



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN ROBOT

Autor: Ricardo Hernández Schnelzer

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Rodrigo Álvarez Hernández

Madrid

Julio de 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN ROBOT** de la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 4º es de mi autoría 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.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

☒ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, la Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

(indicar aquí el uso concreto que se ha hecho de la Inteligencia Artificial)

- Búsqueda de bibliografía técnica
- Ayuda en el uso de software (SolidWorks, Solid Edge, VX Elements, Altair Inspire)
- Ayuda a la hora de estructurar apartados y subapartados
- Validación de datos técnicos
- Aclaraciones conceptuales y explicaciones



Firmado (alumno): Ricardo Hernández Schnelzer

Fecha: 09/07/2026

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto	El co-Director del Proyecto (si aplica)
	
Fdo: Mariano Jiménez Calzado	Fdo: Rodrigo Álvarez Hernández
Fecha: 13/07/2026	Fecha: 13/07/2026



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN ROBOT

Autor: Ricardo Hernández Schnelzer

Director: Mariano Jiménez Calzado

Co-Director: Rodrigo Álvarez Hernández

Madrid

Julio de 2026

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi familia, que me ha visto sufrir y crecer desde que entré por las puertas de ICAI, y sin la cual no habría llegado a donde estoy hoy. En especial quiero darle las gracias a mi padre, que, siendo ingeniero industrial también, ha sabido siempre comprender mi situación y guiarme desde el amor y la compasión.

A su vez quiero agradecer a los amigos que he hecho en la escuela, con los que he sufrido, aprendido y finalmente crecido, y que ahora junto a mí pueden llevar el nombre de ingeniero de ICAI con orgullo. He conocido a grandes ingenieros, pero crucialmente a grandes personas, que salen de la escuela preparados para aportar a un mundo mejor.

Por último, a todos los profesores que he tenido a lo largo de la carrera, en especial a aquellos que se han preocupado en darnos lecciones de vida más allá de lo académico. Sus palabras de sabiduría han ayudado a ver más allá de los estudios, haciéndonos crecer como buenas personas que van a vivir una vida laboral y personal de servicio para los demás. Finalmente, quiero dar un agradecimiento personal a Mariano, por enseñarnos la belleza de la fabricación, por guiarme en este TFG, y por su paciencia y su inmensa entrega.

ANÁLISIS, DISEÑO GENERATIVO Y FABRICACIÓN DE COMPONENTES DE USO FINAL MEDIANTE IMPRESIÓN 3D PARA APLICACIÓN EN UN ROBOT

Autor: Hernández Schnelzer, Ricardo.

Director: Jiménez Calzado, Mariano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Palabras clave: ROBOT ABB IRB 120, Optimización Topológica, Ingeniería Inversa, Fabricación Aditiva, Diseño Generativo, Análisis por Elementos Finitos.

1. Introducción

El constante avance en las tecnologías de fabricación digital ha impulsado la integración de métodos de optimización en sectores industriales como la robótica avanzada. La demanda actual de sistemas automatizados con dinámicas más rápidas y un menor consumo energético exige el rediseño de sus eslabones estructurales rígidos hacia soluciones de mínima masa y máxima rigidez. En este sentido, la optimización topológica y el diseño generativo, respaldados por la flexibilidad geométrica que ofrece la fabricación aditiva, se posicionan como metodologías clave para transformar componentes industriales masivos y convencionales en estructuras orgánicas optimizadas de alta eficiencia.

2. Definición del Proyecto

Este Trabajo Fin de Grado tiene como objetivo el aligeramiento y rediseño del eslabón estructural denominado Link 2, perteneciente al brazo robótico industrial ABB IRB 120. Para lograrlo, se plantea un flujo de trabajo que combina técnicas de ingeniería inversa para la adquisición geométrica del componente real, simulación avanzada por elementos finitos (FEA) para garantizar su integridad mecánica bajo condiciones operativas, y procesos de optimización topológica iterativa encaminados a reducir el uso de material en zonas no críticas. Finalmente, el proyecto contempla un exhaustivo análisis técnico-económico de fabricación interna frente a la externalización industrial para validar la viabilidad de producir el componente final mediante impresión 3D FDM de altas prestaciones.



Figura 1. Brazo estructural del Link 2 (elaboración propia)

3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El desarrollo del proyecto se estructuró a través de un ecosistema de software e instrumentación interconectado. En primer lugar, se realizó la captura digital del componente original mediante escaneo 3D, procesando y limpiando la malla de facetas resultante en VX Model. Posteriormente, se llevó a cabo la reconstrucción paramétrica de la pieza en SolidWorks para recuperar una geometría sólida editable que preservara las interfaces físicas de montaje. Sobre este modelo base, se configuraron y ejecutaron las simulaciones de validación mecánica (FEA) y las iteraciones de optimización topológica en Solid Edge, estableciendo las restricciones de carga del robot. Tras esto, las complejas formas orgánicas obtenidas se sometieron a un proceso de refinamiento de superficies en Altair Inspire para asegurar una geometría suave y funcional. Finalmente, la metodología se completó con la fase de fabricación aditiva mediante tecnología FDM, utilizando los entornos de laminación nativos para la preparación de los archivos de impresión, y se implementó un modelo matemático analítico en hojas de cálculo para la auditoría de costes de producción interna en las impresoras Dynamical Tools 3D DT600+ y Markforged X7, validando el presupuesto frente a algoritmos de cotización de proveedores comerciales externos.

4. Resultados

La aplicación de la metodología descrita permitió alcanzar una reducción de masa del 59% respecto al sólido original, logrando rebajar el peso del componente desde los 2,583 kg iniciales en aluminio L-2560 hasta un valor final de 1,059 kg en la variante optimizada, todo ello garantizando la integridad estructural en las zonas de responsabilidad y las interfaces de montaje de los actuadores. Los modelos numéricos de simulación FEA confirmaron un comportamiento mecánico elástico y seguro bajo las condiciones de carga operativas del robot. En el ámbito económico, los modelos de costes por amortización lineal implementados en Excel determinaron un coste unitario de fabricación interna de 207,08 € para la pieza original en la impresora Dynamic Tools DT600+ utilizando PLA, y de 654,42 € para la variante optimizada en la Markforged X7 empleando material compuesto Onyx FR-A. El posterior estudio comparativo validó estas cifras frente al mercado de fabricación aditiva industrial, donde las cotizaciones de plataformas de economía distribuida como Protolabs Network para el material técnico Onyx (523,44 €) se aproximaron de forma muy estrecha al coste interno calculado, contrastando con los presupuestos de proveedores premium como Materialise Onsite, cuyas tarifas unitarias se elevaron hasta los 1422,00 € y 729,90 €.

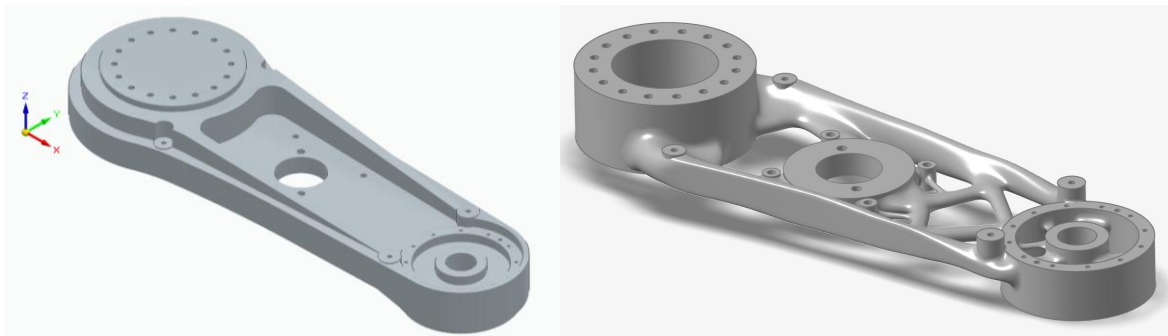


Figura 2. Link 2 original simplificado y optimizado topológicamente (elaboración propia)



Figura 3. Piezas finales fabricadas (elaboración propia)

5. Conclusiones

Los resultados demuestran que la integración de la ingeniería inversa y la optimización topológica representa una alternativa técnica y económicamente viable para el desarrollo autónomo de componentes robóticos finales de alta eficiencia, especialmente enfocada a fases de prototipado o lotes de series cortas. El análisis de costes evidencia que las economías de escala comerciales resultan muy eficientes para materiales básicos como el PLA, pero ante requerimientos técnicos avanzados de ingeniería con filamentos compuestos como el Onyx, el modelo de costes internos de la universidad se posiciona como una opción plenamente competitiva que garantiza la independencia y precisión presupuestaria de la institución. Como líneas de investigación futura, se propone evaluar el comportamiento del componente mediante impresión 3D metálica o mediante técnicas híbridas de fundición con mecanizado CNC de precisión posterior, validando físicamente su resistencia ante ensayos dinámicos y de fatiga en un banco de pruebas real.

ANALYSIS, GENERATIVE DESIGN AND MANUFACTURING OF END-USE COMPONENTS VIA 3D PRINTING FOR APPLICATION IN A ROBOT

Autor: Hernández Schnelzer, Ricardo.

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

Keywords: ABB IRB 120 ROBOT, Topology Optimization, Reverse Engineering, Additive Manufacturing, Generative Design, Finite Element Analysis.

1. Introduction

The constant advancement in digital manufacturing technologies has driven the integration of optimization methods in industrial sectors such as advanced robotics. The current demand for automated systems with faster dynamics and lower energy consumption requires the redesign of their rigid structural links toward minimum mass and maximum stiffness solutions. In this sense, topology optimization and generative design, backed by the geometric flexibility offered by additive manufacturing, position themselves as key methodologies to transform massive and conventional industrial components into optimized, high-efficiency organic structures.

2. Project Definition

This Bachelor's Thesis aims to lighten and redesign the structural link named Link 2, belonging to the ABB IRB 120 industrial robotic arm. To achieve this, a workflow is proposed that combines reverse engineering techniques for the geometric acquisition of the real component, advanced finite element analysis (FEA) to guarantee its mechanical integrity under operating conditions, and iterative topology optimization processes aimed at reducing material use in non-critical areas. Finally, the project includes an exhaustive technical-economic analysis of in-house manufacturing versus industrial outsourcing to validate the feasibility of producing the final component using high-performance FDM 3D printing.



Figure 1. Structural arm of Link 2 (own elaboration)

3. Description of the model/system/tool

The development of the project was structured through an interconnected ecosystem of software and instrumentation. First, the digital capture of the original component was performed using 3D scanning, processing and cleaning the resulting facet mesh in VX Model. Subsequently, the parametric reconstruction of the part was carried out in SolidWorks to recover an editable solid geometry that preserved the physical mounting interfaces. On this base model, mechanical validation simulations (FEA) and iterative topology optimization loops were configured and executed in Solid Edge, establishing the robot's load constraints. After this, the complex organic shapes obtained were subjected to a surface refinement process in Altair Inspire to ensure a smooth and functional geometry. Finally, the methodology was completed with the additive manufacturing phase using FDM technology, utilizing native slicing environments for the preparation of print files, and an analytical mathematical model was implemented in spreadsheets for auditing in-house production costs on the Dynamical Tools DT600+ and Markforged X7 printers, validating the budget against quotation algorithms from external commercial suppliers.

4. Results

The application of the described methodology allowed achieving a mass reduction of 59% compared to the original solid, managing to lower the weight of the component from the initial 2.583 kg in L-2560 aluminum to a final value of 1.059 kg in the optimized variant, all while guaranteeing structural integrity in critical areas and the mounting interfaces of the actuators. The numerical FEA simulation models confirmed a safe and elastic mechanical behavior under the operating load conditions of the robot. In the economic field, the linear depreciation cost models implemented in Excel determined an in-house manufacturing unit cost of €207.08 for the original part on the DT600+ printer using PLA, and €654.42 for the optimized variant on the Markforged X7 using Onyx FR-A composite material. The subsequent comparative study validated these figures against the industrial additive manufacturing market, where quotations from distributed economy platforms such as Protolabs Network for the Onyx technical material (€523.44) very closely approached the calculated in-house cost, contrasting with the budgets of premium providers such as Materialise Onsite, whose unit rates rose up to €1,422.00 and €729.90.

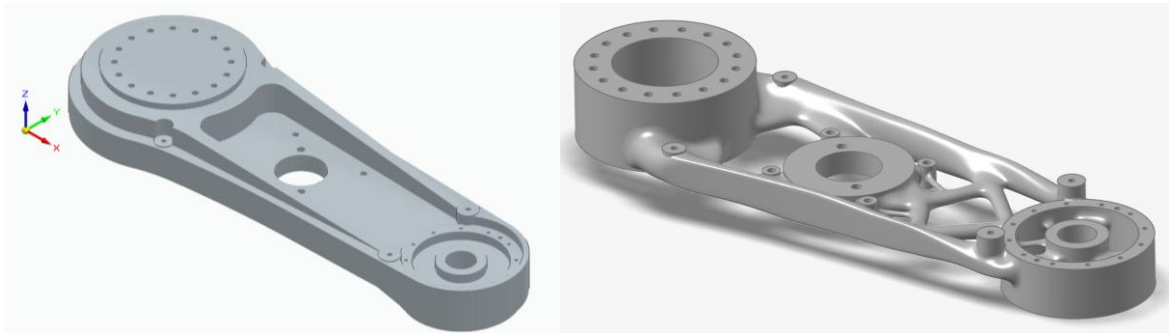


Figura 2. Original simplified Link 2 part and topology optimized part (own elaboration)



Figura 3. Final manufactured parts (own elaboration)

5. Conclusions

The results demonstrate that the integration of reverse engineering and topology optimization represents a technically and economically viable alternative for the autonomous development of high-efficiency final robotic components, especially focused on prototyping phases or short-series batches. The cost analysis evidences that commercial economies of scale are highly efficient for basic materials such as PLA, but when faced with advanced technical engineering requirements with composite filaments like Onyx, the university's internal cost model positions itself as a fully competitive option that guarantees the institution's budget independence and accuracy. As future lines of research, it is proposed to evaluate the behavior of the component through metallic 3D printing or using hybrid casting techniques with subsequent precision CNC machining, physically validating its resistance against dynamic and fatigue testing in a real test bench.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción	11
1.1 Motivación del proyecto.....	13
1.2 Objetivos del Proyecto	14
1.2.1 Análisis e Ingeniería Inversa del Componente Original	14
1.2.2 Definición del Estado de Cargas y Condiciones de Contorno	15
1.2.3 Aplicación de Técnicas de Optimización Topológica	15
1.2.4 Adaptación por Criterio de Diseño y Fabricación.....	16
1.2.5 Validación y Fabricación Aditiva.....	16
1.2.6 Evaluación del Componente y Análisis de Resultados y Viabilidad Económica	16
1.3 Alineación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).....	17
1.3.1 ODS 9: Industria, Innovación e Infraestructura	17
1.3.2 ODS 12: Producción y Consumo Responsables.....	17
1.3.3 ODS 7: Energía Asequible y No Contaminante	17
Capítulo 2. Estado del Arte.....	19
2.1 Robótica Industrial	20
2.1.1 Evolución Histórica y Futuro de la Robótica Industrial	20
2.1.2 Robot PUMA	22
2.1.3 Clasificación Estructural y Morfología.....	23
2.1.4 Modelado cinemático y parámetros de Denavit-Hartenberg.....	24
2.2 Ingeniería Inversa y Escaneado 3D	27
2.3 Análisis por Elementos Finitos (FEA)	31
2.4 Optimización Topológica y Diseño Generativo	33
2.5 Fabricación Aditiva	35
Capítulo 3. Definición del Trabajo	39
3.1 Selección y Justificación del Componente	40
3.2 Selección del Material	44
3.3 Descripción del Estado de Cargas y Condiciones de Contorno	46
3.3.1 Justificación de la Selección del Estado de Cargas	46
3.3.2 Análisis de Trayectorias de Carga y Selección del Caso Crítico.....	47
3.3.3 Modelado de la Parada de Emergencia	50

3.3.4 Definición del Estado de Cargas.....	50
Capítulo 4. Metodología de Trabajo	52
4.1 Proceso General.....	52
4.2 Ingeniería Inversa	54
4.2.1 Escaneo 3D.....	56
4.2.2 Limpieza y Procesamiento del Escaneado en VX Model.....	56
4.3 Reconstrucción Paramétrica en SolidWorks	57
4.4 Simulación FEA de Validación en Solid Edge.....	58
4.5 Optimización Topológica Iterativa en Solid Edge	59
4.6 Refinamiento Geométrico en Altair Inspire	61
4.7 Fabricación Aditiva	62
4.7.1 Preparación para Fabricación Aditiva	62
4.7.2 Fabricación del Prototipo y Evaluación Final.....	63
Capítulo 5. Desarrollo del Trabajo	64
5.1 Preparación y Análisis de la Pieza.....	65
5.2 Obtención de la Pieza por Ingeniería Inversa.....	66
5.2.1 Escaneo 3D y Trabajo en VX Model	66
5.2.2 Postprocesado en SolidWorks	73
5.3 Obtención de la Pieza por Modelado CAD	76
5.3.1 Pieza Detallada	76
5.3.2 Pieza Simplificada para Optimización Topológica.....	83
5.4 Simulación FEA	85
5.4.1 Creación de Estudio FEA.....	85
5.4.2 Resultados de la Simulación FEA	90
5.5 Optimización Topológica y Diseño Generativo	93
5.5.1 Creación de Estudio Generativo	93
5.5.2 Resultados del Estudio Generativo.....	101
5.5.3 Conversión de Cuerpo de Construcción a Diseño	113
5.5.4 Simulación FEA Final	115
5.6 Adaptación por Criterio de Diseño y Fabricación	118
5.7 Preparación Para Fabricación Aditiva.....	128
5.7.1 Pieza Original	128

5.7.2 Pieza Optimizada.....	132
5.8 Impresión 3D y Postprocesado.....	135
5.8.1 Pieza Original.....	135
5.8.2 Pieza Optimizada.....	137
Capítulo 6. Análisis de Resultados.....	138
6.1 Análisis de Piezas.....	138
6.2 Análisis de Costes.....	144
6.2.1 Pieza Original.....	147
6.2.2 Pieza Optimizada.....	152
Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros.....	158
Capítulo 8. Bibliografía.....	160
Capítulo 9. ANEXOS.....	165
9.1 ANEXO I. Especificaciones Dynamic Tools DT600+.....	165
9.2 ANEXO II. Especificaciones Markforged X7.....	166
9.3 ANEXO III. Materiales de Impresión.....	167
9.4 ANEXO IV. Tabla de Aleaciones de Aluminio para Fundición.....	168
9.5 ANEXO V. Plano Detallado de la Pieza Original.....	169

Índice de figuras

Figura 1. Componentes del Robot ABB IRB 120 (elaboración propia).....	14
Figura 2. Objetivos de desarrollo sostenible de la ONU [7]	18
Figura 3. Niveles de colaboración entre humano y robot [11]	21
Figura 4. Principales tendencias mundiales de la robótica [13]	22
Figura 5. Grados de libertad del Robot ABB IRB 120 [14]	23
Figura 6. Parámetros de Denavit-Hartenberg del IRB 120 [16].....	25
Figura 7. Matriz de transformación de Denavit-Hartenberg [17].....	25
Figura 8. Transformación total de un robot PUMA de 6 grados de libertad [18]	26
Figura 9. Diagrama de flujo para el diseño de producto mediante ingeniería inversa [20].	27
Figura 10. Escaneado 3D de un componente [21].....	28
Figura 11. Métodos de digitalización 3D (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI))	29
Figura 12. Fases del modelado 3D no paramétrico (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI))	30
Figura 13. Simulación FEA de una biela de pistón [25]	31
Figura 14. Ejemplo de optimización topológica en una pieza [27]	33
Figura 15. Ejemplo de impresión 3D de ruedas dentadas [32].....	35
Figura 16. Tecnologías de fabricación aditiva [36].....	38
Figura 17. Robot ABB IRB 120 [38]	40
Figura 18. Espacio de trabajo del ABB IRB 120 [39].....	41
Figura 19. Elementos del Robot ABB IRB 120 [40].....	41
Figura 20. Cableado y electrónica en el Link 2 (elaboración propia)	42
Figura 21. Brazo estructural del Link 2 (elaboración propia)	43
Figura 22. Diagrama de Cuerpo Libre del ABB IRB 120 [5]	48
Figura 23. Cargas que actúan en la base del robot para distintas configuraciones [5].....	49
Figura 24. DCL aplicado al caso de cargas extremo (elaboración propia).....	51

Figura 25. Diagrama de flujo del proceso general (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI))	53
Figura 26. Diagrama de flujo para ingeniería inversa (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI))	55
Figura 27. Diagrama de flujo para optimización topológica [48]	60
Figura 28. Diagrama de flujo para fabricación aditiva [36]	63
Figura 29. HandyScan 3D de Creaform [50].....	66
Figura 30. ABB IRB 120 con marcadores geométricos para escaneado 3D (elaboración propia).....	67
Figura 31. Modelo inicial introducido en VX Model (elaboración propia)	68
Figura 32. Tareas de eliminación de material (elaboración propia)	69
Figura 33. Colocación de nuevos planos de referencia (elaboración propia).....	70
Figura 34. Tapado de agujeros (elaboración propia).....	71
Figura 35. Eliminación de parte trasera (elaboración propia)	72
Figura 36. Función Auto Surface (elaboración propia).....	72
Figura 37. Modelo importado a SolidWorks (elaboración propia)	73
Figura 38. Creación de planos auxiliares (elaboración propia)	73
Figura 39. Limpieza por corte del perfil exterior de la pieza (elaboración propia).....	74
Figura 40. Rellenado del espacio trasero eliminado en VX Model (elaboración propia) ...	74
Figura 41. Inserción de agujeros eliminados en VX Model (elaboración propia)	75
Figura 42. Pieza final tras postprocesado (elaboración propia).....	75
Figura 43. Dimensiones base (elaboración propia)	77
Figura 44. Extrusiones inferiores de la pieza (elaboración propia).....	77
Figura 45. Extrusiones superiores de la pieza (elaboración propia).....	78
Figura 46. Inserción de bordes en ambos lados (elaboración propia)	79
Figura 47. Cortes de revolución y extrusión (elaboración propia)	80
Figura 48. Redondeo de bordes (elaboración propia).....	81
Figura 49. Inserción de agujeros, corte extruido en forma de X y redondeos finales (elaboración propia).....	82

Figura 50. Simplificación de la pieza para posterior simulación y optimización (elaboración propia).....	84
Figura 51. Nuevo estudio FEA con selección del material Aluminio L-2560 (elaboración propia).....	85
Figura 52. Ventana para seleccionar restricción fija (elaboración propia).....	86
Figura 53. Restricción fija sobre la pieza (elaboración propia).....	86
Figura 54. Ventana para seleccionar cargas estructurales de fuerza y par (elaboración propia)	87
Figura 55. Colocación de fuerzas sobre la pieza (elaboración propia).....	87
Figura 56. Colocación de momento flector sobre la pieza (elaboración propia).....	88
Figura 57. Colocación de momento torsor sobre la pieza (elaboración propia).....	88
Figura 58. Ventana para mallar y resolver simulación (elaboración propia)	89
Figura 59. Tamaño de malla de 3,22mm (elaboración propia)	89
Figura 60. Pieza mallada con flechas de cargas (elaboración propia).....	90
Figura 61. Vista 1 resultado simulación FEA (elaboración propia).....	91
Figura 62. Vista 2 resultado simulación FEA (elaboración propia).....	91
Figura 63. Detalle 1 resultado simulación FEA (elaboración propia).....	92
Figura 64. Detalle 2 resultado simulación FEA (elaboración propia).....	92
Figura 65. Nuevo estudio generativo con material Aluminio l-2560 (elaboración propia)	93
Figura 66. Ventana para introducir restricciones y cargas (elaboración propia).....	94
Figura 67. Restricción fija sobre la pieza (elaboración propia).....	94
Figura 68. Colocación de fuerzas sobre la pieza (elaboración propia).....	95
Figura 69. Colocación de momento flector sobre la pieza (elaboración propia).....	95
Figura 70. Colocación de momento torsor sobre la pieza (elaboración propia).....	96
Figura 71. Colocación de restricción de simetría plana (elaboración propia).....	96
Figura 72. Región a preservar 1 (elaboración propia).....	97
Figura 73. Región a preservar 2 (elaboración propia).....	97
Figura 74. Región a preservar 3 (elaboración propia).....	98
Figura 75. Región a preservar 4 (elaboración propia).....	98
Figura 76. Región a preservar 5 (elaboración propia).....	99

Figura 77. Región a preservar 6 (elaboración propia).....	99
Figura 78. Región a preservar 7 (elaboración propia).....	100
Figura 79. Región a preservar 8 (elaboración propia).....	100
Figura 80. Región a preservar 9 (elaboración propia).....	100
Figura 81. Resultado simulación iteración 1 (elaboración propia).....	101
Figura 82. Modificación región a preservar 9 (elaboración propia).....	102
Figura 83. Parámetros iteración 2. Tamaño de voxel 1,73 mm y reducción de masa 60% (elaboración propia).....	103
Figura 84. Resultado estudio generativo iteración 2 (elaboración propia).....	103
Figura 85. Resultado simulación iteración 2 (elaboración propia).....	104
Figura 86. Parámetros iteración 3. Tamaño de voxel 1,73 mm y reducción de masa 55% (elaboración propia).....	105
Figura 87. Resultado estudio generativo iteración 3 (elaboración propia).....	106
Figura 88. Resultado simulación iteración 3 (elaboración propia).....	106
Figura 89. Parámetros iteración 4. Tamaño de voxel 1,73 mm y reducción de masa 50% (elaboración propia).....	107
Figura 90. Resultado estudio generativo iteración 4 (elaboración propia).....	108
Figura 91. Resultado simulación iteración 4 (elaboración propia).....	108
Figura 92. Parámetros iteración 5. Tamaño de voxel 1,73 mm y reducción de masa 60% (elaboración propia).....	109
Figura 93. Resultado estudio generativo iteración 5 (elaboración propia).....	110
Figura 94. Resultado simulación iteración 5 (elaboración propia).....	110
Figura 95. Parámetros iteración 6. Tamaño de voxel 1,73 mm y reducción de masa 59% (elaboración propia).....	111
Figura 96. Resultado estudio generativo iteración 6 (elaboración propia).....	112
Figura 97. Resultado simulación iteración 6 (elaboración propia).....	112
Figura 98. Ventana para convertir en cuerpo de malla (elaboración propia)	113
Figura 99. Opciones de mallado (elaboración propia)	114
Figura 100. Pieza convertida a cuerpo de diseño (elaboración propia).....	114
Figura 101. Tamaño de malla de 3,02 mm (elaboración propia)	115

Figura 102. Pieza mallada con condiciones de contorno (elaboración propia).....	116
Figura 103. Resultado de simulación FEA (elaboración propia)	116
Figura 104. Búsqueda de contorno iso dinámico de 160 MPa (elaboración propia).....	117
Figura 105. Pieza importada en Altair Inspire (elaboración propia)	118
Figura 106. Comando de simetría (elaboración propia)	119
Figura 107. Comando Fit de Altair Inspire (elaboración propia)	119
Figura 108. Irregularidades en la PolyNURBS (elaboración propia).....	120
Figura 109. Comando Reparar (elaboración propia).....	121
Figura 110. Elemento reparado (elaboración propia).....	121
Figura 111. Pieza tras reparar irregularidades (elaboración propia)	122
Figura 112. Conversión a pieza implícita (elaboración propia)	122
Figura 113. Creación de planos auxiliares (elaboración propia).....	123
Figura 114. Reconstrucción de zonas a preservar (elaboración propia).....	123
Figura 115. Comando sustraer para eliminar zona de diseño de pieza implícita (elaboración propia).....	124
Figura 116. Pieza implícita tras eliminar cilindros (elaboración propia)	125
Figura 117. Todas las zonas de preservación creadas de cero en Altair Inspire (elaboración propia).....	125
Figura 118. Todas las zonas de preservación sustraídas de la pieza implícita (elaboración propia).....	126
Figura 119. Comando combinar para juntar ambos conjuntos (elaboración propia)	126
Figura 120. Pieza final lista para exportar (elaboración propia)	127
Figura 121. Impresora 3D DT 600+ del fabricante Dynamical Tools [52].....	129
Figura 122. Pieza original dentro del slicer Simplify3D (elaboración propia)	129
Figura 123. Pieza original preparada para imprimir en impresora DT 600+ (elaboración propia).....	131
Figura 124. Impresora 3D X7 del fabricante Markforged [53]	132
Figura 125. Pieza optimizada sobre bandeja de impresión en software Eiger (elaboración propia).....	133
Figura 126. Estimación en Eiger de material de soporte (elaboración propia)	133

Figura 127. Pieza original impresa con material de soporte (elaboración propia)	135
Figura 128. Pieza original tras postprocesado (elaboración propia)	136
Figura 129. Pieza optimizada impresa con material de soporte (elaboración propia).....	137
Figura 130. Pieza optimizada tras postprocesado (elaboración propia)	137
Figura 131. Link 2 obtenido por ingeniería inversa (elaboración propia).....	139
Figura 132. Link 2 creado desde cero en SolidWorks (elaboración propia)	140
Figura 133. Link 2 simplificado para optimización topológica (elaboración propia).....	141
Figura 134. Link 2 optimizado en Solid Edge y adaptado en Altair Inspire (elaboración propia).....	142
Figura 135. Piezas fabricadas por impresión 3D (elaboración propia)	143
Figura 136. Diagrama de flujo de fabricación aditiva con criterio económico (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI))	144
Figura 137. Comparativa costes I3D y fabricación tradicional en función de lote (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI)).....	145
Figura 138. Cotización de pieza original en Materialise Onsite (elaboración propia)	149
Figura 139. Cotización de pieza original en Xometry con PLA (elaboración propia).....	150
Figura 140. Cotización de pieza original en Protolabs Network con PLA (elaboración propia)	150
Figura 141. Cotización de pieza optimizada en Materialise Onsite (elaboración propia). 155	
Figura 142. Cotización de pieza optimizada en Xometry en PLA (elaboración propia)... 155	
Figura 143. Cotización de pieza optimizada en Protolabs Network con PLA (elaboración propia).....	156
Figura 144. Cotización de pieza optimizada en Protolabs Network con Onyx FR-A (elaboración propia).....	156

Índice de tablas

Tabla 1. Propiedades del Aluminio L-2560 (elaboración propia).....	44
Tabla 2. Cargas máximas bajo caso de robot fijado a la pared (elaboración propia).....	51
Tabla 3. Resumen de impresión de pieza original (elaboración propia)	130
Tabla 4. Resumen de impresión de pieza optimizada (elaboración propia).....	134
Tabla 5. Análisis de costes pieza original (elaboración propia).....	148
Tabla 6. Resumen costes pieza original (elaboración propia).....	151
Tabla 7. Análisis de costes pieza optimizada (elaboración propia).....	153
Tabla 8. Resumen costes pieza optimizada (elaboración propia).....	157

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La robótica industrial constituye un elemento clave de la fabricación moderna, con aplicaciones ampliamente extendidas en ámbitos como ensamblaje, soldadura y procesos de fabricación automatizada. Su implantación responde a la creciente necesidad industrial de incrementar la productividad, la precisión y la flexibilidad de los procesos [1]. Sin embargo, el diseño tradicional de los componentes estructurales de los robots ha estado condicionado por métodos de fabricación convencionales como el mecanizado o la fundición, lo cual lleva en muchos casos a estructuras sobredimensionadas, con geometrías simples y una elevada cantidad de material. En consecuencia, los robots presentan un exceso de masa y volumen que penaliza su comportamiento dinámico, incrementa las inercias de los elementos móviles y el consumo energético. Además, este exceso de peso limita la relación entre carga útil y peso propio, limitando la eficiencia operativa y acelerando el desgaste mecánico de actuadores y reductores [2], [3].

En este contexto, la aparición de la fabricación aditiva, junto con las técnicas de optimización topológica y diseño generativo, han abierto nuevas posibilidades para el diseño de componentes de uso final en robótica industrial. Estas metodologías permiten redistribuir el material de forma eficiente siguiendo los caminos reales de carga, eliminando material innecesario y dando lugar a geometrías optimizadas que no serían viables mediante procesos de fabricación convencionales. La aplicación de estas técnicas no solo permite reducciones de peso de entre el 30% y el 70%, sino que facilita la creación de geometrías orgánicas optimizadas para resistir los elevados momentos flectores y torsores propios de la dinámica robótica [4].

El presente Trabajo Fin de Grado (TFG) se centra en el análisis, rediseño mediante diseño generativo y fabricación mediante impresión 3D del segundo eslabón (Link 2) de un robot ABB IRB 120. El proyecto se rige por una metodología que comienza con la ingeniería inversa y el modelado CAD para la obtención de la geometría original y la definición del espacio de diseño.

A continuación, se procede al análisis de esfuerzos y condiciones de contorno mediante la identificación de las cargas estáticas y dinámicas críticas basándose en las especificaciones técnicas del fabricante. Este análisis incluye factores de amplificación por inercia y escenarios de parada de emergencia, donde el robot debe soportar momentos flectores elevados.

Posteriormente, se aplica la optimización topológica mediante algoritmos de diseño generativo para maximizar la rigidez estructural minimizando la masa. Finalmente, el proceso concluye con la validación y fabricación, empleando simulaciones de análisis de elementos finitos (FEA) de la nueva geometría y su posterior materialización mediante impresión 3D en polímeros técnicos.

A través de este caso de estudio práctico, se pretende evaluar el potencial real y la viabilidad económica de estas tecnologías en la robótica industrial, analizando si la sustitución de fundiciones de aluminio por componentes optimizados de fabricación aditiva puede mantener los estándares de precisión y seguridad exigidos en la industria robótica.

1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

La motivación de este proyecto nace de la convergencia entre la necesidad industrial de sistemas robóticos más eficientes y la madurez de las tecnologías de diseño generativo y fabricación aditiva. En robótica industrial, la reducción de masa en los eslabones móviles no es solo una cuestión de ligereza, sino un factor crítico que impacta directamente en la reducción de las fuerzas de inercia y los momentos torsores que deben vencer los actuadores. En el caso del eslabón Link 2, al ser un elemento proximal, su masa condiciona el par requerido por los ejes 1 y 2, por lo que su optimización permite disminuir el consumo energético y el desgaste mecánico del sistema completo.

Desde un punto de vista académico, el proyecto permite aplicar de manera integrada conocimientos de mecánica, resistencia de materiales, robótica industrial, diseño asistido por ordenador (CAD) y tecnologías de fabricación. Además, ofrece la oportunidad de trabajar con herramientas y tecnologías de uso creciente en la industria, alineando la formación académica con las demandas actuales del mercado laboral.

Por otro lado, desde un aspecto industrial y tecnológico, el proyecto busca validar la fabricación aditiva como una solución para componentes de uso final, superando la barrera del simple prototipado. El gran desafío, y motivación principal, es evaluar si una estructura optimizada y fabricada mediante fabricación aditiva puede mantener los estándares de precisión y soportar las cargas dinámicas extremas que se producen en robots industriales en situaciones como paros de emergencia, para determinar si su implementación a gran escala es viable.

En este sentido, el TFG se plantea no solo como un ejercicio de rediseño, sino como un estudio aplicado que permita extraer conclusiones útiles sobre el balance entre la reducción de masa y la rigidez estructural, aportando datos reales sobre el potencial y las restricciones de estas técnicas en aplicaciones robóticas de altas prestaciones.

1.2 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo general del proyecto es analizar, rediseñar y fabricar mediante impresión 3D el eslabón Link 2 de un robot ABB IRB 120, aplicando técnicas de optimización topológica para mejorar su eficiencia estructural y reducir su inercia rotacional.

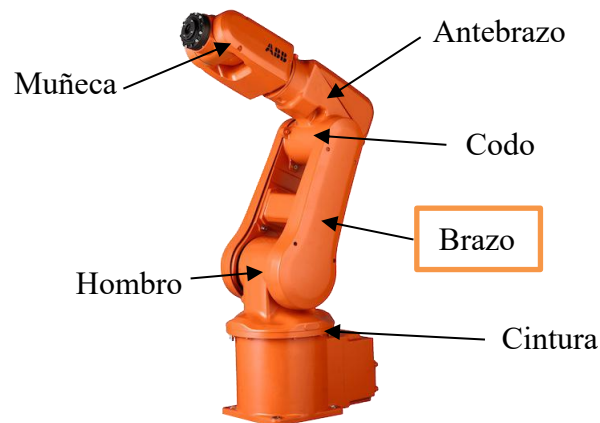


Figura 1. Componentes del Robot ABB IRB 120 (elaboración propia)

De este objetivo general se derivan los siguientes objetivos específicos:

1.2.1 ANÁLISIS E INGENIERÍA INVERSA DEL COMPONENTE ORIGINAL

Dada la inexistencia de modelos CAD oficiales del componente accesibles, y debido a la imposibilidad de desmontar el eslabón del conjunto cinemático del robot físico, se llevará a cabo un proceso de ingeniería inversa mediante un flujo de trabajo híbrido. La captura de la geometría frontal se realizará utilizando un escáner 3D de alta precisión, permitiendo obtener una nube de puntos de alta densidad. Posteriormente, se procederá al postprocesado y limpieza de la malla poligonal en VX Model para eliminar ruidos y artefactos de la digitalización.

Dado que el escaneado frontal por sí solo no permite capturar la geometría trasera, el modelo se importará a SolidWorks. En esta fase, se realizará un modelado paramétrico de precisión, completando la geometría trasera y reconstruyendo las interfaces mecánicas con mediciones manuales detalladas. Se reintroducirán los dieciséis agujeros roscados del empotramiento

proximal y los doce pasadores de la interfaz distal basándose en mediciones directas sobre el componente físico. El resultado final será un modelo CAD altamente preciso que servirá como base crítica para la simulación de esfuerzos y la posterior optimización.

1.2.2 DEFINICIÓN DEL ESTADO DE CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO

El proyecto requiere la traducción de la compleja dinámica del IRB 120 a un modelo de simulación estático equivalente. Se definirán las condiciones de contorno basándose en las especificaciones técnicas de ABB, considerando los casos de carga más severos durante escenarios críticos de parada de emergencia. Se utilizarán como valores de entrada los esfuerzos máximos especificados en el manual para la configuración de montaje más exigente (fijado a la pared), aplicando el principio de análisis de trayectorias de carga que justifica este enfoque conservador [5].

