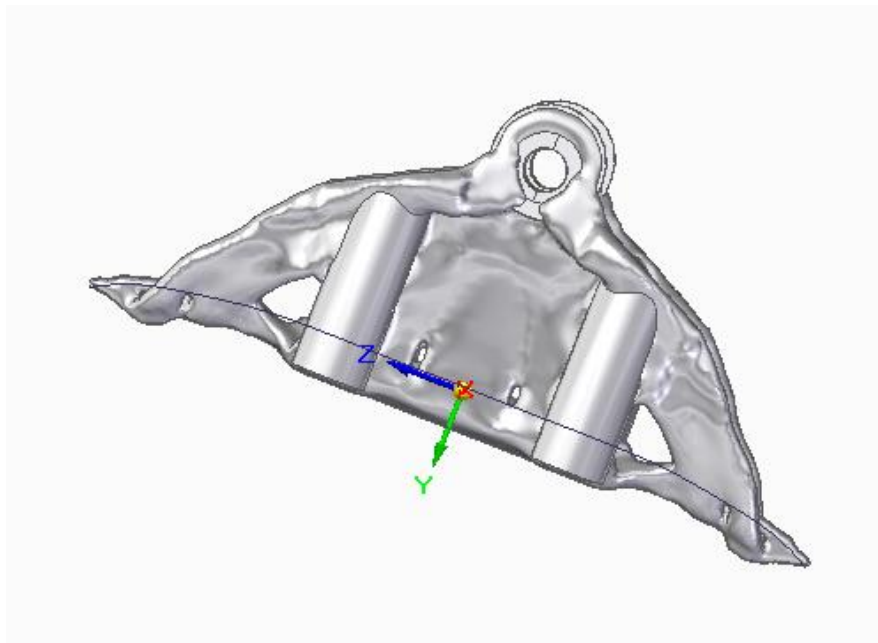


Ilustración 56. Reducción de masa al 48% (1). Fuente: elaboración propia

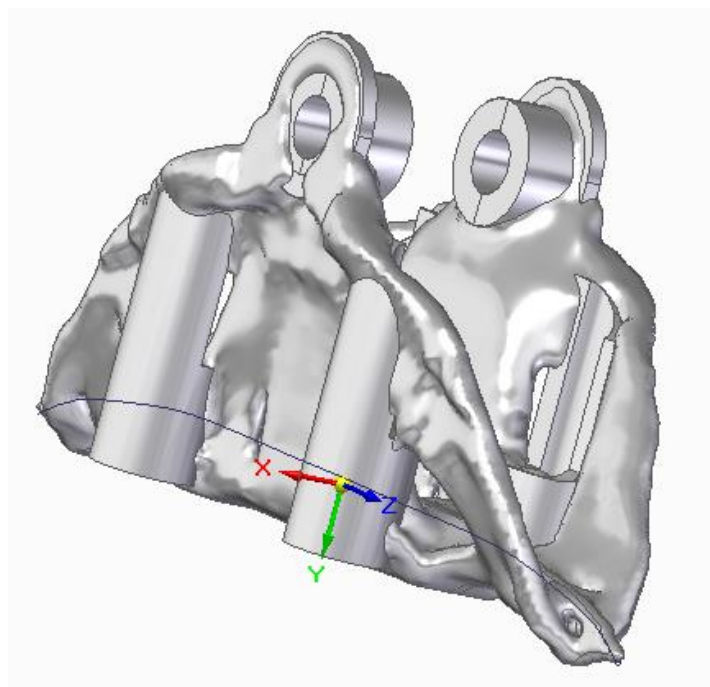


Ilustración 57. Reducción de masa al 48% (2). Fuente: elaboración propia

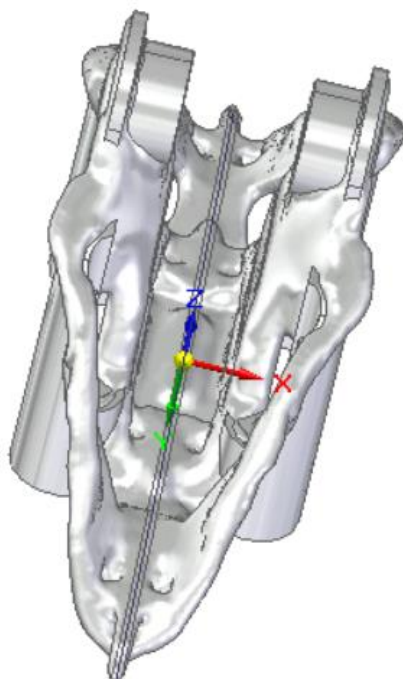


Ilustración 58. Reducción de masa al 48% (3). Fuente: elaboración propia

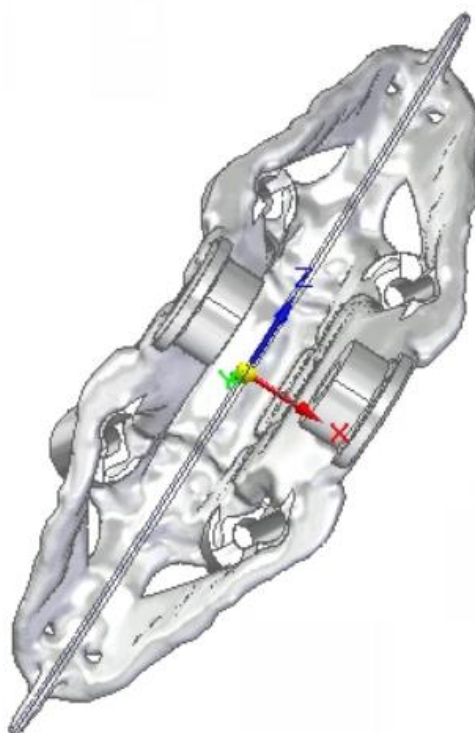


Ilustración 59. Reducción de masa al 48% (4). Fuente: elaboración propia

Para comprobar la validez de este diseño es necesario realizar otra vez un estudio de elementos finitos. Tras realizar el mallado, Ilustración 60, se analizaron los resultados obtenidos.

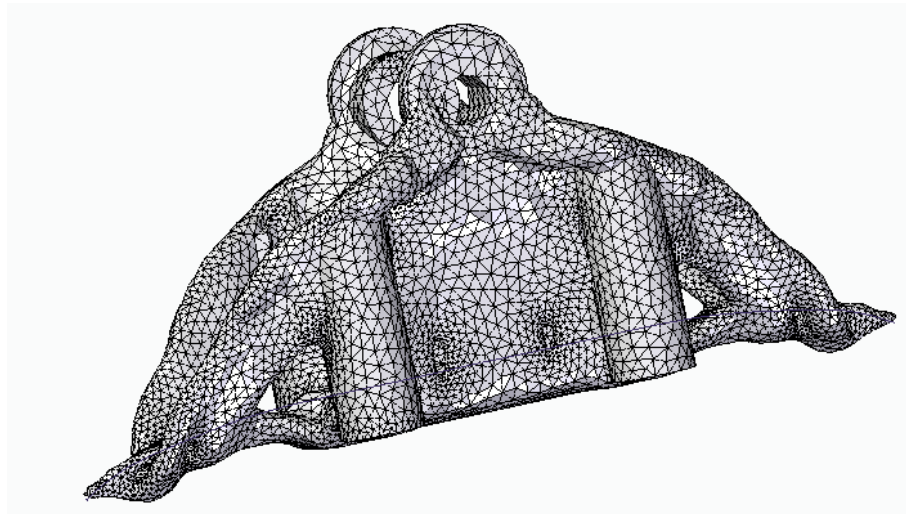


Ilustración 60. Mallado al 48%. Fuente: elaboración propia

Como se pudo comprobar después de la simulación, este último diseño tiene un límite de tensión de Von Mises igual al máximo admitido por la pieza original.

Por tanto, se puede concluir que este diseño es el caso límite de reducción de masa ya que cualquier valor mayor no cumpliría con las condiciones de trabajo del herraje.

fig_gen_48.par, Estudio estático 1, Aluminio 1060, plancha estriada
 Tensión - Elemental
 Contorno: Tensión de Von Mises
 Deformación: Traslación total
 Fecha: jueves, 8 de junio de 2023 17:24

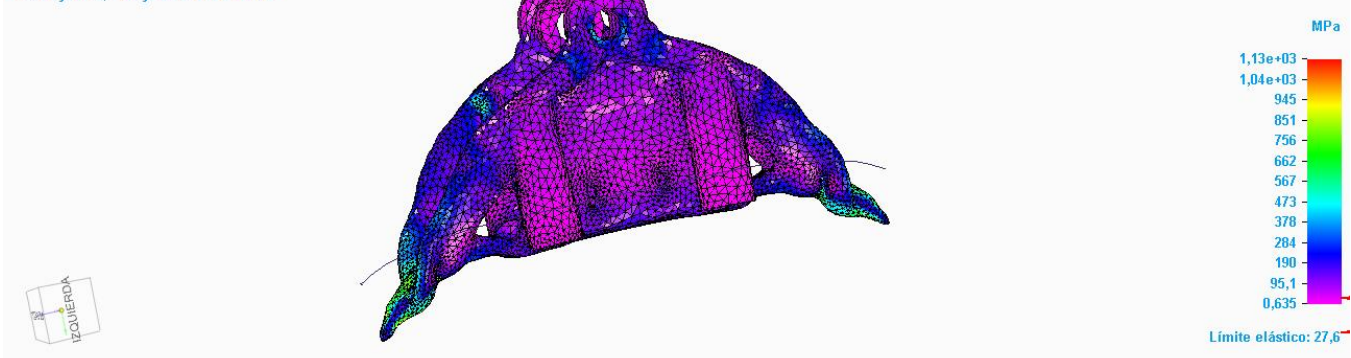


Ilustración 61. Resultados estudio estático al 48%. Fuente: elaboración propia

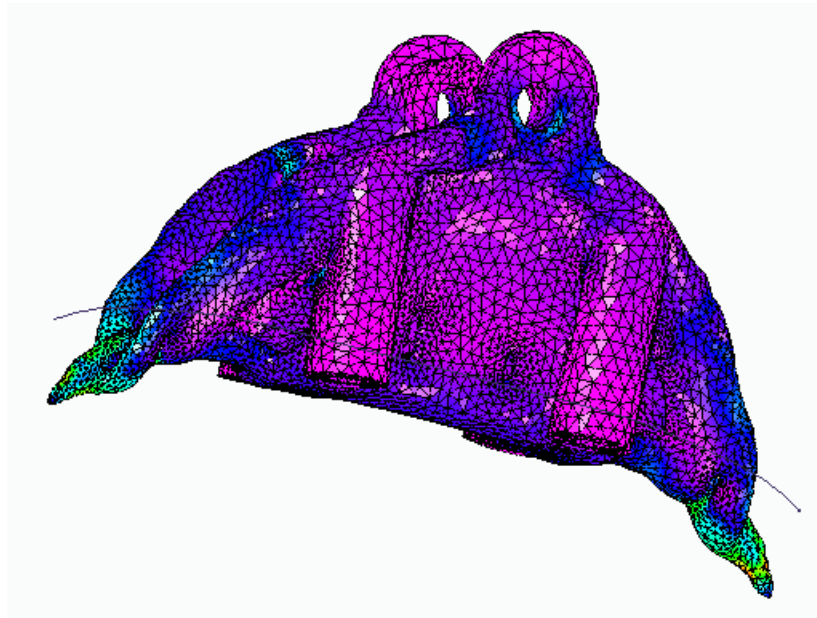


Ilustración 62. Detalle estudio estático al 48%. Fuente: elaboración propia

Por último, como se observa en la Ilustración 61 y la Ilustración 62, las zonas que más van a sufrir son los bordes y otra vez, donde se colocan los tornillos. No obstante, en este caso, ya se ha comprobado que no será un problema ya que cumplen con los límites originales.

Una vez obtenida la máxima reducción de masa, es necesario refinar el diseño y hacerlo óptimo para poder imprimirlo en 3D. Para ello, se usará el software Altair Inspire.

4.3 REFINAMIENTO DEL MODELO OPTIMIZADO

En esta sección, se explica el proceso de refinamiento de la pieza tras encontrar la nueva silueta que permite una reducción de masa del 48%.

Tras la simulación generativa, la pieza obtenida no está acabada ya que es un diseño que no es posible realizar en la vida real y que es puramente teórico. Por ello, es necesario pasar por un proceso de refinamiento para obtener un nuevo herraje que sea posible fabricar. Se busca que el diseño final no tenga protuberancias o salientes irrealizables y que pueda ser una pieza imprimible en 3D.

En este paso del proceso, se utilizará el software “Altair Inspire”, una aplicación que, entre otras cosas, permite optimizar diseños para mejorar la viabilidad de fabricación, [17].

Entre sus herramientas incluye “PolyNurbs”, una técnica de modelado 3D que emplea superficies de subdivisión poligonal con el fin de generar objetos que presenten formas suaves y con gran nivel de detalle. Haciendo uso de la opción “Ajustar”, a través de la cual el propio programa optimiza la geometría y la deja pulida, se obtiene la pieza mostrada en la Ilustración 63.

No obstante, analizando en detalle la propuesta (Ilustración 64, Ilustración 65, Ilustración 66), se observa que no es una geometría viable para la impresión 3D ya que sigue presentando demasiadas alteraciones y zonas poco modelables.



Ilustración 63. Pieza refinada con Altair. Fuente: elaboración propia

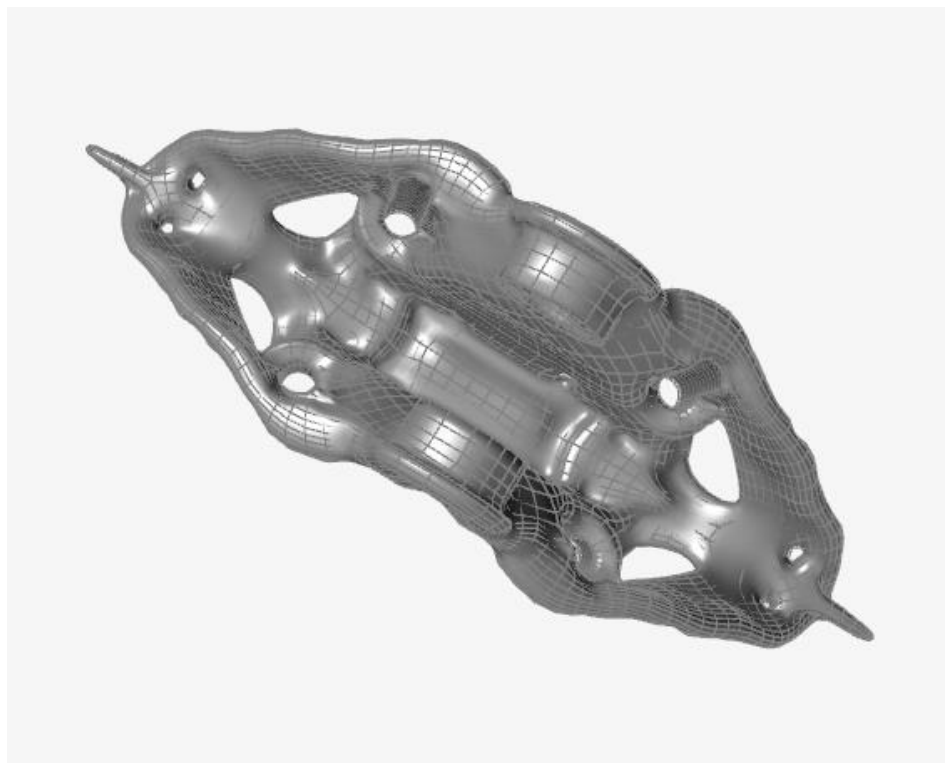


Ilustración 64. Detalle refinamiento (1). Fuente: elaboración propia

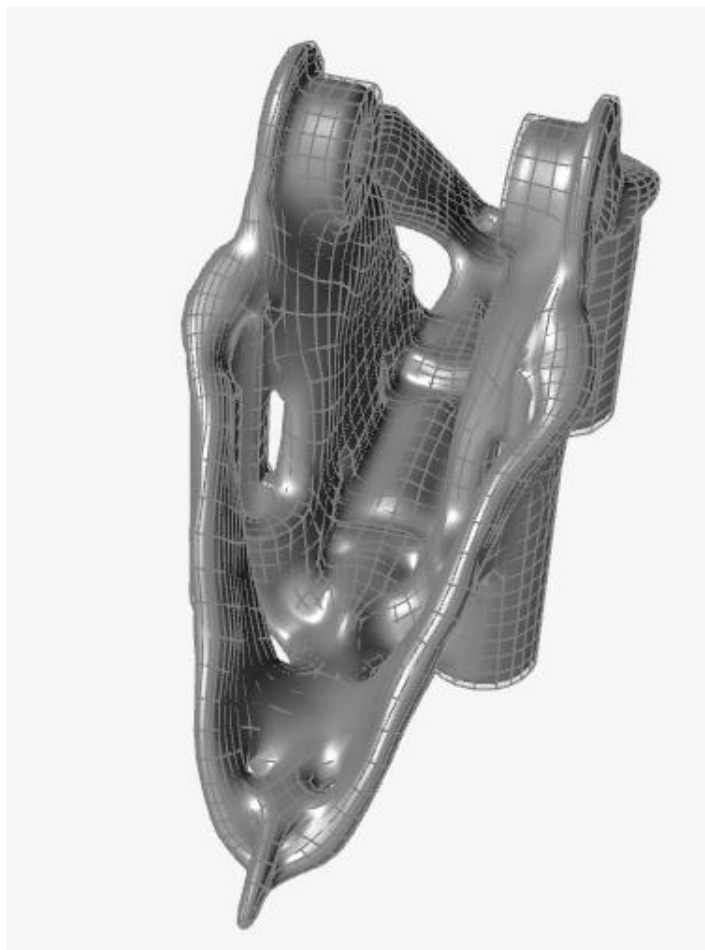


Ilustración 65. Detalle refinamiento (2). Fuente: elaboración propia

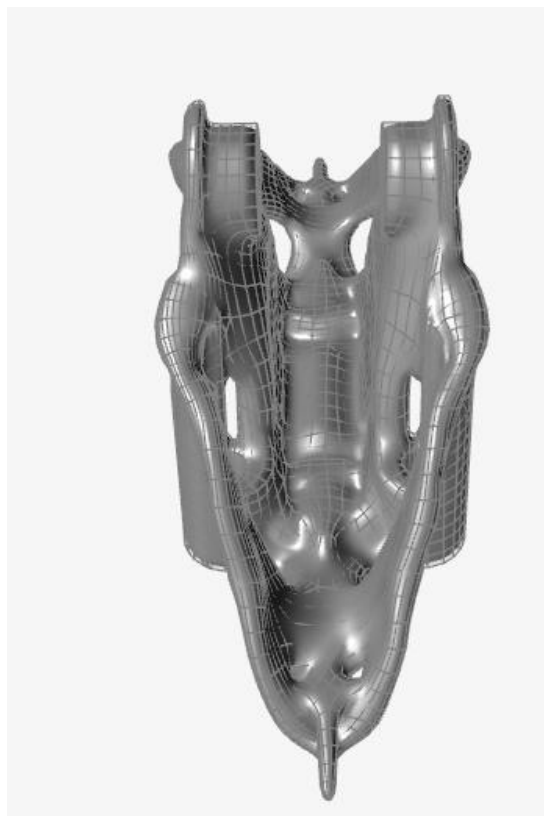


Ilustración 66. Detalle refinamiento (3). Fuente: elaboración propia

Como la reducción de masa y refinamiento es tan extrema, no es posible imprimir directamente esta propuesta de optimización topológica.

Por ello, se tomará como referencia el refinamiento propuesto por Altair para modificar la pieza original y de esta forma conseguir así una reducción de masa y volumen que cumplan con los criterios de diseño pero que sea viable para la impresión.

4.4 MODIFICACIÓN DE LA PIEZA ORIGINAL

Como el modelo propuesto por Altair es demasiado extremo y no es viable para imprimirlo en 3D, se ha decidido tomarlo como referencia para modificar el diseño original y proponer una nueva grapa con la reducción de masa pertinente.

Se fueron haciendo diferentes vaciados para obtener las formas abstractas propuestas por el diseño generativo y el software Altair. Ya que, aun manteniéndose fiel a la propuesta, era necesario hacer uso de formas simples que pudiesen ser impresas.

Lo primero que se hizo fue vaciar los laterales de la pieza con formas triangulares ya que eran las formas regulares que más se parecían a la propuesta del diseño generativo, Ilustración 67. Además, se eliminó también parte del cuerpo central siguiendo, otra vez, la pieza obtenida con los softwares de diseño.

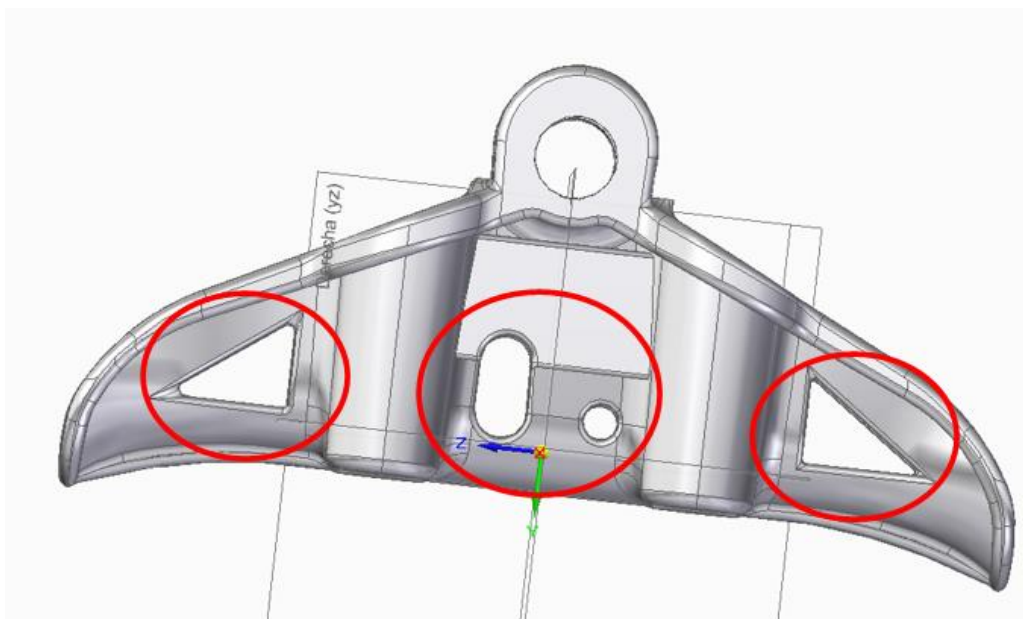


Ilustración 67. Vaciado pieza original (1). Fuente: elaboración propia

Por otro lado, se modificó la parte del enganche central, Ilustración 68. Principalmente, se ha eliminado parte del grosor de protección del agujero ya que era material excesivo para esa zona.

Es cierto que entre las especificaciones que se decidieron a la hora de realizar la optimización, se impuso que no se eliminase cierto radio alrededor del agujero para que no fuese demasiado fino y supusiese un riesgo para la pieza. No obstante, cuando se realizó el diseño generativo, el software siguió eliminando cierto material de esa parte manteniéndose fiel al requerimiento impuesto.

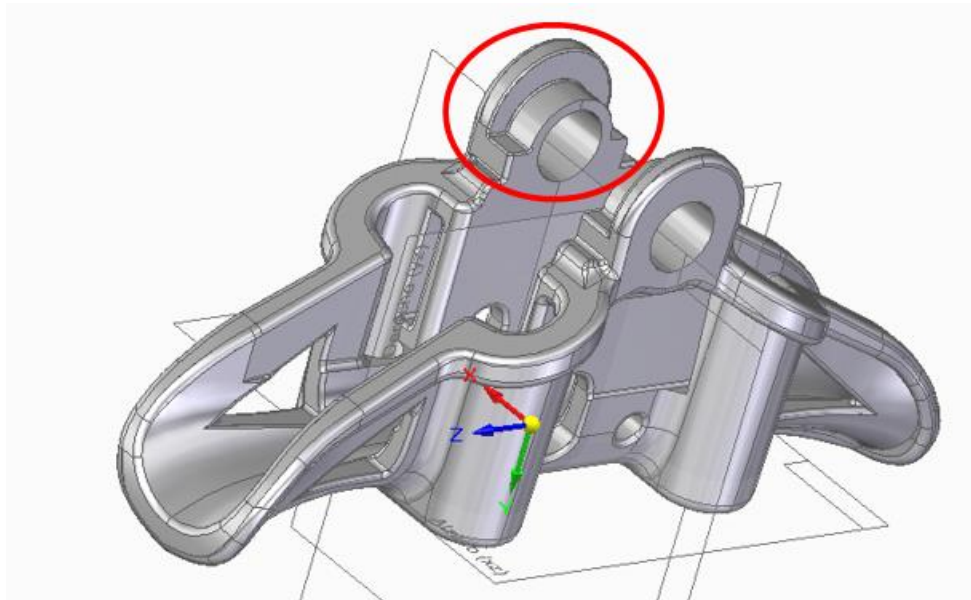


Ilustración 68. Vaciado pieza original (2). Fuente: elaboración propia

Por último, se hizo un vaciado en las paredes laterales (Ilustración 69) para seguir reduciendo la masa, pero sin hacer que la pieza no cumpla con la propuesta del diseño generativo.