La simulación por elementos finitos se realizará en Solid Edge, generando un mallado de elementos tetraédricos de alta orden y verificando que las tensiones de von Mises se mantengan por debajo del límite de fluencia del material. Esta validación inicial permitirá confirmar que el componente original es estructuralmente adecuado, justificando la necesidad de optimización para reducir su sobredimensionamiento.

1.2.3 APLICACIÓN DE TÉCNICAS DE OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

Utilizando el módulo Topology Study de Solid Edge, se ejecutará un proceso iterativo de optimización topológica para la redistribución óptima del material dentro del espacio de diseño definido. El objetivo principal es maximizar la rigidez específica (relación rigidez-peso) del eslabón frente a los estados de esfuerzos combinados identificados. Se realizarán múltiples iteraciones con diferentes porcentajes de eliminación de material, validando tras cada iteración que la geometría optimizada mantiene los criterios de seguridad estructural.

Durante este proceso, se garantizará estrictamente el respeto a las zonas de exclusión necesarias para asegurar el paso de sistemas internos y el movimiento sin interferencias de elementos adyacentes.

1.2.4 ADAPTACIÓN POR CRITERIO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN

La geometría optimizada resultante del algoritmo generativo será refinada en Altair Inspire para mejorar su viabilidad de fabricación. Se suavizarán las aristas agudas, se regularizarán las transiciones geométricas y se mejorará la calidad de la malla superficial, manteniendo simultáneamente la validez estructural de la solución optimizada. El modelo refinado será validado nuevamente mediante simulación FEA para confirmar que los cambios geométricos no comprometen los criterios de aceptación.

1.2.5 VALIDACIÓN Y FABRICACIÓN ADITIVA

Una vez obtenida la geometría optimizada y refinada, se realizará la preparación para fabricación aditiva. La geometría se exportará en formato STL y se procesará mediante software de preparación de impresión 3D para definir la estrategia de deposición y parámetros de impresión. La fabricación de prototipos se llevará a cabo mediante tecnología FDM en escala real en los laboratorios de la universidad, permitiendo una evaluación visual y dimensional de la geometría optimizada.

1.2.6 EVALUACIÓN DEL COMPONENTE Y ANÁLISIS DE RESULTADOS Y VIABILIDAD ECONÓMICA

La fase final del proyecto consistirá en una evaluación integral del nuevo eslabón frente al original. Se realizará un análisis comparativo que cuantifique la reducción de masa lograda mediante la optimización topológica y la posterior adaptación de diseño. Se evaluará el potencial impacto en la inercia rotacional del sistema y sus implicaciones para la dinámica del robot. Finalmente, se desarrollará un análisis de viabilidad que contraste los procesos de fabricación, determinando la rentabilidad de esta solución optimizada para aplicaciones de fabricación aditiva en robótica industrial.

1.3 ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

El presente trabajo se alinea con la Agenda 2030 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), integrando criterios de sostenibilidad en el diseño mecánico y los procesos de fabricación avanzada. El proyecto impacta positivamente en los siguientes objetivos [6]:

1.3.1 ODS 9: INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

El proyecto fomenta la transformación digital de la industria mediante la integración de flujos de trabajo avanzados que combinan la ingeniería inversa, la optimización topológica y la fabricación aditiva. Al demostrar que es posible sustituir componentes de fundición tradicionales por geometrías optimizadas de alta tecnología, se contribuye a la creación de infraestructuras industriales más resilientes, innovadoras y eficientes, alineadas con los estándares de la Industria 4.0.

1.3.2 ODS 12: PRODUCCIÓN Y CONSUMO RESPONSABLES

La aplicación de algoritmos de optimización topológica permite una desmaterialización del componente, utilizando únicamente la cantidad estrictamente necesaria de materia prima para cumplir con los requisitos estructurales. Además, la fabricación aditiva es intrínsecamente más eficiente que los métodos sustractivos (como el mecanizado), ya que reduce drásticamente el desperdicio de material en forma de viruta, promoviendo un modelo de fabricación más circular y responsable con los recursos naturales.

1.3.3 ODS 7: ENERGÍA ASEQUIBLE Y NO CONTAMINANTE

La reducción de masa en un eslabón proximal como el Link 2 tiene un impacto multiplicador en la eficiencia energética del robot. Al disminuir la inercia rotacional del conjunto, se reduce el par necesario en los actuadores para realizar aceleraciones y frenados, lo que se traduce en un menor consumo eléctrico por ciclo de trabajo. Este ahorro energético, acumulado a lo largo de la vida útil del manipulador industrial, contribuye directamente a la reducción de la huella de carbono de los procesos automatizados.



Producido en colaboración con TROLLBACK + COMPANY | TheGlobalGoals@trollback.com | +1212.529.1010
Para cualquier duda sobre la utilización, por favor comuníquese con: dpcampaigns@un.org

Figura 2. Objetivos de desarrollo sostenible de la ONU [7]

Capítulo 2. ESTADO DEL ARTE

La evolución de la robótica industrial en las últimas décadas ha estado marcada por una transición desde sistemas masivos y sobredimensionados hacia manipuladores de alta eficiencia dinámica y precisión submilimétrica. En este contexto, la optimización de los componentes estructurales no es solo una mejora estética, sino una necesidad imperativa para reducir las inercias rotacionales, disminuir el consumo energético y aumentar la velocidad de ciclo en entornos de producción Industria 4.0.

El presente capítulo ofrece un análisis del estado actual de las tecnologías que convergen en este proyecto. Se inicia con una revisión de la arquitectura de los manipuladores antropomórficos y los fundamentos cinemáticos que rigen su movimiento, como la metodología de Denavit-Hartenberg. Posteriormente, se explora el ecosistema de la Ingeniería Inversa y la digitalización mediante sistemas como VXElements, herramientas esenciales para el cierre del ciclo de diseño cuando se trabaja sobre plataformas existentes.

Asimismo, se profundiza en las nuevas fronteras de la Optimización Topológica, diferenciando los enfoques tradicionales de las actuales herramientas de Diseño Generativo integradas en entornos como Solid Edge. Finalmente, se examina el papel de la Fabricación Aditiva y el software de laminado (slicing), evaluando cómo la anisotropía de los polímeros técnicos y el análisis por Elementos Finitos (FEA) permiten validar componentes funcionales que, hasta hace poco, solo eran viables mediante procesos de fundición o mecanizado convencional.

2.1 ROBÓTICA INDUSTRIAL

Según la norma ISO 8373, un robot industrial se define como un manipulador controlado automáticamente, reprogramable y multifuncional, programable en tres o más ejes, que puede ser fijo o móvil y está destinado a aplicaciones de automatización industrial. Esta definición incluye el manipulador con sus actuadores, el controlador, el dispositivo de programación y las posibles interfaces de comunicación [8].

Debido a sus múltiples grados de libertad, movimientos repetitivos y elevadas solicitaciones dinámicas, los robots industriales presentan requisitos estructurales exigentes que hacen especialmente relevante el diseño ligero de sus componentes. Entre las principales limitaciones de los robots tradicionales se encuentran el elevado peso propio, la baja relación entre carga útil y peso propio y el aumento del consumo energético debido a las inercias de los elementos móviles, especialmente en brazos y eslabones [2], [3].

Diversos estudios han comprobado que una reducción de masa adecuadamente diseñada en los componentes móviles de los robots permite disminuir las fuerzas de inercia durante los movimientos acelerados, lo que conlleva una reducción del consumo energético y una mejora del comportamiento mecánico bajo carga, al reducirse las tensiones y deformaciones estructurales sin comprometer la resistencia del componente [4].

2.1.1 EVOLUCIÓN HISTÓRICA Y FUTURO DE LA ROBÓTICA INDUSTRIAL

La robótica industrial moderna no es un fenómeno aislado, sino el resultado de una transición desde la automatización rígida, máquinas diseñadas para una única tarea con nula adaptabilidad, hacia la automatización flexible. Según los fundamentos de la robótica industrial, esta última se define por la capacidad de las máquinas para ser reprogramadas y reconfiguradas, permitiendo una elasticidad en la producción que es la base de la industria contemporánea [9].

El origen se remonta a 1954 con la patente de George Devol, que materializó en el Unimate, el primer robot industrial de la historia, instalado en 1961 en una planta de General Motors.

Sin embargo, la arquitectura que define al ABB IRB 120 de este proyecto tiene su origen en el desarrollo del PUMA (Programmable Universal Machine for Assembly) en 1975 por Victor Scheinman. El PUMA introdujo la configuración de brazo articulado de 6 grados de libertad (GDL), permitiendo por primera vez una versatilidad similar a la del brazo humano [10].

El ABB IRB 120 es un robot del tipo PUMA. Es el robot industrial multiusos más pequeño de ABB y pesa únicamente 25 kg, pudiendo soportar una carga de 3kg con un alcance de 580mm. Es una elección fiable y rentable para generar una gran capacidad de producción a cambio de una baja inversión [5].

En la actualidad, la robótica industrial está evolucionando de manera constante. La cobótica (colaboración hombre-máquina) requiere robots más ligeros y seguros, con sistemas de control que permitan operación en espacios compartidos. La Industria 4.0 demanda sistemas altamente adaptables y conectados que puedan ser reconfigurados rápidamente para diferentes tareas. Simultáneamente, la sostenibilidad ambiental impulsa la búsqueda de eficiencia energética, siendo la reducción de masa estructural una estrategia clave.

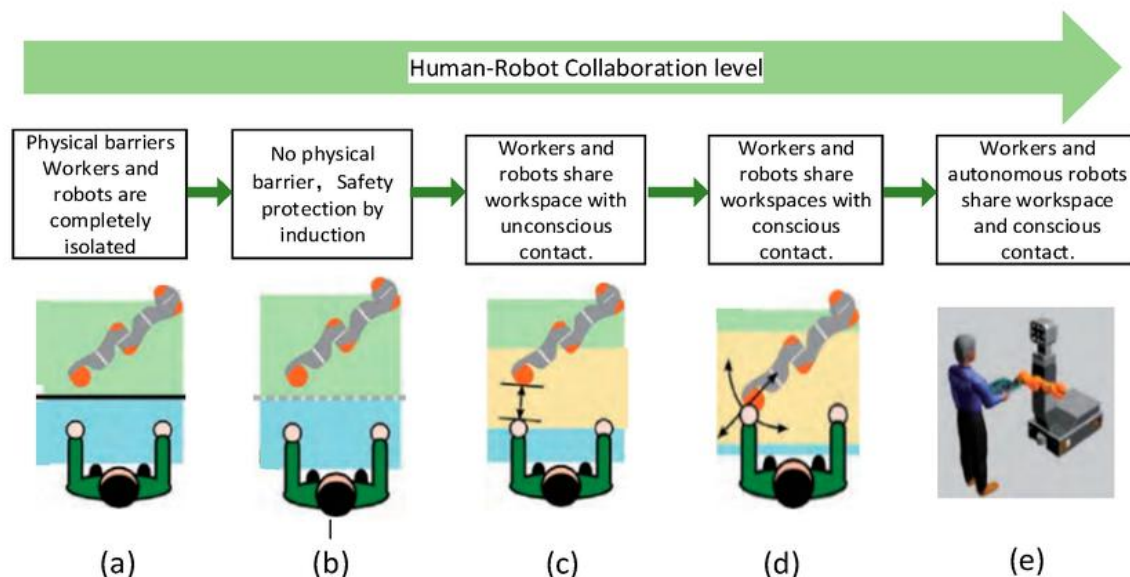


Figura 3. Niveles de colaboración entre humano y robot [11]

Investigaciones recientes exploran materiales avanzados, diseño generativo y fabricación aditiva como medios para lograr robots más ligeros, precisos y eficientes energéticamente. Este contexto establece la motivación principal para estudios de optimización topológica de eslabones robóticos, donde la integración de diseño ligero con seguridad estructural representa la frontera del desarrollo tecnológico en la disciplina [12].

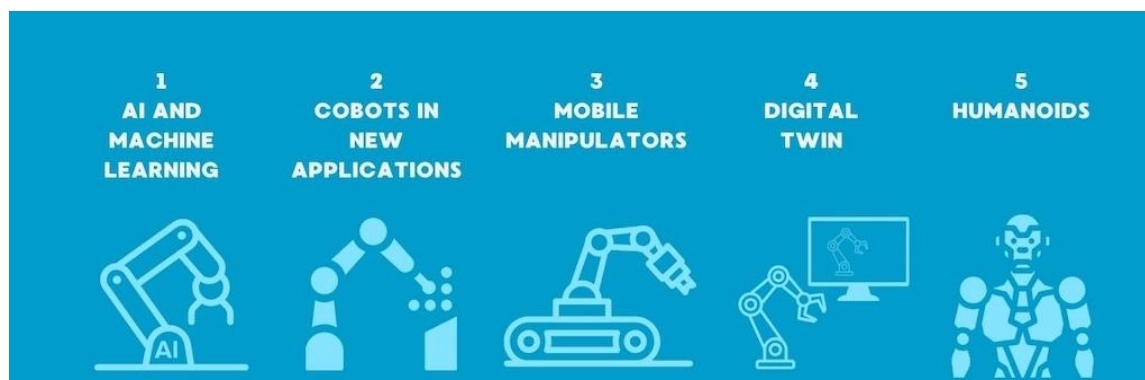


Figura 4. Principales tendencias mundiales de la robótica [13]

2.1.2 ROBOT PUMA

El robot ABB IRB 120 pertenece a la familia de manipuladores industriales seriales antropomórficos de seis grados de libertad. Esta arquitectura presenta tres articulaciones principales destinadas al posicionamiento del brazo y una muñeca de tres ejes encargada de orientar el efector final. Aunque su geometría concreta no es idéntica a la de un robot PUMA clásico, ambos comparten una configuración cinemática comparable, ya que los tres primeros ejes determinan la posición del centro de muñeca y los tres últimos definen la orientación de la herramienta.

Dentro de esta cadena cinemática, el segundo eslabón o Link 2 tiene una función estructural especialmente relevante. Debe transmitir los esfuerzos generados por la carga útil y por los elementos situados aguas abajo, incluyendo otros eslabones, actuadores y el efector final. Por ello, durante determinadas posturas y aceleraciones, puede estar sometido a momentos flectores y torsionales elevados. Su masa, posición del centro de gravedad y momento de

inercia influyen directamente en el par que deben proporcionar las articulaciones precedentes.

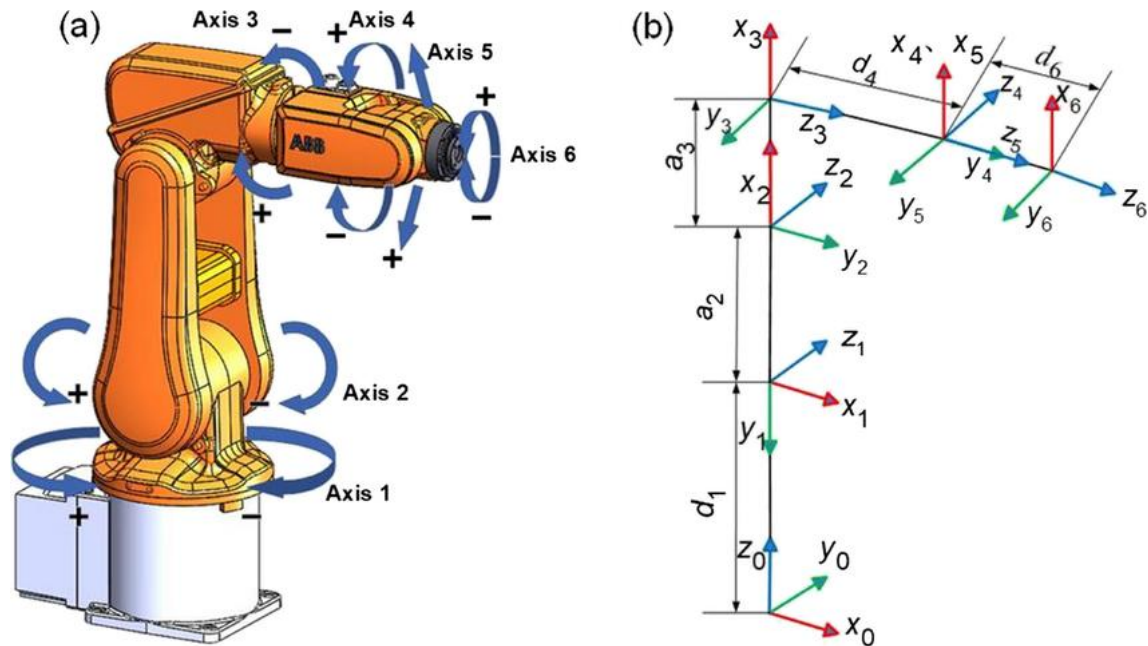


Figura 5. Grados de libertad del Robot ABB IRB 120 [14]

2.1.3 CLASIFICACIÓN ESTRUCTURAL Y MORFOLOGÍA

Los robots industriales pueden clasificarse según la disposición de sus eslabones y la naturaleza de sus articulaciones, que habitualmente son de revolución o prismáticas. Esta clasificación responde a la configuración cinemática del manipulador y condiciona tanto su espacio de trabajo como sus prestaciones de rigidez, velocidad, precisión y capacidad de carga.

Los robots cartesianos se desplazan habitualmente mediante tres ejes lineales perpendiculares entre sí. Se caracterizan por una elevada rigidez y precisión, aunque su volumen de trabajo puede resultar limitado en relación con el espacio físico que ocupan. Por su parte, las configuraciones cilíndricas y esféricas combinan movimientos lineales y rotacionales para ampliar el alcance del manipulador. Los robots SCARA se emplean principalmente en tareas de manipulación rápida, como “pick and place”, debido a su elevada rigidez en dirección vertical y a su capacidad de movimiento rápido en el plano horizontal.

El robot ABB IRB 120 empleado en este proyecto pertenece a la categoría de robots antropomórficos. Esta arquitectura reproduce, de forma simplificada, la disposición cinemática de un brazo humano. Está formada por tres articulaciones principales, asociadas a los movimientos de cintura, hombro y codo, que determinan principalmente la posición del extremo del robot. A continuación, dispone de una muñeca esférica de tres ejes, cuya función es controlar la orientación del efector final. En conjunto, el robot dispone de seis grados de libertad, lo que le permite posicionar y orientar una herramienta dentro de su espacio de trabajo.

Esta configuración proporciona una elevada versatilidad, pero también genera exigencias estructurales relevantes en los eslabones que componen el brazo. En particular, el Link 2 se encuentra sometido a momentos flectores y torsionales significativos, ya que debe soportar la carga útil transportada por el robot y el peso de los eslabones, actuadores y elementos mecánicos situados aguas arriba en la cadena cinemática. Por ello, constituye un componente especialmente adecuado para estudiar estrategias de aligeramiento estructural mediante optimización topológica y fabricación aditiva.

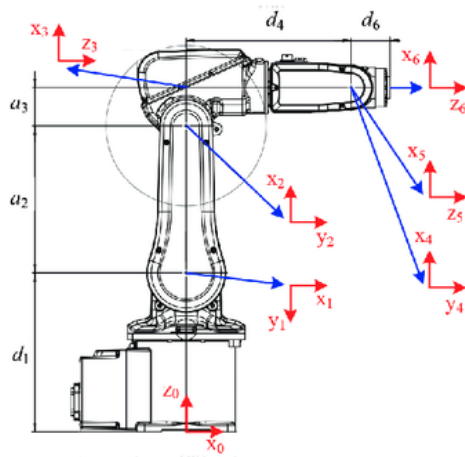
2.1.4 MODELADO CINEMÁTICO Y PARÁMETROS DE DENAVIT-HARTENBERG

Para controlar con precisión un robot antropomórfico como el ABB IRB 120 es necesario disponer de un modelo matemático que relacione los movimientos de sus articulaciones con la posición y orientación de la herramienta. Este análisis se aborda mediante la cinemática directa y la cinemática inversa.

2.1.4.1 Problema Directo

El problema directo permite determinar la posición y orientación del efector final a partir de los valores conocidos de las articulaciones del robot. Para ello, puede emplearse la formulación de Denavit-Hartenberg, propuesta en 1955, que asigna un sistema de referencia local a cada eslabón y define la relación entre sistemas de coordenadas consecutivos mediante transformaciones homogéneas.

Cada eslabón queda definido mediante cuatro parámetros: el ángulo articular θ_i (correspondiente a la rotación alrededor del eje Z_{i-1}), el desplazamiento d_i (medido sobre dicho eje), la longitud a_i (correspondiente a la distancia entre ejes consecutivos medida sobre el eje X_i) y el ángulo de torsión α_i (que representa la orientación relativa entre ejes Z consecutivos) [15].



(a) The attached frames

Joint i	θ_i [rad]	d_i [m]	a_i [m]	α_i [rad]
1	q_1	$d_1 = 0.290$	$a_1 = 0$	$\alpha_1 = -\pi/2$
2	$q_2 - \pi/2$	$d_2 = 0$	$a_2 = 0.27$	$\alpha_2 = 0$
3	q_3	$d_3 = 0$	$a_3 = 0.07$	$\alpha_3 = -\pi/2$
4	q_4	$d_4 = 0.302$	$a_4 = 0$	$\alpha_4 = -\pi/2$
5	q_5	$d_5 = 0$	$a_5 = 0$	$\alpha_5 = -\pi/2$
6	q_6	$d_6 = 0.072$	$a_6 = 0$	$\alpha_6 = 0$

(b) D-H parameters

Figura 6. Parámetros de Denavit-Hartenberg del IRB 120 [16]

La transformación homogénea entre dos sistemas de referencia consecutivos se expresa mediante una matriz de dimensión 4×4 , denominada la matriz de transformación.

$${}^{i-1}A_i = T_{z,d} T_{z,\theta} T_{x,a} T_{x,\alpha} = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\cos \alpha_i \sin \theta_i & \sin \alpha_i \sin \theta_i & a_i \cos \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \alpha_i \cos \theta_i & -\sin \alpha_i \cos \theta_i & a_i \sin \theta_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 7. Matriz de transformación de Denavit-Hartenberg [17]

En un robot de seis grados de libertad, la transformación total entre la base y el efector final se obtiene mediante el producto sucesivo de las seis matrices de transformación asociadas a sus articulaciones.

$$\mathbf{T} = \mathbf{T}_1 \mathbf{T}_2 = {}^0\mathbf{A}_1 {}^1\mathbf{A}_2 {}^2\mathbf{A}_3 {}^3\mathbf{A}_4 {}^4\mathbf{A}_5 {}^5\mathbf{A}_6 = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Figura 8. Transformación total de un robot PUMA de 6 grados de libertad [18]

2.1.4.2 Problema Inverso

El problema inverso plantea el problema opuesto, determinar los valores articulares necesarios para que el efector final alcance una posición y orientación objetivo. Se trata de un problema más complejo que la cinemática directa, ya que las ecuaciones resultantes son no lineales y pueden admitir múltiples soluciones. Por ejemplo, un mismo punto del espacio puede alcanzarse mediante configuraciones diferentes, como una posición de codo elevado o de codo bajo [19].

Además, pueden existir singularidades cinemáticas, es decir, configuraciones en las que el robot pierde capacidad de movimiento en determinadas direcciones o en las que pequeñas velocidades del efector requieren velocidades articulares muy elevadas. En robots antropomórficos de seis grados de libertad, la resolución de la cinemática inversa suele dividirse en dos etapas. En primer lugar, el cálculo de las tres primeras articulaciones para determinar la posición de la muñeca, y en segundo lugar, el desacoplamiento de la muñeca esférica para obtener la orientación final de la herramienta.

2.2 INGENIERÍA INVERSA Y ESCANEADO 3D

La ingeniería inversa consiste en obtener información técnica de un componente físico para generar una representación digital que permita analizarlo, reproducirlo o modificarlo. A diferencia del proceso convencional de diseño, que comienza con una necesidad y termina en una pieza física, la ingeniería inversa parte de una pieza existente y permite reconstruir su geometría, sus dimensiones y sus principales elementos funcionales en un entorno digital.

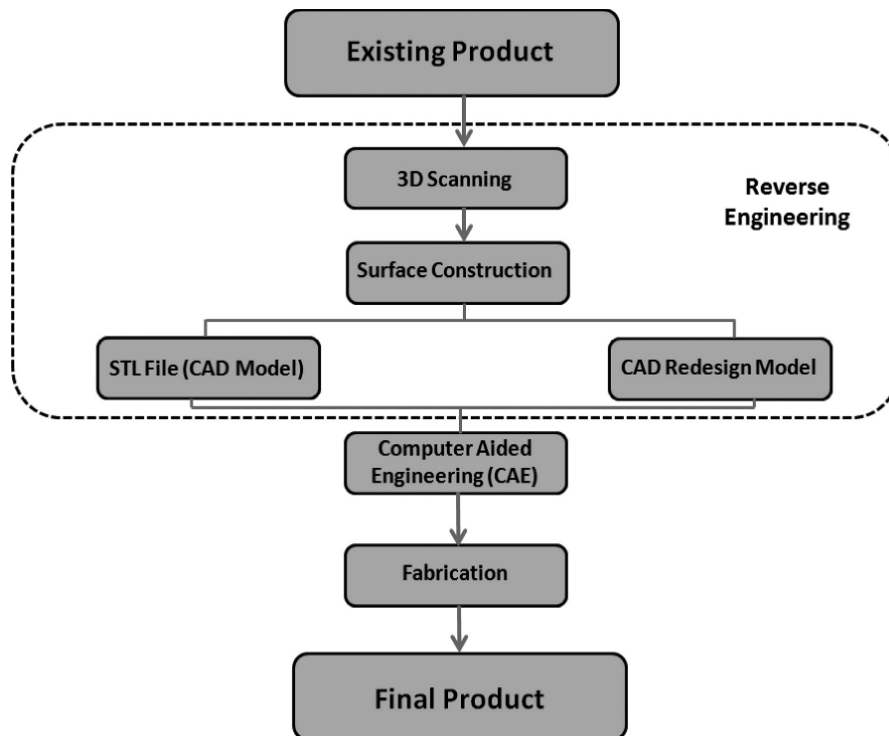


Figura 9. Diagrama de flujo para el diseño de producto mediante ingeniería inversa [20]

En este proyecto, la ingeniería inversa se empleará como paso previo al rediseño del brazo seleccionado del robot ABB IRB 120. Su aplicación permitirá disponer de una geometría de referencia cuando no se cuente con un modelo CAD original completo o cuando sea necesario contrastar el modelo disponible con el componente real. Esta digitalización es especialmente importante para identificar las superficies de montaje, los alojamientos, los taladros y otras zonas funcionales que deberán conservarse durante la optimización topológica.



Figura 10. Escaneado 3D de un componente [21]

La obtención de la geometría puede realizarse mediante escaneado tridimensional, medición manual o una combinación de ambos procedimientos. El escaneado 3D permite capturar una gran cantidad de puntos de la superficie del componente y generar una representación digital de su forma externa. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentran las siguientes [20]:

- El escaneado por contacto utiliza una sonda física para registrar puntos sobre la superficie de la pieza. Es el método empleado por las máquinas de medición por coordenadas (CMM) y ofrece una elevada precisión dimensional, aunque el proceso es relativamente lento y menos adecuado para geometrías complejas.
- Los sistemas ópticos de luz estructurada proyectan un patrón luminoso sobre la superficie y, mediante visión estereoscópica, reconstruyen la geometría tridimensional a partir de la deformación del patrón. Permiten digitalizar componentes con gran rapidez y precisión, siendo especialmente adecuados para piezas de pequeño y mediano tamaño.
- La fotogrametría obtiene la geometría tridimensional mediante el análisis de múltiples imágenes capturadas desde diferentes posiciones. Se trata de una técnica de bajo coste y gran flexibilidad, aunque su precisión suele ser inferior a la de los sistemas de luz estructurada o escaneado láser.

- El escaneado láser emplea un haz de luz para medir la geometría de la superficie. Según la tecnología utilizada, puede basarse en triangulación mediante láser lineal, adecuada para la digitalización de componentes con alta precisión, o en sistemas LiDAR, orientados al escaneado de objetos de gran tamaño y largas distancias mediante medición del tiempo de vuelo del pulso láser.
- El escaneado 360° utiliza sensores ópticos o LiDAR para capturar el entorno completo desde un único punto de medida, generando nubes de puntos de grandes dimensiones. Es una tecnología ampliamente utilizada en aplicaciones de teledetección, arquitectura, ingeniería civil y levantamiento de instalaciones industriales, aunque no suele emplearse para la digitalización precisa de componentes mecánicos de pequeño tamaño.



Figura 11. Métodos de digitalización 3D (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI))

El resultado inicial de un escaneado suele ser una nube de puntos, formada por un gran número de coordenadas que describen la superficie de la pieza. Tras eliminar el ruido, alinear las diferentes capturas y corregir posibles discontinuidades, esta información se transforma en una malla triangular que representa la geometría del componente. El formato STL es uno de los más utilizados para almacenar este tipo de mallas, ya que permite su exportación e importación en software CAD para su posterior análisis, rediseño, simulación y preparación para fabricación aditiva [22].

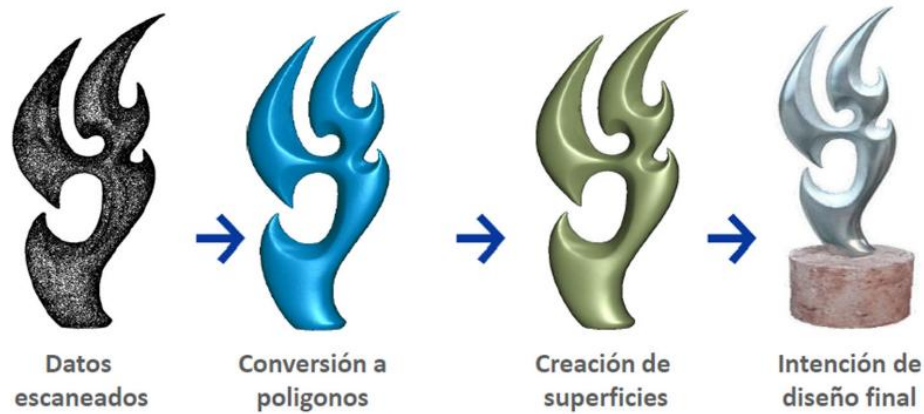


Figura 12. Fases del modelado 3D no paramétrico (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI))

El procesamiento de los datos obtenidos durante el escaneado puede realizarse mediante software específico, como VXelements, que permite gestionar la nube de puntos, generar la malla tridimensional y realizar inspecciones o comparaciones dimensionales entre el componente físico y su representación digital. Una vez obtenida la geometría, esta se exporta para su utilización en entornos CAD y CAE, como Solid Edge y Altair Inspire, donde se llevan a cabo las etapas de simulación, optimización topológica y rediseño del componente.

2.3 ANÁLISIS POR ELEMENTOS FINITOS (FEA)

El Análisis por Elementos Finitos es una técnica numérica que permite aproximar el comportamiento estructural de componentes bajo carga mediante la discretización de la geometría en miles de elementos finitos interconectados. Para geometrías complejas tridimensionales, los elementos más comúnmente utilizados son tetraedros, que ofrecen flexibilidad en mallado automático de formas irregulares [23].

La calidad del análisis depende críticamente de la densidad de discretización. Una malla muy gruesa produce resultados inexactos y una malla excesivamente refinada es computacionalmente prohibitiva. El análisis de convergencia valida que los resultados son independientes de la discretización, comparando resultados con malla progresivamente más fina hasta lograr estabilidad. Para componentes como el Link 2, es necesario refinar intensamente la malla alrededor de agujeros de conexión mientras se mantiene malla más gruesa en regiones de esfuerzo uniforme [24].

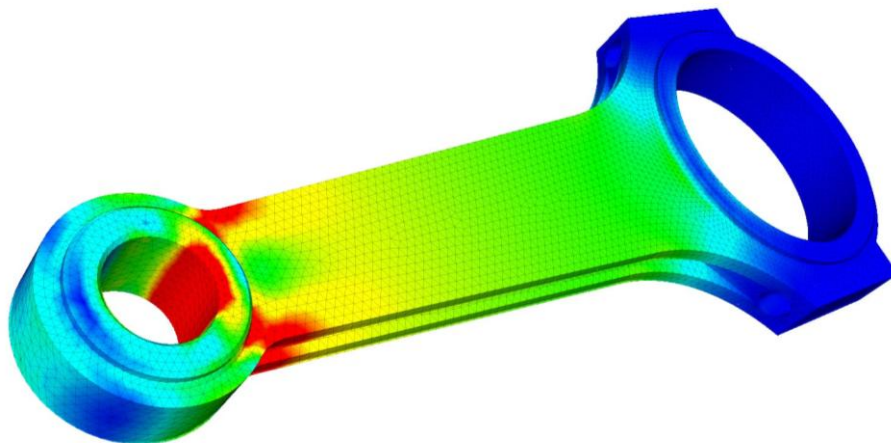


Figura 13. Simulación FEA de una biela de pistón [25]

Para materiales dúctiles como aluminio, el criterio de fallo más utilizado es el de Von Mises, que combina todos los componentes de esfuerzo tridimensional en un escalar comparable con el límite elástico del material. El análisis FEA produce campos completos de esfuerzo a

través de toda la geometría, permitiendo identificar concentraciones de esfuerzo en zonas críticas como bordes afilados o alojamientos de agujeros.

En el presente TFG, el análisis FEA se utilizará en múltiples fases. Inicialmente se analizará el Link 2 original bajo el estado de cargas para validar su adecuación estructural. Posteriormente, cada iteración del diseño generativo será validada numéricamente, verificando que las tensiones se mantienen dentro de límites admisibles. Finalmente, la geometría refinada será analizada nuevamente para confirmar que los cambios realizados no han comprometido la integridad estructural. Esta estrategia iterativa asegura que cada decisión de diseño está respaldada numéricamente, reduciendo el riesgo de fallos en fabricación y operación.

2.4 OPTIMIZACIÓN *TOPOLÓGICA* Y *DISEÑO GENERATIVO*

Los robots industriales presentan características estructurales exigentes, como múltiples grados de libertad, movimientos repetitivos y solicitaciones dinámicas elevadas. El peso propio de sus brazos y eslabones incrementa las inercias de los elementos móviles, lo que puede aumentar el consumo energético y reducir la relación entre carga útil y peso propio [2], [3]. Por ello, una reducción de masa adecuadamente planteada permite disminuir las fuerzas de inercia durante los movimientos acelerados y mejorar el comportamiento mecánico del componente, reduciendo tensiones y deformaciones sin comprometer su resistencia [4].

En este contexto, el diseño generativo es una metodología de diseño asistido por ordenador en la que se definen los objetivos, requisitos y restricciones del componente, mientras que el software explora automáticamente diferentes alternativas geométricas. En lugar de desarrollar una única solución de forma manual, se establece el problema mediante variables como la masa objetivo, las cargas, el material, el espacio disponible y las condiciones de fabricación. A partir de estos datos, el programa genera propuestas que pueden evaluarse según criterios estructurales, funcionales y económicos [26].

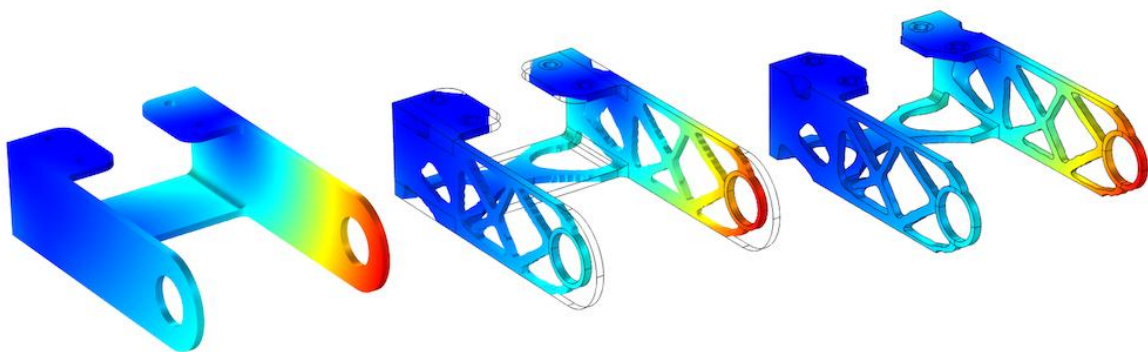


Figura 14. Ejemplo de optimización topológica en una pieza [27]

Esta metodología permite obtener configuraciones geométricas complejas que no surgirían mediante un proceso de diseño convencional. Sin embargo, los resultados generados no

constituyen automáticamente una pieza final, deben revisarse para comprobar su resistencia, rigidez, fabricabilidad y compatibilidad con el resto del robot.

Los algoritmos de diseño generativo más utilizados en software comercial se basan en métodos como SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) o ESO (Evolutionary Structural Optimization), que iterativamente redistribuyen el material dentro del dominio de diseño eliminando regiones con baja participación en la transmisión de cargas. Este proceso es fundamentalmente matemático, aunque el usuario tiene control sobre parámetros clave, como el porcentaje de masa a eliminar, las zonas de exclusión, restricciones de espesor mínimo, y requisitos de simetría. El resultado depende mucho de cómo se definan estos parámetros, siendo necesario realizar múltiples iteraciones con diferentes configuraciones para explorar el espacio de soluciones disponibles [28].

Un aspecto crítico en la aplicación práctica del diseño generativo a componentes robóticos es la viabilidad de fabricación de la topología resultante. Las soluciones generadas frecuentemente presentan geometrías orgánicas complejas, filetes curvos y cavidades internas que pueden ser difíciles o imposibles de fabricar mediante procesos convencionales como fundición o mecanizado. Sin embargo, la irrupción de la fabricación aditiva ha transformado este panorama, permitiendo materializar diseños generativos que serían inviables por otros métodos. Esta convergencia entre optimización topológica y fabricación aditiva representa una de las fronteras más activas de la investigación en ingeniería mecánica, especialmente para aplicaciones donde la minimización de peso es crítica, como en sistemas robóticos [29].

En el presente TFG, el diseño generativo se aplicará al brazo seleccionado del robot ABB IRB 120 con el objetivo de reducir su masa y su contribución a la inercia del sistema. Durante el proceso deberán conservarse las zonas funcionales del componente. Estas regiones se definen como geometrías preservadas, ya que no pueden alterarse durante la optimización. La definición de estas restricciones es fundamental para garantizar que la pieza optimizada mantenga compatibilidad con el resto del robot, permitiendo que las articulaciones adyacentes, la transmisión interna y los elementos de sujeción funcionen sin interferencia.

2.5 FABRICACIÓN ADITIVA

La fabricación aditiva (FA), también conocida como impresión 3D, se ha consolidado como una tecnología clave dentro del contexto de la Industria 4.0, al permitir una integración directa entre el diseño digital y la fabricación de componentes complejos. Su característica principal, que la diferencia de los métodos de fabricación convencionales, es la incorporación de material de manera gradual, capa a capa, hasta completar la pieza objetivo. Esta capacidad facilita la materialización de geometrías avanzadas generadas mediante optimización topológica, reduciendo material innecesario, eliminando restricciones geométricas propias de los procesos sustractivos y favoreciendo la integración funcional de los componentes [30].

Esta tecnología ha revolucionado el diseño de componentes complejos, permitiendo geometrías que serían imposibles o económicamente inviables mediante procesos convencionales: estructuras internas huecas, entramados complejos, y canales curvos internos. En sectores como la aeronáutica se han fabricado componentes estructurales con geometrías orgánicas que reducen significativamente el peso, mientras que en medicina permite personalización de prótesis que se adaptan exactamente a la anatomía de cada paciente [31].



Figura 15. Ejemplo de impresión 3D de ruedas dentadas [32]

Las ventajas principales incluyen la libertad de diseño, ya que los ingenieros no están limitados por restricciones geométricas de procesos convencionales, abriendo posibilidades a soluciones innovadoras. La capacidad de producir geometrías complejas permite integrar múltiples funciones en una única pieza, reduciendo el número de ensamblajes necesarios. Adicionalmente, permite personalización sin incremento significativo de costos, y favorece optimización de material al depositar únicamente lo requerido, minimizando desperdicio y contribuyendo a sostenibilidad [33].

La norma UNE-EN ISO 17296:2017 clasifica las tecnologías de fabricación aditiva en siete categorías principales en función del mecanismo de aportación y consolidación del material, siendo estas las siguientes [34]:

- Fotopolimerización en cuba (Vat Photopolymerization)
- Proyección de material (Material Jetting)
- Proyección de aglutinante (Binder Jetting)
- Fusión por lecho de polvo (Powder Bed Fusion)
- Extrusión de material (Material Extrusion)
- Deposición de energía focalizada (Directed Energy Deposition)
- Laminado de hojas (Sheet Lamination)

Cada una de estas tecnologías presenta características, materiales y aplicaciones diferentes. La fotopolimerización en cuba, que engloba procesos como SLA (Stereolithography), DLP (Digital Light Processing) y CDLP (Continuous Digital Light Processing), solidifica resinas fotosensibles mediante radiación ultravioleta, obteniendo piezas de elevada precisión y excelente acabado superficial. La proyección de material (Material Jetting, MJ), junto con variantes como NPJ (NanoParticle Jetting) o DOD (Drop on Demand), deposita pequeñas gotas de material fotopolimérico que posteriormente son curadas, permitiendo fabricar piezas multimaterial y a todo color.

La proyección de aglutinante (Binder Jetting, BJ) une partículas de polvo mediante un agente aglutinante, siendo una tecnología empleada tanto para materiales metálicos como cerámicos y arena de fundición. Por su parte, la fusión por lecho de polvo (Powder Bed Fusion, PBF) utiliza una fuente de energía para fundir selectivamente capas de polvo metálico o polimérico. Dentro de esta familia destacan procesos como la sinterización selectiva por láser (SLS), la fusión selectiva por láser (SLM), la fusión directa por láser de metales (DMLS), la fusión por haz de electrones (EBM) y la tecnología Multi Jet Fusion (MJF), ampliamente utilizadas para fabricar componentes metálicos y poliméricos de altas prestaciones.

La extrusión de material (Material Extrusion), cuyo proceso más extendido es Fused Deposition Modeling (FDM), deposita filamento termoplástico fundido capa a capa y constituye una de las tecnologías más utilizadas por su bajo coste, facilidad de uso y amplia variedad de materiales, entre los que destacan PLA, ABS, PETG o compuestos reforzados con fibra de carbono. La deposición de energía focalizada (Directed Energy Deposition, DED), que incluye tecnologías como LENS (Laser Engineered Net Shaping) y EBAM (Electron Beam Additive Manufacturing), funde simultáneamente el material y lo deposita sobre la pieza, siendo especialmente adecuada para la reparación o fabricación de grandes componentes metálicos. Finalmente, el laminado de hojas (Sheet Lamination), representado por procesos como LOM (Laminated Object Manufacturing), construye las piezas mediante la unión sucesiva de láminas de material, aunque actualmente presenta una implantación industrial más limitada [35].



Figura 16. Tecnologías de fabricación aditiva [36]

Un aspecto crítico de la fabricación aditiva es el postprocesado. Dependiendo de la tecnología empleada, puede ser necesario retirar soportes, eliminar polvo no fusionado, realizar operaciones de lijado o pulido, aplicar tratamientos térmicos para aliviar tensiones o mejorar las propiedades mecánicas, e incluso efectuar procesos de sinterizado en determinadas tecnologías metálicas. Asimismo, el control de calidad puede resultar complejo debido a la variabilidad inherente al proceso de fabricación, y en producciones de gran volumen los costes continúan siendo, en muchos casos, superiores a los de los procesos convencionales de fabricación [37].

En el presente TFG, la fabricación aditiva se utiliza como medio de validación de la geometría optimizada mediante fabricación de prototipo en escala real. El modelo CAD refinado será preparado para impresión 3D mediante software de laminado que define parámetros críticos, como la altura de capa, densidad de relleno, orientación de pieza y estrategia de generación de soportes. Se empleará tecnología FDM, permitiendo una evaluación visual y dimensional del componente optimizado. Aunque el prototipo en polímero no representa comportamiento estructural real bajo carga, su inspección confirma la viabilidad y coherencia geométrica de la solución optimizada, demostrando que el diseño generativo ha producido una pieza fabricable y funcional.

Capítulo 3. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

En el presente capítulo se define el alcance, los objetivos y los límites del Trabajo de Fin de Grado. Se concreta la pieza objeto de análisis y optimización topológica, el Link 2 del robot ABB IRB 120, analizando su función específica dentro de la cadena cinemática del manipulador y detallando las solicitaciones estructurales a las que se ve sometida durante su operación. Asimismo, se justifica la selección del material utilizado en la simulación y se describe exhaustivamente el estado de cargas y las condiciones de contorno que caracterizarán el problema a resolver. Este capítulo establece la base conceptual y técnica que define completamente qué se optimizará, por qué, bajo qué condiciones y con qué restricciones, siendo fundamental para comprender el alcance y validez de los resultados posteriores.

3.1 SELECCIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL COMPONENTE

El componente de robot industrial elegido para este trabajo es el brazo estructural del Link 2 del robot ABB IRB 120, un robot colaborativo de reducido tamaño ampliamente utilizado en aplicaciones de laboratorio, fabricación y tareas de precisión.



Figura 17. Robot ABB IRB 120 [38]

El robot ABB IRB 120 es un manipulador industrial de configuración tipo PUMA dotado de seis grados de libertad, todos ellos de naturaleza rotacional. La estructura cinemática del robot se compone de seis eslabones o links interconectados, siendo cada uno de ellos responsable de un grado de libertad específico mediante una articulación rotacional. Esta arquitectura permite que el extremo del robot alcance cualquier posición y orientación dentro de su volumen de trabajo mediante la rotación coordinada de estos seis links.

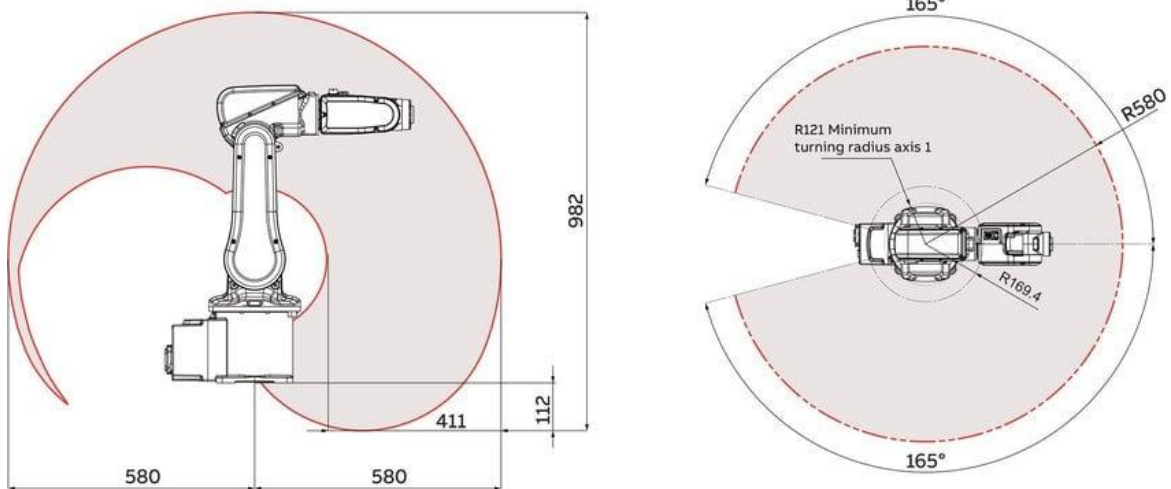


Figura 18. Espacio de trabajo del ABB IRB 120 [39]

El Link 2 constituye el segundo eslabón de la cadena cinemática del robot, posicionado entre el Joint 2 (articulación de elevación del brazo) y el Joint 3, siendo responsable de transmitir y distribuir las cargas de todos los elementos posteriores del robot hacia la articulación proximal [40].

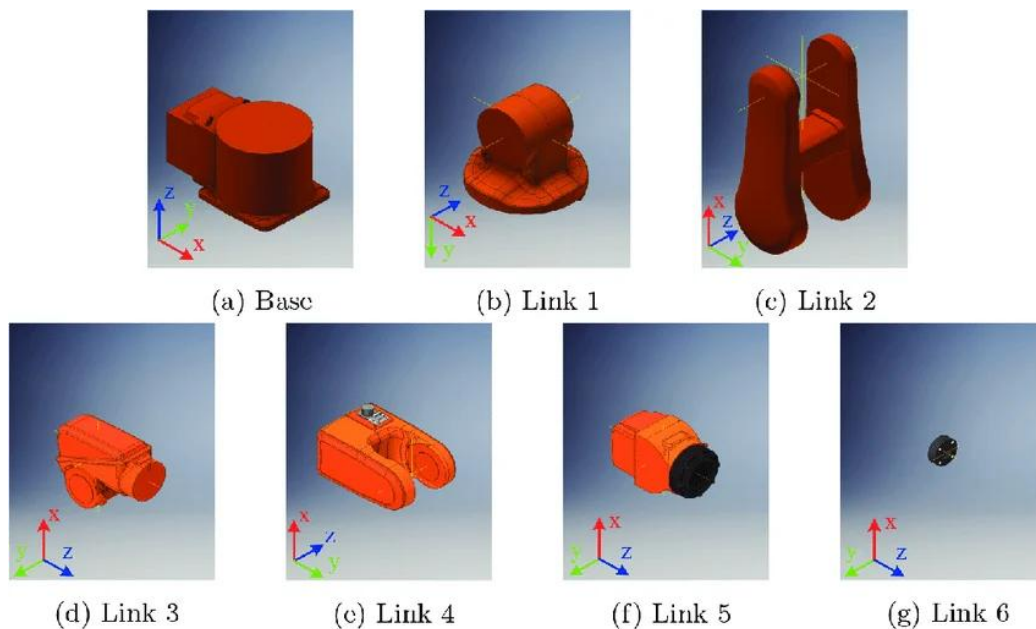


Figura 19. Elementos del Robot ABB IRB 120 [40]

La selección de este componente se justifica por varias razones fundamentales. En primer lugar, el Link 2 es un componente crítico desde el punto de vista estructural, ya que concentra las máximas sollicitaciones de flexión durante la operación del robot. En segundo lugar, su geometría compleja y su función de elemento de transición entre articulaciones lo hacen especialmente susceptible de optimización topológica, ofreciendo un buen potencial de reducción de masa sin comprometer la integridad estructural.

Finalmente, la visibilidad clara del componente una vez retirada la tapa del robot permite realizar un escaneo 3D de buena precisión sin necesidad de desmontar elementos adicionales, así como obtener medidas precisas de las dimensiones críticas del componente, facilitando la reconstrucción digital del modelo CAD para su posterior análisis.

La estructura del Link 2 del IRB 120 está formada por dos brazos excéntricos interconectados mediante una sección central tipo túnel que alberga componentes internos del sistema de transmisión y accionamiento. El brazo izquierdo sirve como canal de alojamiento para la electrónica de control y el cableado de los eslabones posteriores del robot, como se puede observar en la Figura 20.



Figura 20. Cableado y electrónica en el Link 2 (elaboración propia)

El brazo derecho, como se muestra en la Figura 21, constituye el elemento estructural principal encargado de la distribución de cargas procedentes del Link 1, el Joint 2 y todos los componentes posteriores, incluyendo el payload máximo especificado. Este elemento es el que procederemos a estudiar y optimizar.



Figura 21. Brazo estructural del Link 2 (elaboración propia)

La geometría del componente en su diseño original se produce mediante fundición de aluminio, y responde a un enfoque convencional de fundición que garantiza márgenes de seguridad conservadores, permitiendo que la pieza soporte adecuadamente cargas transversales, axiales y momentos flectores durante operaciones dinámicas que incluyen aceleración, desaceleración y condiciones de parada de emergencia. Sin embargo, esta aproximación conservadora conlleva una distribución de material que no está optimizada para las solicitaciones reales, presentando considerable potencial de aligeramiento estructural mediante optimización topológica [41].

3.2 SELECCIÓN DEL MATERIAL

Para el proceso de optimización topológica se selecciona la aleación de aluminio EN AC-43000, también conocida comercialmente como Al-12SiMg y especificada en la norma DIN como G-AlSi 10 Mg. Se trata de una aleación binaria aluminio-silicio con adiciones de magnesio formulada específicamente para procesos de fundición a presión. Esta selección responde a dos criterios fundamentales que justifican la elección. En primer lugar, la compatibilidad con el proceso de fabricación original del componente en el robot industrial IRB 120 de ABB, cuyo casting de Link 2 se produce mediante fundición a presión. En segundo lugar, responde a la viabilidad de fabricación mediante tecnologías aditivas metálicas modernas como la fusión selectiva por láser, lo que abre la posibilidad de considerar métodos de fabricación alternativos para la geometría optimizada resultante del análisis.

PROPIEDAD	VALOR	UNIDAD
Densidad	2680	kg/m ³
Límite Elástico	200	MPa
Resistencia a Tracción	250	MPa
Módulo de Elasticidad	75000	MPa
Coef. Expansión Térmica	20.0×10^{-6}	K ⁻¹
Conductividad Térmica	159	W/(m·K)
Calor Específico	900	J/(kg·K)

Tabla 1. Propiedades del Aluminio L-2560 (elaboración propia)

La aleación EN AC-43000 presenta propiedades mecánicas adecuadas para aplicaciones estructurales en sistemas robóticos. El material seleccionado para esta simulación posee un límite elástico de 200 MPa, resistencia a tracción de 250 MPa, módulo de elasticidad de 75 GPa y densidad de 2,68 g/cm³. Estas características proporcionan un balance favorable entre resistencia específica y capacidad de fabricación, permitiendo que el algoritmo de optimización topológica genere una geometría que sea estructuralmente válida tanto en procesos convencionales de fundición a presión como en fabricación aditiva metálica. Esta flexibilidad en la fabricación resulta particularmente importante, ya que permite evaluar diferentes escenarios de producción y seleccionar el más eficiente según el contexto industrial. La composición química de la aleación, regulada por la norma UNE EN 1676, garantiza la reproducibilidad del material y su disponibilidad en el mercado industrial europeo.

Las propiedades mecánicas utilizadas finalmente han sido extraídas de la documentación técnica de la Federación Española de Fundidores, que agrupa los parámetros característicos de esta aleación para diferentes estados de tratamiento [42].

3.3 DESCRIPCIÓN DEL ESTADO DE CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO

3.3.1 JUSTIFICACIÓN DE LA SELECCIÓN DEL ESTADO DE CARGAS

La definición del estado de cargas que actúa sobre el Link 2 requiere una justificación rigurosa, ya que constituye la base sobre la cual reposa toda la validación estructural y posterior optimización del componente. Una aproximación ideal hubiera consistido en realizar un cálculo dinámico completo a partir de los parámetros cinemáticos y másicos del robot. Sin embargo, el manual de especificaciones del fabricante ABB no proporciona información suficiente para esta aproximación. Específicamente, el manual no incluye los valores de masa individual de cada link, ni especifica las aceleraciones máximas que puede desarrollar cada articulación. El fabricante únicamente proporciona las velocidades máximas de operación de cada joint, información insuficiente para reconstruir con precisión los campos de aceleración y las fuerzas inerciales resultantes.

Ante esta limitación, se realizó una búsqueda exhaustiva en Google Scholar para identificar trabajos previos que hubieran desarrollado análisis de cargas comparables en el robot IRB 120. Aunque se encontraron varios trabajos de interés en el campo de optimización topológica de componentes robóticos, ninguno abordaba específicamente el Link 2 del IRB 120. Además, la mayoría de las referencias identificadas empleaban aproximaciones basadas en simulación dinámica con valores estimados, estrategia que habría introducido capas adicionales de incertidumbre sin mejorar significativamente la precisión del análisis [43], [44], [45].

3.3.2 ANÁLISIS DE TRAYECTORIAS DE CARGA Y SELECCIÓN DEL CASO CRÍTICO

Ante las limitaciones identificadas en la obtención de datos de inercia y aceleración específicos del robot, se optó por una estrategia alternativa fundamentada en el concepto de trayectorias de carga (load paths) establecido en mecánica estructural. El manual de especificaciones del fabricante ABB proporciona cargas máximas admisibles en la base de fijación del robot para diferentes configuraciones de montaje, incluyendo montaje sobre suelo, fijación a pared y suspensión. Estas cargas base representan el máximo que el robot puede transmitir a su interfaz de anclaje en cualquier circunstancia de operación.

El análisis de trayectorias de carga en una cadena cinemática serial establece que cualquier interfaz intermedia de la cadena debe transmitir únicamente las cargas procedentes de los elementos estructurales situados distalmente respecto a ella [46].

En el caso del IRB 120, las cargas que actúan sobre la base de fijación incluyen no solamente las cargas del Link 2 y sus elementos posteriores, sino también la masa e inercia del propio Link 1. Por lo tanto, las cargas que específicamente actúan sobre el Link 2 son necesariamente menores que las cargas totales especificadas en la base de fijación. Esta relación constituye una desigualdad estructural bien definida en el análisis de cadenas cinemáticas abiertas [47].

Consecuentemente, aplicar las cargas máximas especificadas en la base de fijación a la interfaz distal del Link 2 introduce un factor de seguridad inherente al modelo, ya que se están aplicando cargas superiores a las que realmente actúan sobre este componente. Este enfoque conservador resulta apropiado para el análisis estructural en una fase de diseño, garantizando que cualquier conclusión de validez estructural será válida no solamente para el peor caso real del Link 2, sino también para escenarios de sobrecarga que exceden las sollicitaciones reales.

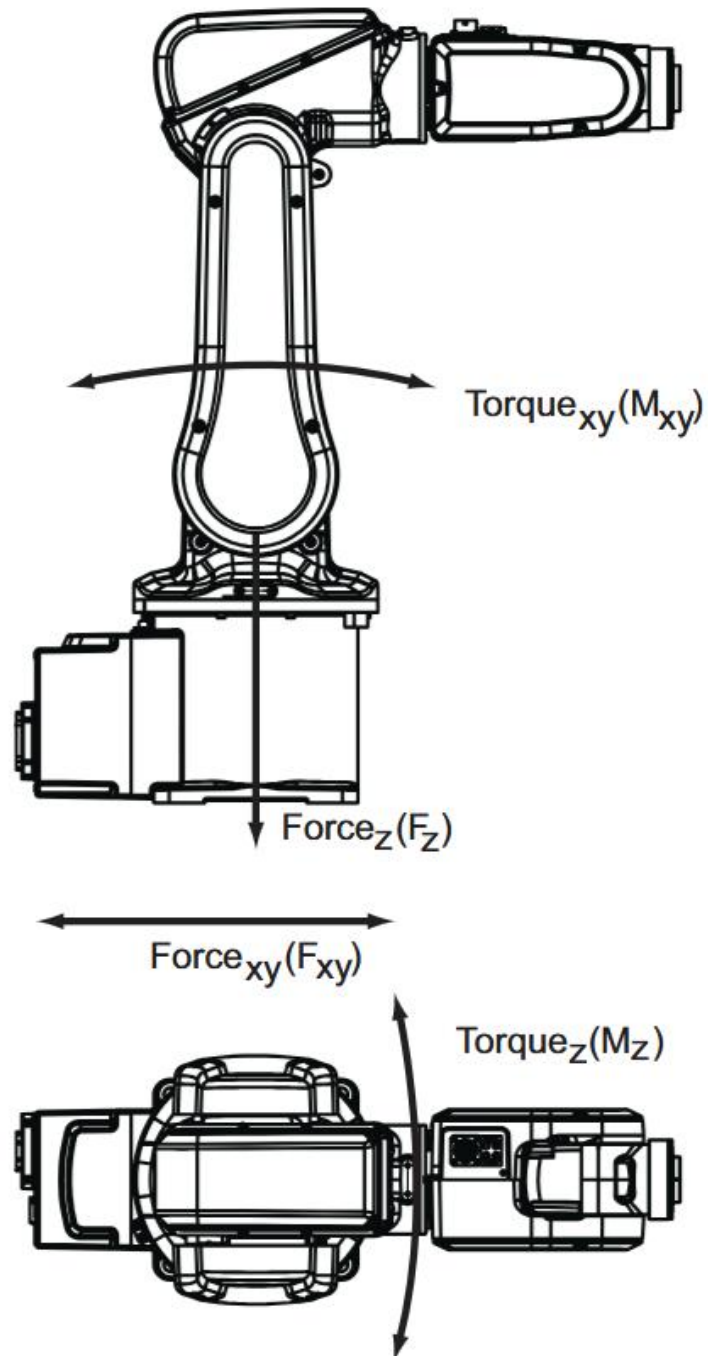


Figura 22. Diagrama de Cuerpo Libre del ABB IRB 120 [5]

Montado sobre el suelo

Fuerza	Carga de resistencia (en funcionamiento)	Carga máxima (paro de emergencia)
Fuerza xy	± 265 N	± 515 N
Fuerza z	-265 ± 200 N	-265 ± 365 N
Par xy	± 195 Nm	± 400 Nm
Par z	± 85 Nm	± 155 Nm

Fijado a la pared

Fuerza	Carga de resistencia (en funcionamiento)	Carga máxima (paro de emergencia)
Fuerza xy	± 470 N	± 735 N
Fuerza z	0 ± 200 N	0 ± 630 N
Par xy	± 240 Nm	± 450 Nm
Par z	± 90 Nm	± 175 Nm

Suspendido

Fuerza	Carga de resistencia (en funcionamiento)	Carga máxima (paro de emergencia)
Fuerza xy	± 265 N	± 515 N
Fuerza z	265 ± 200 N	265 ± 365 N
Par xy	± 195 Nm	± 400 Nm
Par z	± 85 Nm	± 155 Nm

Figura 23. Cargas que actúan en la base del robot para distintas configuraciones [5]

Entre las configuraciones de montaje especificadas por el fabricante, se selecciona el caso más extremo, correspondiente a la fijación a pared con parada de emergencia. Esta configuración genera las máximas solicitaciones estructurales y proporciona los márgenes más conservadores para el análisis. Los valores de carga extraídos del manual para esta configuración son aplicados al modelo del Link 2 como condiciones de diseño.

3.3.3 MODELADO DE LA PARADA DE EMERGENCIA

La parada de emergencia constituye un evento transitorio en el cual el robot cesa su operación y se detiene bruscamente. Desde el punto de vista del análisis estructural estático del Link 2, este evento puede modelarse como una condición de carga estática en la cual el motor de Joint 2 se bloquea instantáneamente y la inercia de todos los elementos posteriores genera cargas resistentes sobre el empotramiento proximal. La interfaz proximal, que consiste en la corona de dieciséis agujeros roscados de conexión con el Link 1, queda sometida a un empotramiento completo en los seis grados de libertad, reflejando que el motor está bloqueado y el Link 1 ha cesado toda rotación.

Simultáneamente, la interfaz distal del Link 2, consistente en la corona de doce agujeros de conexión con el Link 3, es el punto de entrada de las cargas procedentes de la inercia del Link 3, Link 4, Link 5 y Link 6 más el payload, todos los cuales resisten la desaceleración brusca del sistema. Este evento se modela mediante la aplicación de cargas estáticas equivalentes en la interfaz distal.

3.3.4 DEFINICIÓN DEL ESTADO DE CARGAS

Las cargas aplicadas en la interfaz distal comprenden cuatro componentes distintos, todos ellos extraídos del manual de especificaciones técnicas del fabricante para la configuración más crítica. La fuerza transversal en el plano XY tiene un valor máximo de 735 N, representando la máxima sollicitación lateral del brazo durante parada de emergencia. La fuerza axial a lo largo del eje Z del brazo tiene un valor máximo de 630 N, representando cargas de compresión o tracción axial dependiendo de la orientación del robot. El momento flector en el plano XY tiene un valor de 450 Nm, generado por la acción combinada de las fuerzas transversales y la geometría del brazo. El momento torsor alrededor del eje Z tiene un valor de 175 Nm, representando los pares de reacción de los motores posteriores durante la desaceleración.

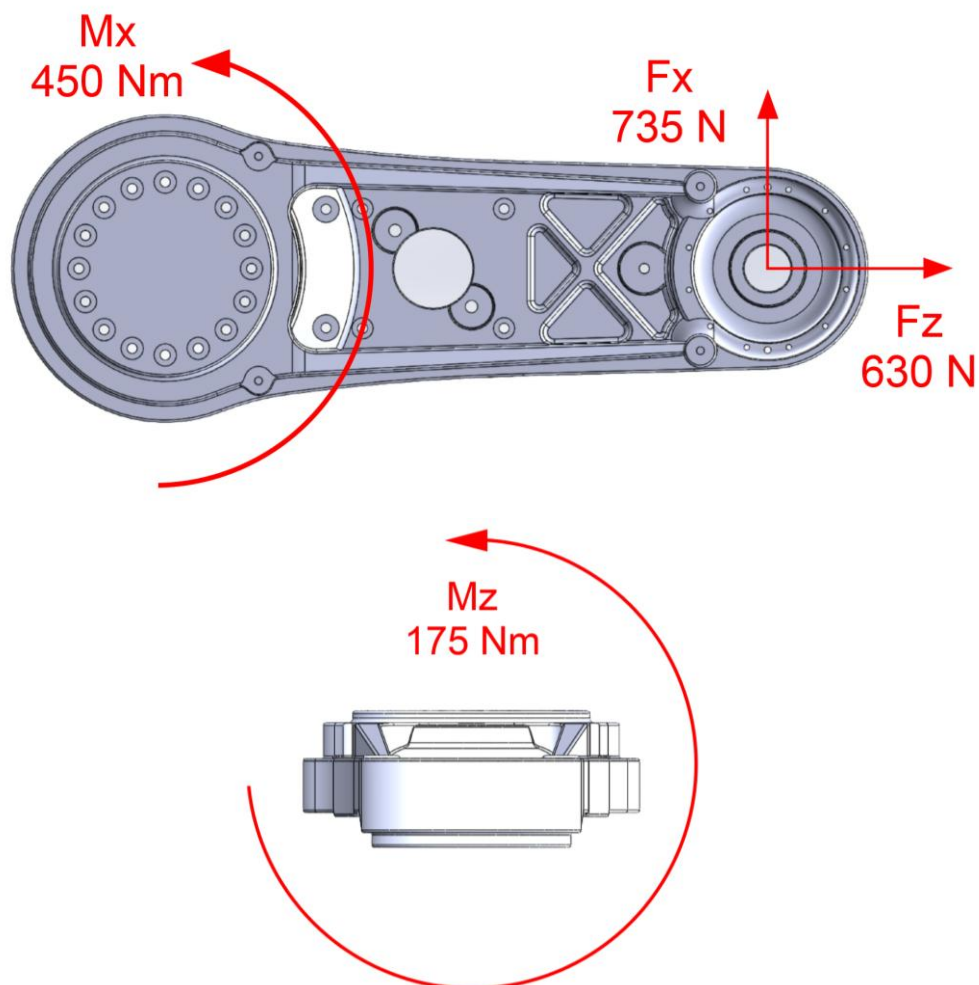


Figura 24. DCL aplicado al caso de cargas extremo (elaboración propia)

FUERZA	CARGA MÁXIMA
Fuerza XY (transversal)	735 N
Fuerza Z (axial)	630 N
Par XY (flector)	450 Nm
Par Z (torsor)	175 Nm

Tabla 2. Cargas máximas bajo caso de robot fijado a la pared (elaboración propia)

Capítulo 4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

4.1 PROCESO GENERAL

La metodología de este trabajo se fundamenta en un proceso iterativo de ingeniería inversa combinado con Ingeniería Asistida por Ordenador (CAE), que integra el modelado 3D, la validación mediante Análisis por Elementos Finitos (FEA), la optimización topológica para rediseñar el componente mecánico existente y finalmente la fabricación aditiva de un prototipo optimizado. El flujo de trabajo está diseñado para evaluar la validez estructural del componente original, identificar oportunidades de optimización de masa y desarrollar una geometría mejorada que mantenga la integridad funcional. El proceso se estructura en fases secuenciales que abarcan desde la captura digital del componente original hasta la fabricación mediante impresión 3D y la evaluación del prototipo optimizado.

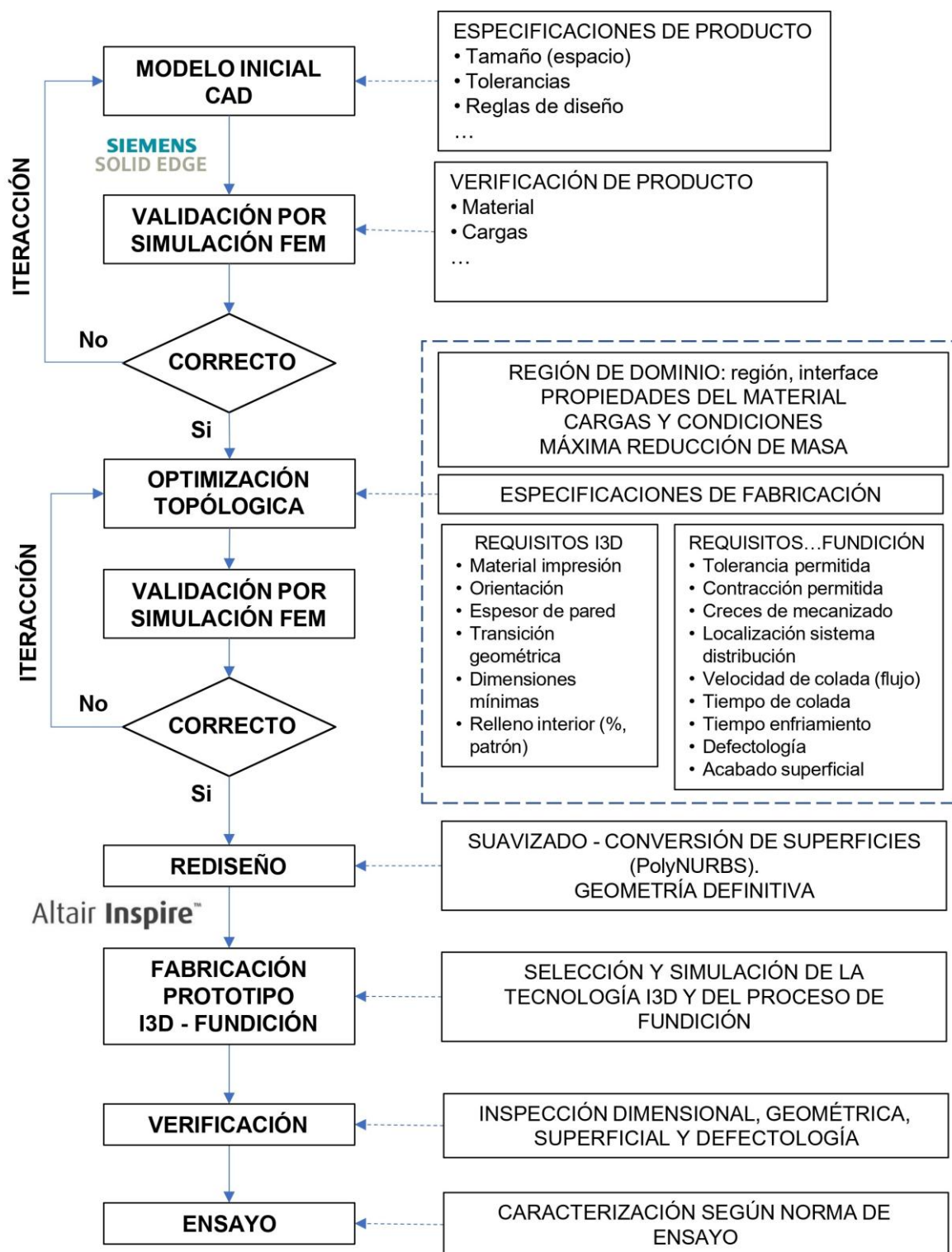


Figura 25. Diagrama de flujo del proceso general (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI))

4.2 INGENIERÍA INVERSA

El proceso de ingeniería inversa aplicado se fundamenta en un ciclo metodológico estandarizado que transforma un componente físico en un modelo digital paramétrico a través de fases consecutivas. El flujo de trabajo se inicia con la definición del objetivo y la preparación de la pieza mediante limpieza, aplicación de spray mate y colocación de targets de referencia. Tras configurar y calibrar el escáner, se realizan capturas desde múltiples ángulos que se alinean para unificar las nubes de puntos individuales en una geometría global. A partir de este volumen, se ejecuta una limpieza de ruido y huecos para crear y optimizar una malla 3D (STL u OBJ), la cual se convierte posteriormente en un sólido CAD paramétrico. Finalmente, se realiza un control de calidad que evalúa el cumplimiento de las tolerancias métricas. Si el resultado es favorable, se procede a la exportación final en formatos de intercambio estándar (STEP o IGES), mientras que una desviación negativa obliga a reajustar los parámetros o realizar un reescaneo local para reiniciar el ciclo de captura.

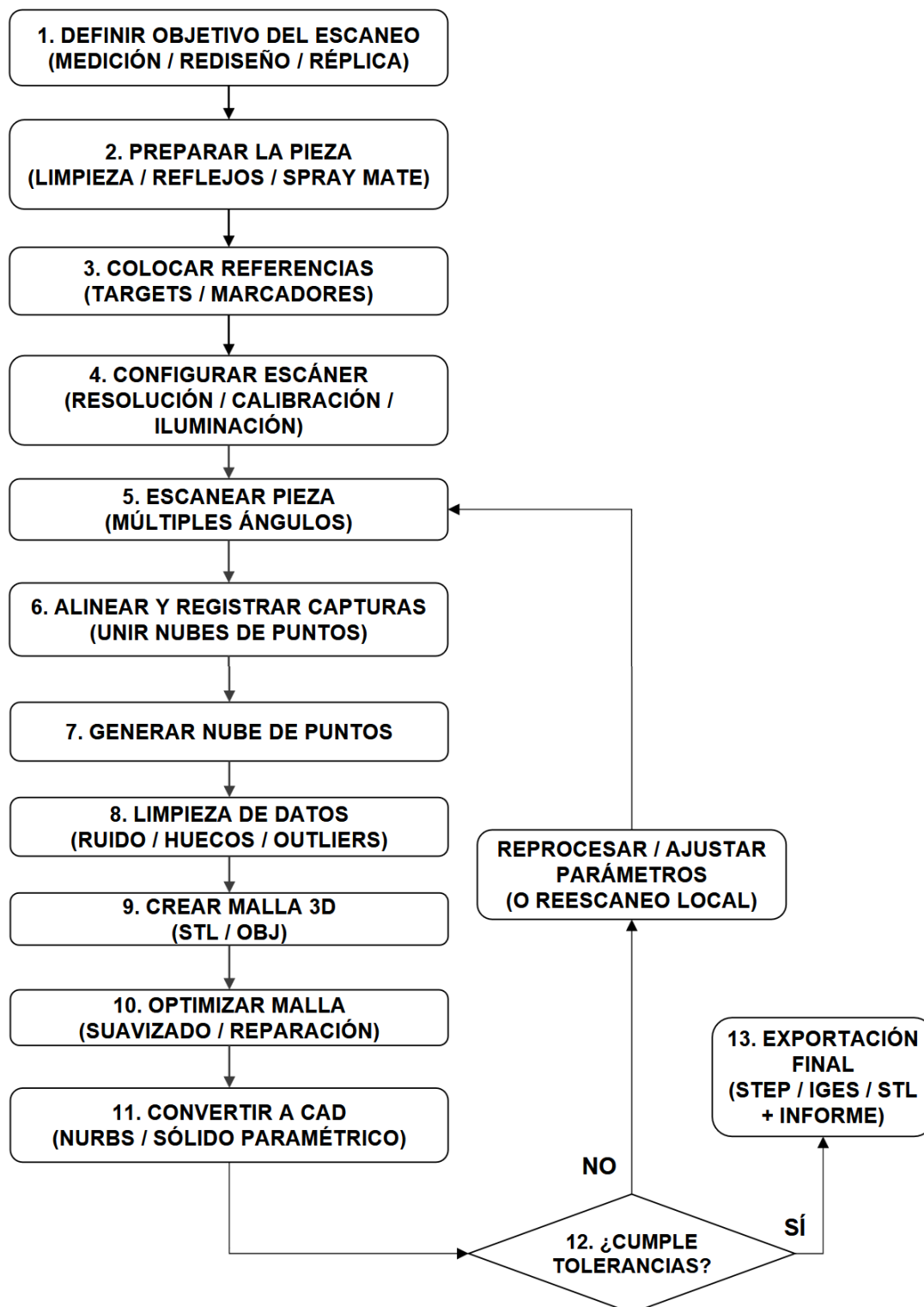


Figura 26. Diagrama de flujo para ingeniería inversa (Prof. Mariano Jiménez Calzado (ETSI – ICAI))

4.2.1 ESCANEEO 3D

La metodología se inicia con la captura digital del Link 2 original mediante escaneo tridimensional de alta precisión. Debido a la imposibilidad de desmontar el robot, se escanea exclusivamente la cara frontal del componente, obteniendo una nube de puntos que representa fielmente la geometría externa visible del casting. Este enfoque de ingeniería inversa resulta necesario dado que no se dispone de acceso directo al modelo CAD original de fabricación del componente. La geometría completa de la pieza se reconstruye en fases posteriores, donde se completa la parte trasera del componente que no se puede obtener por escaneado 3D, siendo esta estrategia la mejor opción para reconstruir digitalmente la pieza con precisión suficiente para análisis posterior.