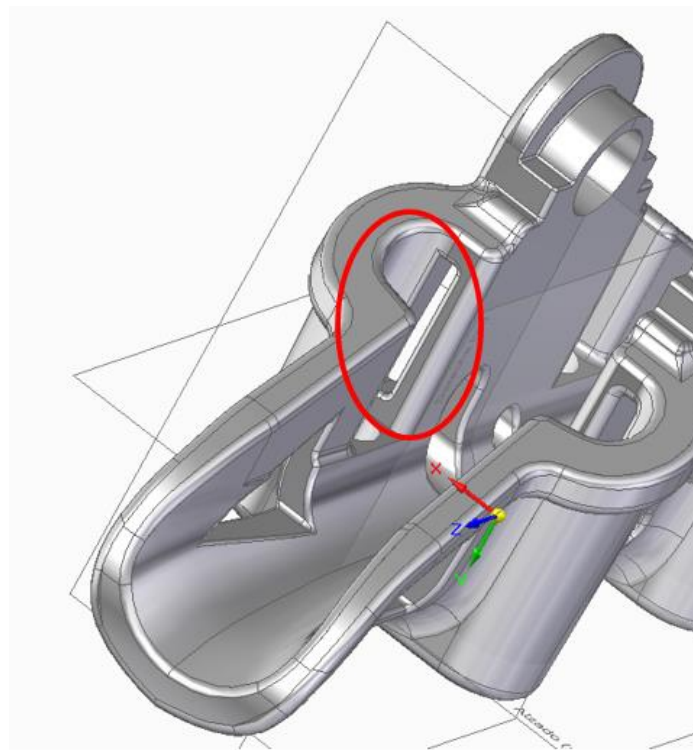


Ilustración 69. Vaciado pieza original (3). Fuente: elaboración propia

En la siguiente imagen se ve en la planta de la pieza los distintos cortes que se han hecho a la pieza:

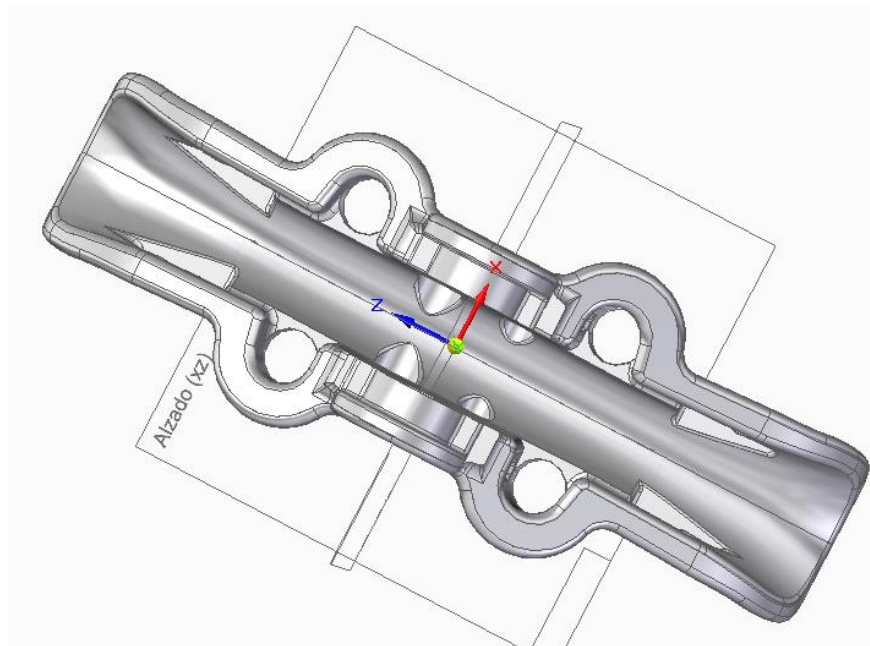


Ilustración 70. Planta pieza original modificada. Fuente: elaboración propia

De esta forma, las especificaciones finales de la pieza optimizada son las siguientes:

Propiedades físicas ✕

☐ Definidas por el usuario

Sistema de coordenadas:
Espacio modelo

Material

Nombre:
Aluminio 1060, plancha e

Densidad:
2712,000 kg/m³

Cambiar

Precisión (de 0 a 1):
0,99

☒ Actualizar al guardar

Global
Principales

Masa: 0,485 kg	Volumen: 178740,868 mm ³	Área de superficie: 64452,13 mm ²
-------------------	--	---

Centro de masa

☐ Mostrar símbolo cm

X: -0,31 mm

Y: -18,27 mm

Z: -0,23 mm

Centro de volumen

☐ Mostrar símbolo cv

X: -0,31 mm

Y: -18,27 mm

Z: -0,23 mm

Momentos de inercia de la masa

Ixx: 0,001 kg-m ²	Iyy: 0,001 kg-m ²	Izz: 0,001 kg-m ²
Ixy: 0,000 kg-m ²	Ixz: 0,000 kg-m ²	Iyz: 0,000 kg-m ²

Las propiedades físicas están actualizadas.

Actualizar
Cerrar
Guardar como...
Ayuda

Ilustración 71. Especificaciones del diseño final. Fuente: Solid Edge

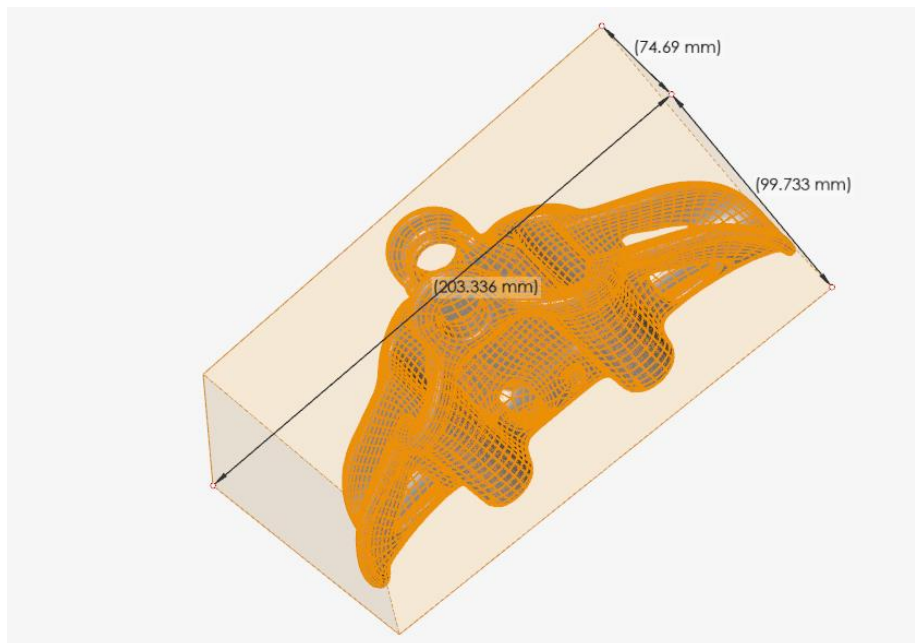


Ilustración 72. Dimensiones pieza. Fuente: elaboración propia

No obstante, antes de poder imprimir la pieza fue necesario redondear todos los salientes ya que no puede haber superficies abruptas y debe ser una pieza fluida.

De esta forma, la pieza final quedó como se muestra a continuación:

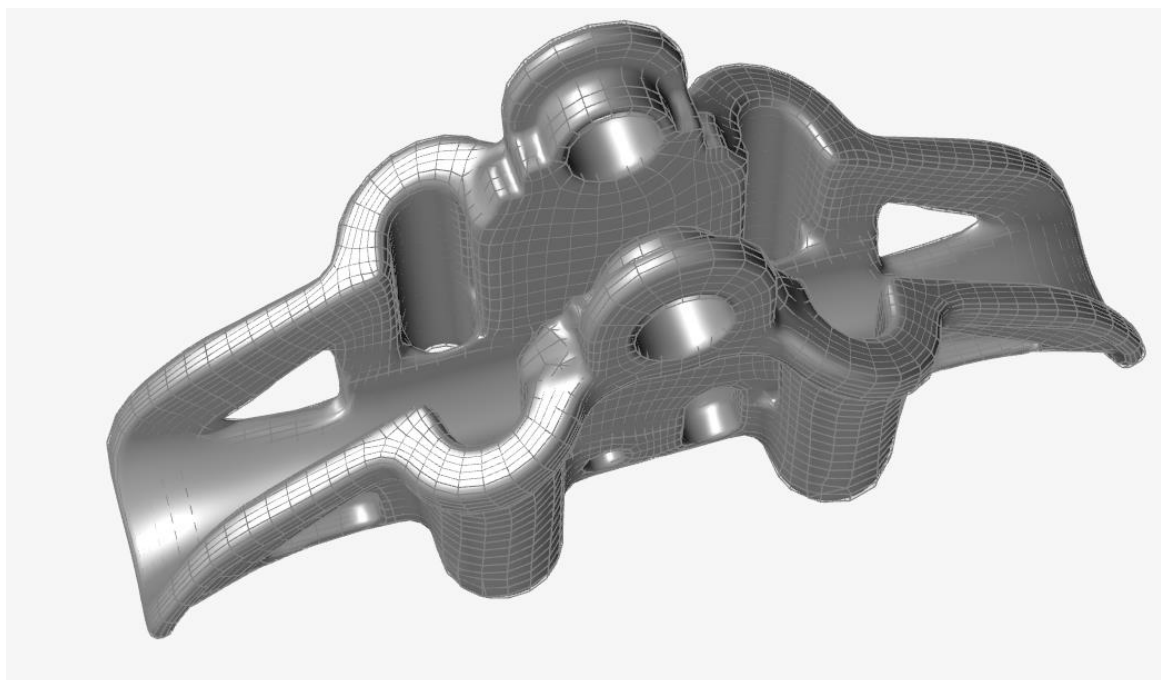


Ilustración 73. Pieza final (1). Fuente: elaboración propia

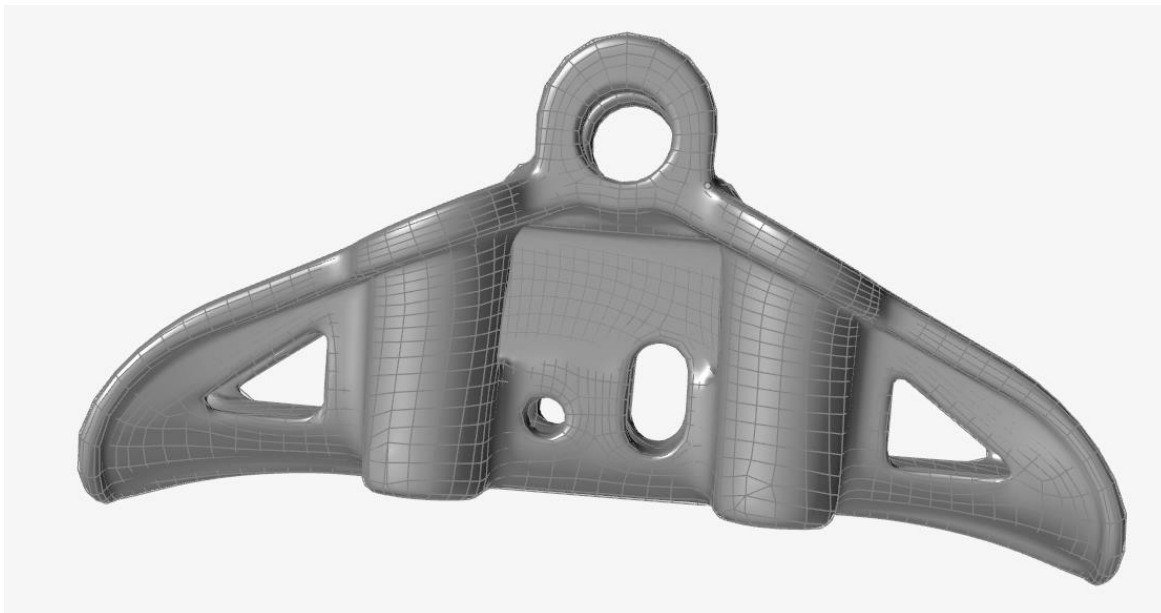


Ilustración 74. Pieza final (2). Fuente: elaboración propia

Finalmente, en la siguiente ilustración se muestra una comparativa del herraje original frente al herraje optimizado y refinado que será impreso en 3D.

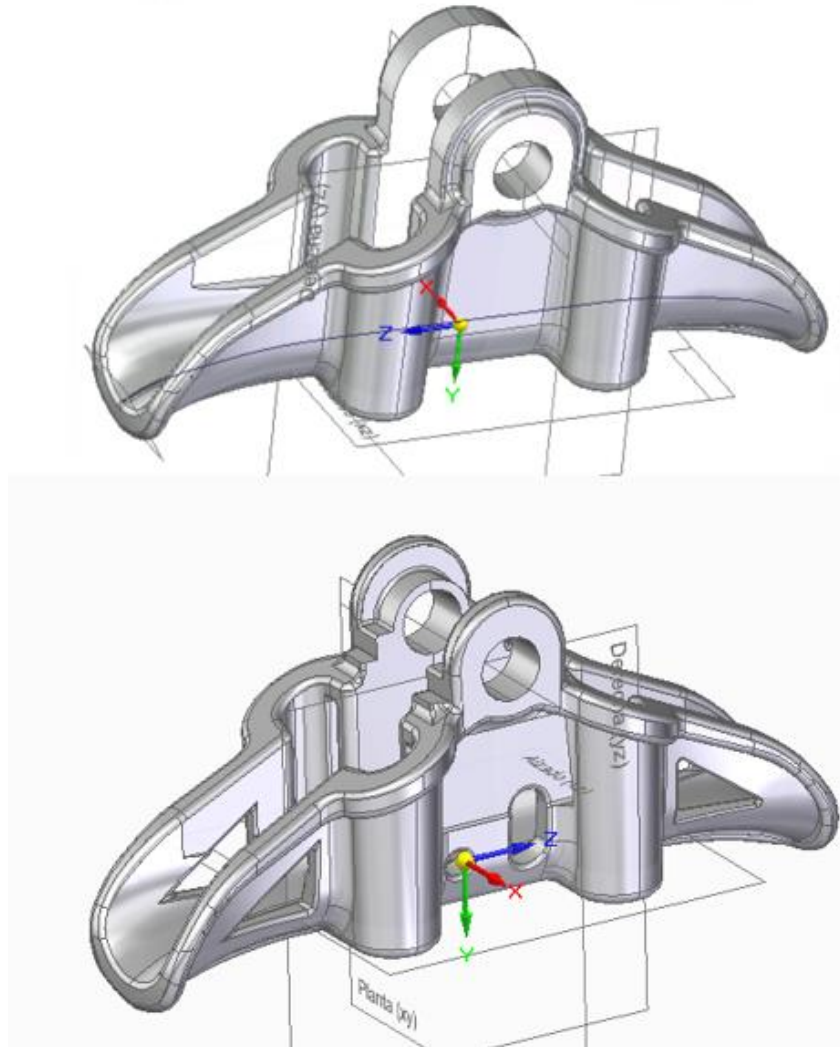


Ilustración 75. Comparativa herraje original vs optimizado. Fuente: elaboración propia

4.5 ESTUDIO FEM DE LA PROPUESTA FINAL

Para poder dar por válido el diseño optimizado, es necesario ver si sigue cumpliendo con las especificaciones de diseño de la pieza original.