4.2.2 LIMPIEZA Y PROCESAMIENTO DEL ESCANEADO EN VX MODEL

La nube de puntos resultante del escaneo se importa al software VX Model (del paquete VX Elements de Creaform) para su procesamiento. En esta fase se realizan operaciones de limpieza y acondicionamiento de la geometría, incluyendo la eliminación de ruido del escaneado, la regularización de superficies y fundamentalmente la eliminación de los agujeros de conexión. Esta última operación resulta necesaria para obtener un modelo base limpio del cuerpo estructural del componente, siendo los agujeros reintroducidos posteriormente con precisión dimensional en fases subsecuentes. El resultado de esta fase es una malla cerrada y lista para exportación.

4.3 RECONSTRUCCIÓN PARAMÉTRICA EN SOLIDWORKS

La geometría procesada en VX Model se importa a SolidWorks para su reconstrucción como modelo sólido paramétrico. En esta fase se realizan operaciones de refinamiento geométrico sobre el escaneo frontal y se completa la geometría trasera del componente con las consideraciones estructurales del diseño original. Se reintroducen con precisión los elementos de conexión críticos del componente, siendo los dieciséis agujeros roscados del empotramiento proximal y los doce de la interfaz distal obtenidos mediante medición directa sobre el componente físico. La pieza se prepara en SolidWorks estableciendo sistemas de referencias, planos de simetría y restricciones geométricas que facilitarán el trabajo posterior en Solid Edge, garantizando que la geometría reconstruida sea paramétrica y fácilmente modificable. El modelo resultante constituye la representación digital del Link 2 en su estado original, combinando datos del escaneo frontal con la reconstrucción geométrica de la cara trasera.

4.4 SIMULACIÓN FEA DE VALIDACIÓN EN SOLID EDGE

El modelo paramétrico de SolidWorks se importa a Solid Edge, donde se procede a la definición rigurosa del entorno de simulación. Se asigna el material EN AC-43000 con sus propiedades mecánicas definidas, se establecen las condiciones de contorno mediante empotramiento en los dieciséis agujeros proximales y se aplican las cargas estáticas correspondientes al caso de parada de emergencia en la interfaz distal. Se genera un mallado sólido de elementos tetraédricos de alta orden, optimizando la densidad de malla en las regiones de máxima sollicitación. La simulación FEA se ejecuta bajo el criterio de Von Mises, verificando que las tensiones máximas se mantengan por debajo del límite elástico del material. Esta fase de validación sirve para confirmar que el diseño original es estructuralmente adecuado, y para evaluar si está sobredimensionado y presenta márgenes de seguridad muy conservadores que justifican la optimización topológica.

4.5 OPTIMIZACIÓN *TOPOLÓGICA ITERATIVA EN SOLID EDGE*

Una vez validado el diseño original, se procede a la fase de optimización topológica empleando el módulo Topology Study de Solid Edge. Se definen los mismos estados de carga y restricciones cinemáticas de la simulación anterior, estableciendo la interfaz distal como zona de aplicación de cargas y el empotramiento proximal como restricción. Se configura el algoritmo generativo con diferentes estrategias de eliminación de material, iniciando con porcentajes conservadores de reducción de masa y aumentando iterativamente. Tras cada iteración, la geometría optimizada resultante se somete a simulación FEA de validación, y se analiza en términos de reducción de masa frente a mantención de criterios de seguridad. Este bucle iterativo continúa hasta identificar una solución óptima que logre un equilibrio significativo entre aligeramiento estructural y viabilidad funcional.

Este proceso general de optimización y rediseño se estructura bajo un flujo metodológico secuencial para garantizar la transición de un sólido rígido a una estructura orgánica de altas prestaciones. El ciclo de trabajo comienza al dibujar o importar la geometría en el espacio virtual, procediendo de inmediato a simplificar la pieza para eliminar vaciados estéticos, nervios o vaciados que limiten el espacio libre de diseño. Posteriormente, se pasa a definir las uniones, juntas y contactos funcionales que delimitan el contorno no modificable, permitiendo así asignar los materiales y las cargas físicas estáticas o dinámicas del entorno de operación. Con las fronteras matemáticas resueltas, el algoritmo procesa los datos para generar la optimización topológica inicial, la cual da paso a la etapa de refinar utilizando PolyNURBS o exportar a CAD, transformando la malla poligonal en superficies continuas editables. El flujo concluye tras verificar el rendimiento mediante un análisis de elementos finitos final que valida mecánicamente el componente antes de enviarlo a la etapa definitiva de fabricar por métodos convencionales o aditivos.

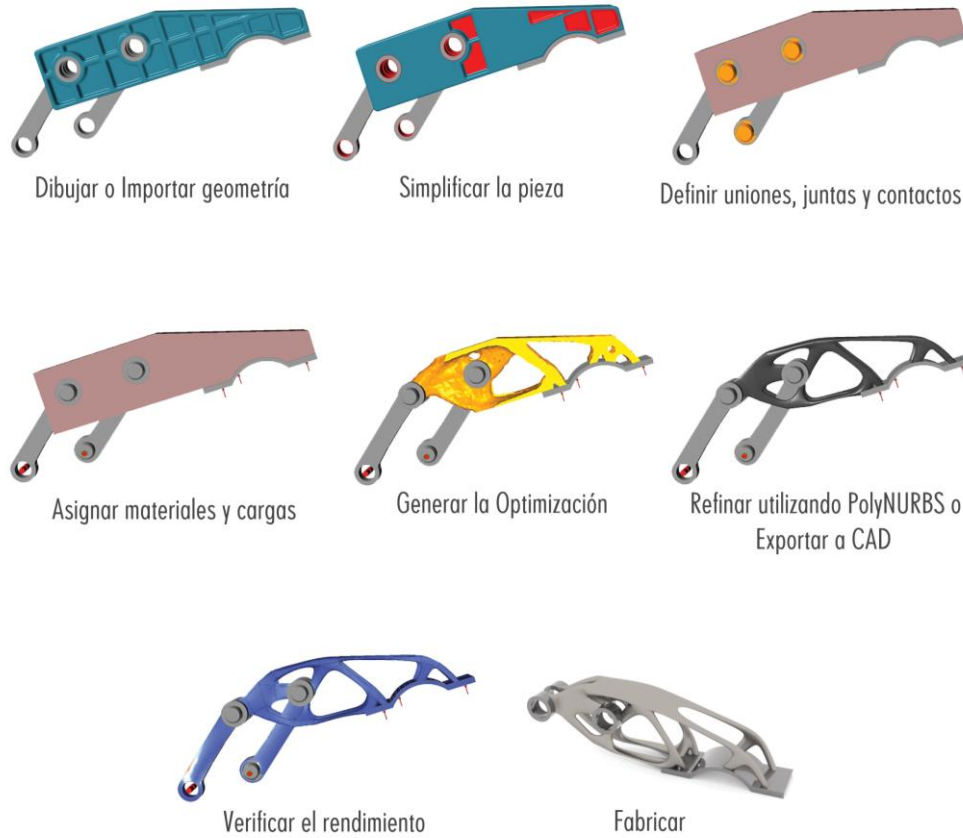


Figura 27. Diagrama de flujo para optimización topológica [48]

4.6 REFINAMIENTO GEOMÉTRICO EN ALTAIR INSPIRE

La geometría optimizada resultante del algoritmo generativo, aunque estructuralmente válida, presenta características geométricas complejas y potencialmente problemáticas para su fabricación. La pieza optimizada se importa a Altair Inspire para un refinamiento geométrico adicional. En esta fase se suavizan las aristas agudas, se regularizan las transiciones entre regiones de material, se eliminan pequeños detalles sin incidencia estructural, y se mejora la calidad de la malla superficial. El objetivo es obtener una geometría que mantenga las propiedades estructurales optimizadas de la solución generativa pero presente un aspecto más realista y fabricable, especialmente para procesos de impresión 3D.

4.7 FABRICACIÓN ADITIVA

4.7.1 PREPARACIÓN PARA FABRICACIÓN ADITIVA

La geometría refinada en Altair Inspire se exporta en formato estándar STL, formato requerido para la preparación de archivos de impresión 3D. El modelo STL se procesa mediante software de preparación de impresión 3D (slicer) para definir la estrategia de deposición, orientación de la pieza en la plataforma de construcción y parámetros de impresión. Se realiza una simulación de impresión 3D para estimar tiempos, consumo de material y viabilidad del proceso.

Este flujo de fabricación aditiva sigue una metodología lineal de seis etapas. El proceso comienza en la fase de Diseño (CAD) mediante la consolidación tridimensional del modelo virtual, el cual se exporta posteriormente a un fichero de intercambio de geometría facetada o triangulada, normalmente en formato STL. En nuestro caso, este archivo es el STL final exportado de Altair Inspire. Una vez obtenido este archivo de malla, se importa al software de impresión 3D (slicer) para llevar a cabo la descomposición en capas, un análisis numérico que divide el sólido continuo en secciones bidimensionales horizontales de espesor controlado. Posteriormente, el G-code generado guía a la maquinaria industrial durante la creación de capas, donde el cabezal de extrusión deposita secuencialmente el filamento fundido sobre la plataforma de construcción siguiendo las trayectorias físicas calculadas. El ciclo concluye en la etapa de postprocesado, donde el componente fabricado se somete a operaciones de eliminación manual de material de soporte, limado de rebabas, pulido de superficies e inspección dimensional para certificar su acabado final.

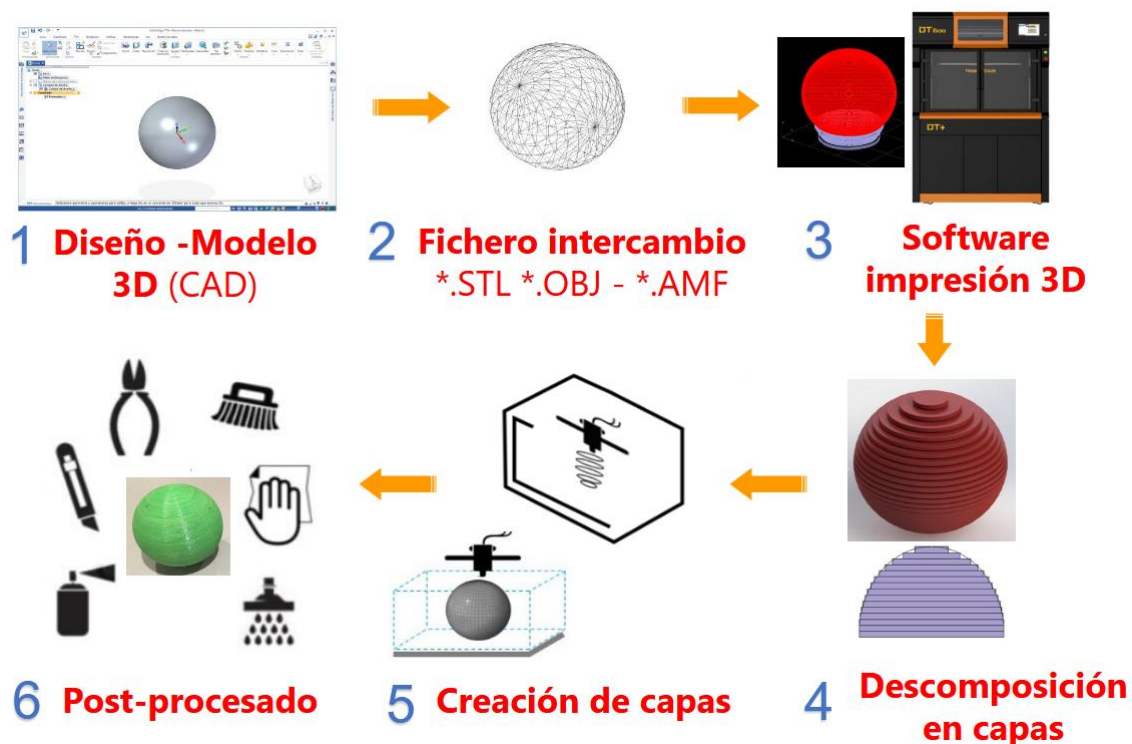


Figura 28. Diagrama de flujo para fabricación aditiva [36]

4.7.2 FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO Y EVALUACIÓN FINAL

El prototipo se fabrica mediante impresión 3D utilizando tecnología FDM en escala real. Una vez completada la impresión, se procede a la evaluación visual y dimensional del prototipo, verificando que la geometría fabricada corresponde fielmente a la diseñada. Aunque el prototipo no es representativo del comportamiento estructural bajo carga real, su inspección visual y dimensional confirma la viabilidad y coherencia de la solución optimizada.

Capítulo 5. DESARROLLO DEL TRABAJO

El presente capítulo expone de forma detallada el núcleo operativo y metodológico del proyecto, estructurando las fases de ingeniería inversa, simulación numérica, optimización avanzada y fabricación aditiva aplicadas sobre el Link 2. El desarrollo del trabajo se articula a través de un flujo secuencial orientado a transformar el componente físico original en uno digital paramétrico, para posteriormente someterlo a un proceso de aligeramiento estructural mediante diseño generativo. De este modo, el capítulo transita desde las etapas iniciales de inspección metrológica hasta la materialización física del nuevo prototipo funcional, sirviendo como registro técnico de todas las herramientas experimentales y de software empleadas.

5.1 PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LA PIEZA

Se comienza desmontando la tapa exterior del robot IRB 120 para acceder directamente al Link 2. Con la tapa retirada se observa claramente la geometría del componente y se identifican sus características funcionales principales. Durante la inspección inicial se nota la presencia de una correa de transmisión en la sección central del componente, que actúa como transmisor de movimiento para el motor del Link 3. Esta correa no constituye un elemento estructural de nuestra pieza, sino que sirve exclusivamente para acoplar la caja de cambios interna, por lo que se excluye del dominio de análisis. Sin embargo, su presencia define una zona de exclusión que debe respetarse durante la optimización topológica.

Se realizan una serie de mediciones manuales sobre el componente físico utilizando calibres digitales, permitiendo obtener dimensiones con precisión. Se miden las dimensiones generales del componente incluyendo su longitud total, ancho máximo y espesor en diferentes secciones.

Se miden con precisión ambas interfaces de conexión. En la interfaz proximal se determinan los diámetros de los dieciséis agujeros roscados y se verifica su distribución equidistante alrededor del eje central, confirmando que constituyen una unión rígida e integral con el Link 1. En la interfaz distal se miden los doce agujeros cilíndricos lisos de conexión con el Link 3, verificando también su distribución circular equidistante.

5.2 OBTENCIÓN DE LA PIEZA POR INGENIERÍA INVERSA

5.2.1 ESCANEADO 3D Y TRABAJO EN VX MODEL

La obtención del modelo digital del Link 2 comienza mediante un proceso de ingeniería inversa utilizando escaneado 3D de alta precisión. Se emplea un escáner tridimensional de tecnología portátil, el HandyScan 3D de Creaform, que combina un sensor láser con cámaras de referencia para capturar la geometría externa del componente con precisión metrológica [49].



Figura 29. HandyScan 3D de Creaform [50]

Para optimizar la calidad del escaneo, se prepara el componente adhiriendo marcadores geométricos de referencia sobre su superficie. Estos marcadores permiten al software de escaneo mantener la continuidad y alineación de las diferentes pasadas del sensor, garantizando que la nube de puntos resultante sea coherente y precisa en todas sus regiones [51].

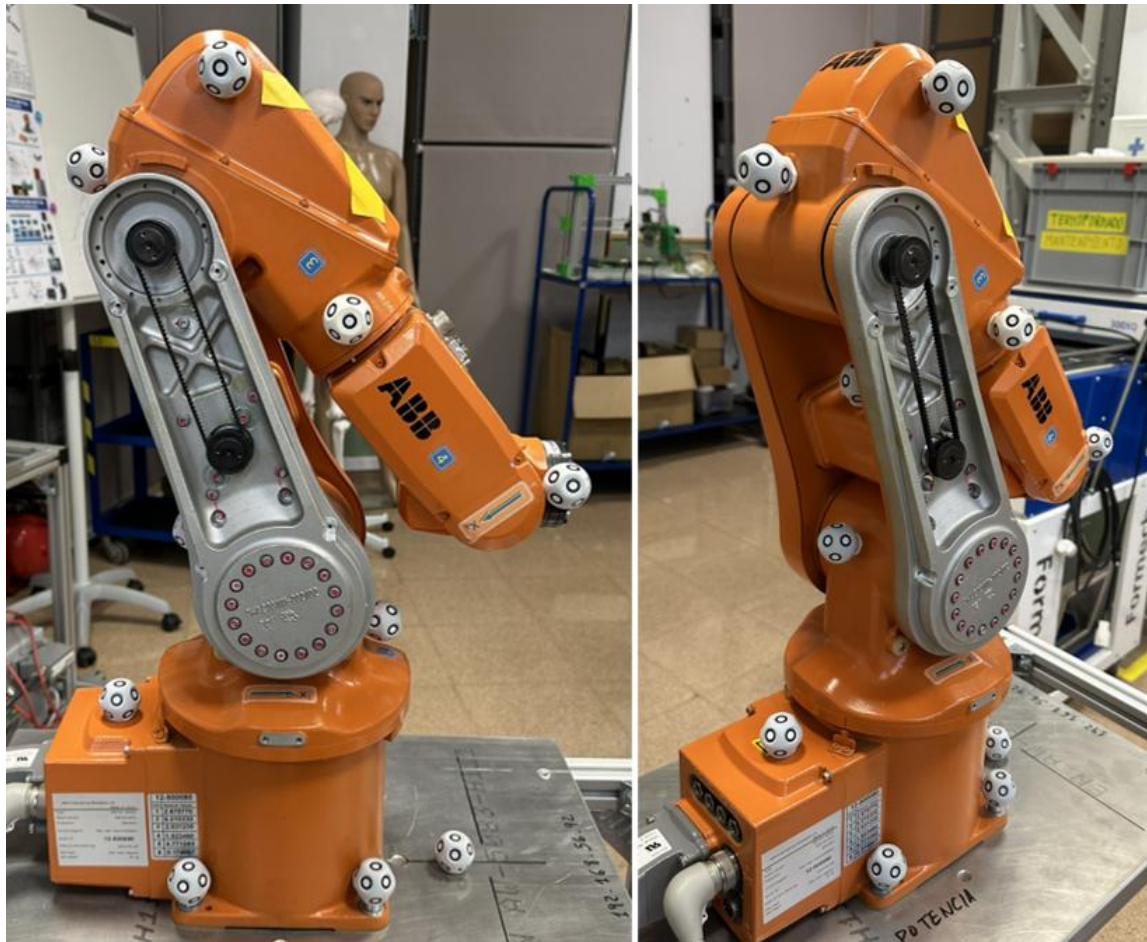


Figura 30. ABB IRB 120 con marcadores geométricos para escaneo 3D (elaboración propia)

El escaneo se realiza desde la cara frontal del componente, capturando la geometría visible desde esa perspectiva. El resultado es una nube de puntos densa que representa fielmente la superficie exterior frontal del Link 2, así como los elementos alrededor de la pieza. Esta nube se importa al software VX Model para su procesamiento y refinamiento.

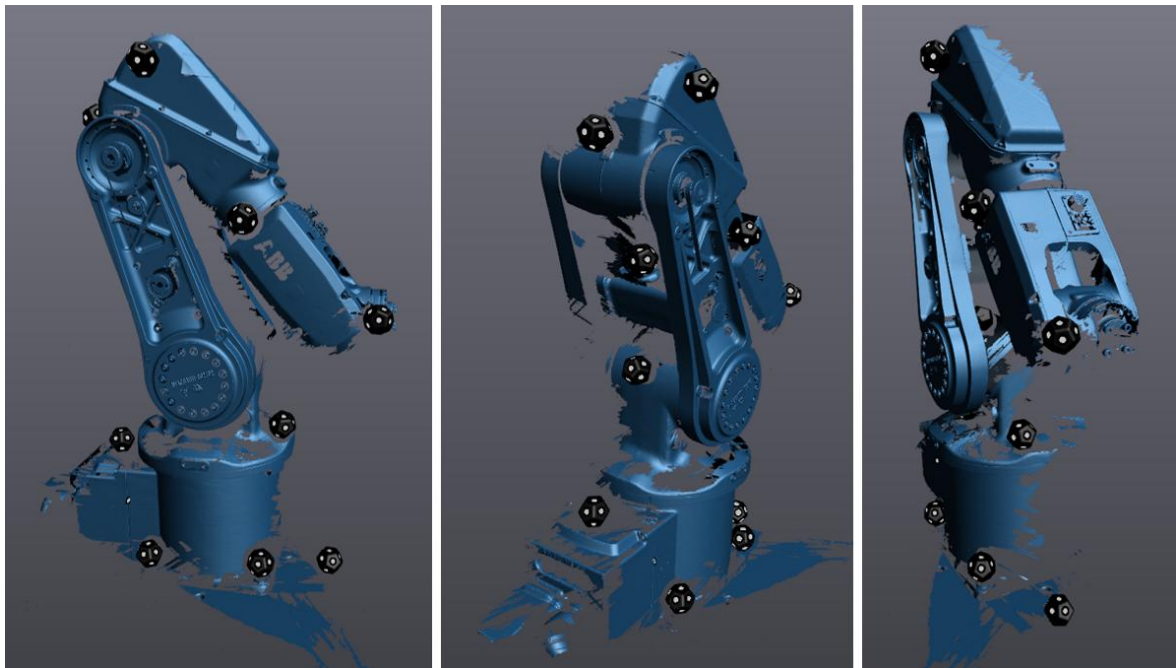


Figura 31. Modelo inicial introducido en VX Model (elaboración propia)

Una vez en VX Model, se inicia el postprocesado de la geometría escaneada. El primer paso consiste en la eliminación de material innecesario y artefactos del escaneo que no corresponden a la geometría real del componente. Se suprimen regiones de ruido, puntos aislados y capturas erróneas.

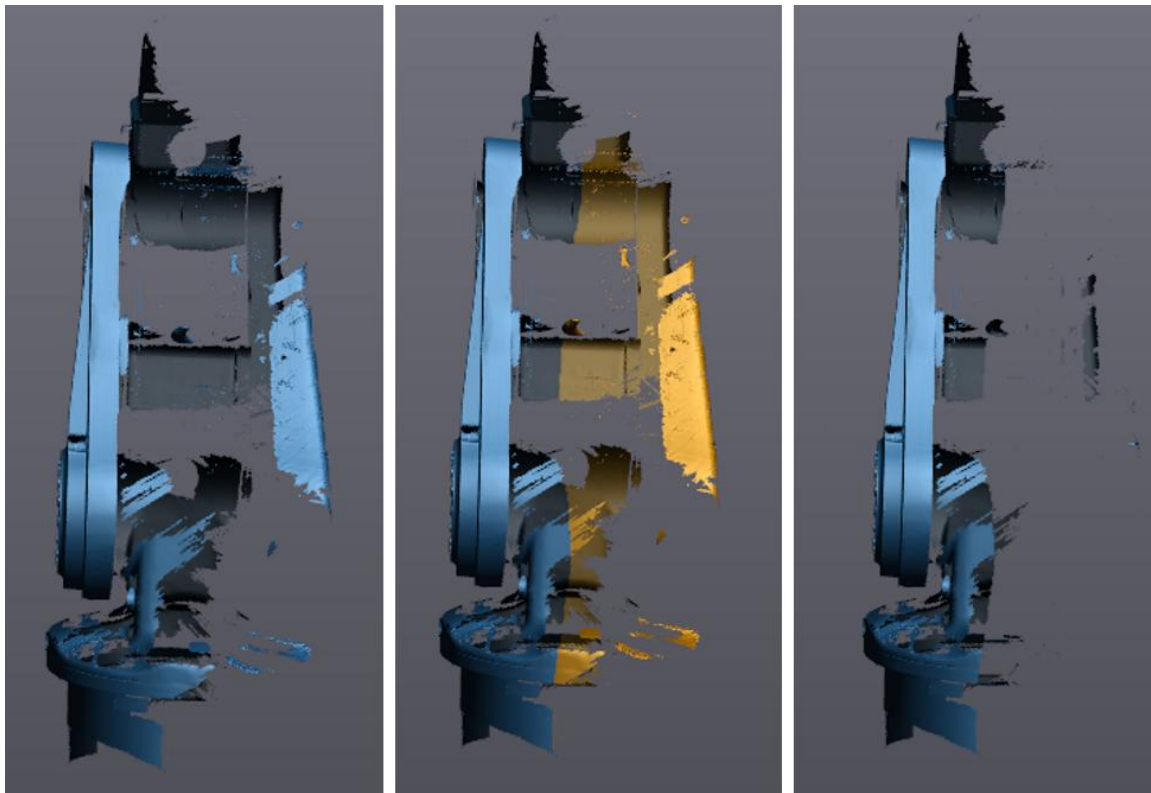


Figura 32. Tareas de eliminación de material (elaboración propia)

Se establece un sistema de referencias geométricas que servirá de base para el modelado posterior en SolidWorks. Se crean nuevos planos de referencia alineados con los ejes principales del componente, permitiendo que el modelo tenga una orientación consistente y facilite las operaciones de simetría y parametrización.

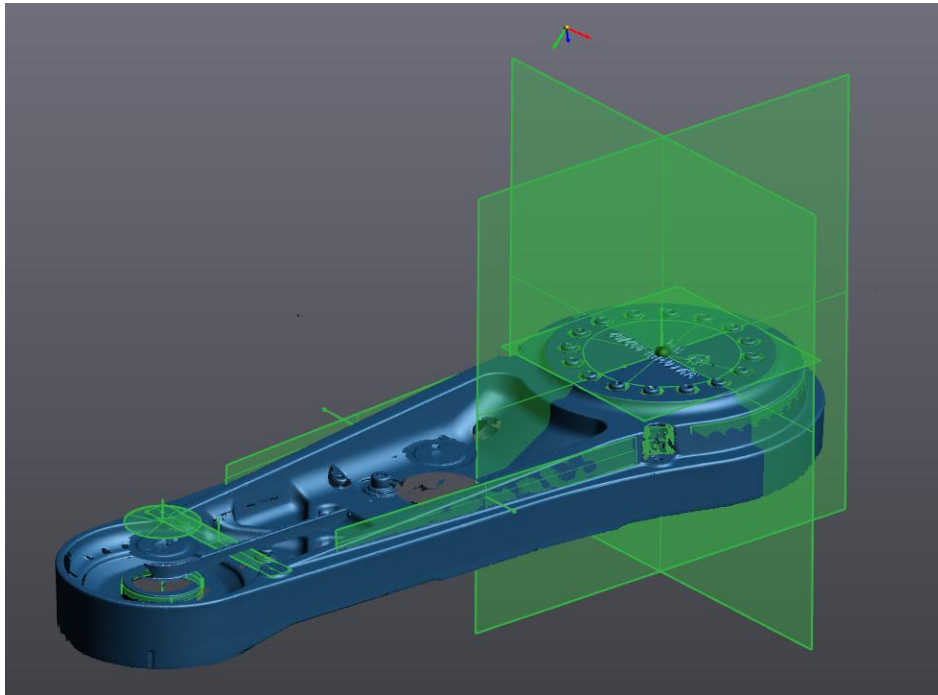


Figura 33. Colocación de nuevos planos de referencia (elaboración propia)

Se procede al tapado de los agujeros de conexión que fueron capturados como cavidades durante el escaneo. Aunque estos agujeros serán reconstruidos posteriormente en SolidWorks con precisión metrológica, es necesario cerrar estas discontinuidades en VX Model para obtener una malla topológicamente cerrada y válida.

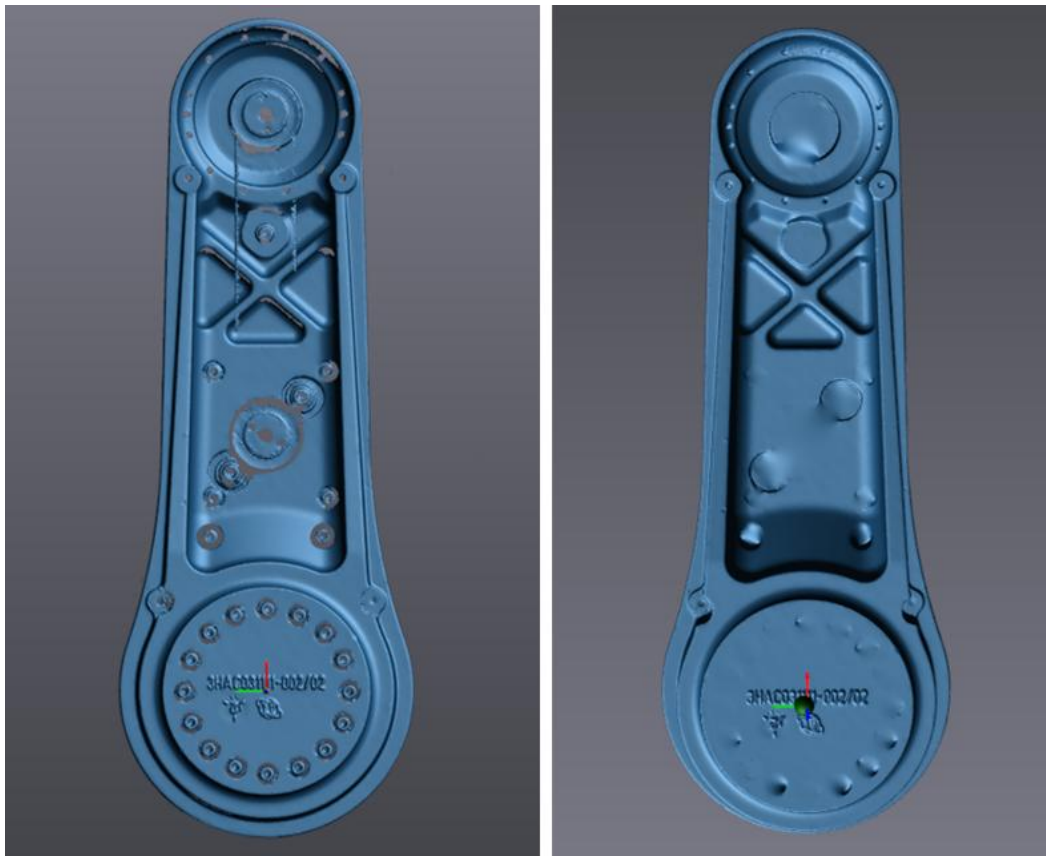


Figura 34. Tapado de agujeros (elaboración propia)

Dado que el escaneo solo capturó la cara frontal del componente, se requiere eliminar la cara trasera problemática que no pudo ser escaneada adecuadamente. Esta operación deja la malla plana por la parte trasera, de modo que pueda ser reconstruida posteriormente en SolidWorks mediante operaciones de extrusión.

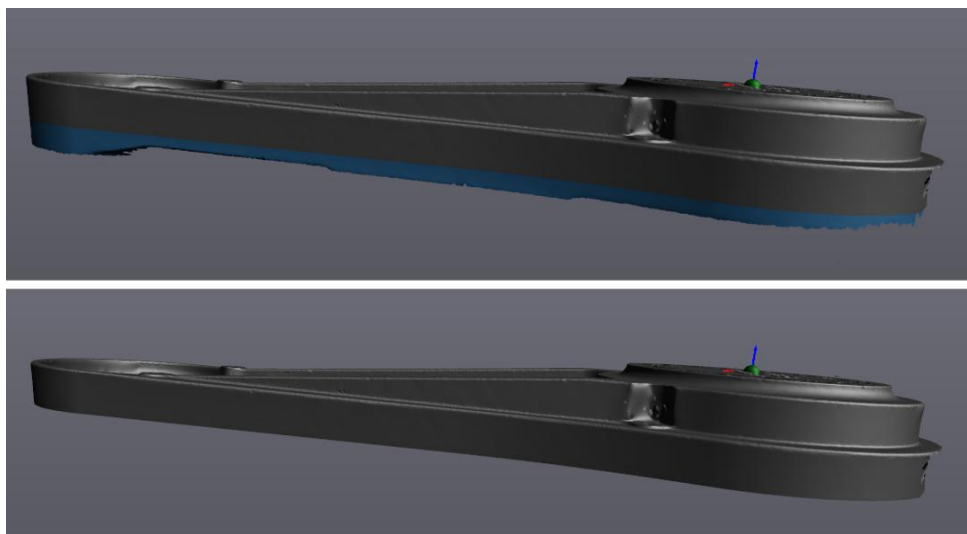


Figura 35. Eliminación de parte trasera (elaboración propia)

Como paso final antes de la exportación, se aplica la función Auto Surface de VX Model. Esta función suaviza la malla poligonal, elimina facetas irregulares y mejora la calidad geométrica general, produciendo una representación más limpia y precisa de la superficie capturada.

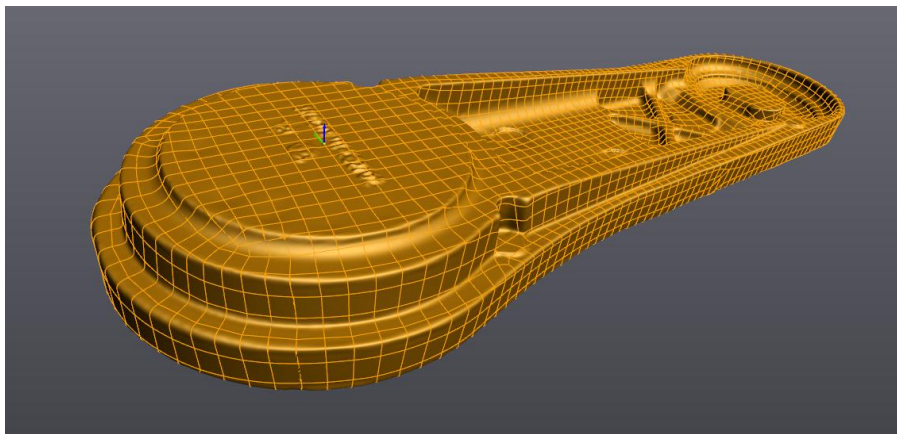


Figura 36. Función Auto Surface (elaboración propia)

5.2.2 POSTPROCESADO EN SOLIDWORKS

Una vez procesada la malla en VX Model, se importa el modelo a SolidWorks para iniciar la fase de reconstrucción paramétrica. El objetivo es transformar la malla de puntos en un modelo sólido CAD preciso, completando las geometrías faltantes y reconstruyendo todas las interfaces de conexión con exactitud metrológica.

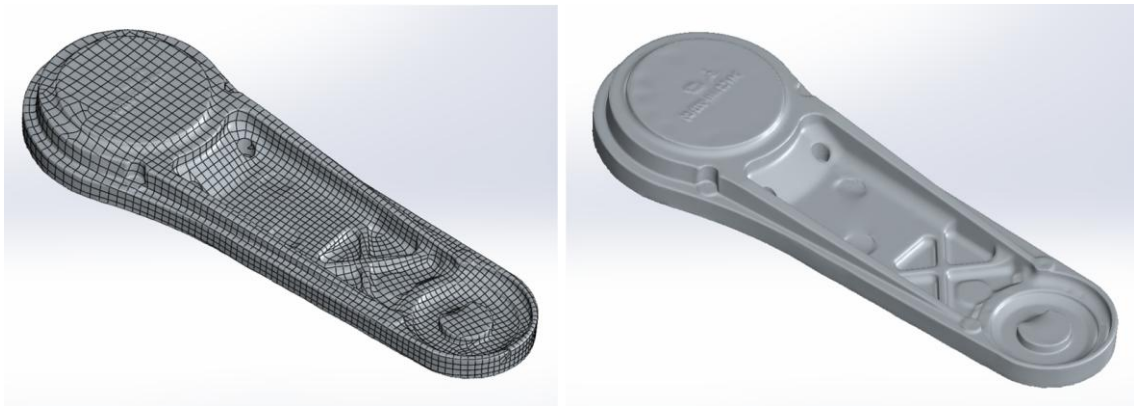


Figura 37. Modelo importado a SolidWorks (elaboración propia)

El primer paso en SolidWorks consiste en crear un sistema robusto de planos auxiliares de referencia alineados con los ejes principales del componente. Estos planos sirven como base para todas las operaciones geométricas subsecuentes, permitiendo realizar cortes, simetrías y proyecciones con precisión.

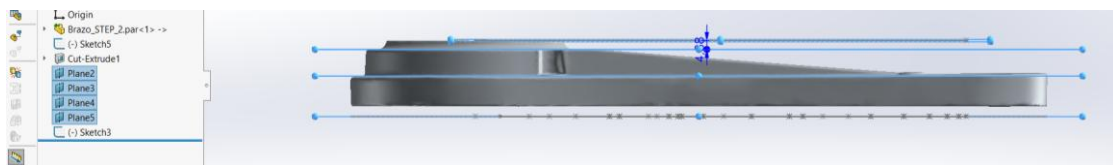


Figura 38. Creación de planos auxiliares (elaboración propia)

Se realiza una limpieza del perfil exterior del componente mediante una operación de corte que define la silueta frontal de la pieza. Se dibuja manualmente el contorno exterior del componente basándose en el escaneo, eliminando así cualquier irregularidad, ruido o artefacto que no corresponda a la geometría real. Esta operación garantiza que los bordes y perfiles externos sean limpios y precisos.