Por ello, es necesario realizar un último estudio estático para comprobar que la propuesta de diseño cumple con los requerimientos de carga.

Primero, se ha realizado el mallado de la nueva pieza:

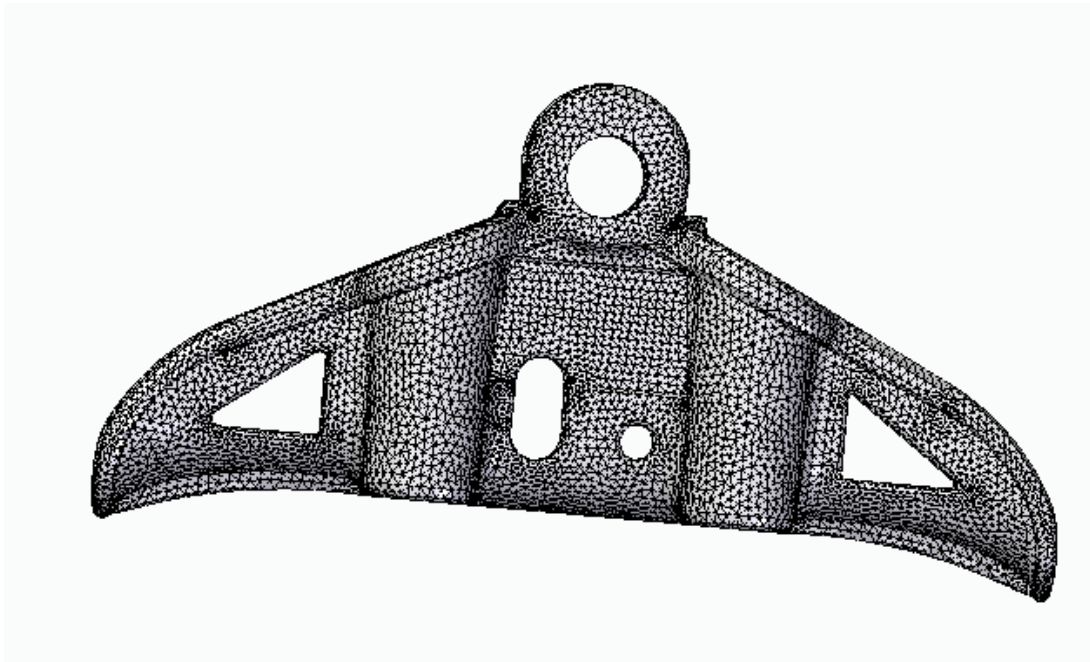


Ilustración 76. Mallado pieza final. Fuente: elaboración propia

Una vez obtenido el mallado ya se pudieron obtener los resultados del estudio estático. De esta forma, se comprobó que la nueva pieza seguía cumpliendo con las especificaciones de diseño iniciales.

Como se puede observar, la máxima tensión de esta nueva pieza es de $1.03e03$ MPa, la cual está por debajo del límite máximo inicial ($1.13e03$ MPa). Por ello, se puede dar por válido este nuevo diseño ya que cumple con las restricciones de carga de la pieza original.

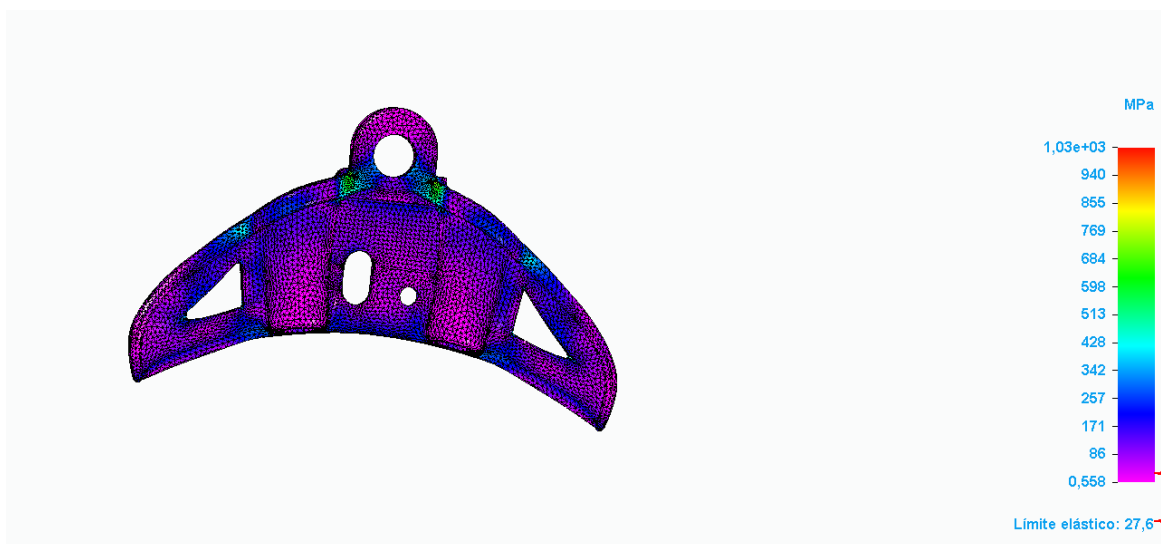


Ilustración 77. Resultados estudio estático pieza final. Fuente: elaboración propia

Además, se incluyen, a continuación, detalles de cómo se deforma la pieza cuando se somete a un conjunto de cargas.

Se puede apreciar como las zonas más sufridas siguen siendo donde van apoyados los 4 tornillos laterales y por ello, es necesario seguir prestando mucha atención al esfuerzo que hagan estas partes ya que puede ser por donde rompa la pieza en un futuro.

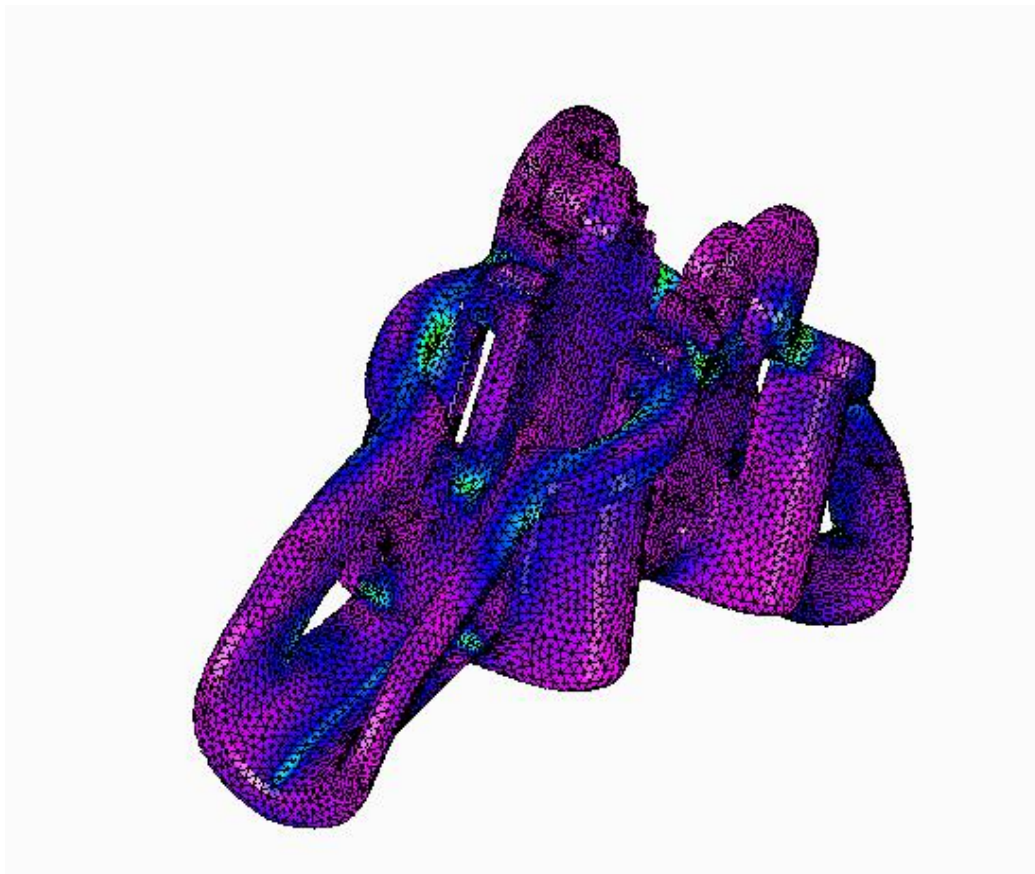


Ilustración 78. Detalle deformación pieza final (1). Fuente: elaboración propia

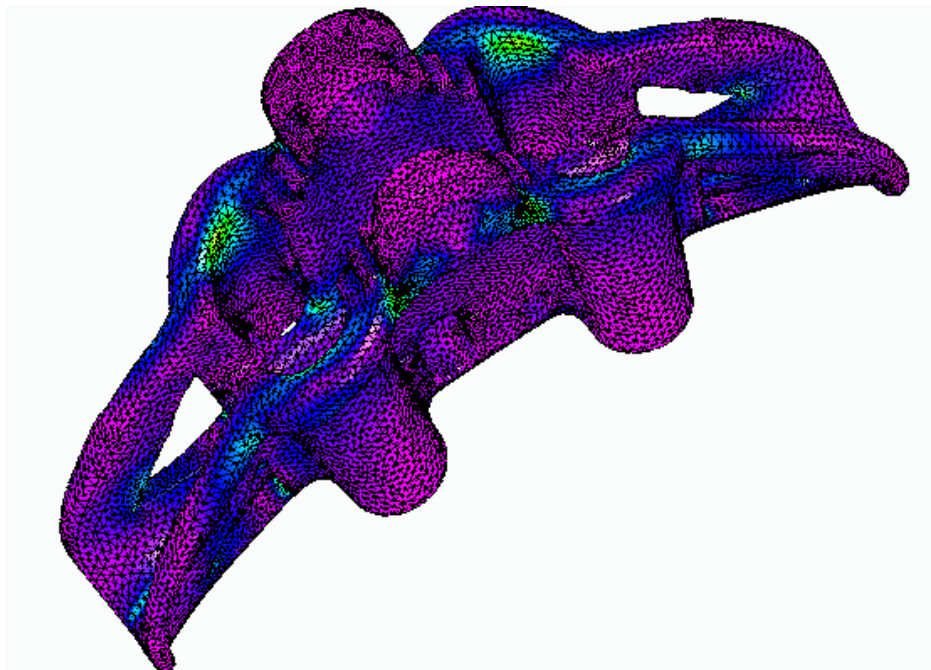


Ilustración 79. Detalle deformación pieza final (2). Fuente: elaboración propia

4.6 FABRICACIÓN DE LA PIEZA FINAL

Para obtener un prototipo de la pieza final se va a hacer uso de la fabricación aditiva. Se trata de un innovador enfoque de producción industrial en el cual se deposita material (plástico o metal) de manera controlada, capa a capa, en los lugares requeridos. Mediante la técnica conocida como impresión 3D, es posible fabricar formas geométricas personalizadas según las necesidades de diversos sectores.

El proceso de fabricación aditiva comienza con un diseño CAD como el que se ha realizado previamente. A partir de ahí, el equipo encargado de la fabricación aditiva lee los datos de este archivo digital y añade capas sucesivas de líquido, polvo o el material específico (como termoplástico, metal, resina, filamentos, fibra de carbono), construyendo así un objeto 3D.

En comparación con las técnicas tradicionales de fabricación industrial, la fabricación aditiva elimina procesos intermedios, como la producción de herramientas, lo que permite obtener piezas de forma más rápida (hasta un 90% más rápido, [18]). Además, al utilizar únicamente el material necesario para fabricar la pieza, se reduce la generación de residuos, se disminuye el costo de los componentes y se promueve un enfoque más respetuoso con el medio ambiente.