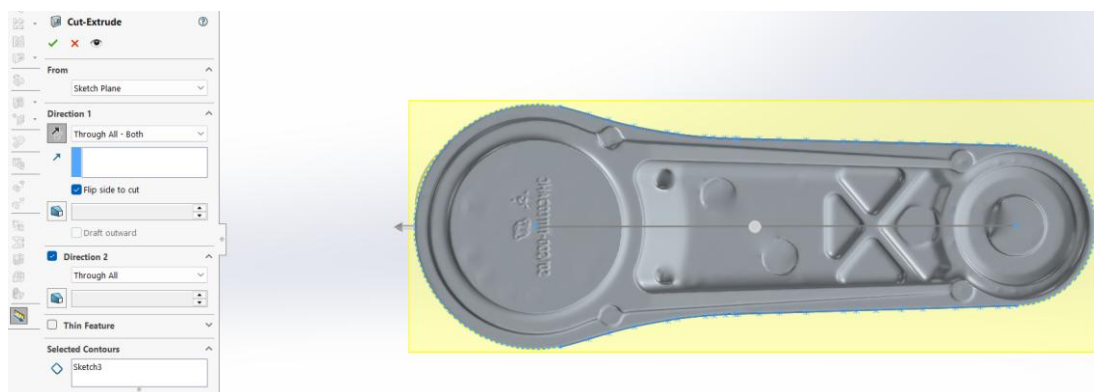


Figura 39. Limpieza por corte del perfil exterior de la pieza (elaboración propia)

Se procede a rellenar el espacio trasero del componente que fue eliminado en VX Model. Utilizando operaciones de simetría respecto al plano central longitudinal del componente, se reconstruye la cara trasera reflejando lo observado en la fase de análisis inicial, utilizando las medidas realizadas.

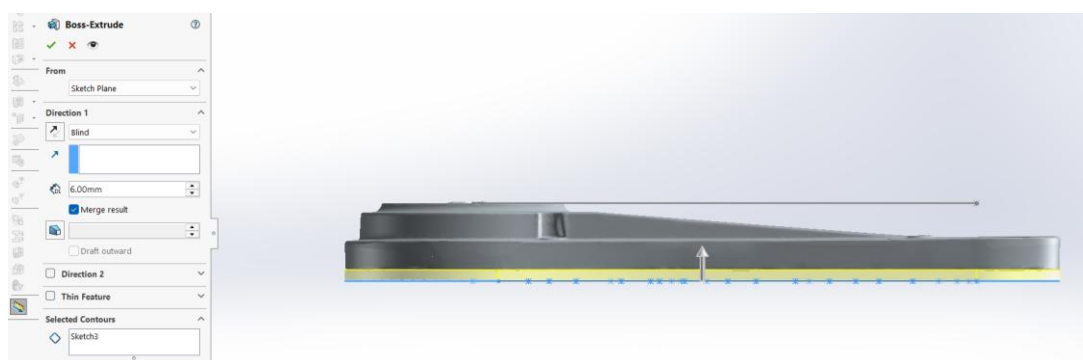


Figura 40. Rellenado del espacio trasero eliminado en VX Model (elaboración propia)

Se reintroducen los agujeros de conexión que fueron eliminados en VX Model. Basándose en las mediciones manuales realizadas sobre el componente físico, se crean los agujeros y los huecos para la correa de transmisión. Se definen los diámetros exactos, las profundidades y la distribución equidistante alrededor de los ejes de rotación correspondientes.

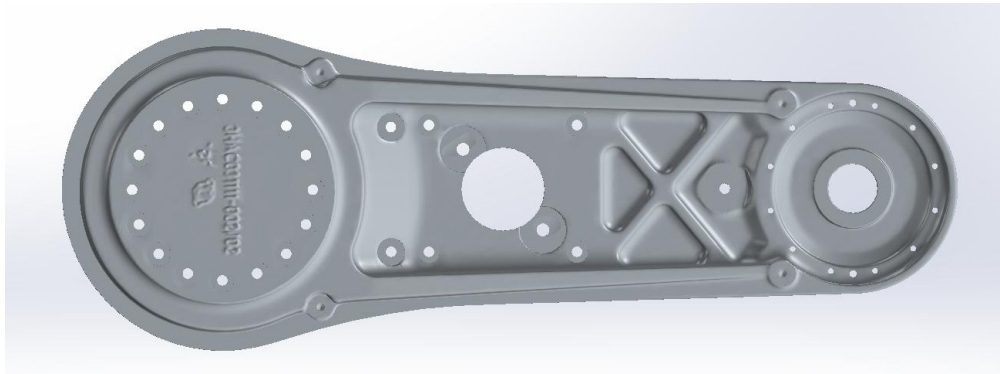


Figura 41. Inserción de agujeros eliminados en VX Model (elaboración propia)

Una vez completadas todas las operaciones de reconstrucción geométrica, se realiza un postprocesado final del modelo, suavizando superficies y refinando aristas para obtener una representación limpia y coherente del componente. El resultado es un modelo CAD sólido, paramétrico y dimensionalmente preciso del Link 2 en su estado original.

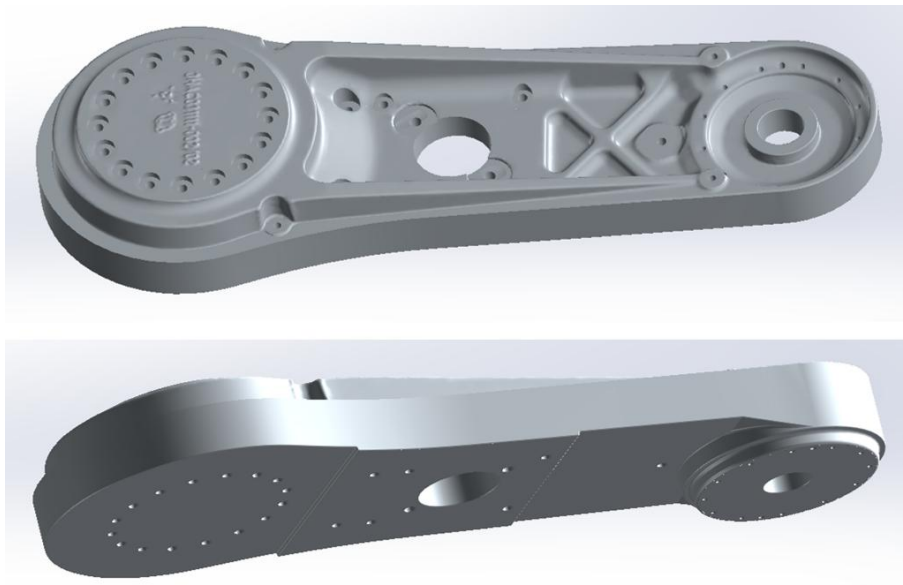


Figura 42. Pieza final tras postprocesado (elaboración propia)

5.3 OBTENCIÓN DE LA PIEZA POR MODELADO CAD

5.3.1 PIEZA DETALLADA

Aunque la reconstrucción mediante ingeniería inversa del escaneo 3D proporciona una geometría válida del componente, se decide realizar adicionalmente un modelado paramétrico completo de la pieza desde cero en SolidWorks. Esta aproximación se justifica por varias razones. En primer lugar, la ausencia de modelos CAD paramétricos disponibles del Link 2 del IRB 120 en fuentes públicas hace que la creación de un modelo robusto y parametrizado sea un valor añadido significativo para el TFG. En segundo lugar, el modelado paramétrico manual permite obtener mayor control sobre la precisión dimensional y la integridad geométrica del modelo, asegurando una simetría perfecta que la pieza escaneada no es capaz de proporcionar.

Se utiliza como base las mediciones manuales realizadas sobre el componente físico, complementadas con dimensiones extraídas del modelo escaneado en SolidWorks que permiten obtener medidas en zonas que físicamente resultaban de difícil o imposible acceso con instrumentos de medición convencionales. Este enfoque híbrido garantiza una precisión superior a la que permitiría cualquiera de las dos fuentes por separado.

Se comienza definiendo las dimensiones base del componente, estableciendo sus longitudes, anchos y espesores principales. Se crean los bocetos fundamentales que definen la silueta general de la pieza tanto en vista frontal como lateral.

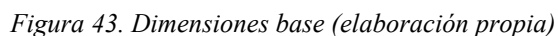


Figura 44. Extrusiones inferiores de la pieza (elaboración propia)

Se completa la geometría base mediante las extrusiones superiores, conformando la estructura superior del componente.

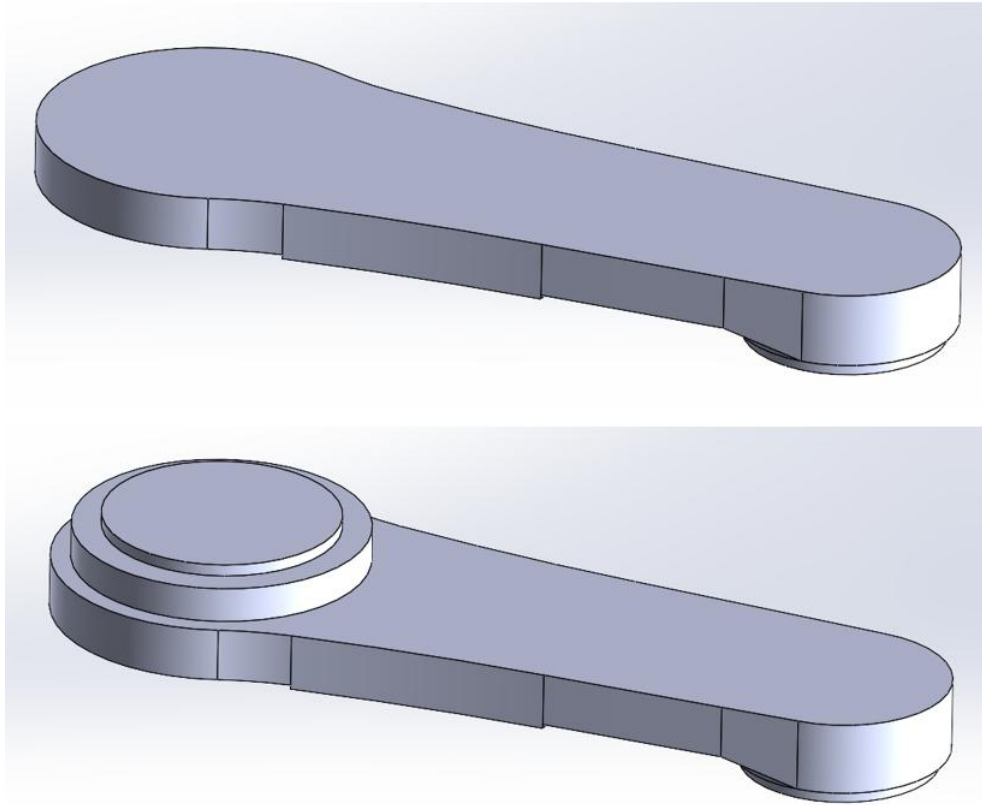


Figura 45. Extrusiones superiores de la pieza (elaboración propia)

Se añaden las paredes que caracterizan la transición entre diferentes regiones de la pieza, creando los perfiles que definen la estructura visible del componente.

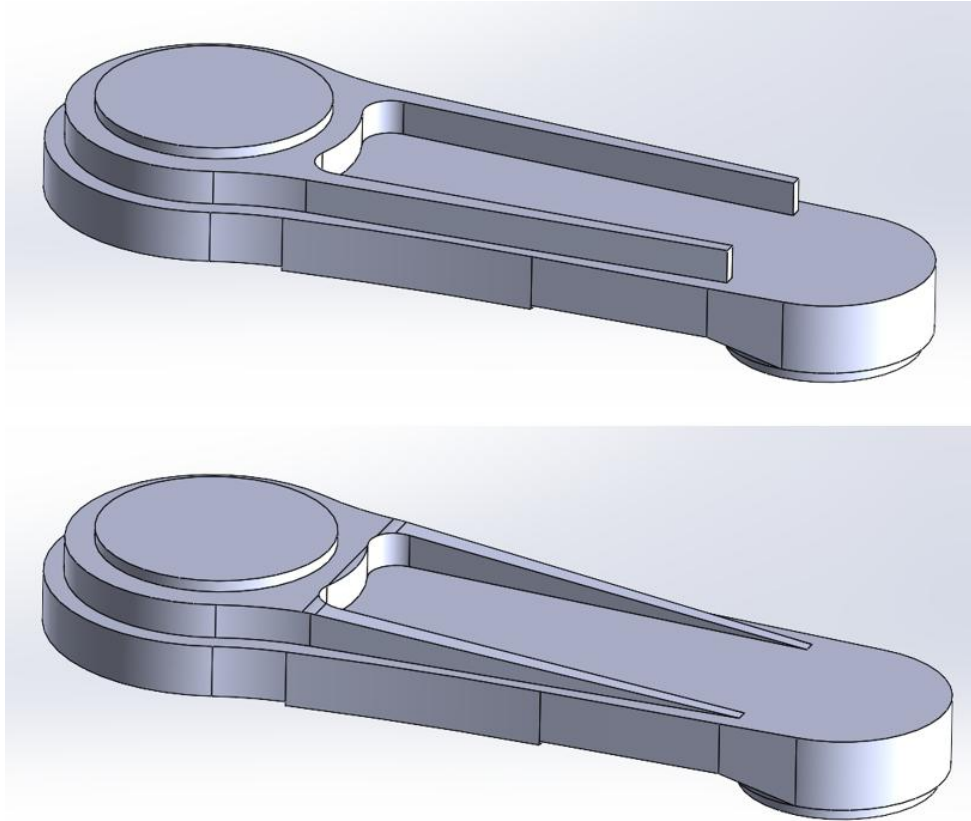


Figura 46. Inserción de bordes en ambos lados (elaboración propia)

Se realizan operaciones de corte utilizando revoluciones y extrusiones para crear cavidades internas, nervios de refuerzo y regiones de material optimizado que caracterizan la estructura del casting original.

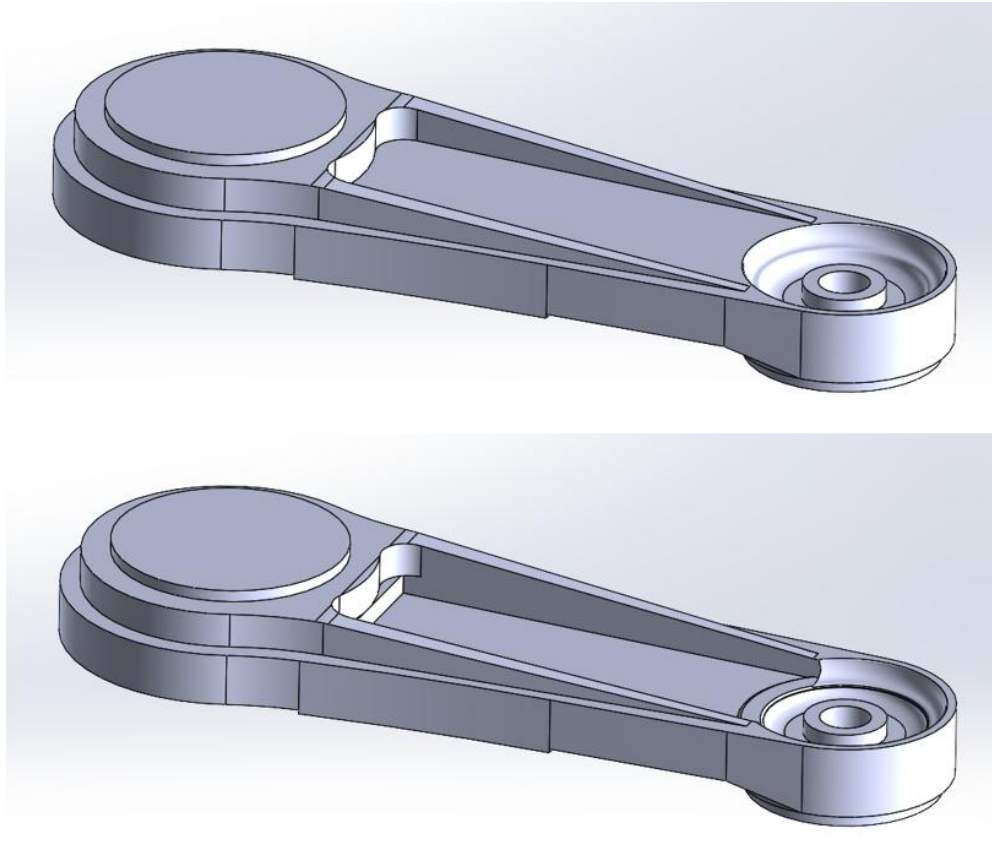


Figura 47. Cortes de revolución y extrusión (elaboración propia)

Se aplican operaciones de redondeo a las aristas vivas, suavizando los bordes del componente de manera consistente con el diseño original del casting fundido.

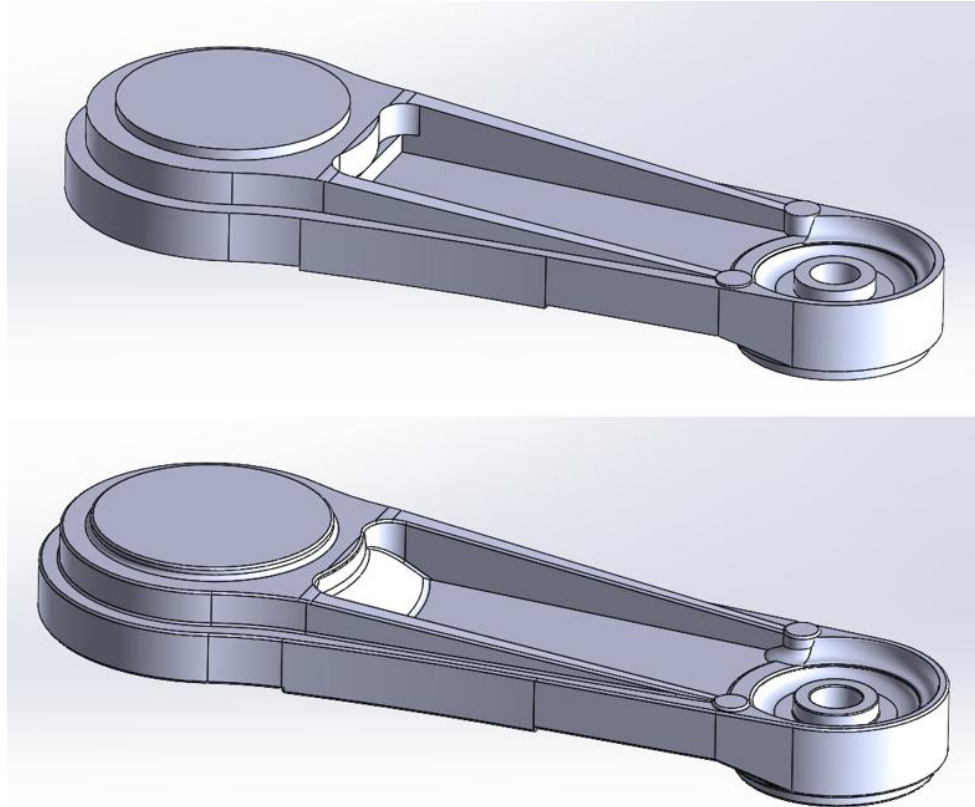


Figura 48. Redondeo de bordes (elaboración propia)

Se reintroducen los agujeros de conexión con sus diámetros, profundidades y posiciones exactas basadas en las mediciones realizadas. Se crean los cortes adicionales necesarios para completar la geometría, incluyendo formas complejas como el corte en forma de X. Se realizan los redondeos finales para lograr una representación geoméricamente completa y coherente del componente original.

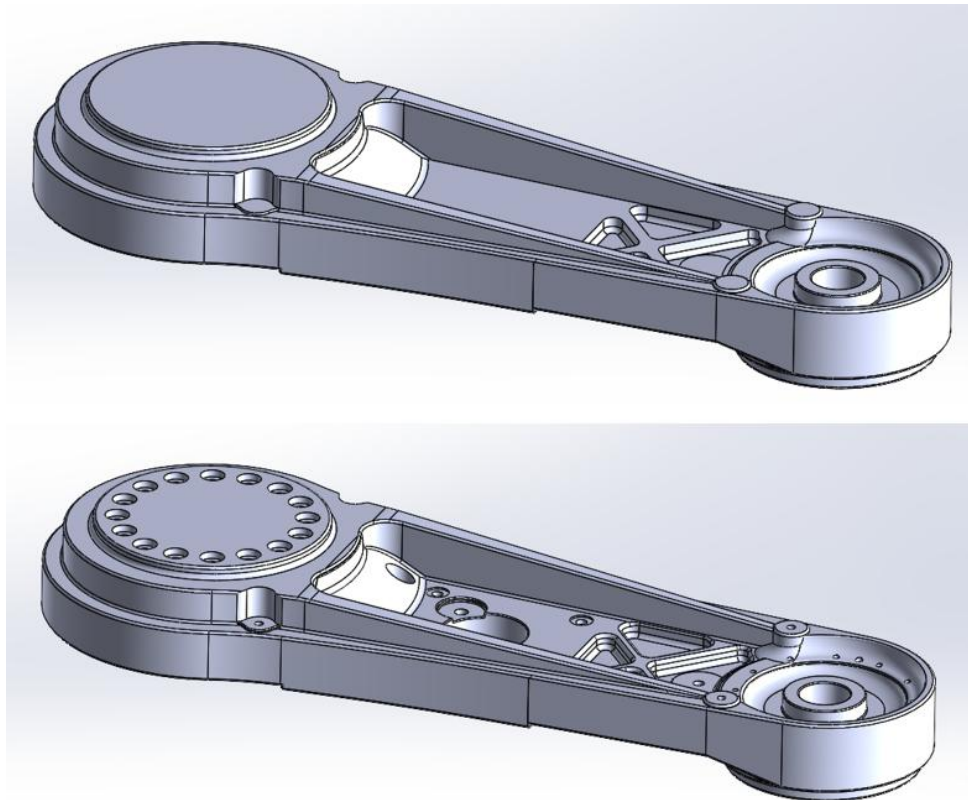


Figura 49. Inserción de agujeros, corte extruido en forma de X y redondeos finales (elaboración propia)

El resultado es un modelo CAD paramétrico de alta precisión que representa fielmente la geometría del Link 2 original, integrando tanto la información del escaneo 3D como las mediciones manuales directas. Este modelo parametrizado facilita futuras modificaciones y constituye la base sólida para las fases de simulación y optimización.

5.3.2 PIEZA SIMPLIFICADA PARA OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

El modelo CAD paramétrico detallado obtenido en la fase anterior, aunque representa fielmente la geometría original del componente, contiene características geométricas que resultan problemáticas para la simulación FEA y la optimización topológica. Características como cortes complejos, transiciones fluidas y agujeros secundarios pueden introducir singularidades numéricas, picos de concentración de esfuerzos artificiales y complicaciones innecesarias en el mallado de elementos finitos.

Se procede por lo tanto a una simplificación del modelo, eliminando selectivamente aquellas características que no son esenciales para la transmisión estructural de cargas pero que sí pueden comprometer la calidad del análisis numérico. Esta simplificación se realiza de manera conservadora, asegurando que se mantiene la integridad estructural y funcional del componente mientras se mejora la viabilidad del análisis.

Se retiran los cortes en forma de X que, aunque presentes en el componente original, generan complejidad geométrica innecesaria. Se eliminan igualmente los agujeros secundarios que no participan en las interfaces de conexión principales, conservando únicamente aquellos agujeros que son esenciales para la aplicación de cargas y restricciones, y aquellos que unen el Link 2 al resto del robot y a la tapa exterior.

Se suavizan las formas fluidas y transiciones complejas que pueden producir concentraciones de esfuerzos numéricas durante la simulación FEA, reemplazándolas por geometrías más simples y regulares que representen el flujo de cargas estructurales sin introducir singularidades.

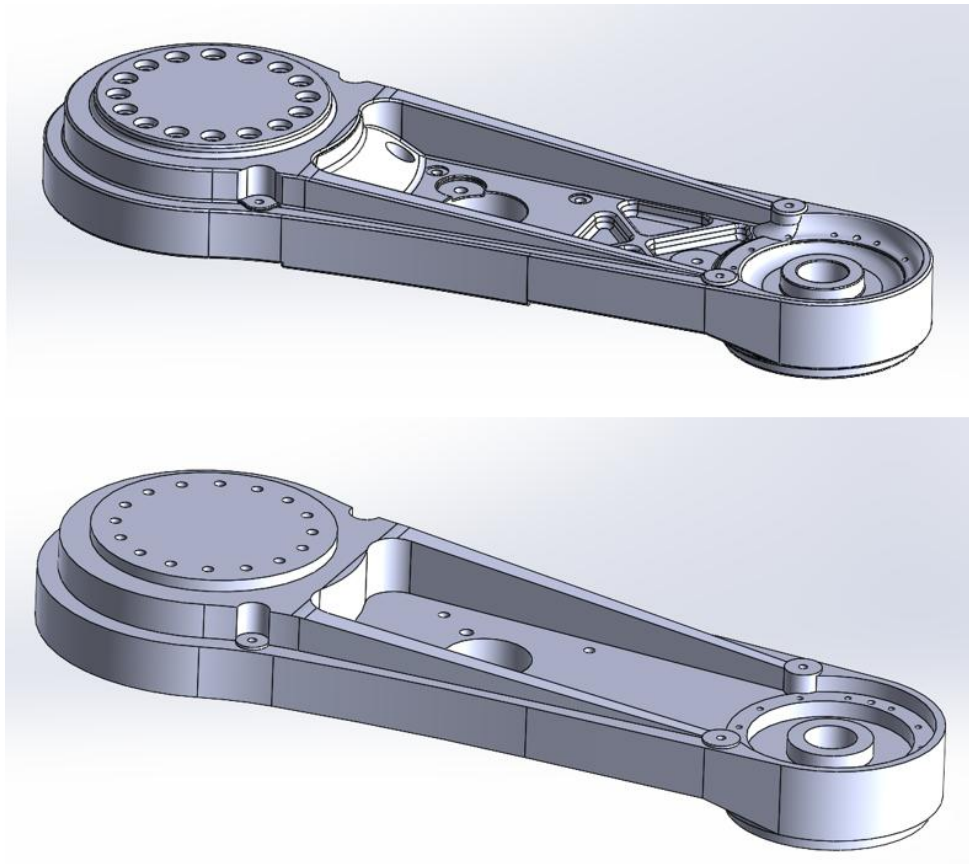


Figura 50. Simplificación de la pieza para posterior simulación y optimización (elaboración propia)

El resultado es un modelo simplificado pero estructuralmente representativo que mantiene todas las características funcionales y de transmisión de carga del componente original, pero proporciona una geometría más adecuada para el análisis numérico. Este modelo simplificado constituye el punto de partida para las fases de simulación FEA y optimización topológica subsecuentes.

5.4 SIMULACIÓN FEA

Una vez obtenido el modelo CAD sólido, paramétrico y dimensionalmente preciso, se procede a evaluar su comportamiento mecánico bajo las condiciones operacionales previstas. Para ello, se utiliza el método de análisis por elementos finitos (FEA) en Solid Edge, el cual permite discretizar el continuo tridimensional y resolver numéricamente los campos de tensiones y deformaciones. Esta fase de cálculo numérico es fundamental para garantizar la viabilidad estructural del componente antes de someterlo a procesos de optimización de masa.

5.4.1 CREACIÓN DE ESTUDIO FEA

El flujo de trabajo dentro del módulo de simulación comienza con la configuración inicial del entorno virtual. En primer lugar, es necesario definir la naturaleza del análisis y caracterizar los parámetros físico-mecánicos de la aleación. Para este estudio se ha configurado un análisis estático lineal basado en las propiedades de máxima resistencia obtenidas de la ficha técnica de la aleación. Como paso inicial para el cálculo computacional, se crea el entorno del proyecto asignando el comportamiento elástico del material.

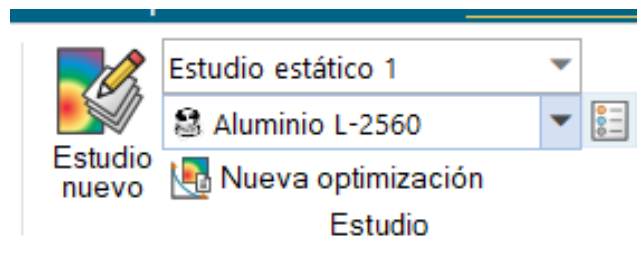


Figura 51. Nuevo estudio FEA con selección del material Aluminio L-2560 (elaboración propia)

Con el dominio material definido, el siguiente paso consiste en restringir los grados de libertad del componente para evitar movimientos de sólido rígido durante la resolución de las ecuaciones. El software requiere la definición de soportes cinemáticos que emulen el anclaje físico real de la pieza en su conjunto mecánico.

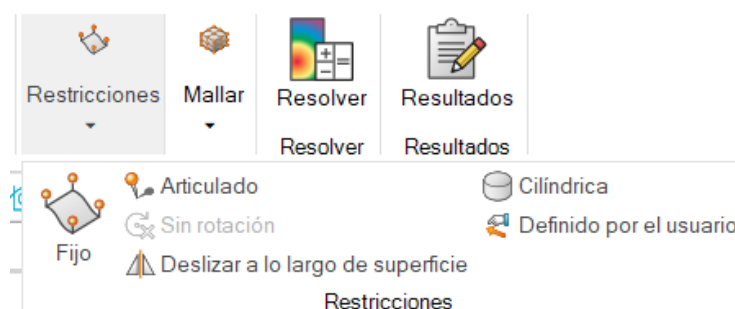


Figura 52. Ventana para seleccionar restricción fija (elaboración propia)

Una vez seleccionado el tipo de soporte, se aplican físicamente estas restricciones sobre las superficies de contacto del Link. En este caso, se han seleccionado los elementos de la interfaz proximal para simular un empotramiento rígido.

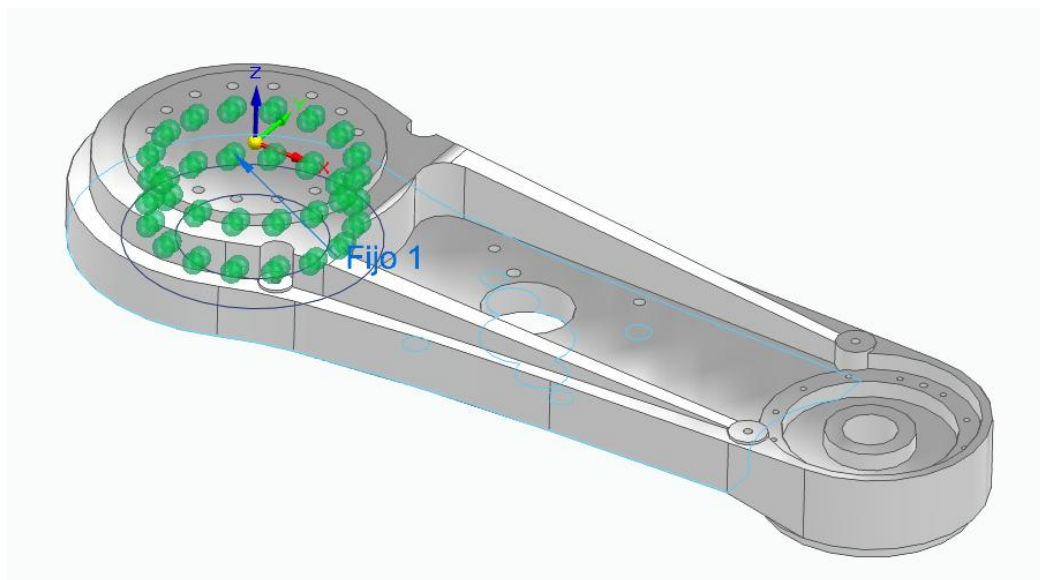


Figura 53. Restricción fija sobre la pieza (elaboración propia)

Establecidas las restricciones, se procede a la fase de sollicitación, donde se introducen las cargas estructurales que actúan sobre el componente. El software permite la aplicación de

vectores de fuerza y momentos torsores o flectores directamente sobre las entidades geométricas para reproducir el estado tensional de operación.

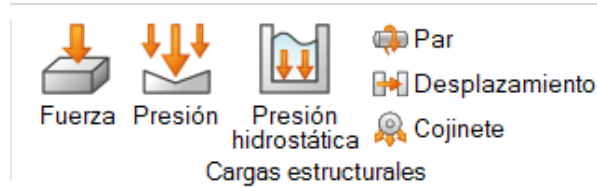


Figura 54. Ventana para seleccionar cargas estructurales de fuerza y par (elaboración propia)

La primera carga introducida corresponde a las fuerzas lineales netas que actúan en los ejes principales de la interfaz distal del componente, modelando los empujes directos que recibe la estructura durante el ciclo de trabajo.

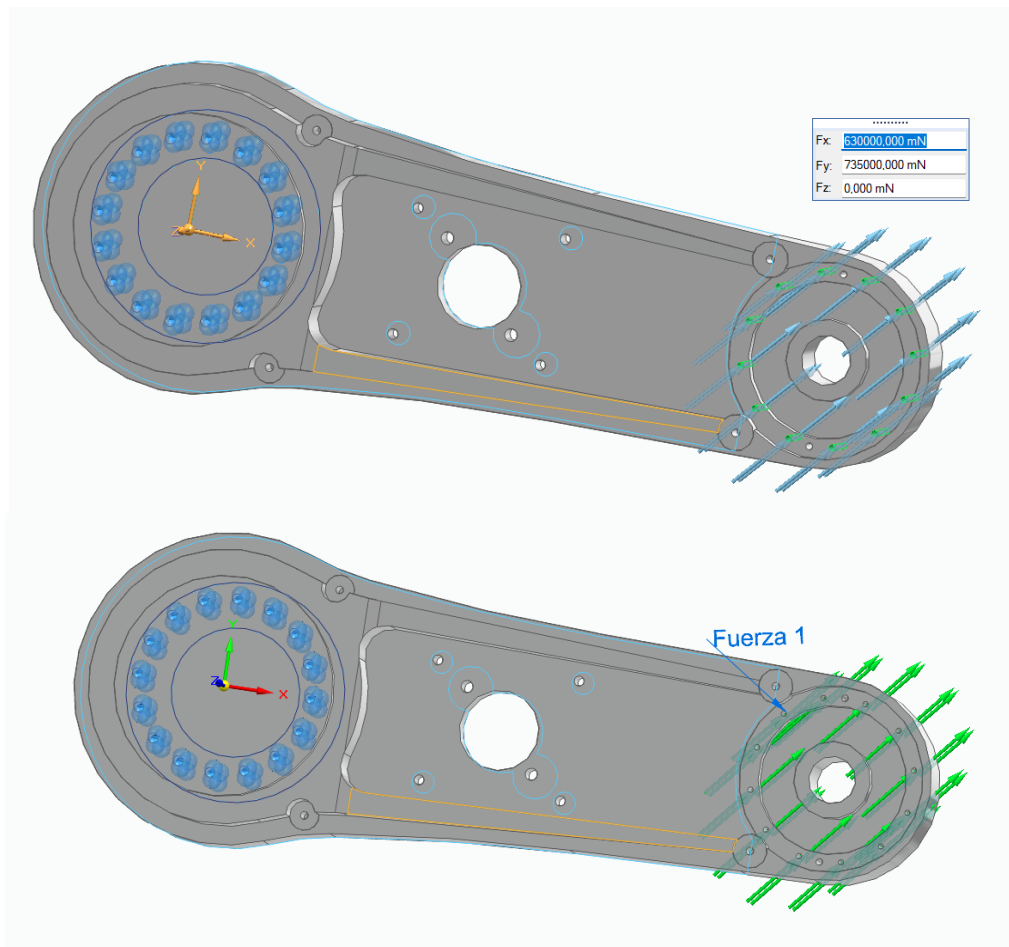


Figura 55. Colocación de fuerzas sobre la pieza (elaboración propia)

Además de las fuerzas lineales, el componente está sujeto a momentos provocados por las fuerzas desalineadas respecto a sus ejes neutros. Se introduce un momento flector que somete a las fibras de la pieza a esfuerzos de tracción y compresión asimétricos.

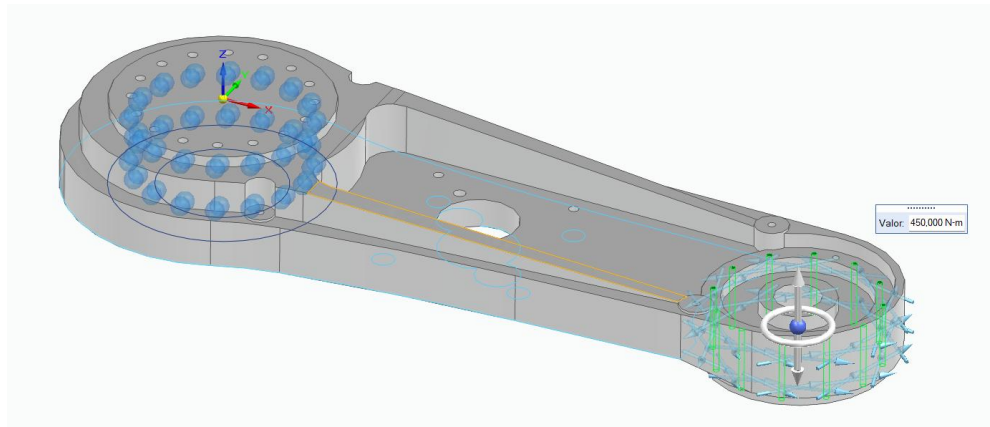


Figura 56. Colocación de momento flector sobre la pieza (elaboración propia)

Por último, se aplica un momento torsor alrededor del eje de rotación principal del Link, simulando la resistencia al giro y las fuerzas de cizalladura rotacional que debe transmitir la interfaz.

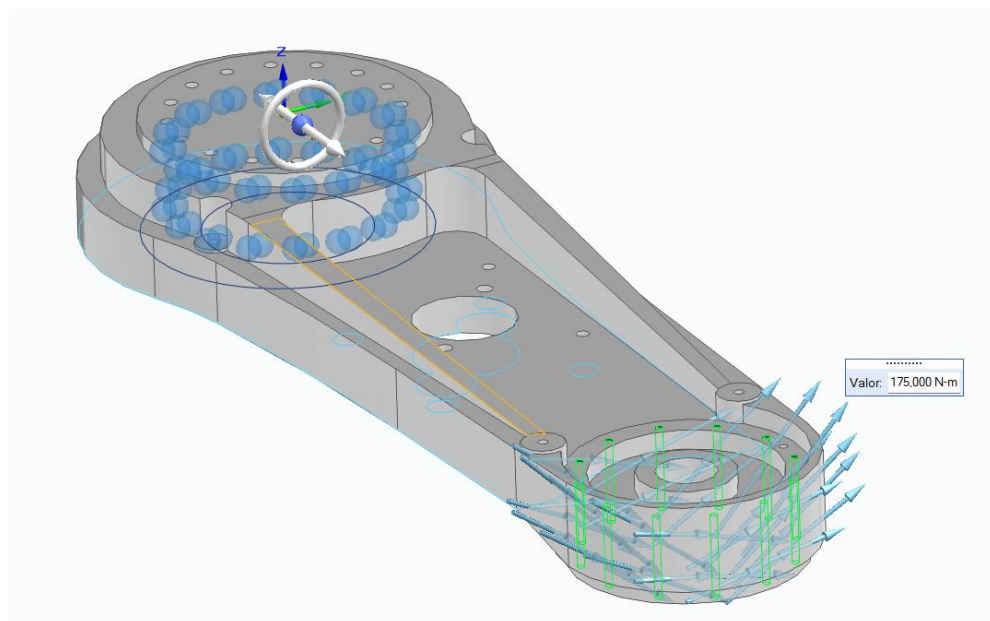


Figura 57. Colocación de momento torsor sobre la pieza (elaboración propia)

Una vez definidas las condiciones de contorno, se procede a la etapa de discretización geométrica.

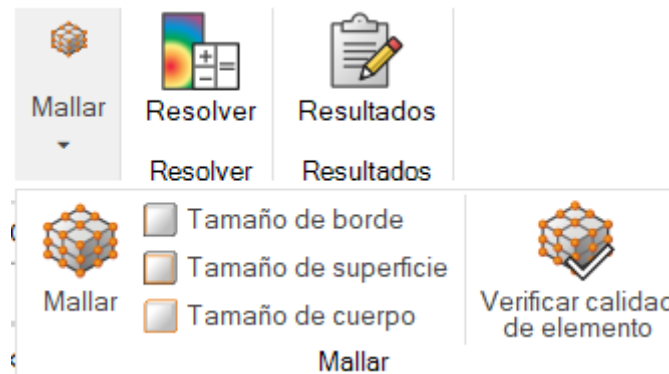


Figura 58. Ventana para mallar y resolver simulación (elaboración propia)

Para asegurar la convergencia del análisis y obtener resultados de alta fidelidad sin incurrir en un coste computacional excesivo, se determina un tamaño de elemento tetraédrico global ni muy fino ni muy basto.

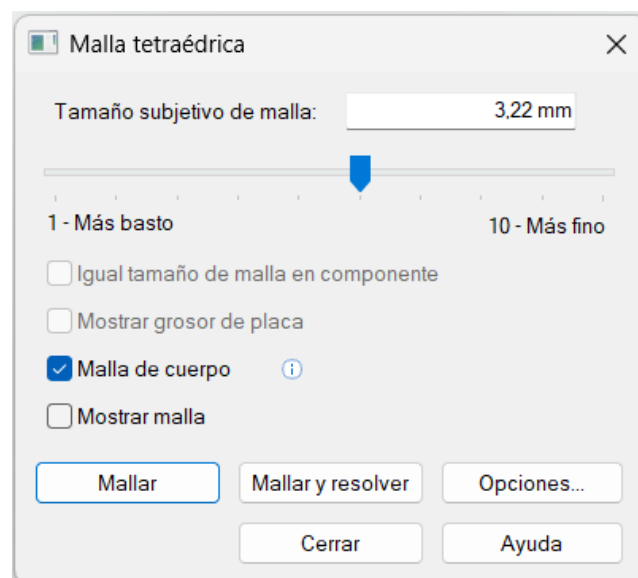


Figura 59. Tamaño de malla de 3,22mm (elaboración propia)

El software ejecuta el algoritmo de división geométrica, transformando el sólido continuo en un modelo de malla de elementos finitos de alto orden, listo para que el procesador resuelva el sistema de ecuaciones lineales simultáneas.

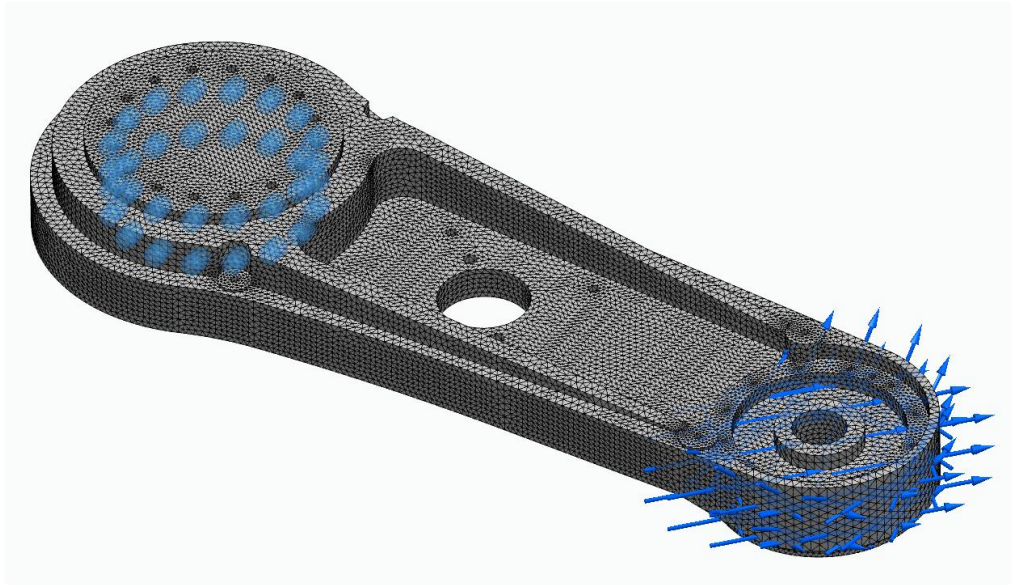


Figura 60. Pieza mallada con flechas de cargas (elaboración propia)

5.4.2 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN FEA

Una vez resuelto el sistema de ecuaciones, el software genera los mapas de distribución tensional. Para la evaluación de la integridad estructural del componente se utiliza el criterio de Von Mises. Los resultados numéricos revelan una tensión máxima de Von Mises de 56 MPa. Al comparar este valor con el límite elástico configurado para el escenario de máxima resistencia del Aluminio L-2560 (200 MPa), se ratifica la seguridad de la pieza, la cual trabaja holgadamente dentro del régimen elástico lineal con un factor de seguridad global de 3,57, descartando cualquier tipo de fallo por plastificación inminente bajo estas cargas.

Para comprender el comportamiento macroscópico del componente bajo carga, es necesario analizar las deformaciones y la tendencia tensional desde perspectivas generales. Las vistas

globales permiten identificar de manera cualitativa cómo se propaga el flujo de fuerzas a lo largo del cuerpo del Link 2 desde el extremo móvil hasta el empotramiento.

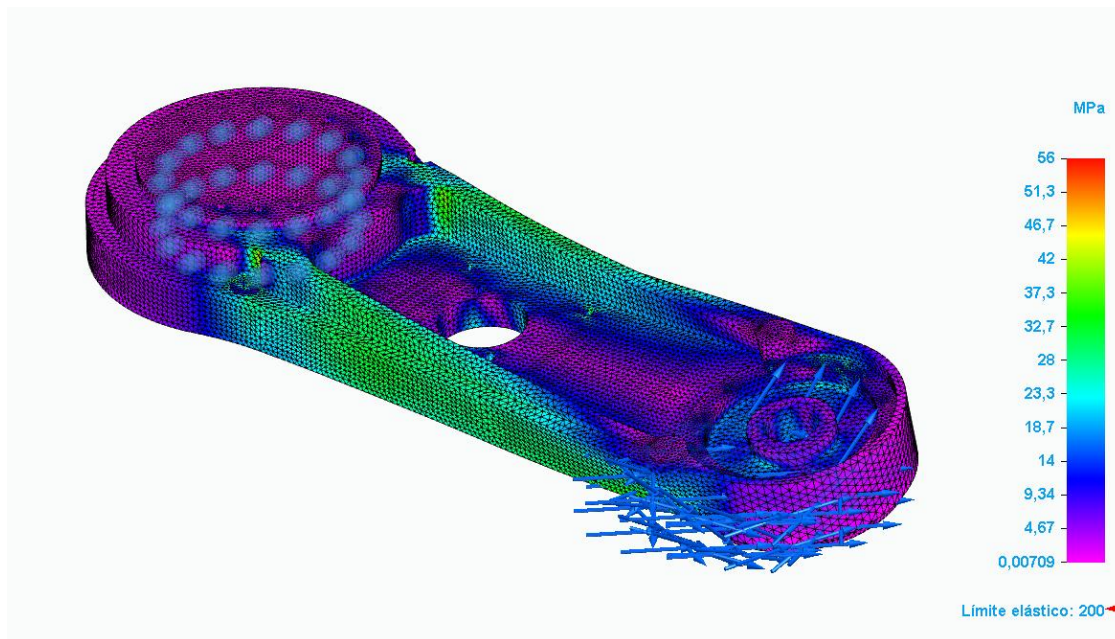


Figura 61. Vista 1 resultado simulación FEA (elaboración propia)

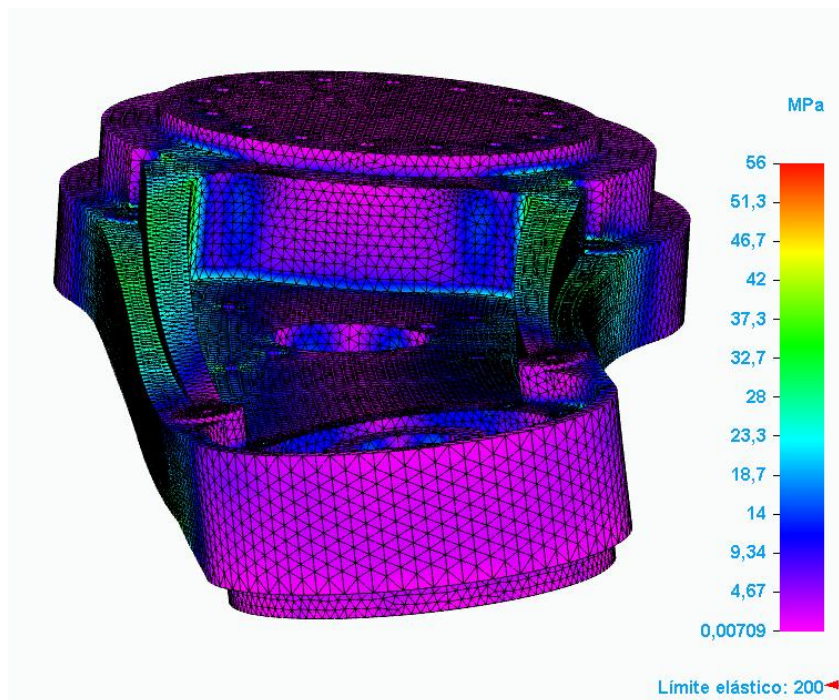


Figura 62. Vista 2 resultado simulación FEA (elaboración propia)

Con objeto de realizar un análisis crítico, se localizan las zonas singulares del componente donde el gradiente de tensiones se eleva de manera localizada. El software identifica los puntos críticos de concentración de esfuerzos (picos de tensión), los cuales se sitúan en puntos con cambios bruscos de geometría, alcanzando allí el valor máximo registrado de 56 MPa.

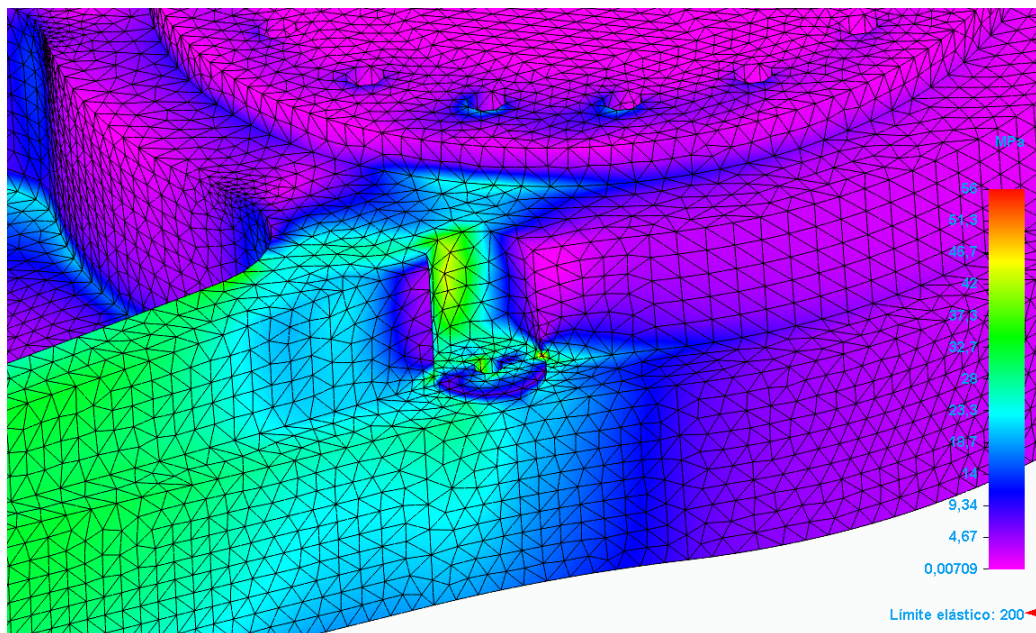


Figura 63. Detalle 1 resultado simulación FEA (elaboración propia)

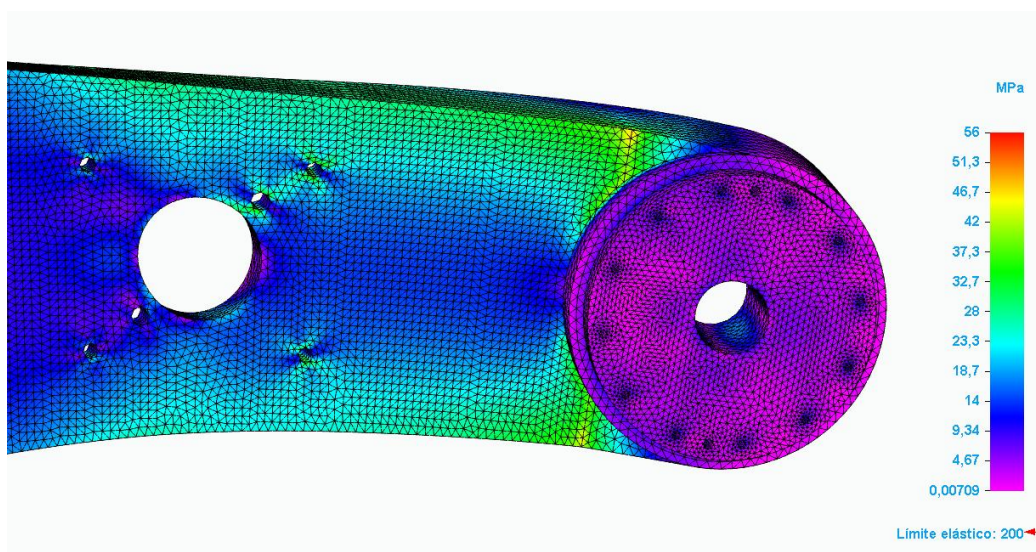


Figura 64. Detalle 2 resultado simulación FEA (elaboración propia)

5.5 OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA Y DISEÑO GENERATIVO

Una vez validada la integridad estructural del componente mediante el análisis por elementos finitos, el siguiente hito metodológico consiste en someter la geometría a un proceso de optimización topológica y diseño generativo. Esta técnica avanzada de ingeniería asistida por ordenador busca reducir la masa del componente distribuyendo el material de forma estrictamente eficiente en las regiones donde las trayectorias de carga lo requieren. A diferencia de la simulación convencional, el algoritmo generativo evalúa de forma iterativa el volumen del sólido, eliminando los elementos subutilizados mecánicamente y manteniendo la rigidez estructural especificada como restricción del problema.

5.5.1 CREACIÓN DE ESTUDIO GENERATIVO

El inicio de este proceso requiere configurar un nuevo caso de estudio generativo en el software de Solid Edge, parametrizando las directrices de optimización y cargando nuevamente los tensores mecánicos de la aleación seleccionada.

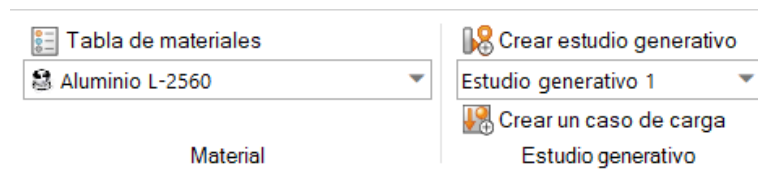


Figura 65. Nuevo estudio generativo con material Aluminio l-2560 (elaboración propia)

Para que el algoritmo de optimización calcule las trayectorias de carga y la eliminación de material de forma coherente con la realidad física, el sistema necesita conocer el entorno de solicitaciones del componente. Por lo tanto, se abre el módulo de edición donde se gestionan los vectores de fuerza, momentos y las restricciones de movimiento que definirán las fronteras del cálculo matemático.



Figura 66. Ventana para introducir restricciones y cargas (elaboración propia)

Dado que el entorno físico de trabajo y el estado tensional del Link 2 coinciden exactamente con los analizados en la fase previa de simulación FEA, se replican las condiciones de contorno cinemáticas y dinámicas. El procedimiento implica fijar los grados de libertad mediante un empotramiento rígido en la interfaz proximal y, de manera consecutiva, aplicar los vectores de fuerzas lineales, el momento flector y el momento torsor en el extremo opuesto.

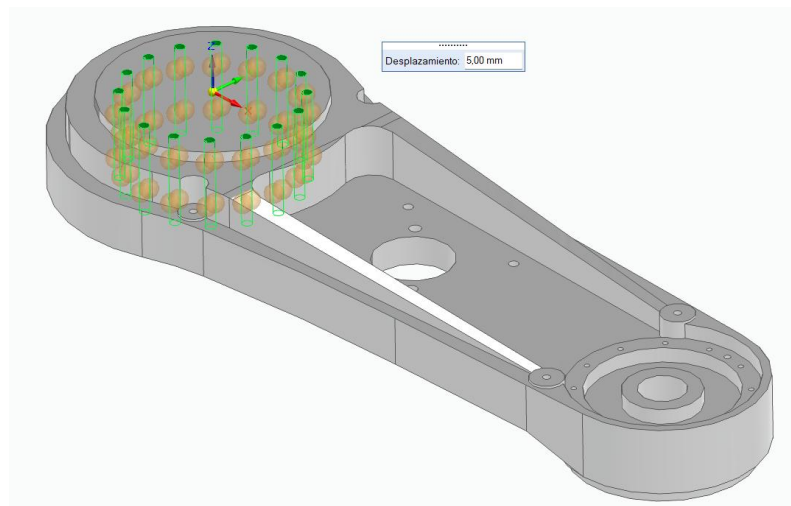


Figura 67. Restricción fija sobre la pieza (elaboración propia)

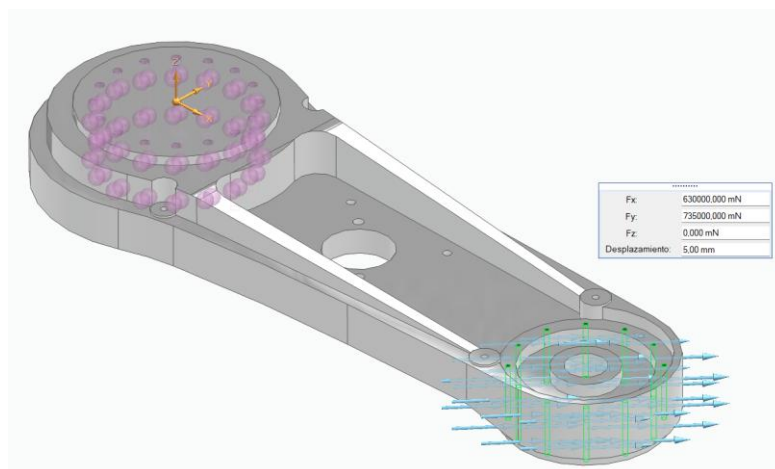


Figura 68. Colocación de fuerzas sobre la pieza (elaboración propia)

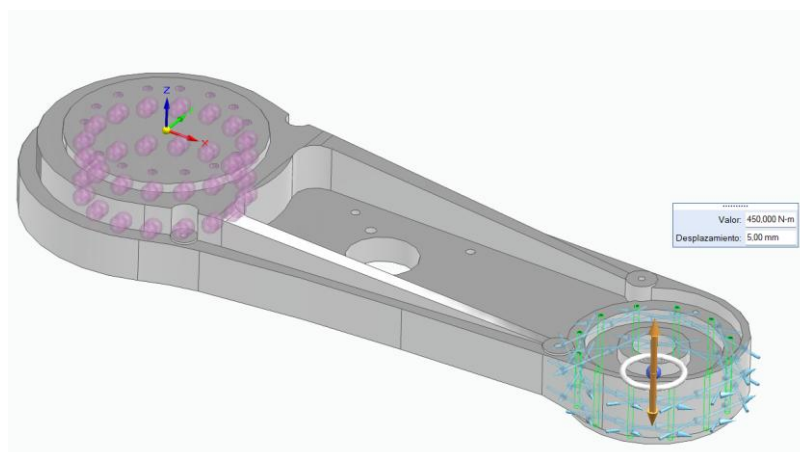


Figura 69. Colocación de momento flector sobre la pieza (elaboración propia)

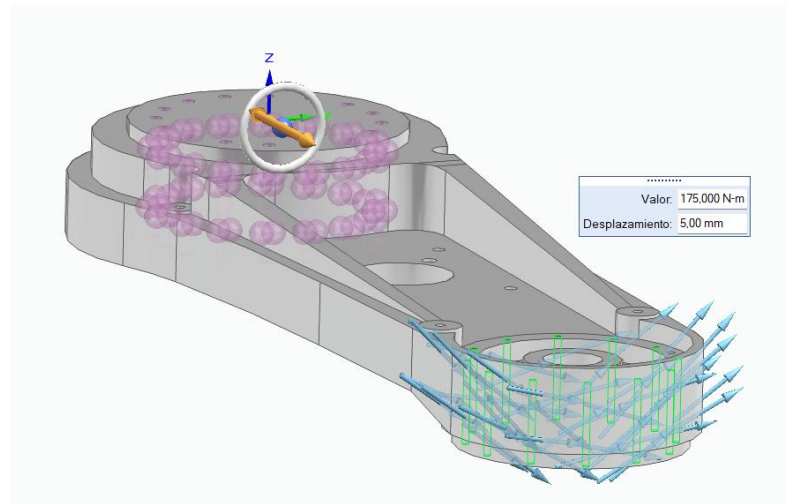


Figura 70. Colocación de momento torsor sobre la pieza (elaboración propia)

Una de las ventajas clave del diseño generativo es la posibilidad de imponer restricciones de fabricación y criterios geométricos que faciliten la fabricación o mantengan la coherencia del diseño. En este aspecto, se introduce una restricción de simetría plana coincidente con el plano longitudinal medio del componente, obligando al algoritmo a generar una distribución de material idéntica en ambos lados del Link 2 y asegurando el equilibrio de la pieza.

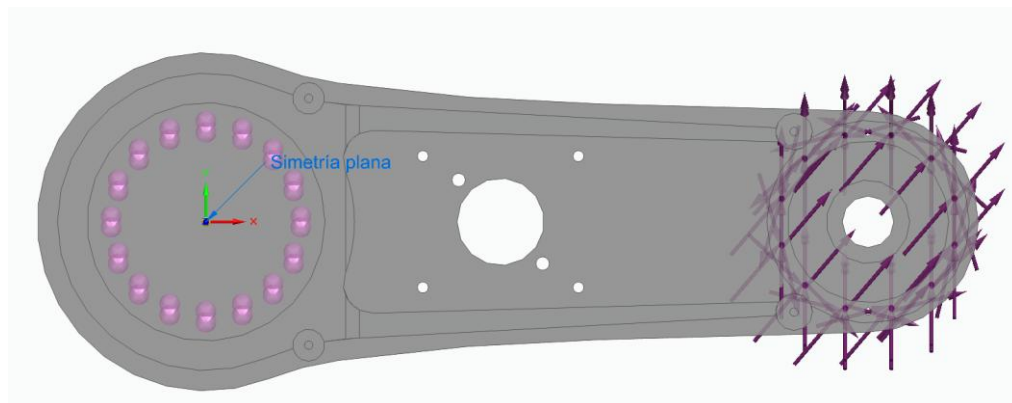


Figura 71. Colocación de restricción de simetría plana (elaboración propia)

Un paso crítico en la configuración del diseño generativo es la delimitación de las regiones a preservar (Preserved Geometries). Estas zonas representan volúmenes del CAD original que el algoritmo de optimización tiene estrictamente prohibido modificar o eliminar, independientemente de si sufren bajas tensiones o no. Su propósito fundamental es proteger

la integridad de los elementos funcionales del componente, tales como los agujeros roscados de acoplamiento de la interfaz proximal, los taladros cilíndricos de la interfaz distal y las superficies de asiento mecánico, garantizando que la pieza optimizada siga siendo totalmente conectable y operativa en su conjunto mecánico final.

La selección y el aislamiento geométrico de estas nueve zonas de preservación a lo largo del cuerpo del Link se documentan en las siguientes figuras.

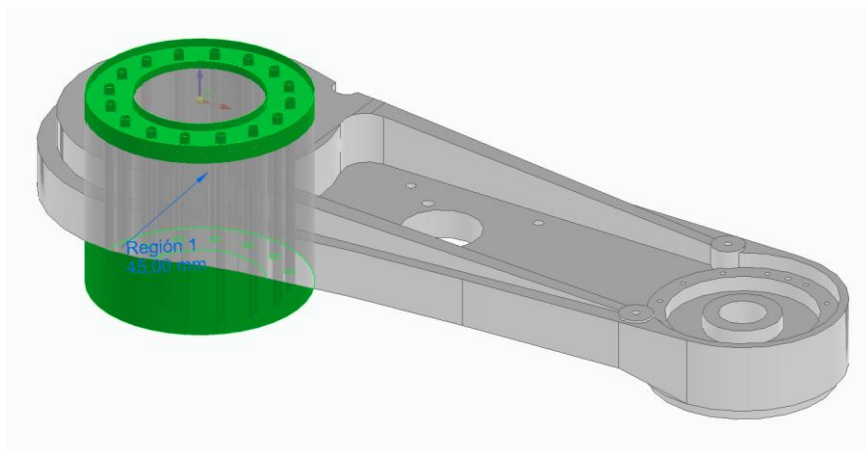


Figura 72. Región a preservar 1 (elaboración propia)

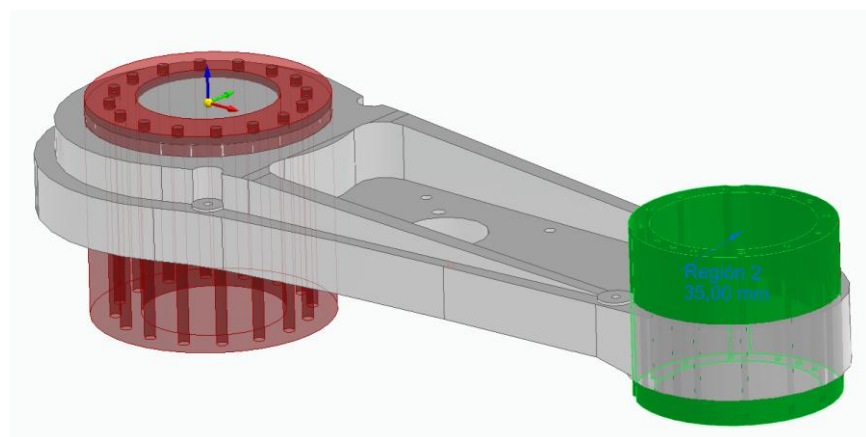


Figura 73. Región a preservar 2 (elaboración propia)

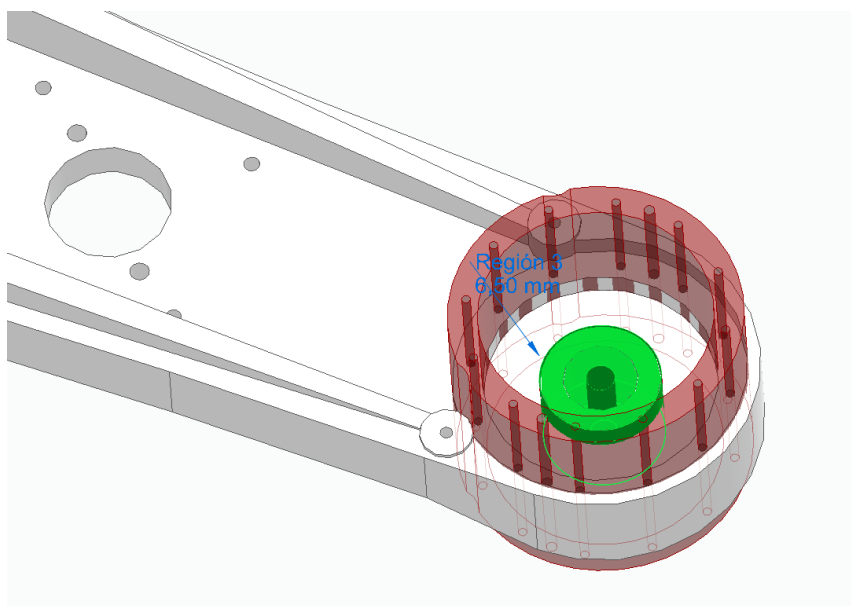


Figura 74. Región a preservar 3 (elaboración propia)

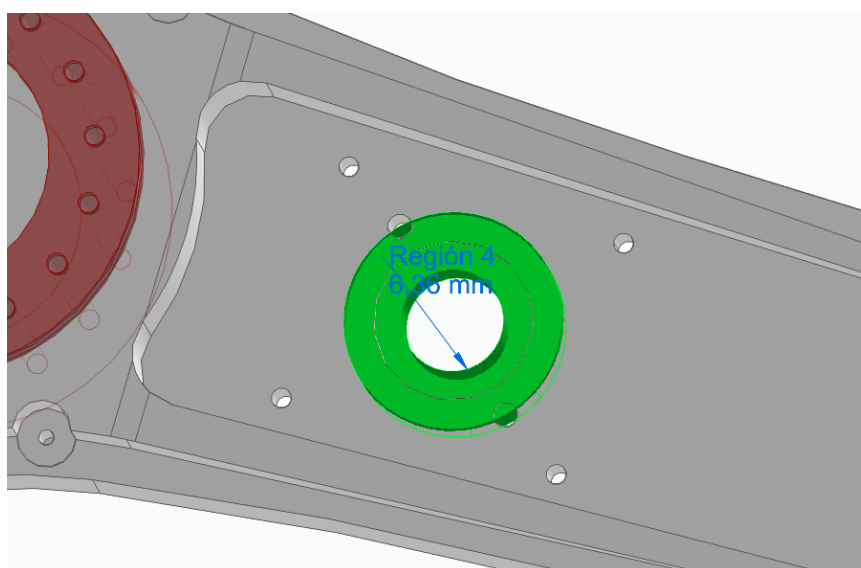


Figura 75. Región a preservar 4 (elaboración propia)

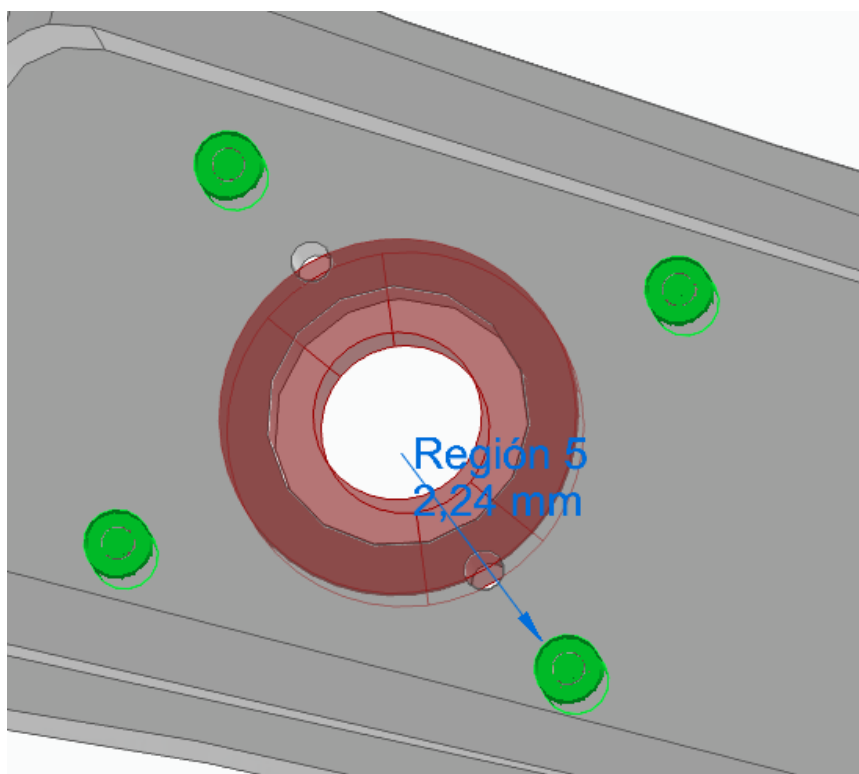


Figura 76. Región a preservar 5 (elaboración propia)

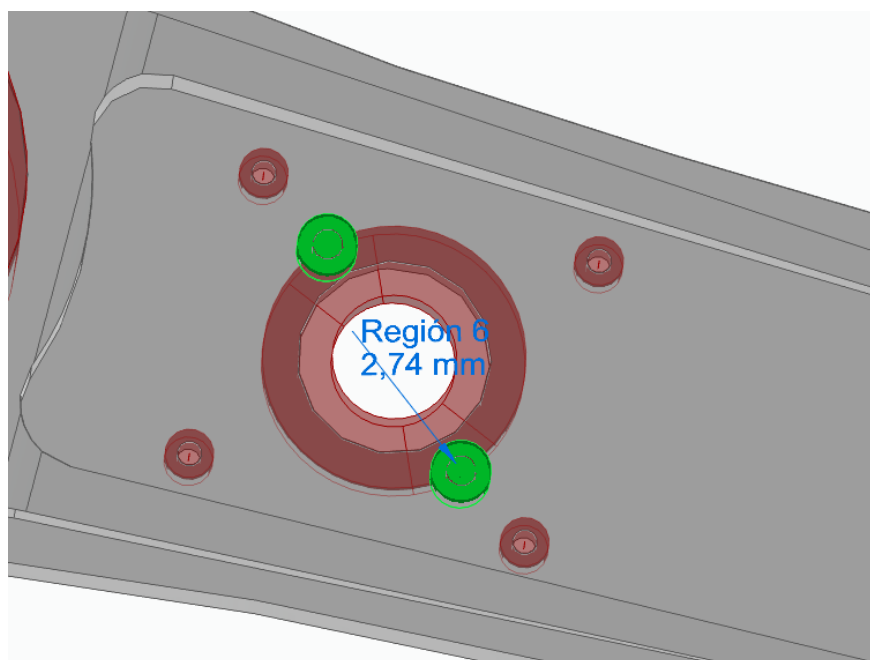


Figura 77. Región a preservar 6 (elaboración propia)

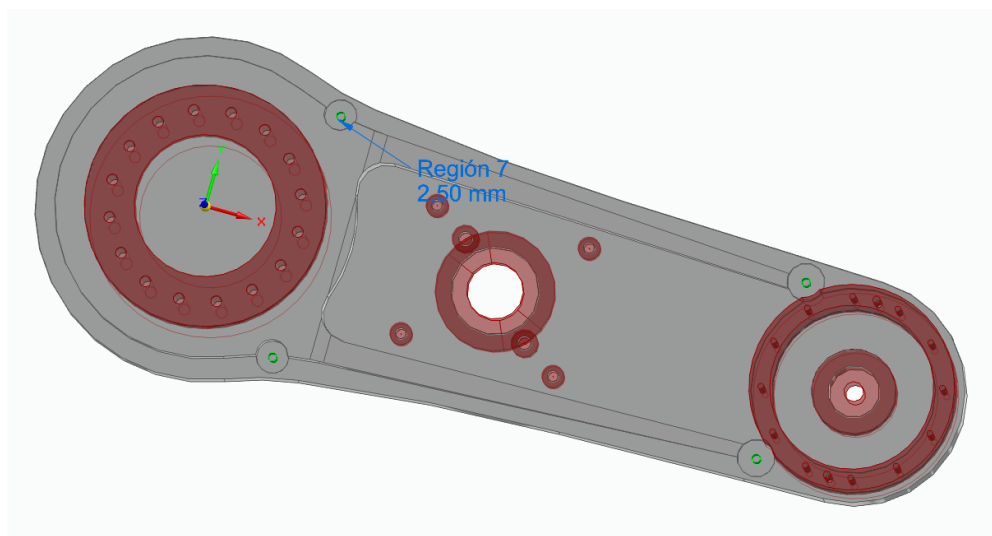


Figura 78. Región a preservar 7 (elaboración propia)

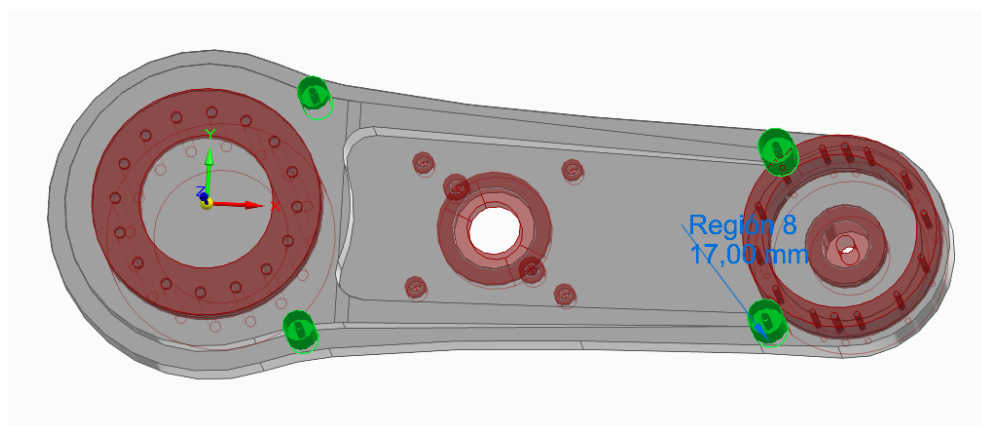


Figura 79. Región a preservar 8 (elaboración propia)

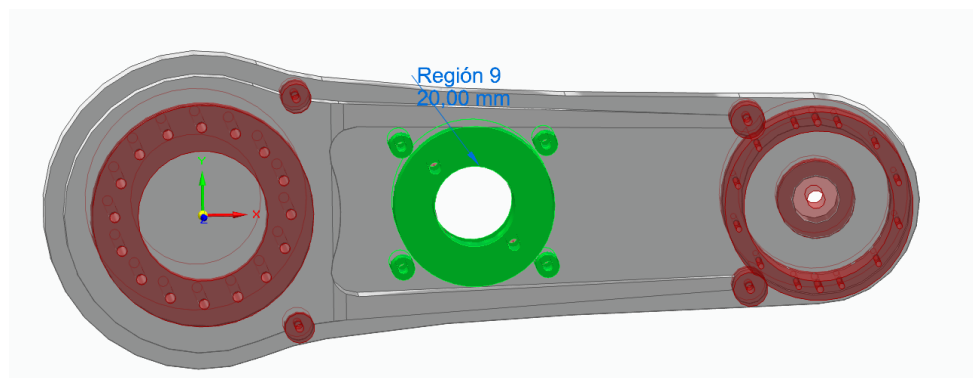


Figura 80. Región a preservar 9 (elaboración propia)

5.5.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO GENERATIVO

Tras configurar las condiciones de contorno y definir los dominios de preservación geométrica, se procede a la fase de convergencia y resolución iterativa del algoritmo de diseño generativo. El proceso se estructura a través de un análisis comparativo de iteraciones consecutivas. En cada una de ellas se modifican de forma controlada los parámetros de reducción de masa, el tamaño de discretización por vóxel y la configuración de las geometrías protegidas, buscando alcanzar un equilibrio óptimo entre el aligeramiento del componente y la seguridad estructural del mismo.