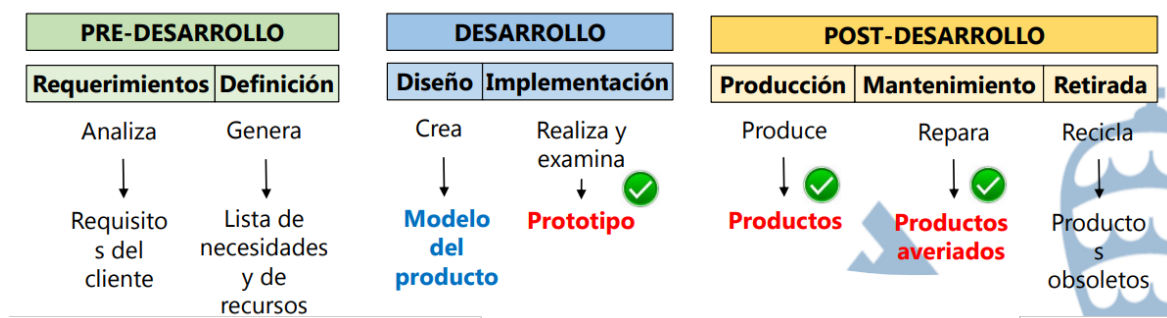


Ilustración 80. Ciclo de desarrollo. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

Analizando el ciclo de desarrollo de un producto, en la primera fase, se genera una lista de necesidades cumpliendo con los requisitos del cliente. Este paso no ha sido necesario para crear el producto ya que es una pieza que ya existe y que tiene una función clara en las líneas de alta tensión.

Por ello, en este caso, el proceso de concepción se centró en la fase de desarrollo, donde a partir de una pieza original se creó y modeló un diseño en 3D al cual se le aplicaron las técnicas de diseño generativo y optimización topológica para obtener un prototipo que cumpla con los mismos requisitos constructivos, pero con un diseño optimizado.

4.6.1 CARACTERÍSTICAS DE IMPRESIÓN

En esta etapa, el primer paso es generar una pieza en 3D lista para la fabricación aditiva. El formato necesario es “.stl”, sin embargo, entre sus opciones de descarga, existen diversas opciones por lo que es necesario asegurarse de que el archivo se guarda con las características correctas. Se debe indicar una tolerancia de conversión de 0.010 y un ángulo de superficie de 3°.

El motivo por el que se deben escoger estas características es por el grado de detalle que se quiere en la impresión. Si no se seleccionan, la pieza quedará basta y sin las formas que se esperan.

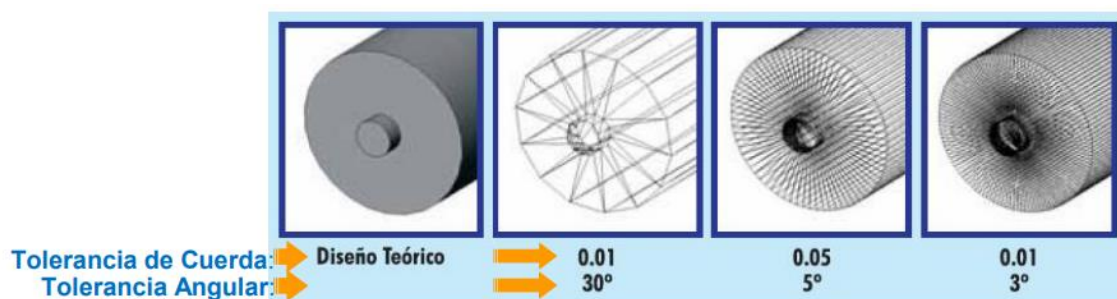


Ilustración 81. Selección tolerancias. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

En la siguiente ilustración se recogen estas características:

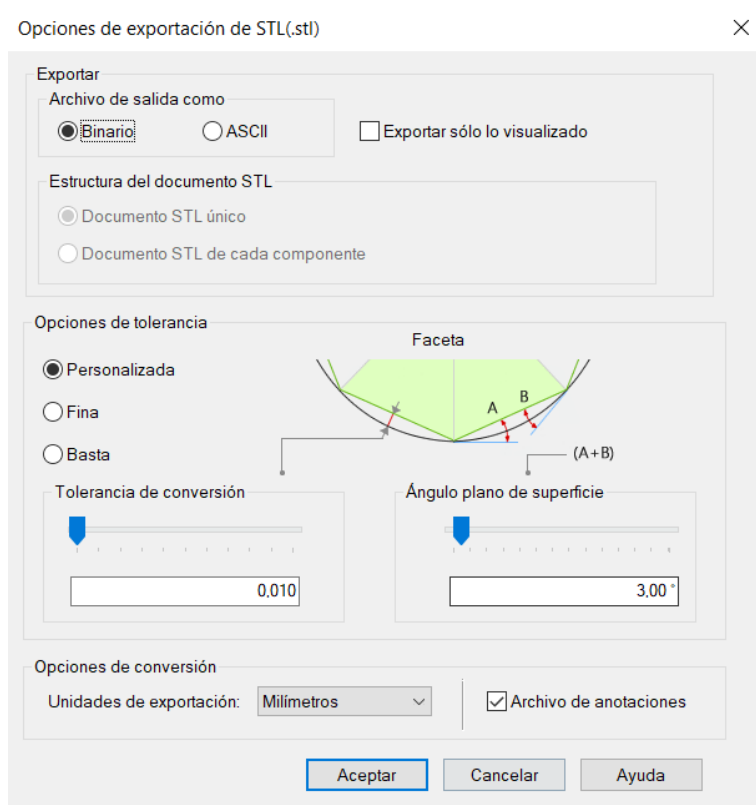


Ilustración 82. Formato ".stl". Fuente: Solid Edge

El siguiente paso es determinar las características dentro del software de fabricación aditiva. El software que se va a usar va a ser “Autodesk Netfab”.

Es importante prestar atención al laminado de capas, ya que dependiendo del tamaño de capa la pieza va a quedar más precisa o menos. No obstante, también es necesario tener en cuenta que cuanto más precisión y calidad en la impresión, se requerirá más tiempo de impresión.



Ilustración 83. Tamaño de capa. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

Otro factor a mencionar es el relleno interior. En la siguiente ilustración se resumen las opciones disponibles en cuanto a patrón y porcentaje de relleno.

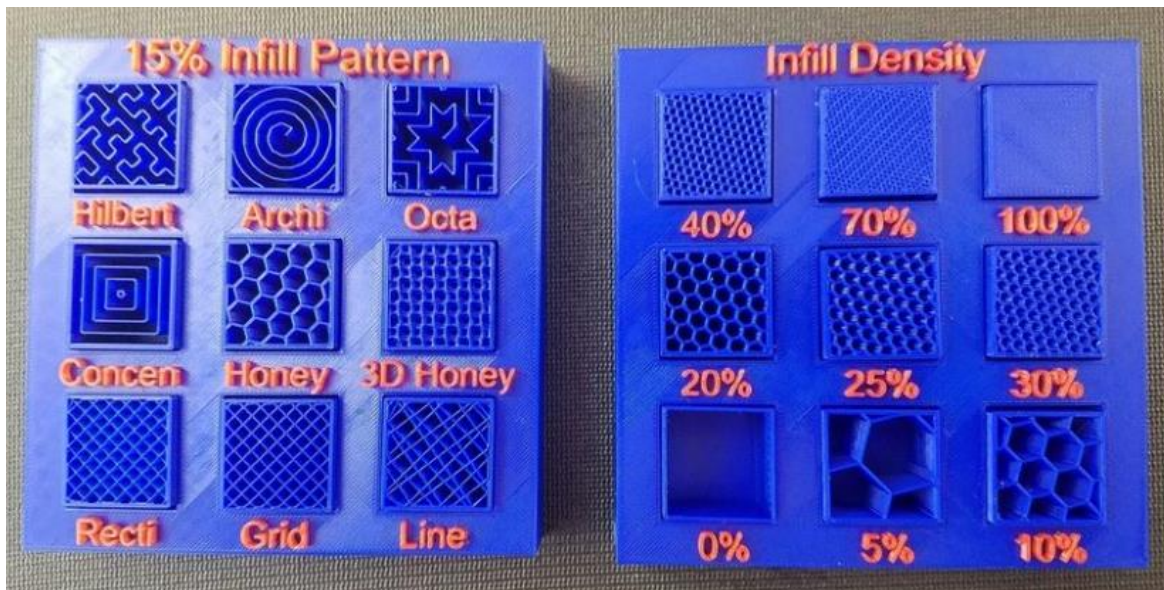


Ilustración 84. Relleno de pieza. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

Es importante añadir que en el caso de la impresora que se va a emplear, trabaja en sólido por lo que no sería necesario considerar los rellenos interiores.

4.6.2 TIPOS DE IMPRESIÓN

Aunque existen muchos tipos de fabricación aditiva, se pueden resumir en si la impresión es en estado líquido (SLA/DLP), sólido (FDM) o polvo (SLS/DMLS).

- Estado líquido: La impresión 3D mediante fotopolimerización en tanque o cuba se refiere a un proceso de fabricación aditiva en el cual se utiliza un líquido fotosensible y una fuente de luz ultravioleta para crear objetos tridimensionales capa por capa.

En este método, se llena un tanque o cuba con resina líquida fotosensible, que es un material que se endurece o solidifica cuando se expone a la luz ultravioleta. La resina se coloca en el tanque de manera que cubra toda la plataforma de impresión. Luego, una fuente de luz ultravioleta se utiliza para exponer selectivamente áreas específicas de la resina líquida. La luz ultravioleta hace que la resina expuesta se solidifique, formando una capa del objeto en construcción. Una vez que se completa una capa, la plataforma de impresión se mueve hacia abajo y se agrega una nueva capa de resina líquida sobre la capa anteriormente solidificada. Este proceso se repite capa por capa hasta que se completa el objeto

en su totalidad. Después de la impresión, es posible que sea necesario realizar un postprocesamiento adicional, como enjuagar el objeto para eliminar el exceso de resina o curar completamente el objeto mediante luz ultravioleta adicional.

La impresión 3D mediante fotopolimerización en tanque o cuba es conocida por su alta precisión y capacidad para producir detalles finos en los objetos impresos. Es utilizado en diversas aplicaciones, como la fabricación de prototipos, la producción de joyas, la odontología, la medicina y más. Algunas tecnologías populares de impresión 3D de este tipo incluyen la estereolitografía (SLA) y la impresión 3D con polimerización digital de luz (DLP).

- Estado sólido: La impresión 3D mediante extrusión de material es un método común utilizado en la fabricación aditiva, donde se utiliza un filamento de material termoplástico que se alimenta a través de un cabezal de impresión (también conocido como extrusor). El filamento se calienta hasta que se vuelve maleable y luego se deposita capa por capa para construir el objeto en 3D.

El proceso de extrusión comienza con el filamento de material termoplástico, que se alimenta desde una bobina a través del extrusor. Dentro del extrusor, el filamento pasa por un mecanismo de alimentación que lo empuja hacia un sistema de fusión, donde se calienta mediante resistencias eléctricas o un cabezal de impresión con una boquilla calentada. A medida que el filamento se calienta, se vuelve líquido o viscoso y se puede extruir a través de la boquilla del cabezal de impresión. La boquilla tiene un pequeño orificio a través del cual se deposita el material fundido sobre la plataforma de impresión o sobre la capa previamente depositada. La plataforma de impresión se mueve en coordenadas X, Y y Z controladas por un software de impresión 3D. A medida que el cabezal de impresión se desplaza horizontalmente, extruye el material fundido capa por capa, siguiendo el camino definido por el modelo 3D digital.

Una vez que se completa una capa, el cabezal de impresión se mueve ligeramente hacia arriba (en el eje Z) y se deposita una nueva capa de material fundido. Este proceso se repite hasta que se completa el objeto en su totalidad.

La impresión 3D mediante extrusión de material es una técnica versátil y ampliamente utilizada debido a su relativa simplicidad, costos bajos y la amplia

variedad de materiales termoplásticos disponibles. Es adecuada para una amplia gama de aplicaciones, desde la creación de prototipos rápidos hasta la fabricación de piezas finales en sectores como la industria, la medicina, la arquitectura y el diseño de productos.

- Estado polvo: La impresión 3D mediante fusión de lecho en polvo, también conocida como Sinterización Selectiva por Láser (SLS, por sus siglas en inglés), es un proceso de fabricación aditiva en el cual se utiliza un láser para fusionar selectivamente capas de polvo metálico, plástico o cerámico.

En este método, una capa fina de polvo se extiende uniformemente sobre la plataforma de impresión. Luego, un láser de alta potencia se utiliza para escanear y fusionar selectivamente las áreas del polvo correspondientes a la sección transversal del objeto a imprimir. El láser aumenta la temperatura del polvo en esas áreas específicas hasta que se funde o sinteriza, fusionándose con las capas adyacentes. Una vez que se completa una capa, se aplica una nueva capa de polvo sobre la capa anterior y el proceso de fusión se repite. Esto se repite capa por capa hasta que se construye el objeto en 3D completo en el lecho de polvo.

La impresión 3D mediante fusión de lecho en polvo ofrece varias ventajas. Debido a que el polvo no fundido actúa como soporte durante la impresión, no se requieren estructuras de soporte adicionales. Además, esta técnica permite la impresión de objetos con geometrías complejas y la utilización de una amplia gama de materiales, incluyendo polímeros, metales y cerámicas. Después de la impresión, es posible que se requiera un proceso de enfriamiento antes de retirar el objeto del lecho de polvo. También puede ser necesario realizar un postprocesamiento adicional, como la eliminación del exceso de polvo no fundido o el tratamiento térmico para mejorar las propiedades del objeto impreso.