5.5.2.1 Iteración 1

La primera iteración se ejecuta como una toma de contacto para evaluar cómo responde el algoritmo a los volúmenes de preservación iniciales. Desgraciadamente, el resultado obtenido desvela que aunque el software respeta fielmente la región 9, la falta de una trayectoria de carga robusta en esa zona provoca que dicha región se aisle del bloque principal. Como consecuencia, el algoritmo genera dos cuerpos completamente disjuntos y separados físicamente, lo que invalida por completo la funcionalidad mecánica del componente.

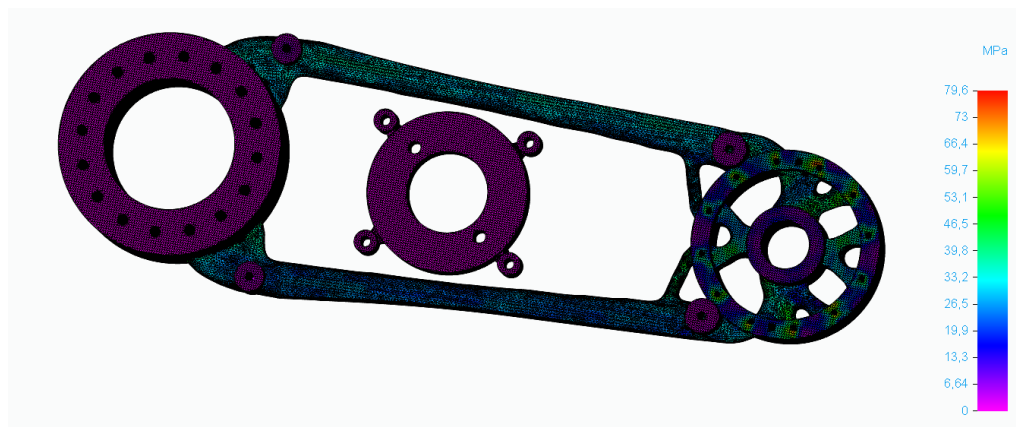


Figura 81. Resultado simulación iteración 1 (elaboración propia)

5.5.2.2 Iteración 2

Con el objetivo de eliminar el error de desconexión estructural identificado, se plantea una modificación en la estrategia geométrica para la segunda iteración. Se decide ampliar el volumen envolvente de la región a preservar 9, incrementando su tamaño y extendiendo sus límites espaciales hacia el núcleo central de la pieza. Con esta aproximación se busca forzar al algoritmo a encontrar un puente de transición continuo que una de forma efectiva las dos zonas.

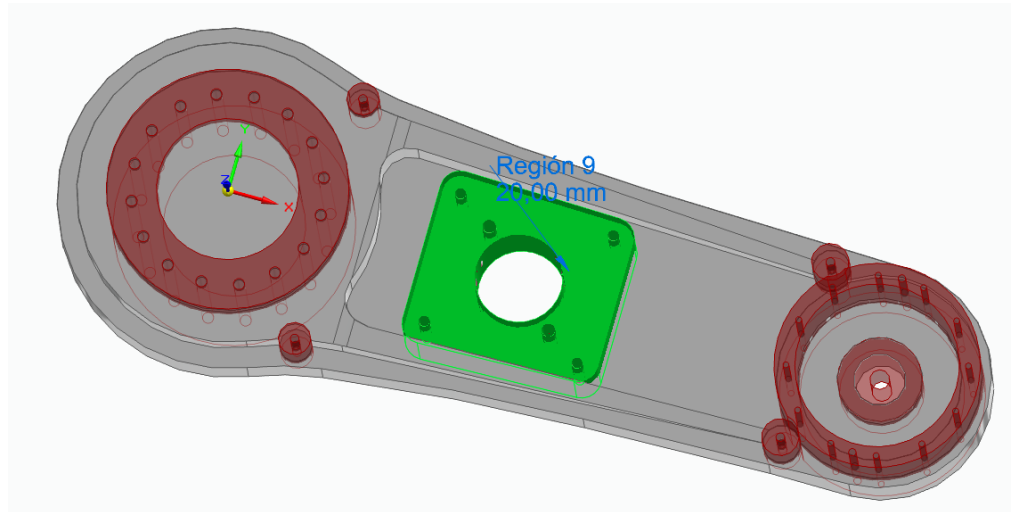


Figura 82. Modificación región a preservar 9 (elaboración propia)

Una vez alterado el dominio, se definen los parámetros de resolución computacional para este segundo intento. Se establece una discretización espacial fina con un tamaño de vóxel de 1,73 mm y se impone un objetivo de reducción de masa muy agresivo, fijado en el 60% respecto al volumen original de la pieza maciza.

Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Tamaño de vóxel: 1,73 mm Alto

Reducción de masa

☒ Reducir por este porcentaje 5% 95%

Masa original: Masa objetivo:

2,582 kg 1,033 kg

☐ Utilizar Factor de seguridad Límite elástico

Límite elástico: Factor de seguridad: Esfuerzo permitido:

200,000 MPa / 1,000 = 200,000 MPa

Visualización de resultados

☒ Ocultar el espacio de diseño al visualizar los resultados

Generar Cerrar Ayuda

Figura 83. Parámetros iteración 2. Tamaño de vóxel 1,73 mm y reducción de masa 60% (elaboración propia)

Al concluir el proceso de cálculo iterativo, el software consigue resolver el problema de la discontinuidad y logra unir la región 9 con el resto del cuerpo.

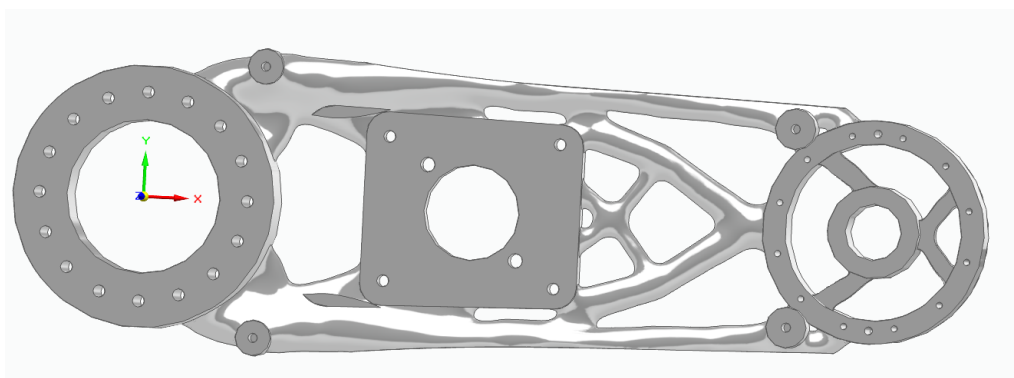


Figura 84. Resultado estudio generativo iteración 2 (elaboración propia)

Para validar si esta distribución de material es mecánicamente viable, se ejecuta la correspondiente simulación de esfuerzos. El mapa de tensiones revela que el componente

alcanza un pico máximo de 199 MPa. Al comparar este valor con el límite elástico del material (200 MPa), se observa que la pieza se encuentra prácticamente al borde de la deformación plástica permanente, trabajando con un coeficiente de seguridad unitario no admisible.

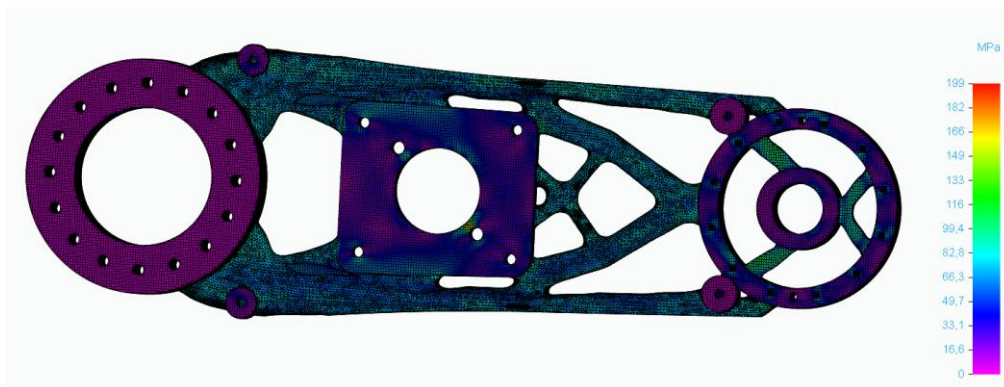


Figura 85. Resultado simulación iteración 2 (elaboración propia)

5.5.2.3 Iteración 3

Ante la falta de seguridad estructural de la iteración previa, se decide relajar las restricciones de masa en el tercer intento para permitir que el algoritmo conserve más material en las zonas críticas. Manteniendo el mismo tamaño de vóxel de 1,73 mm, se reduce la exigencia de aligeramiento al 55%, esperando que el volumen de material adicional robustezca las secciones de transmisión de esfuerzos y reduzca el campo tensional general.

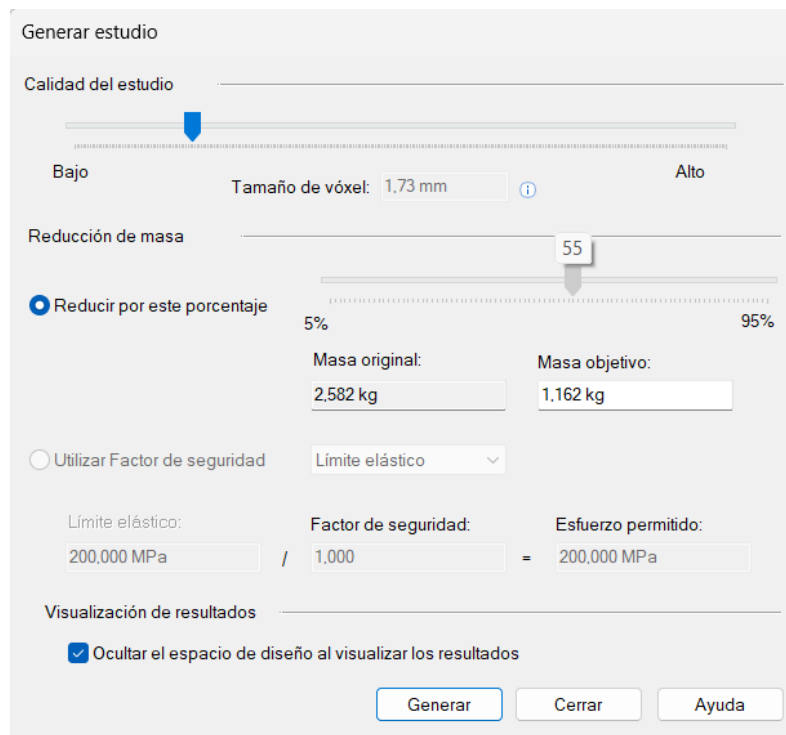


Figura 86. Parámetros iteración 3. Tamaño de vóxel 1,73 mm y reducción de masa 55% (elaboración propia)

La estructura generada bajo estas directrices muestra un engrosamiento visible en los nervios estructurales principales, lo que refleja una distribución más sólida a lo largo del eje longitudinal de la pieza.

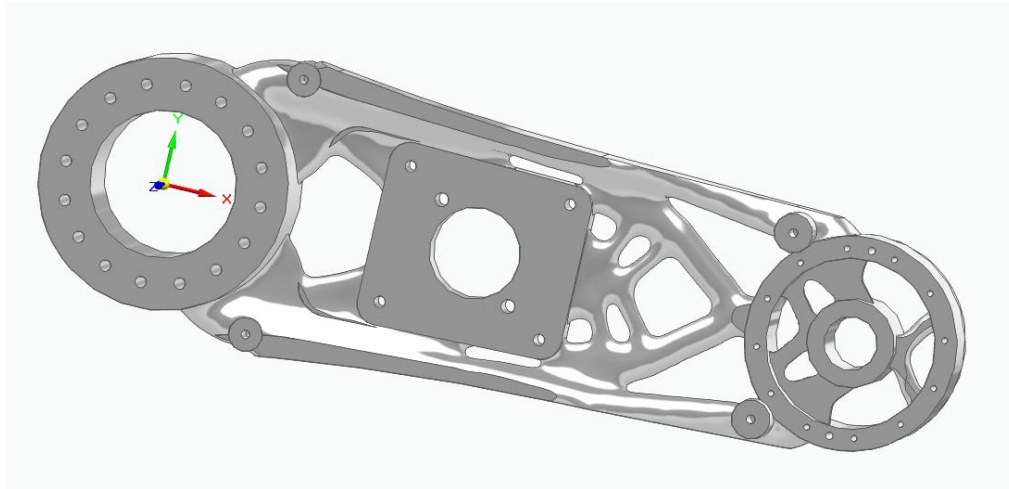


Figura 87. Resultado estudio generativo iteración 3 (elaboración propia)

Al evaluar el comportamiento mecánico del nuevo diseño, la tensión máxima de Von Mises disminuye de forma notable hasta los 159 MPa. Aunque este valor se sitúa dentro del régimen elástico y resulta significativamente más razonable que el anterior, se concluye que el margen de seguridad sigue siendo algo ajustado para los requerimientos del TFG, lo que obliga a buscar un compromiso estructural más óptimo.

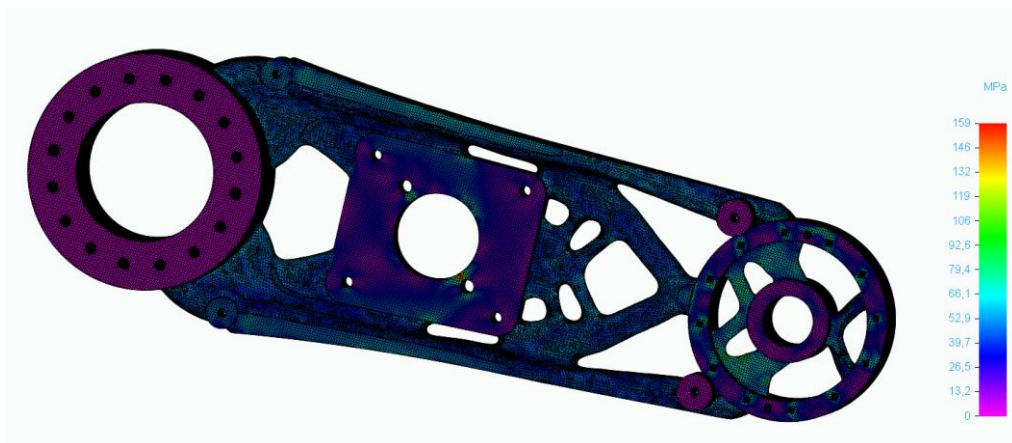


Figura 88. Resultado simulación iteración 3 (elaboración propia)

5.5.2.4 Iteración 4

Para esta iteración, se intenta revertir la región 9 a sus cotas originales más restrictivas, pero incrementando significativamente el volumen total de la pieza. Para ello, se ajusta la reducción de masa a 50%, manteniendo inalterada la resolución del vóxel en 1,73 mm, con la hipótesis de que la mayor disponibilidad de material evita de forma natural el error de segregación de la primera iteración.

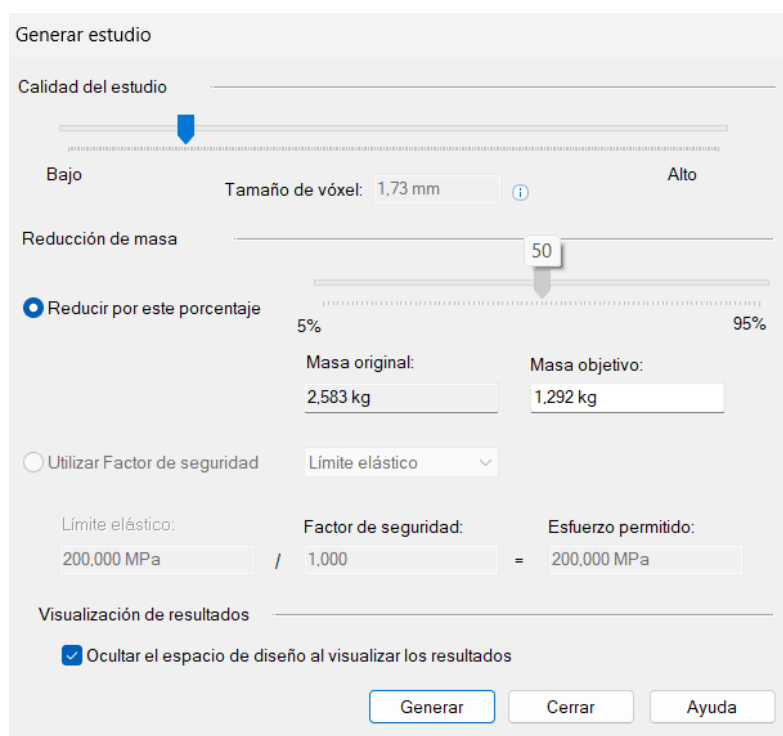


Figura 89. Parámetros iteración 4. Tamaño de vóxel 1,73 mm y reducción de masa 50% (elaboración propia)

El cálculo computacional confirma la hipótesis de partida. Al disponer de más masa, el software consigue interconectar la región 9 original de manera limpia y sin errores de continuidad, dando como resultado un diseño robusto y compacto.

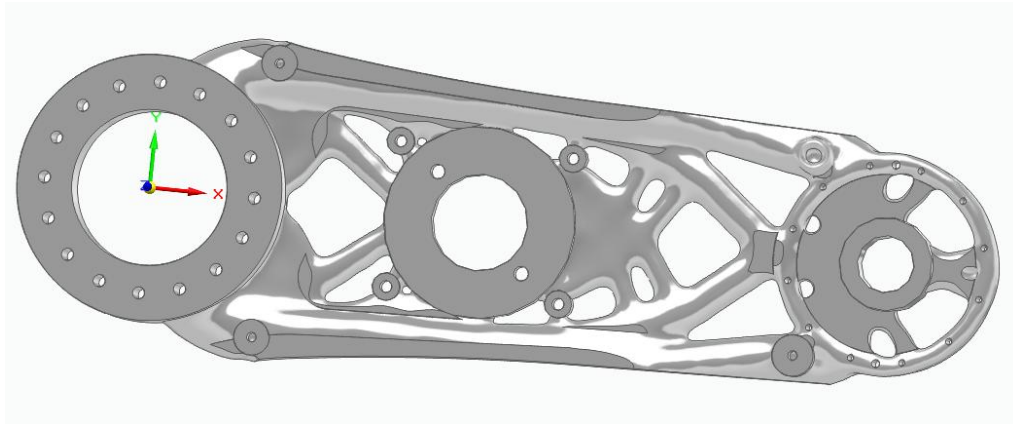


Figura 90. Resultado estudio generativo iteración 4 (elaboración propia)

El análisis por elementos finitos del modelo de la iteración 4 arroja una tensión máxima de 95,8 MPa. Si bien este resultado es mecánicamente excelente y muy seguro, desde la perspectiva de la optimización topológica se considera ineficiente. Una tensión tan baja denota que el material está subutilizado y que la estructura se encuentra sobredimensionada, lo que indica que todavía existe un amplio margen para seguir retirando masa sin comprometer la integridad de la pieza.

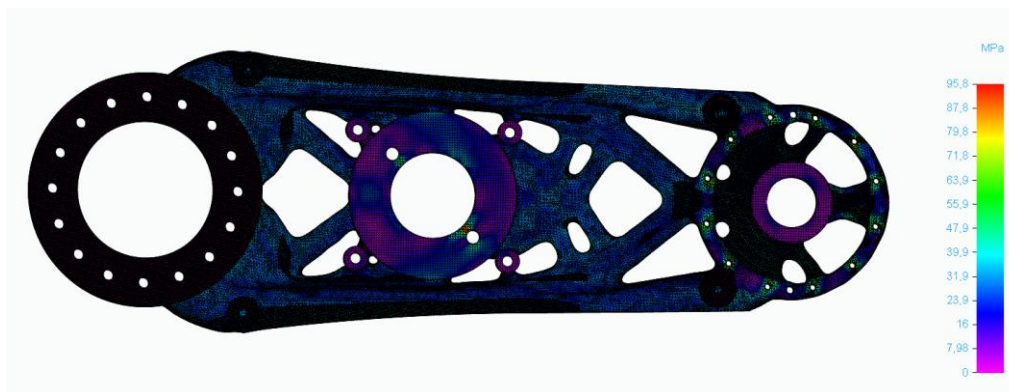
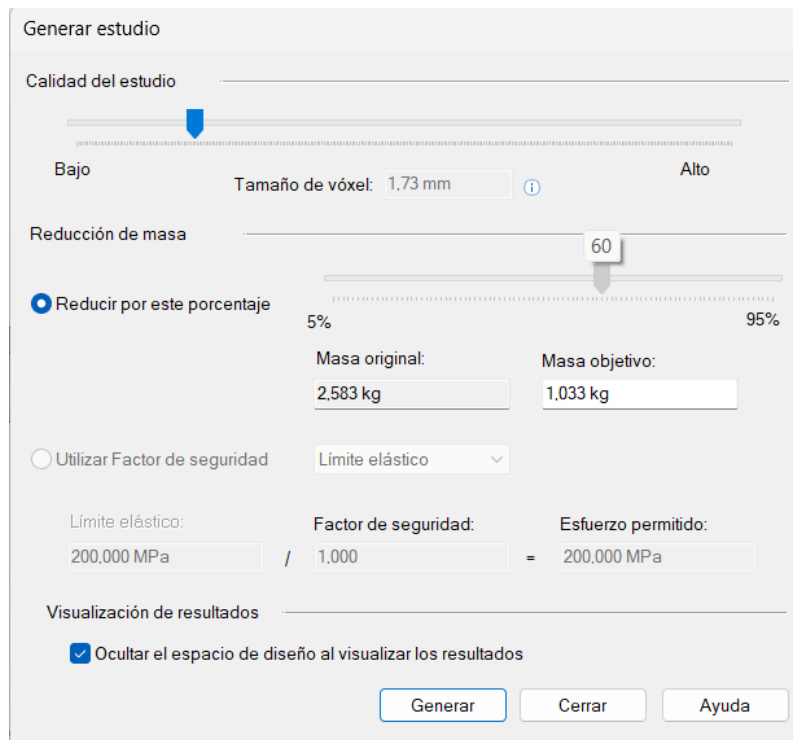


Figura 91. Resultado simulación iteración 4 (elaboración propia)

5.5.2.5 Iteración 5

La quinta iteración busca ajustar el diseño hacia el rango objetivo ideal del proyecto, el cual se estima en torno a los 150 MPa de esfuerzo máximo. Manteniendo el volumen de la región a preservar 9 en su estado original, se vuelve a incrementar el objetivo de aligeramiento hasta el 60%.



Generar estudio

Calidad del estudio

Bajo Tamaño de vóxel: 1,73 mm Alto

Reducción de masa

60

☒ Reducir por este porcentaje

5% 95%

Masa original: 2,583 kg Masa objetivo: 1,033 kg

☐ Utilizar Factor de seguridad

Límite elástico

Límite elástico: 200,000 MPa / Factor de seguridad: 1,000 = Esfuerzo permitido: 200,000 MPa

Visualización de resultados

☒ Ocultar el espacio de diseño al visualizar los resultados

Generar Cerrar Ayuda

Figura 92. Parámetros iteración 5. Tamaño de vóxel 1,73 mm y reducción de masa 60% (elaboración propia)

La geometría obtenida en esta fase muestra una distribución de material casi idónea, con soportes coherentes que mantienen la forma general de la pieza aun retirando mucho material.

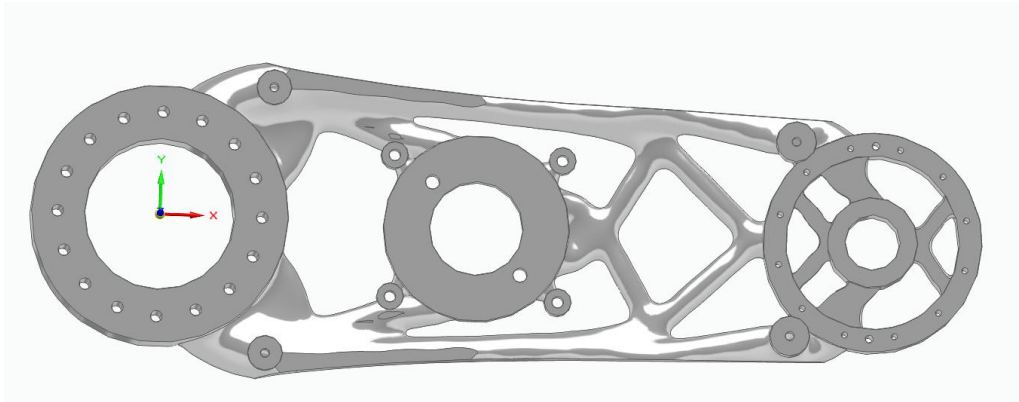


Figura 93. Resultado estudio generativo iteración 5 (elaboración propia)

La validación estructural confirma que el nivel de sollicitación mecánica es óptimo, registrando un pico tensional de 155 MPa, un valor muy cercano a la meta de diseño. Sin embargo, se detecta que dentro de la región a preservar 9, los dos agujeros inferiores carecen de un soporte fuerte, lo que sugiere la conveniencia de añadir un refuerzo o soporte estructural adicional para mejorar la estabilidad frente a cargas dinámicas.

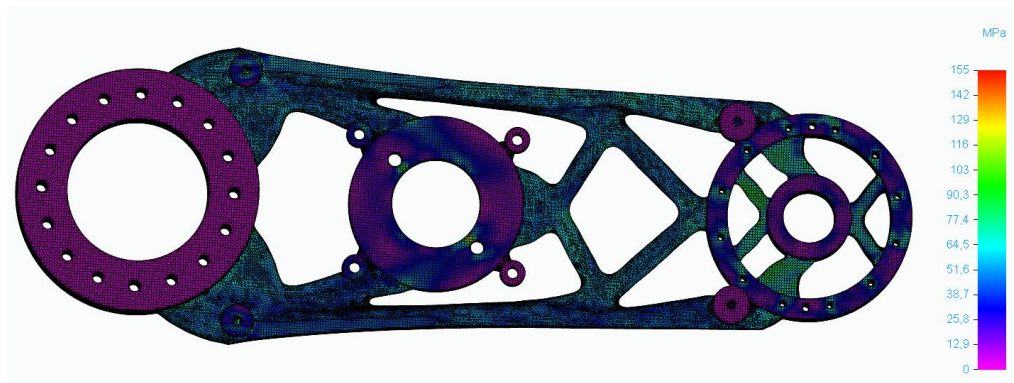


Figura 94. Resultado simulación iteración 5 (elaboración propia)

5.5.2.6 Iteración 6 (Iteración definitiva)

La sexta iteración se diseña para refinar los resultados de la fase anterior. Para corregir la falta de soporte localizada en la interfaz de la región 9, se modifica mínimamente el objetivo de reducción de masa, fijándolo en un 59% (con el mismo tamaño de vóxel de 1,73 mm). Ese 1% de material retenido se orienta para dar al software el volumen necesario para robustecer los puntos críticos de transición.

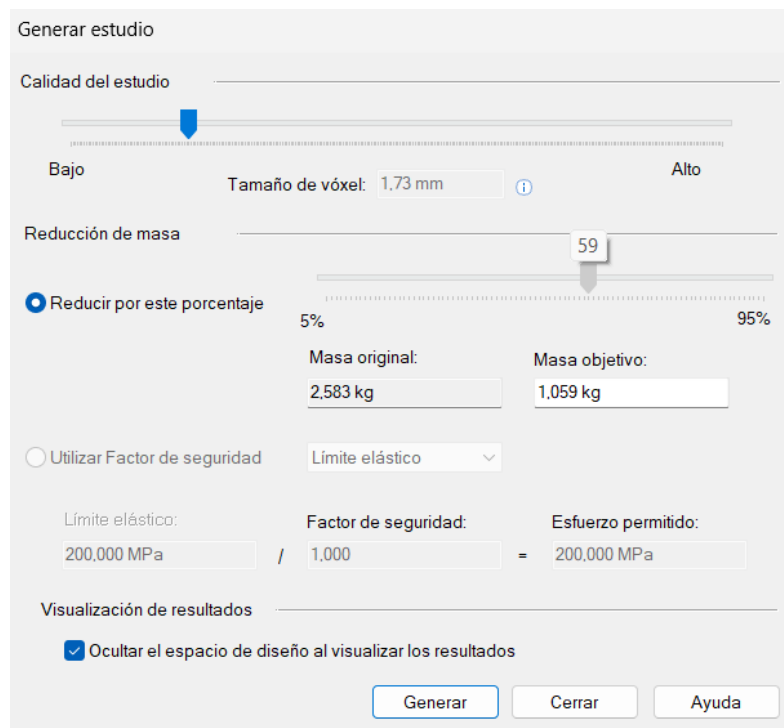


Figura 95. Parámetros iteración 6. Tamaño de vóxel 1,73 mm y reducción de masa 59% (elaboración propia)

El resultado del diseño generativo cumple de forma perfecta con las expectativas. El algoritmo aprovecha el leve incremento de material para desarrollar un brazo de conexión adicional en la base de la región 9, dotando a esa interfaz de una estabilidad estructural y una rigidez superiores.

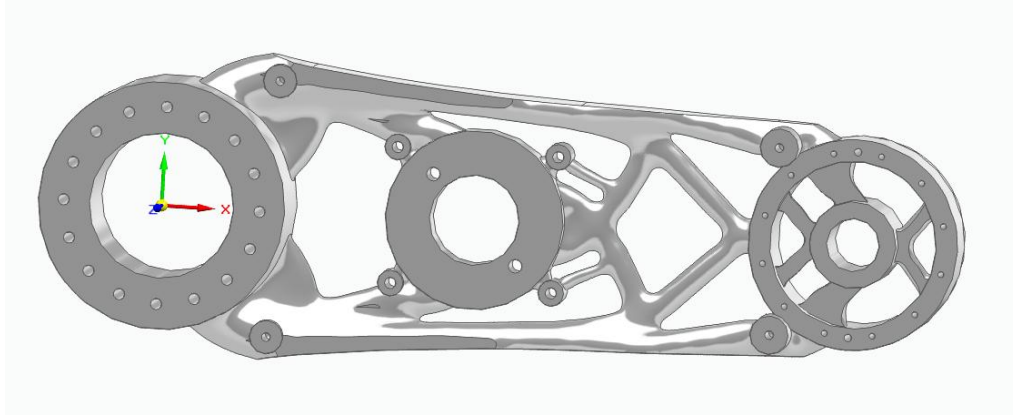


Figura 96. Resultado estudio generativo iteración 6 (elaboración propia)

La simulación estática final de la pieza devuelve una tensión máxima de Von Mises de 149 MPa. Este valor se sitúa justo en el rango de los 150 MPa, maximiza el aprovechamiento mecánico de la aleación de Aluminio L-2560 manteniendo un factor de seguridad controlado respecto al límite elástico de 200 MPa, y consolida una geometría paramétrica estable, segura y significativamente más ligera que la original, pasando de un peso original de 2,583 kg a 1,059 kg.

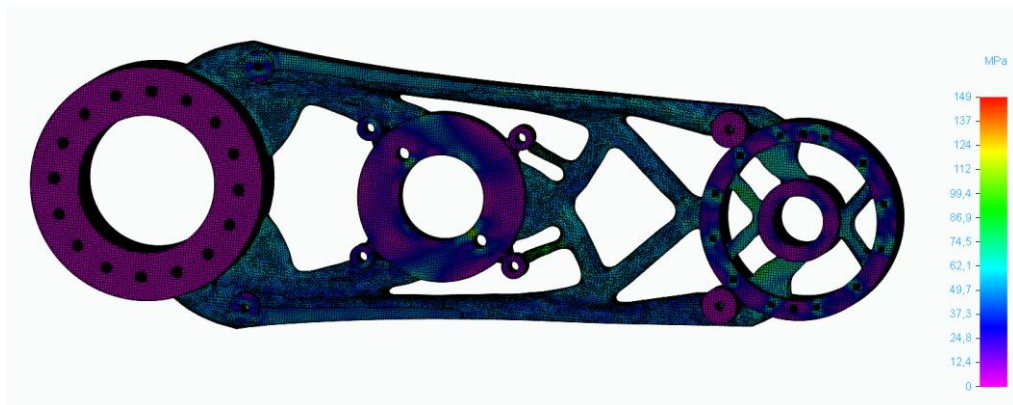


Figura 97. Resultado simulación iteración 6 (elaboración propia)

5.5.3 CONVERSIÓN DE CUERPO DE CONSTRUCCIÓN A DISEÑO

Una vez validada y seleccionada la geometría óptima en la iteración 6, el modelo resultante se encuentra en formato de cuerpo de construcción (facetado o poligonal). Para que este volumen sea completamente operativo dentro del entorno CAD, es necesario realizar una transposición geométrica. Este paso metodológico consiste en transformar la estructura optimizada en un cuerpo de diseño sólido y paramétrico, integrando las superficies orgánicas generadas por el algoritmo con las regiones funcionales que se preservaron desde el inicio del estudio.

El proceso de conversión se inicia activando la herramienta específica del software para el tratamiento de geometrías optimizadas, la cual procesa la superficie facetada y la traduce a un formato de sólido geométrico reconocible por el núcleo de modelado.

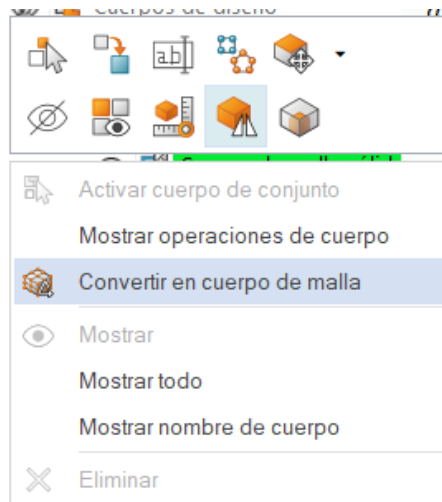


Figura 98. Ventana para convertir en cuerpo de malla (elaboración propia)

Dentro del cuadro de conversión, la precisión geométrica del sólido final depende estrechamente de los parámetros de tolerancia numérica introducidos. Para garantizar una fidelidad metrológica rigurosa que no altere las trayectorias de carga calculadas, se configuran de forma estricta las opciones de mallado. Se establece un error máximo admisible (tolerancia de conversión) de 0,1 mm y un ángulo plano de superficie límite de

1°. Estas restricciones obligan al software a aproximar las curvaturas orgánicas con una desviación muy pequeña, asegurando transiciones suaves y fieles al modelo optimizado.

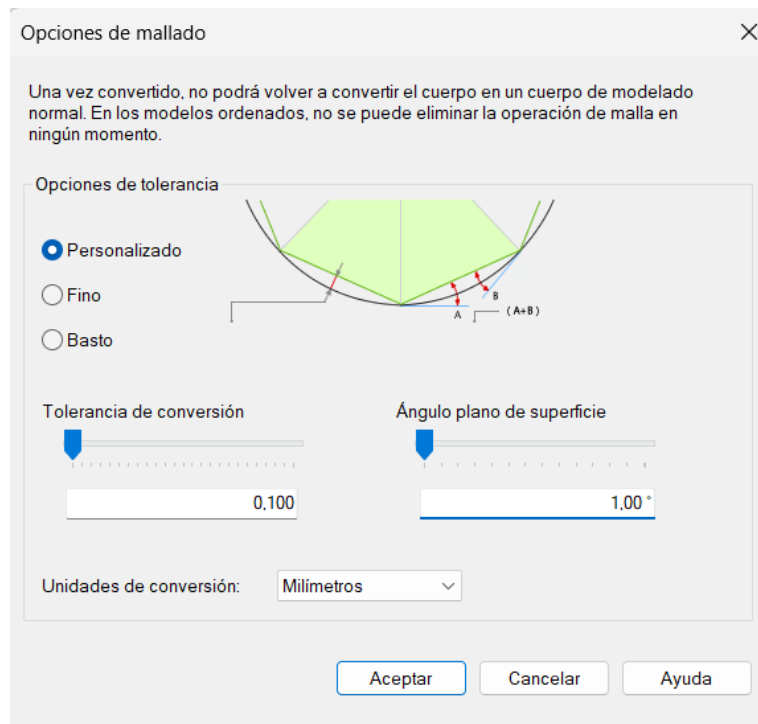


Figura 99. Opciones de mallado (elaboración propia)

Tras aplicar los criterios de tolerancia, el sistema procesa la geometría y consolida un único cuerpo sólido, generando un componente CAD paramétrico listo para su validación final.