La impresión 3D mediante fusión de lecho en polvo se utiliza en diversas industrias, como la fabricación de piezas personalizadas, prototipos funcionales, piezas finales y producción en serie. Es especialmente útil cuando se requiere resistencia mecánica, durabilidad y tolerancias precisas en los objetos impresos.

En el caso del prototipo que se va a imprimir, se va a usar la técnica de la fusión de lecho en polvo y para ello, se empleará la impresora “HP MJF” que utiliza como material de impresión el plástico PA12.

4.6.3 IMPRESIÓN DEL PROTOTIPO

Para la impresión del prototipo final se empleará el programa “Autodesk Netfabb”.

A continuación, se muestra la pieza dentro del software antes de ser impresa:

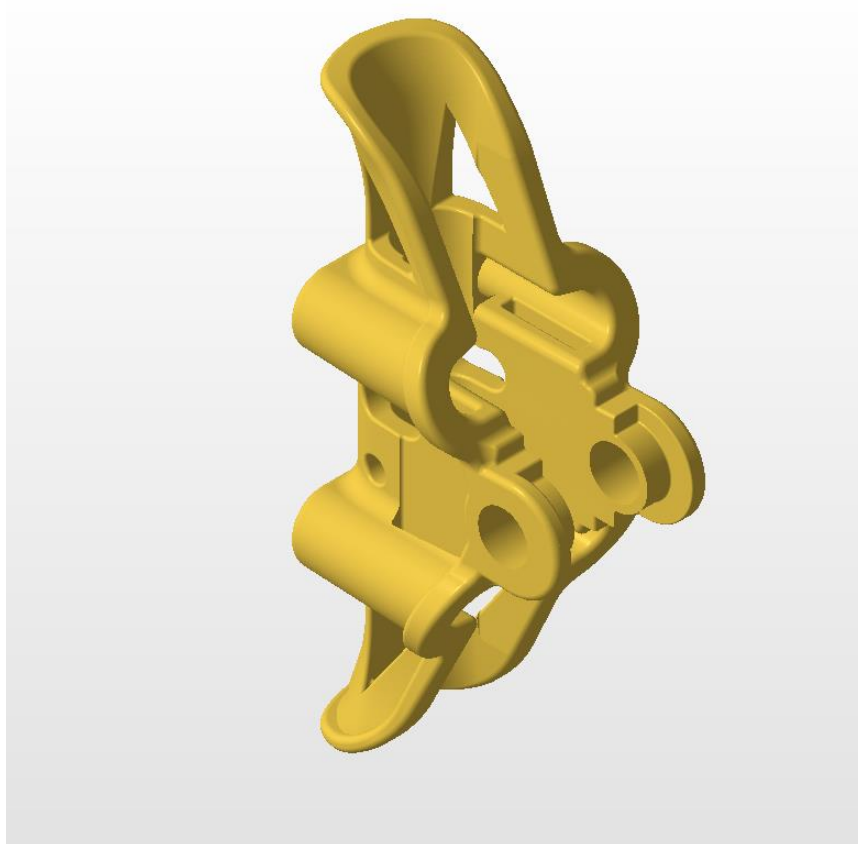


Ilustración 85. Prototipo en Netfabb. Fuente: elaboración propia

Las características de este prototipo se recogen en la siguiente ilustración. En ella se muestran las medidas de la pieza, así como los triángulos y puntos que van a ser necesarios para imprimir la pieza con ese nivel de detalle a partir de las indicaciones del archivo “.stl”.

Clip Planes
 X: 12.16 mm
 Y: 87.25 mm
 Z: 2.32 mm
 Custom 0.00 mm
☐ Transparent cuts ↩ ⚙

	X	Y	Z
Minimum:	12.16	87.25	2.32
Maximum:	87.49	187.95	205.83
Size:	75.33	100.70	203.50

Volume:	178.6714 cm ³	Area:	643.7597 cm ²
Points:	464971	Edges:	1395015
Triangles:	930010	Shells:	1
Holes:	0	Bad Edges:	0
Boundary Edges:	0	Boundary Length:	0.00 mm
Flipped Triangles:	0		
Surface is closed:		Yes	
Surface is orientable:		Yes	

	Min:	Max:	Ø:	Dev:
Edges/Point	3.00	93.00	6.00	0.92
Triangles/Edge	2.00	2.00	2.00	0.00
Triangle Quality	0.00	1.00	0.41	0.28
Edge Length	0.00	57.18	0.60	2.73

Ilustración 86. Características prototipo en Netfabb. Fuente: Netfabb

Aunque la pieza nunca se imprime sola para aprovechar el espacio de trabajo y el lanzamiento de impresión, en la siguiente imagen se muestra cómo queda la pieza en la cuba de impresión. A ello, habrá que añadirle otras piezas que se impriman en la misma tirada.

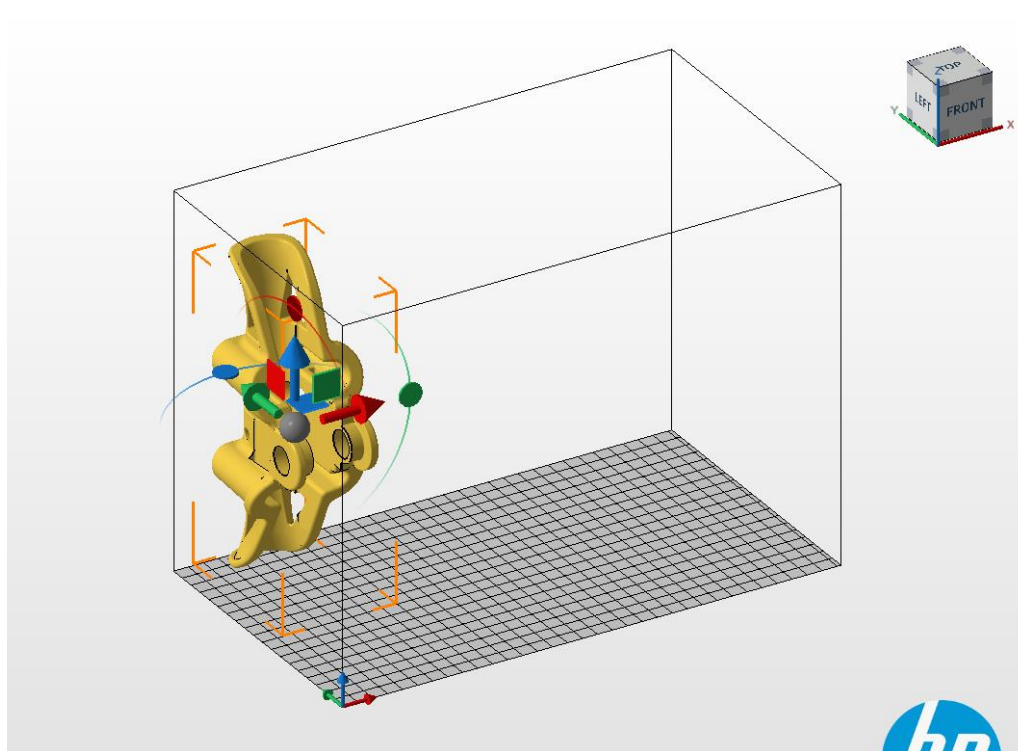


Ilustración 87. Prototipo en el espacio de trabajo de Netfabb. Fuente: elaboración propia

Finalmente, se muestra cómo queda la pieza optimizada tras las doce horas de impresión y una vez limpia



Ilustración 88. Pieza impresa (1). Fuente: elaboración propia



Ilustración 89. Pieza impresa (2). Fuente: elaboración propia

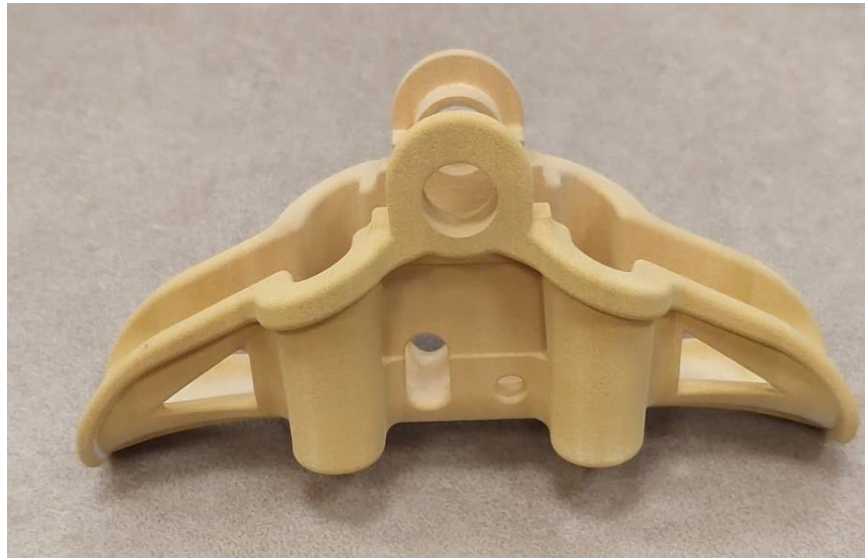


Ilustración 90. Pieza impresa (3). Fuente: elaboración propia

Capítulo 5. RESULTADOS

En esta sección se muestran de forma resumida los resultados obtenidos y la comparativa de la pieza tras la optimización.

Aplicando los criterios de diseño generativo y realizando los estudios estáticos necesarios, se consiguió obtener una pieza con un 48% menos de material y con las mismas capacidades funcionales (. Se trataba de un prototipo que cumplía con las necesidades de carga del herraje original y además eliminaba masa y volumen de donde no se necesitaba.

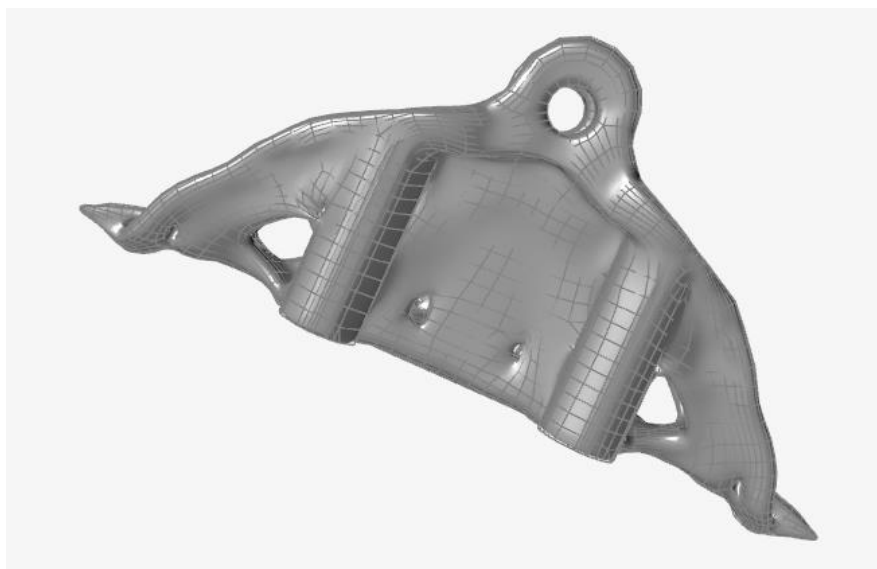


Ilustración 91. Herraje obtenido mediante diseño generativo. Fuente: elaboración propia

No obstante, no era una pieza apta para la fabricación y producción. Era una pieza completamente irregular, con salientes y no estaba pulida. La propuesta del diseño generativo fue tan extrema que no era viable imprimirla. Por ello, se decidió tomar dicha propuesta como modelo para optimizar la pieza original de manera manual.

De esta forma, se fueron realizando diversos cortes para obtener una pieza regular, sin zonas amorfas y con todas las superficies y esquinas pulidas. Es cierto, que no se consiguió la misma reducción de material ya que hubo que añadir material para redondear ciertas partes de la pieza y hacerla apta para la impresión (se consiguió en

torno a un 30%) pero sigue siendo una optimización considerable para una pieza de estas características.

El prototipo final consigue reducir la masa y el volumen de la pieza además de cumplir con los criterios de fuerza pertinentes.

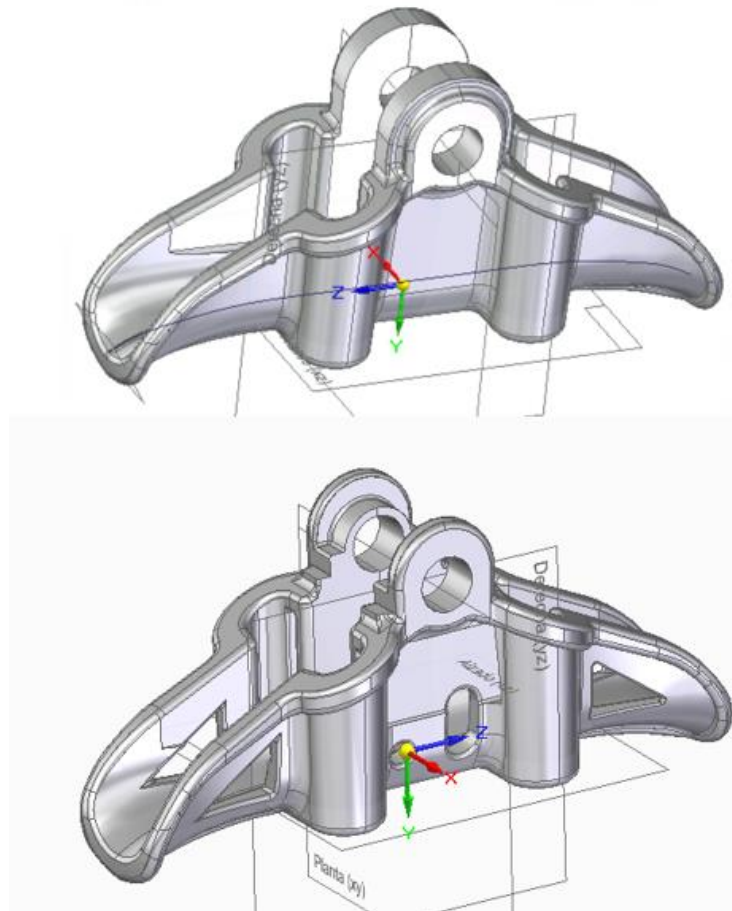


Ilustración 92. Prototipo final vs. Pieza original. Fuente: elaboración propia

Finalmente, para obtener el prototipo final se hizo uso de la fabricación aditiva y en concreto de la técnica MJF que usa la impresión mediante lecho en polvo. No requiere estructuras de soporte y permite realizar geometrías complejas y piezas personalizadas como la que se ha tratado en este estudio.

Como se puede observar en la última ilustración, es una técnica que permite crear piezas de alta precisión con tolerancias muy pequeñas, por lo que permite que las piezas no pierdan ninguna funcionalidad por ser impresas.

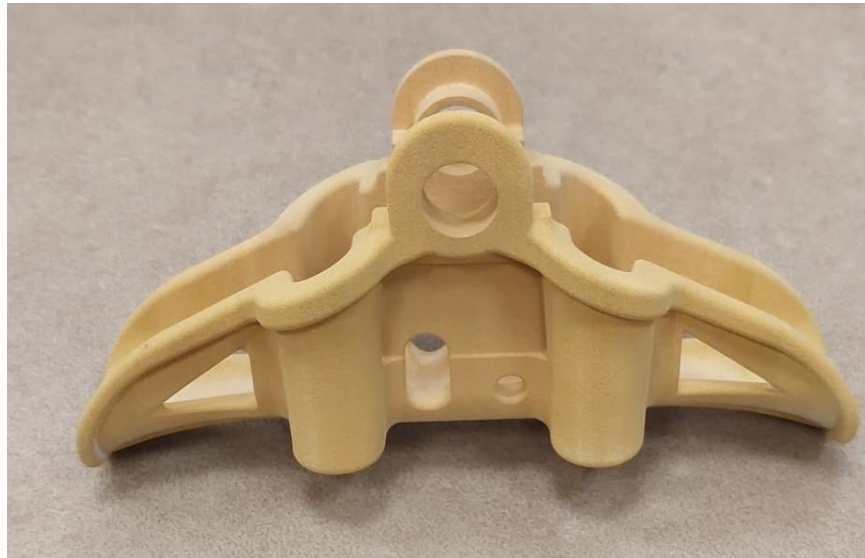


Ilustración 93. Pieza impresa (3). Fuente: elaboración propia

Capítulo 6. ESTUDIO ECONÓMICO: PROVEEDOR

VS I3D IMPLANTACIÓN

En esta sección se pretende comparar y analizar el coste de fabricarla por impresión 3D versus la opción de comprarla directamente de un proveedor.

Se estudiará el coste de prototipado de la grapa optimizada y refinada con POLVO y usando, en este caso, la impresora HP MJF.

Además, como alternativa, se analizará la impresión en aluminio. Este último presupuesto, se realizará a través de diferentes empresas que ofrecen servicios de fabricación aditiva online. No obstante, es necesario tener en cuenta que estos costes son una aproximación de lo que serían los costes reales ya que puede depender de otros gastos añadidos o de como esté gestionado por parte de la empresa el presupuesto final una vez entregada la pieza.

El material elegido será una aleación de aluminio. Analizando los distintos proveedores de grapas, no se especifica una aleación en especial mientras sea aluminio y varía según la marca que se decida ([19], [20], [21], [22]).

6.1 COSTES DE PROVEEDOR

En este apartado se muestra el coste de adquirir la grapa original a través de un proveedor. Para ello, se estudiarán las diferentes opciones que hay en el mercado según ciertas variables como el tamaño de lote.

Después de investigar las distintas alternativas ofrecidas en Alibaba.com, [23], se encontraron las siguientes opciones:

- Opción 1:



For cable conductor transmission line XGH Type aluminum alloy Suspension Clamps

€ View More

FOB Reference Price: [Get latest price](#)

\$0.81 - \$2.01 / piece | 200 piece/pieces (Min. order)

\$20.00 OFF Order more than \$1,000.00 [Get Coupon](#)

Benefits: 3-day coupon giveaway: up to US \$80 off [Claim now >](#)

Quantity: pieces

Samples: **\$0.10/piece** Min. order : 1 piece [Get samples](#)

Lead time: ⓘ	Quantity (pieces)	1 - 5000	> 5000
	Lead time (days)	10	To be negotiated

Customization: Customized logo (Min. order 1000 pieces)
Customized packaging (Min. order 1000 pieces)
More ▾

Ilustración 94. Proveedor 1, , [23]

• Opción 2:



CGH envelop type suspension clamp for overhead line power fittings

FOB Reference Price: [Get latest price](#)

\$2.60 - \$11.00 / piece | 10 piece/pieces (Min. order)

Benefits: Quick refunds on orders under US \$1,000 [Claim now >](#)

Quantity: pieces

Lead time: ⓘ	Quantity (pieces)	1 - 10	11 - 100	101 - 1000	> 1000
	Lead time (days)	1	5	15	To be negotiated

Customization: Customized logo (Min. order 100 pieces)

Ilustración 95. Proveedor 2, , [23]

• Opción 3:



Aluminum Alloy Suspension Clamp For Conductor Transmission Line In Power Accessories

FOB Reference Price: [Get latest price](#)

100 - 4999 pieces **\$6.00**
≥ 5000 pieces **\$5.00**

Benefits: Quick refunds on orders under US \$1,000 [Claim now >](#)

Quantity: pieces

Samples: **\$6.00/piece** Min. order : 1 piece [Get samples](#)

Lead time: ①	Quantity (pieces)	1 - 10000	> 10000
	Lead time (days)	15	To be negotiated

Customization: Customized logo (Min. order 2000 pieces)
Customized packaging (Min. order 2000 pieces)
[More >](#)

☐ Add to Compare ☐ Share

Ilustración 96. Proveedor 3, , [23]

- Opción 4:



CGH Aluminum Alloy Envelope Type Suspension Clamp For Overhead Line Power Fittings

≥ 10 pieces
\$1.13

Benefits: Quick refunds on orders under US \$1,000 [Claim now >](#)

Type Bolts Clamps **\$1.13**

Customization: Customized logo (Min. order 10000 pieces)
Customized packaging (Min. order 10000 pieces)
[More >](#)

Ilustración 97. Proveedor 4, , [23]

La siguiente tabla resume las principales opciones encontradas en Alibaba.com:

Proveedor	\$/pieza	Mínimo lote
1	0.81-2.01	200
2	2.60-11	10
3	5	5000
4	1.13	10

Tabla 4. Resumen proveedores. Fuente: elaboración propia

Como se denota de la Tabla 4, la principal variable que va a definir con que proveedor se va a realizar el pedido es el tamaño de lote. Además, se observa cierta horquilla en el

rango de precios que se puede obtener. No obstante, sigue siendo un precio muy competitivo y que actualmente es complicado superar con otra tecnología.

6.2 *COSTES DE PROTOTIPADO*

En este apartado se resumen los costes de prototipado usando la tecnología de impresión 3D mencionada anteriormente.

Es importante tener en cuenta que existen costes ocultos que pueden aparecer durante el fabricación. Entre ellos, se encuentran, por ejemplo, el deterioro, almacenamiento, logística o el manejo de pedidos. Por ello, para tener la imagen completa y poder decidir de forma correcta si la pieza debe ser producida y el beneficio obtenido, es necesario utilizar herramientas que analicen de forma precisa todos estos costes reales, ya que podrían cambiar por completo la decisión final.

Es cierto que la impresión 3D tiene supone una inversión inicial mayor que la fabricación convencional pero también es cierto que dicha inversión se recupera relativamente rápido. Además, es una tecnología con un coste de preparación bajo.

Entre las principales ventajas que se encuentran cuando se compara la impresión 3D frente a la fabricación tradicional está, la rápida introducción de productos en el mercado, al mismo tiempo que reduce los costos, ya que la impresora crea cada pieza de manera individual, sin necesidad de aumentar el proceso con la consiguiente inversión.

Otra ventaja sería la reducción del desperdicio de material, [24]. Al probar la pieza exacta que se desea, no hay posibilidad de desperdicio, lo que ayuda a reducir aún más los costos y el impacto en el medio ambiente. Además, la personalización es instantánea: cada pieza puede tener un propietario.

Por último, está la precisión y la complejidad de las piezas que se pueden crear. Al ser un diseño digital, es posible incluir todo tipo de detalles en la pieza que se desea obtener. Si se tiene una máquina lo suficientemente precisa, esto se convertirá en una realidad sin dificultades, mientras que crear la misma pieza utilizando métodos

tradicionales podría llevar mucho tiempo o, en algunos casos, ser casi imposible debido a los costos.

En la siguiente ilustración se incluyen las curvas comparativas de precios de la fabricación convencional frente la impresión 3D.

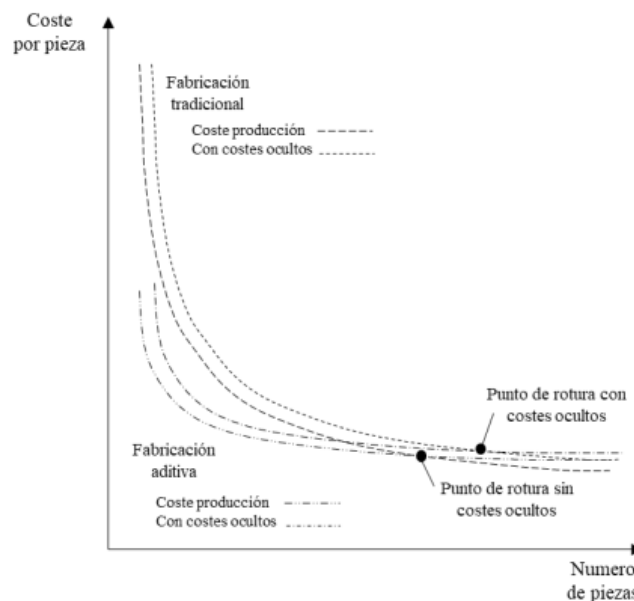


Ilustración 98. Comparativa I3D vs método tradicional. Fuente: Temario Tecnologías de Fabricación Comillas ICAI

6.2.1 TIEMPO Y COSTE DE LA GRAPA OPTIMIZADA Y REFINADA

La estimación del tiempo de impresión se obtuvo a través del software “Preform” de FormLabs, [25]. De esta forma, se entienden mejor los costes y se puede realizar mejor la comparativa entre las distintas opciones de impresión.

Detalles	
⌚ Tiempo estimado	~ 11 h ↻
📐 Capas	1850
📦 Volumen	143,04 ml

Ilustración 99. Tiempo estimado de impresión, [25]

A continuación, se muestra la estimación de precio de un prototipo impreso mediante fusión de lecho en polvo (DMLS).

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	80.000	
Coste mantenimiento anual (€)	2.000	
Años de amortización	5	
Días impresión/año	48	
Impresiones/día	1	
Precio impresión (€)	375,00	
Precio Impresión venta-público (€)	375,00	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)	100,00	
Coste material: (€/cc)	0,11	
Volumen Total (cc)	15634,75	
Densidad de Empaquetado	7,00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20	

CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (cc)	178,74	18,81 €/ud
Impresión	-	61,24 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,20	4,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,20	4,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	88,06 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	88,06 €	

Tabla 5. Coste impresión DMLS. Fuente: elaboración propia

6.3 COSTES DE IMPRESIÓN EN ALUMINIO

Para poder realizar este presupuesto, se ha contactado con diferentes empresas, [26] dedicadas a dar servicios de fabricación aditiva. Además, dichas empresas ofrecen servicios en línea para tener una primera aproximación de cuánto costaría producir la pieza. Pero, es importante indicar que dichos precios son sólo un coste estimado ya que

los costes reales pueden diferir un poco debido a los factores mencionados con anterioridad como los costes ocultos.

El presupuesto obtenido se ha calculado considerando que la pieza sería fabricada en aleación de aluminio.

6.3.1 COSTE DE LA GRAPA OPTIMIZADA Y REFINADA

 View DFM analysis optmin.stp 75.3 × 100.7 × 203.5 mm 23,673.44 mm³	CNC machining Aluminum 6082 3.2315 64430 AlSi1MgMn As machined (Ra 3.2µm / Ra 126µin) No part markings General tolerance: ISO 2768 Medium No tighter tolerances Sharp internal corners rounded to 2 mm No fits No threads	1 €1,087.01 €1,087.01p/part
--	---	--

Ilustración 100. Presupuesto impresión en aluminio, Fuente: elaboración propia

Además, se muestra el detalle de cómo quedará la grapa impresa en aluminio:



Ilustración 101. Pieza impresa en aluminio. Fuente: elaboración propia

6.4 COMPARATIVA COSTES

Actualmente, para adquirir una grapa a través de un proveedor es necesario comprar un tamaño mínimo de lote. Este valor puede ir desde 10 hasta 5000 dependiendo del fabricante. Este factor permite que el precio por grapa sea mínimo siendo el máximo coste alrededor de 10€. Sin embargo, en el caso de querer adquirir una sola grapa es necesario una inversión mínima de 100€ ya que no las venden de forma individual.

Por otro lado, el coste del prototipo impresión mediante lecho en polvo está cerca de los 100€ considerando el coste de material, de la maquina y su mantenimiento y del técnico. Si se compara con el coste de impresión en aluminio mediante una empresa externa, el coste asciende a 1000€. Se puede concluir, por tanto, que la impresión 3D a través de proveedores tiene muchos costes ocultos y se trata de un precio inflado en comparativa a una impresión en un laboratorio. Alrededor de 900€ son extras a los que hay que hacer frente si se quiere la pieza terminada en aluminio.

Actualmente, la impresora HP 580 MJF no permite la impresión en aluminio, por lo que la única opción de obtener este prototipo es mediante una empresa como “HUBS”. No obstante, es importante indicar que ya se está trabajando en impresoras “de laboratorio” y “uso personal” que empleen otros materiales como aluminio o acero, por lo que no se descarta que un futuro se pueda imprimir esta misma pieza en aluminio, pero a un coste mucho menor.

Si se compara el coste de obtener un herraje mediante I3D o en lote a través de “alibaba”, la justificación de dicha inversión radica en que a través de un proveedor no es posible conseguir una pieza personalizada y con las características topológicas definidas en el diseño final. Realizar esta pieza por fundición sigue sin ser posible ya que no es posible crear un molde para este prototipo al tener formas demasiado complejas. Por ello, si se quiere reducir la cantidad de material empleado para tener una pieza optimizada y a largo plazo ahorrar en material sólo se puede conseguir mediante impresión 3D. Además, esta técnica obtiene mucho mejores resultados en cuanto a precisión, durabilidad y resistencia mecánica ya que se puede poner más material donde se requiera y, de nuevo, se hace a gusto del consumidor cumpliendo con todos los requisitos técnicos necesarios.

En este sentido, la optimización topológica se encuentra mucho más alienada con los objetivos de neutralidad climática y desarrollo sostenible ya que permite minimizar la cantidad de residuo generado.

Capítulo 7. CONCLUSIONES

Los herrajes eléctricos son esenciales en las instalaciones eléctricas, desempeñan un papel fundamental para evitar cortocircuitos, sobrecargas y otros problemas eléctricos. Además, garantizan una conexión segura y confiable, protegen los cables y aseguran un suministro eficiente de electricidad en distintos entornos.

Se trata de un elemento común que se usa en diversas aplicaciones, desde instalaciones residenciales hasta sistemas industriales más complejos. Son piezas fabricadas en masa que suponen una alta cantidad de residuos y de exceso de material que realizando un estudio de optimización supondría un gran ahorro de costes en un futuro.

El proyecto se ha centrado en optimizar topológicamente dicha grapa para mejorar la eficiencia y rendimiento de la misma a la vez que se consigue reducir los deshechos. El prototipo obtenido está, por tanto, mucho más alineado con los objetivos de desarrollo sostenible y transición energética que la pieza original.

En un primer proceso de optimización se llegó a reducir la masa en un 48%. No obstante, se trató de un refinamiento tan extremos que tuvo que usarse como referencia para modificar y pulir el diseño original. Finalmente, el prototipo final, teniendo las mismas capacidades de carga, tiene alrededor de un 30% menos de masa. Haciendo un estudio más detallado de la propuesta extrema (48%), se podría llegar a refinar la pieza inicial con la misma reducción de masa.

Actualmente, fabricar dicho prototipo sólo es posible mediante impresión 3D. Realizar una sola pieza y tan personalizada y precisa sólo se consigue aplicando la fabricación aditiva e imprimiendo el nuevo herraje. Si se quiere redistribuir el material de forma eficiente, eliminando la masa sobrante y concentrándola donde sea necesario no se puede realizar por fundición.

Los costes de impresión 3D siguen siendo muy elevados y resulta complicado competir con los costes de un proveedor. Sin embargo, ahora mismo no existe ninguna empresa que permita obtener una pieza tan personalizada a través de la fundición.

Además, es importante mencionar que ya se están estudiando nuevas formas de obtener este tipo de piezas para poder reducir sus costes y que sea competitivo realizar este tipo de piezas. Ya se están realizando las primeras pruebas de una opción mixta entre la fabricación aditiva y la fundición a través de la inyección por molde. Aunque aún está en la parte de pruebas, los resultados son positivos y se espera que en un futuro cercano sea mucho más viable realizar piezas personalizadas y que reduzcan la cantidad de residuos.

En resumen, la optimización topológica permite lograr diseños más eficientes, livianos y resistentes. Además, dicho proceso conduce a un uso más eficiente de los recursos, diseños innovadores y un mejor rendimiento estructural en una variedad de aplicaciones industriales. Sigue siendo una opción cara ya que son piezas que sólo se pueden obtener mediante fabricación aditiva e impresión 3D, pero ya existen estudios esperanzadores que muestran como en un futuro cercano será una opción mucho más competitiva económicamente.

Capítulo 8. ANEXO: ALINEACIÓN CON LOS ODS

En 2015, la ONU aprobó la Agenda 2030 sobre Desarrollo sostenible, una oportunidad para emprender un nuevo camino hacia una sociedad mejor para todos. En ella, se describen 17 Objetivos de desarrollo sostenible con los que se pretende erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurad la prosperidad, entre otros.

En particular, este proyecto pretende dar respuesta tres de los objetivos marcados en dicha agenda:

- **Objetivo 8: TRABAJO DECENTE Y CRECIMIENTO ECONÓMICO**

Como se ha mencionado en las secciones anteriores, este proyecto pretende ayudar a optimizar no solo el diseño si no también el proceso de fabricación de los herrajes de las líneas eléctricas de forma a que se reduzca la cantidad de material empleado y por tanto se consiga reducir los costes y tiempos de fabricación.

- **Objetivo 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURAS**

Con este objetivo lo que se pretende conseguir es un modelo económico competitivo en el que gobierne la innovación con la intención de dirigir el crecimiento económico hacia un modelo circular y sostenible.

Al igual que con el objetivo anterior, optimizar el proceso de fabricación permite cumplir con este objetivo. Además, el desarrollo de una técnica tan innovadora como es la optimización topológica permitirá la evolución en muchos más sectores de los que se muestran con este trabajo.

- **Objetivo 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLE**

Los procesos productivos están muy ligados al medioambiente y a los recursos naturales. Con este objetivo se pretende fomentar el uso de recursos eficientes y sostenibles de forma que se reduzcan los desechos, el consumo de recursos y se usen materiales sostenibles.

Por ello, conseguir un modelo que optimice la cantidad de material necesario para la obtención de la pieza final parece crucial para cumplir con este objetivo.

En conclusión, lo que se quiere con este proyecto no es sólo llegar a un modelo optimizado sino cambiar los ciclos de producción y mejorar en la gestión de recursos de forma que se fomente un modelo sostenible e innovador que pueda ser empleado a largo plazo y que esté alienado con los objetivos impuestos por la ONU.

Capítulo 9. REFERENCIAS

- [1] «ET-AT-305 Herrajes para líneas aéreas de alta tensión | Likinormas». https://likinormas.micodensa.com/Especificacion/otros/etat305_herrajes_lineas_aer_eas_alta_tension (accedido 17 de marzo de 2023).
- [2] «Nociones básicas de optimización topológica: Cómo usar modelos algorítmicos para crear un diseño ligero», *Formlabs*. <https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/> (accedido 7 de abril de 2023).
- [3] «Sistema eléctrico». <https://www.tuveras.com/lineas/aereas/lineasaereas.htm#comienzo> (accedido 2 de noviembre de 2022).
- [4] «Conductores de cobre VS conductores de aluminio», *Gomez Maqueda - Material Eléctrico y Automatización Industrial en Sevilla*, 15 de febrero de 2018. <https://www.gomezmaqueda.com/conductores-cobre-aluminio/> (accedido 16 de marzo de 2023).
- [5] «Comprar Cable de aluminio unipolar 1x25 mm² 1000v - precio por metros. Precio de oferta». <https://www.electricidad.tienda/cable-aluminio-1000v/cable-de-aluminio-unipolar-1x25mm-1000v-precio-por-metros-4280.html> (accedido 16 de marzo de 2023).
- [6] «Comprar Cable rv-k 1x25mm² unipolar 1000v - precio por metro. Precio de oferta». <https://www.electricidad.tienda/cable-unipolar-1000v/cable-rv-k-1x25-mm2-unipolar-1000v-924.html> (accedido 16 de marzo de 2023).
- [7] A. D. D. C. Tesla, «Componentes Básicos De Una Línea De Transmisión De Alta Tensión», *Cursos Tesla*, 19 de noviembre de 2021. <https://cursostesla.com/componentes-basicos-de-una-linea-de-transmision-de-alta-tension/> (accedido 16 de marzo de 2023).
- [8] «guia-itc-lat-07-rev-2.pdf». Accedido: 16 de marzo de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://industria.gob.es/Calidad-Industrial/seguridadindustrial/instalacionesindustriales/lineas-alta-tension/Documents/guia-itc-lat-07-rev-2.pdf>
- [9] J. M. Martín, «AVES Y TENDIDOS ELÉCTRICOS Problemas y soluciones».
- [10] Structuralia, «Aisladores en líneas eléctricas: materiales, tipos y características». <https://blog.structuralia.com/aisladores-en-lineas-electricas-materiales-tipos-y-caracteristicas-principales> (accedido 16 de marzo de 2023).
- [11] «Introducción a las líneas de transmisión de energía eléctrica | Sector Electricidad | Profesionales en Ingeniería Eléctrica». <https://www.sectorelectricidad.com/12443/introduccion-a-las-lineas-de-transmision-de-energia-electrica/> (accedido 2 de noviembre de 2022).
- [12] Raul Marihuan Gonzalez, «Aislador cadena», 15:15:49 UTC. Accedido: 2 de noviembre de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/pampino321/aislador-cadena>
- [13] «Conoce todo sobre los herrajes eléctricos para líneas de alta / media tensión y líneas subterráneas - EEBC.COM.MX». <https://www.eebc.com.mx/herrajes-electricos/> (accedido 2 de noviembre de 2022).

-
- [14] «Grapa de Amarre de Herrajes Líneas Aéreas-Orient China». <https://www.orientaisladores.com/herrajes-lineas-aereas/Grapa-de-amarre.html> (accedido 2 de noviembre de 2022).
 - [15] «Grapa de Suspensión de Herrajes Líneas Aéreas-Orient China». <https://www.orientaisladores.com/herrajes-lineas-aereas/grapa-de-suspension.html> (accedido 2 de noviembre de 2022).
 - [16] Javier Yasno Gutiérrez, «Técnicas de Ingeniería Inversa para diseño Producto». noviembre de 2011.
 - [17] «Acelera el diseño de producto con Simulation-Driven Desig | Altair Inspire». <https://www.altair.com.es/inspire/> (accedido 14 de junio de 2023).
 - [18] «Fabricacion aditiva: Definición, procesos y beneficios», *Electrónica Edimar*, 26 de marzo de 2020. <https://edimar.com/fabricacion-aditiva-que-es/> (accedido 19 de junio de 2023).
 - [19] «TB_span.pdf». Accedido: 14 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: https://hubbelcdn.com/catalogfull/TB_span.pdf
 - [20] «Grapas de Suspensión», *RTHO*. <https://www.rtho.com/linea-de-productos/2-lltt/05-accesorios-para-la-transmision-y-distribucion/grapas-de-suspension/> (accedido 14 de junio de 2023).
 - [21] Saprem, «Suspensión para líneas de alta tensión», *Saprem*. <https://saprem.com/herrajes/suspension/> (accedido 14 de junio de 2023).
 - [22] «Grapas de suspension.pdf». Accedido: 14 de junio de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.plp-spain.com/phocadownload/Energia/Grapas%20de%20suspension.pdf>
 - [23] «Suspension Clamp For Overhead Lines-Suspension Clamp For Overhead Lines Manufacturers, Suppliers and Exporters on Alibaba.comPower Accessories». https://www.alibaba.com/trade/search?spm=a2700.product_home_l0.fy23_pc_search_bar_historyItem.0&tab=all&searchText=suspension+clamp+for+overhead+lines (accedido 27 de junio de 2023).
 - [24] «Impresión3d Vs Métodos Tradicionales De Fabricación | Go3DPrint.es», 23 de noviembre de 2020. <https://go3dprint.es/blog/impresion3d-vs-metodos-tradicionales/> (accedido 13 de junio de 2023).
 - [25] «Software de impresión 3D PreForm: Prepara tus modelos para la impresión», *Formlabs*. <https://formlabs.com/es/software/#preform> (accedido 20 de junio de 2023).
 - [26] «Hubs | On-demand Manufacturing: Quotes in Seconds, Parts in Days», *Hubs*. <https://www.hubs.com/> (accedido 27 de junio de 2023).

ALEJANDRA BARCELÓ