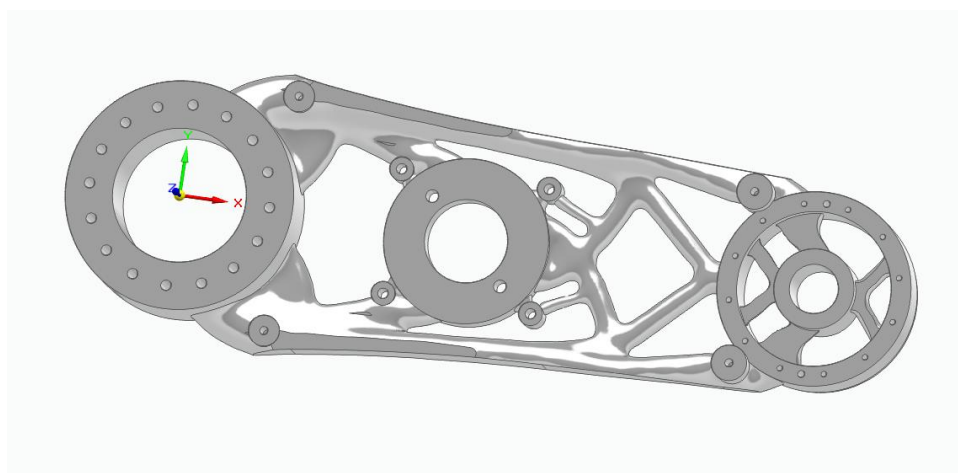


Figura 100. Pieza convertida a cuerpo de diseño (elaboración propia)

5.5.4 SIMULACIÓN FEA FINAL

Con el cuerpo de diseño consolidado, se procede a realizar una última simulación FEA. Se introducen de nuevo exactamente las mismas condiciones de contorno aplicadas al inicio de la metodología, el empotramiento rígido (restricción fija) en la interfaz proximal y el espectro de cargas compuesto por las fuerzas lineales, el momento flector y el momento torsor en el extremo distal.

Para esta validación final, se define un tamaño de malla de 3,02 mm.

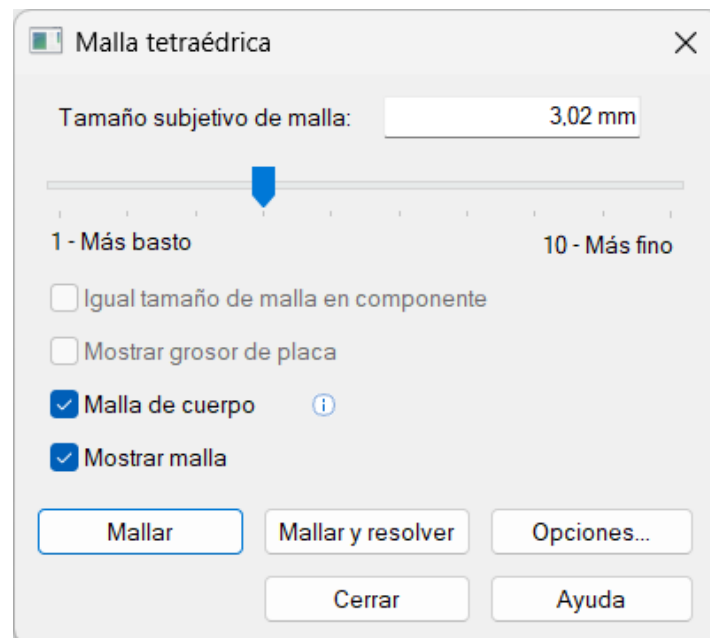


Figura 101. Tamaño de malla de 3,02 mm (elaboración propia)

La distribución de los elementos finitos y las condiciones de contorno sobre el Link optimizado se aprecian en la Figura 102.

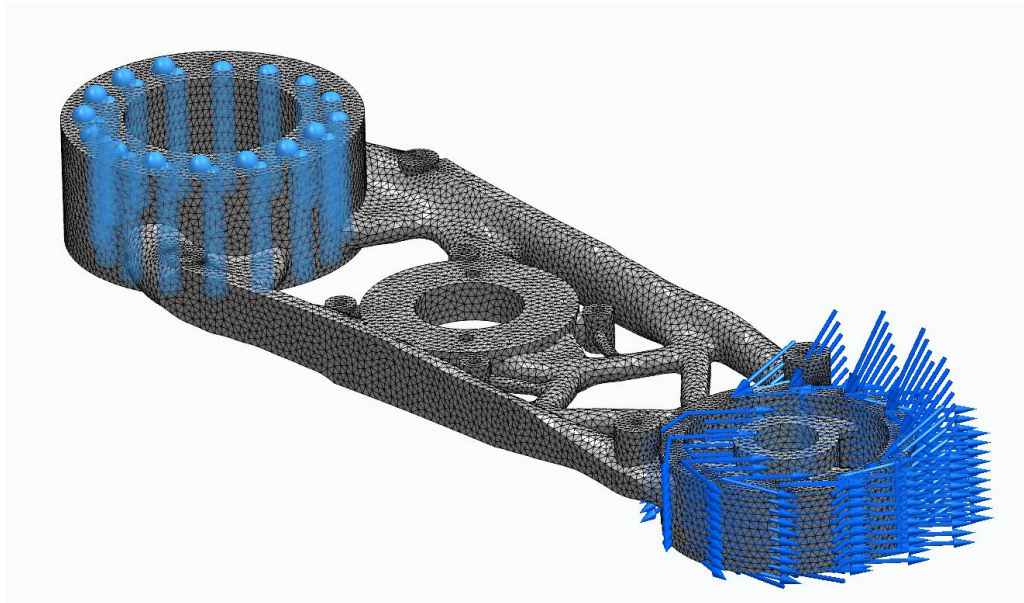


Figura 102. Pieza mallada con condiciones de contorno (elaboración propia)

Al resolver el modelo matemático, el software arroja un valor de tensión máxima de Von Mises de 477 MPa. A nivel puramente numérico, este dato se sitúa muy por encima del límite elástico admisible del Aluminio L-2560 (200 MPa), lo que teóricamente implicaría el fallo inmediato de la pieza. Sin embargo, en la práctica de la simulación por elementos finitos, los picos de tensión desproporcionados en zonas de aplicación de cargas o restricciones suelen ser el resultado de singularidades numéricas (puntos infinitesimales donde el software divide una fuerza entre un área que tiende a cero).

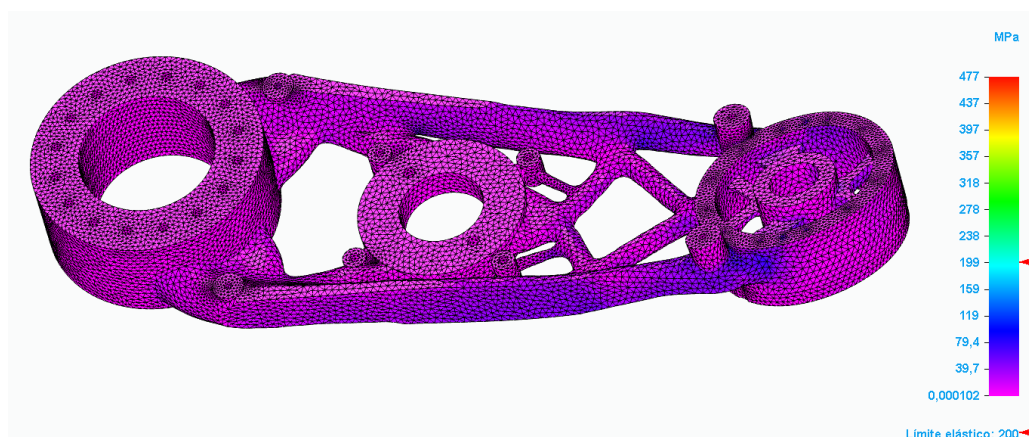


Figura 103. Resultado de simulación FEA (elaboración propia)

Para realizar un análisis crítico y discernir si este valor de 477 MPa representa un peligro real o una anomalía matemática, se recurre a una herramienta de filtrado avanzado mediante la búsqueda de un contorno iso-dinámico. Al configurar el umbral de visualización exactamente en 160 MPa, se observa de forma concluyente que no existe ninguna región, volumen ni grupo de elementos visibles en la pieza que alcance o supere dicho valor. El esfuerzo real en todo el cuerpo se mantiene distribuido de manera segura dentro de los márgenes previstos, lo que confirma que el pico es una singularidad infinitesimal aislada en un único nodo del software. Por tanto, se confirma que la simulación FEA final es válida y se puede exportar la pieza a Altair Inspire para el rediseño final.

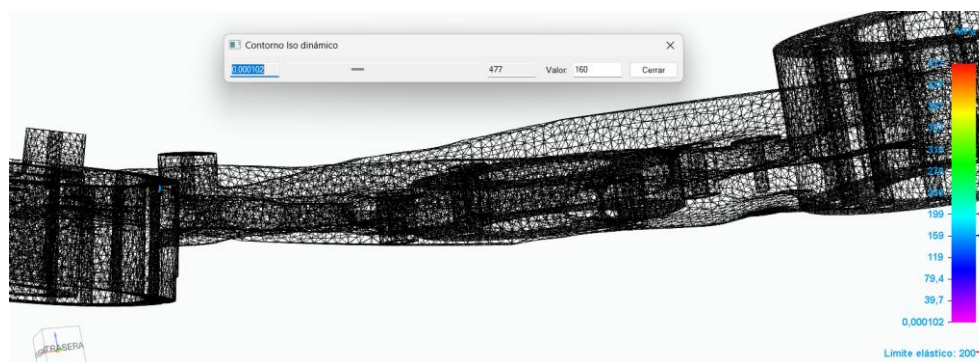


Figura 104. Búsqueda de contorno iso dinámico de 160 MPa (elaboración propia)

5.6 ADAPTACIÓN POR CRITERIO DE DISEÑO Y FABRICACIÓN

Tras completar las simulaciones de validación estructural, la geometría optimizada requiere una fase final de reinterpretación y reconstrucción geométrica orientada a la fabricación. Aunque el cuerpo de diseño obtenido proporciona las directrices de distribución de masa, las superficies orgánicas generadas por el algoritmo de optimización a menudo presentan irregularidades superficiales, rugosidades o pequeñas imperfecciones geométricas que impiden su fabricación directa o su uso en aplicaciones industriales. Por ello, se recurre al software Altair Inspire para llevar a cabo un proceso de suavizado, reconstrucción mediante superficies avanzadas y corrección de las interfaces de conexión.

El flujo de trabajo en este nuevo entorno comienza con la importación del archivo sólido. El software carga la topología optimizada y la prepara para la aplicación de herramientas de reconstrucción e ingeniería inversa avanzada.



Figura 105. Pieza importada en Altair Inspire (elaboración propia)

Para asegurar la coherencia geométrica y estructural del componente, es fundamental mantener la simetría bilateral del Link que se determinó desde las primeras fases del proyecto. El software dispone de utilidades específicas para imponer restricciones de simetría geométrica sobre cuerpos.

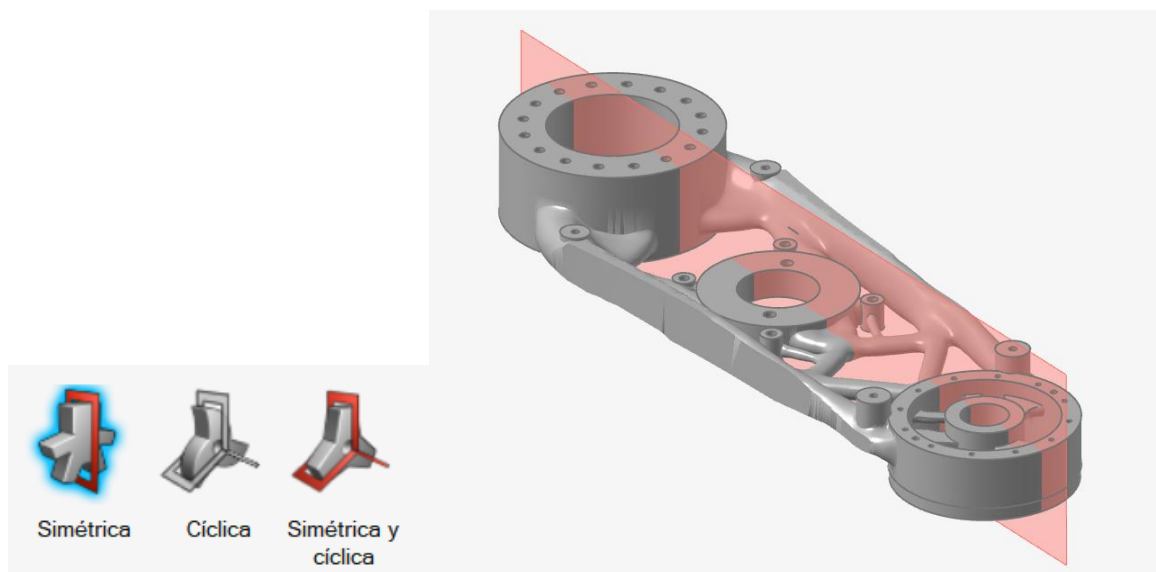


Figura 106. Comando de simetría (elaboración propia)

Con el entorno simétrico establecido, se procede a la reconstrucción de la geometría orgánica mediante tecnología PolyNURBS, la cual permite aproximar formas libres complejas con superficies matemáticas continuas y editables. Para lograr una adaptación fiel que mantenga las trayectorias de carga calculadas, se ejecuta el comando de ajuste automático configurando un número total de 2500 caras PolyNURBS y fijando un parámetro de curvatura al 80%. Esto equilibra de forma idónea la suavidad superficial con la precisión dimensional del modelo.

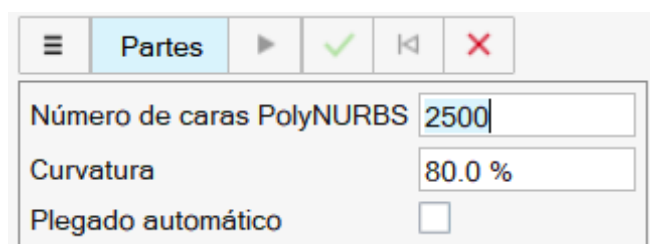


Figura 107. Comando Fit de Altair Inspire (elaboración propia)

A pesar de la alta densidad de caras configurada, el algoritmo de ajuste automático genera de forma localizada ciertas imperfecciones y pliegues anómalos. Estas irregularidades en la malla PolyNURBS se traducen en aristas auto-intersectadas o caras torsionadas que romperían la continuidad del sólido y provocarían fallos en operaciones booleanas posteriores.

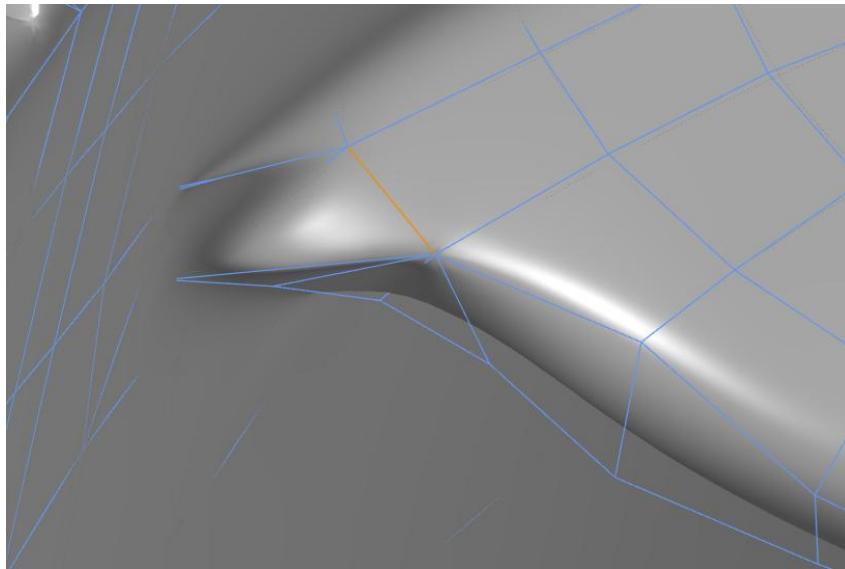


Figura 108. Irregularidades en la PolyNURBS (elaboración propia)

Para corregir estas anomalías y garantizar la integridad topológica del modelo, se recurre al comando de reparación geométrica del software. Esta función identifica automáticamente las inconsistencias de las caras PolyNURBS y recalcula localmente los nodos para eliminar las auto-intersecciones de manera limpia.

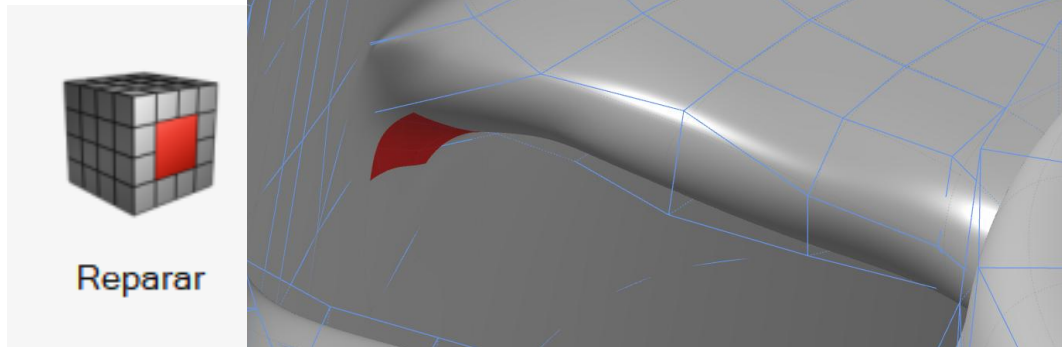


Figura 109. Comando Reparar (elaboración propia)

Tras la ejecución del algoritmo de corrección, los nodos de la región quedan corregidos. Las aristas en conflicto desaparecen y dan paso a una transición de curvatura suave, continua y libre de errores matemáticos.

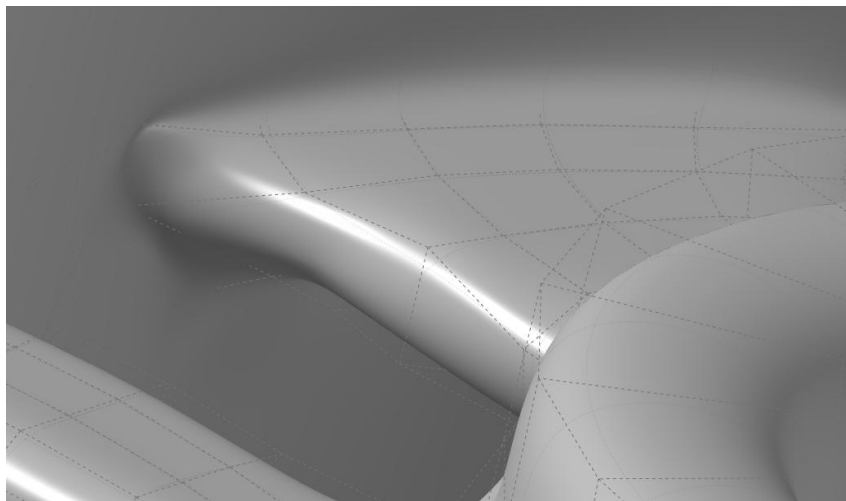


Figura 110. Elemento reparado (elaboración propia)

Este procedimiento de corrección y alisado se replica a lo largo de toda la extensión del modelo. El proceso concluye cuando todas las transiciones y uniones orgánicas del Link quedan saneadas, libres de ruido geométrico y con una continuidad de curvatura uniforme.

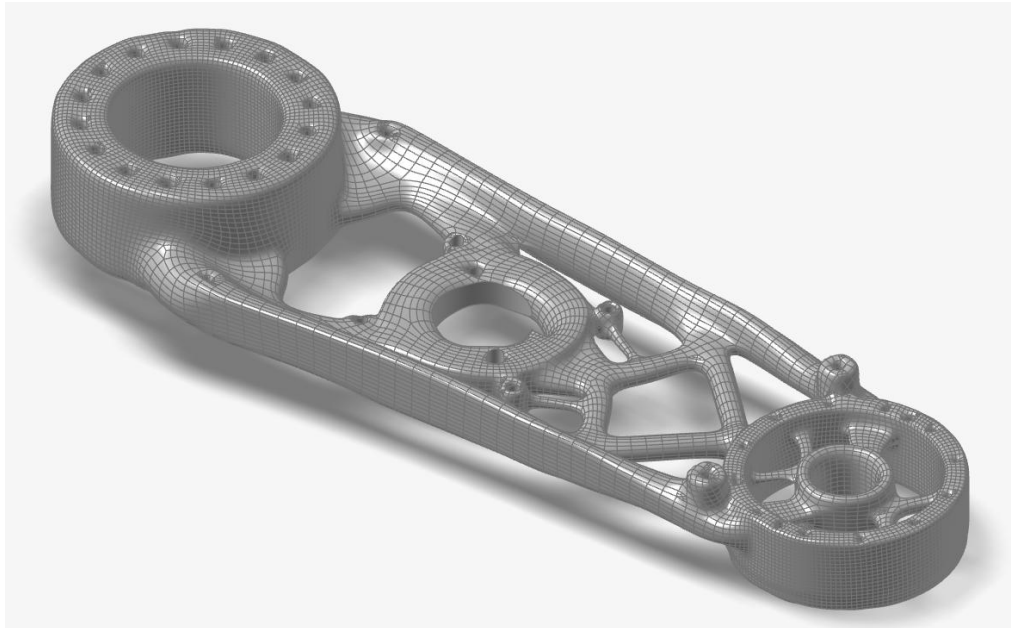


Figura 111. Pieza tras reparar irregularidades (elaboración propia)

Una vez obtenida la estructura orgánica limpia, el modelo se convierte a un formato de pieza implícita. Esta representación matemática avanzada permite procesar la geometría no como fronteras de caras tradicionales, sino como funciones de distancia volumétricas, lo que facilita la realización de operaciones booleanas complejas con geometrías paramétricas.

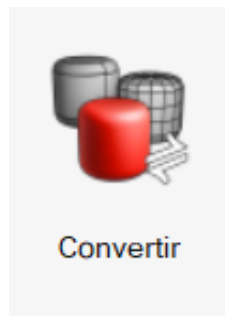


Figura 112. Conversión a pieza implícita (elaboración propia)

Para iniciar la reconstrucción estricta de las zonas de fijación, se establece un sistema robusto de planos auxiliares de referencia. Estos planos se alinean de forma matemática con los centros de rotación y las caras de apoyo originales del componente, sirviendo como la base de posicionamiento para el nuevo modelado paramétrico.

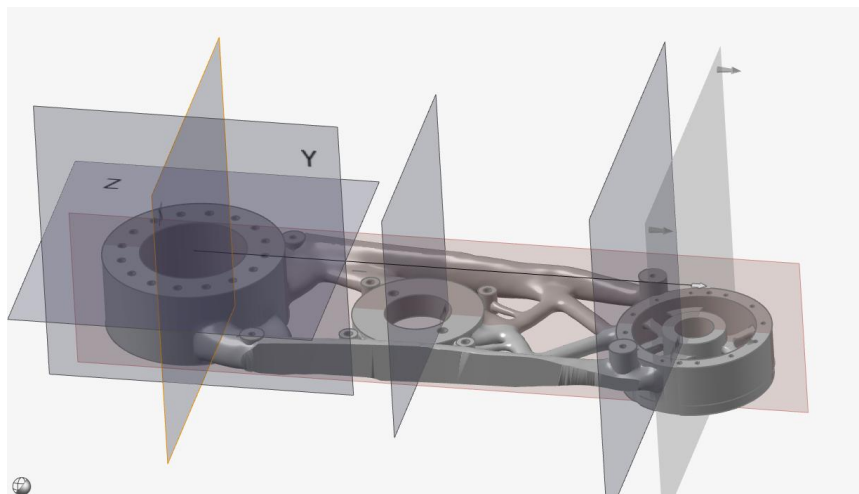


Figura 113. Creación de planos auxiliares (elaboración propia)

Con los planos de referencia situados, se procede a la reconstrucción exhaustiva de las geometrías a preservar de la pieza. El problema de la conversión directa a PolyNURBS es que tiende a redondear y deformar las zonas críticas que deben ser perfectamente cilíndricas o planas para garantizar su montaje. Por lo tanto, se han de rediseñar completamente desde cero todas las interfaces importantes del Link (cilindros de los agujeros y caras planas) utilizando dimensiones nominales.

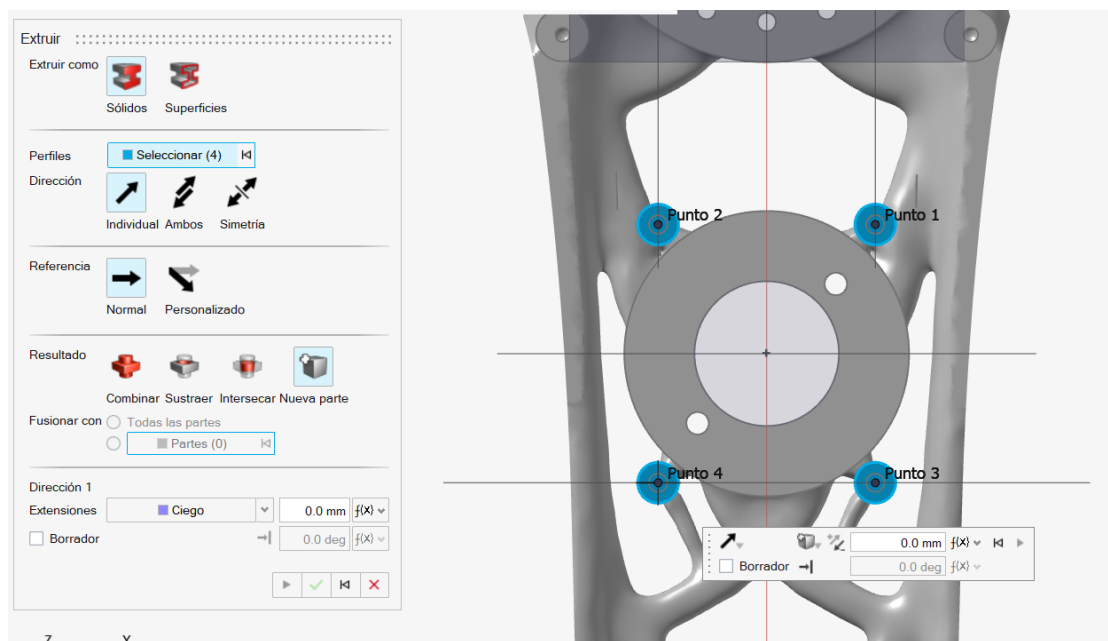


Figura 114. Reconstrucción de zonas a preservar (elaboración propia)

Con los volúmenes creados desde cero, se utiliza el comando de sustracción para eliminar las zonas correspondientes a las uniones cilíndricas imperfectas y redondeadas que la conversión a PolyNURBS había dejado en la pieza implícita, despejando así el espacio ocupado por las conexiones.

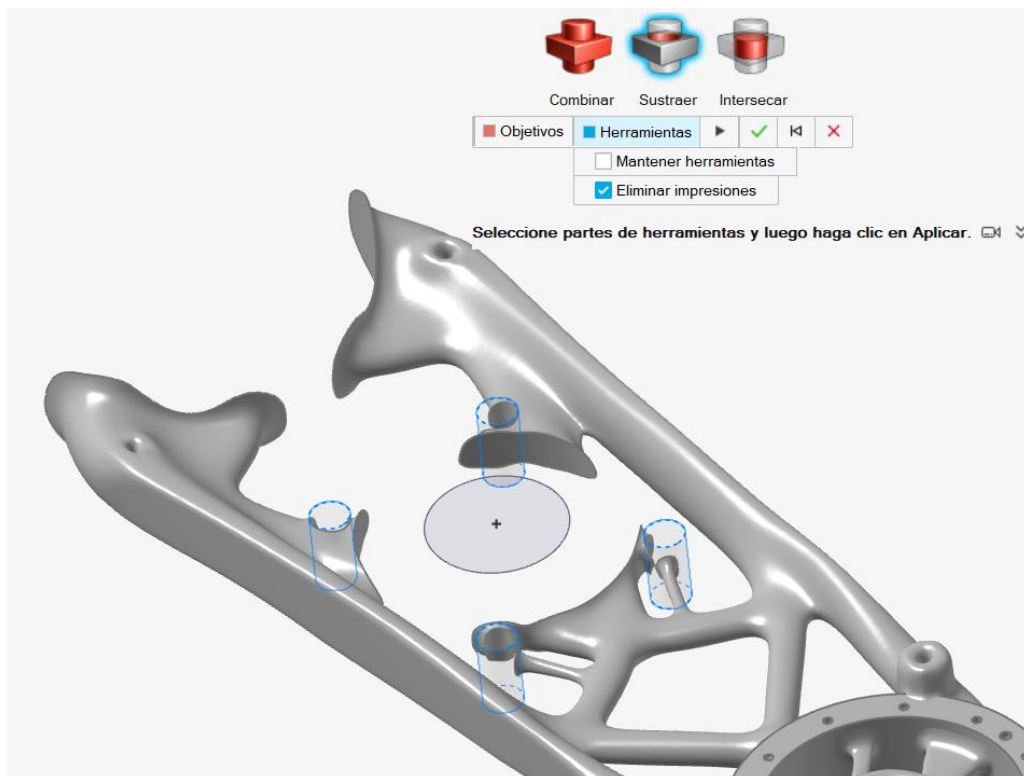


Figura 115. Comando sustraer para eliminar zona de diseño de pieza implícita (elaboración propia)

Tras ejecutar la sustracción, la pieza implícita queda reducida únicamente a los brazos de conexión. Esta estrategia garantiza que las formas libres actúen únicamente como puentes de unión limpios entre los centros de fijación.

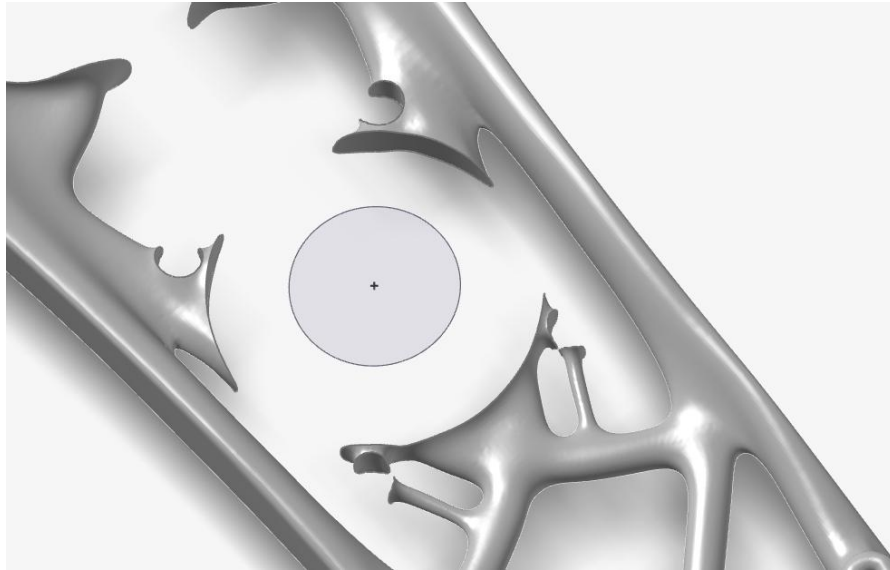


Figura 116. Pieza implícita tras eliminar cilindros (elaboración propia)

Este proceso iterativo de diseño se sigue en cada una de las interfaces del Link. En resumen, la metodología consiste en crear todas las zonas de preservación importantes completamente de cero con precisión, sustraer esos mismos volúmenes del cuerpo de la pieza implícita donde presentaban formas redondeadas o deformes por el optimizador, y aislar de este modo los canales de transmisión orgánica.

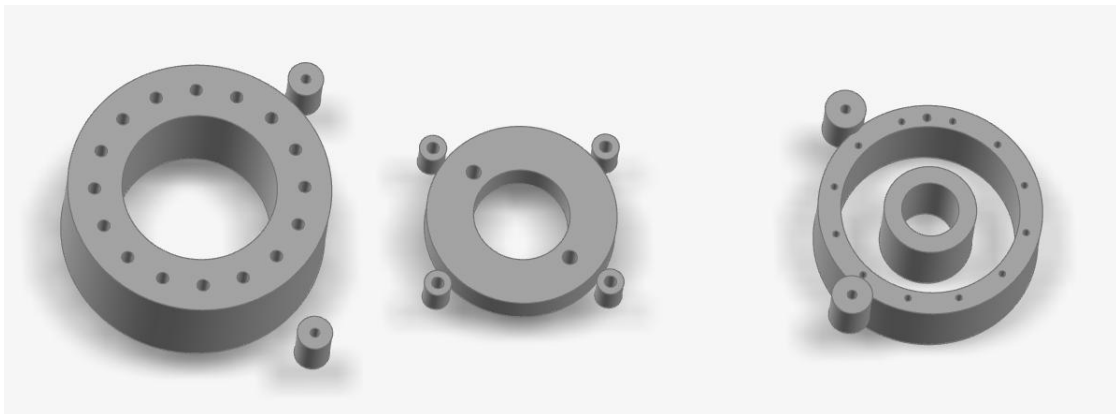


Figura 117. Todas las zonas de preservación creadas de cero en Altair Inspire (elaboración propia)

Similarmente a lo anterior, la estructura de la pieza implícita se somete al vaciado booleano completo de todas sus interfaces, de manera que el sólido orgánico resultante muestra únicamente los huecos listos para recibir los nuevos bloques funcionales paramétricos.

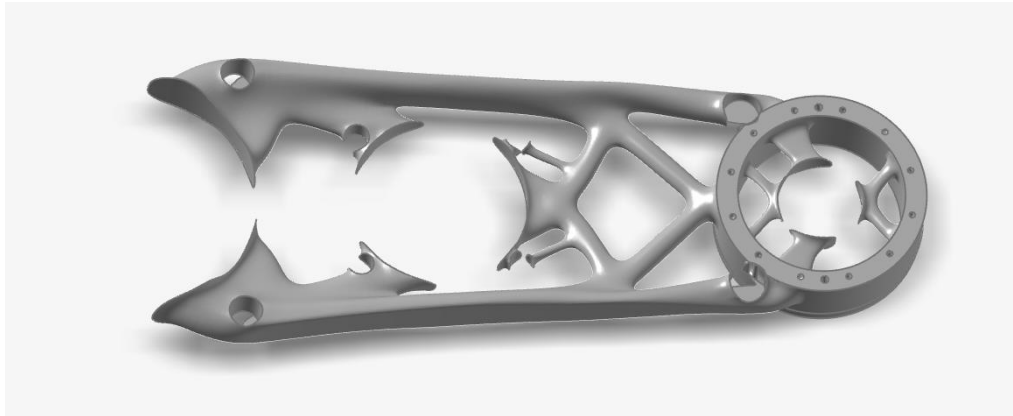


Figura 118. Todas las zonas de preservación sustraídas de la pieza implícita (elaboración propia)

Finalmente, con los dos subconjuntos geométricos optimizados por separado (los brazos de conexión orgánica implícita limpia por un lado, y las zonas de preservación paramétricas perfectas creadas de cero por el otro), se procede a su unificación definitiva. Para ello se emplea el comando de combinación booleana, el cual fusiona ambos dominios en una sola entidad sólida continua y sin costuras.

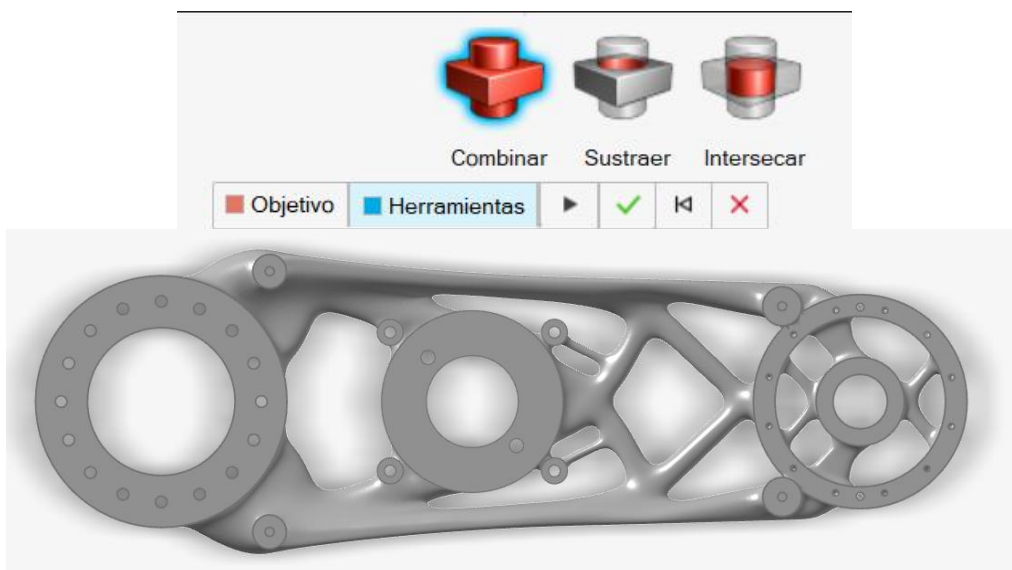


Figura 119. Comando combinar para juntar ambos conjuntos (elaboración propia)

El resultado de esta metodología es el producto final deseado, un componente óptimo que combina de forma precisa la eficiencia en reducción de masa de las formas generativas con la rigidez, planitud y tolerancia dimensional de las interfaces necesarias para su montaje real.

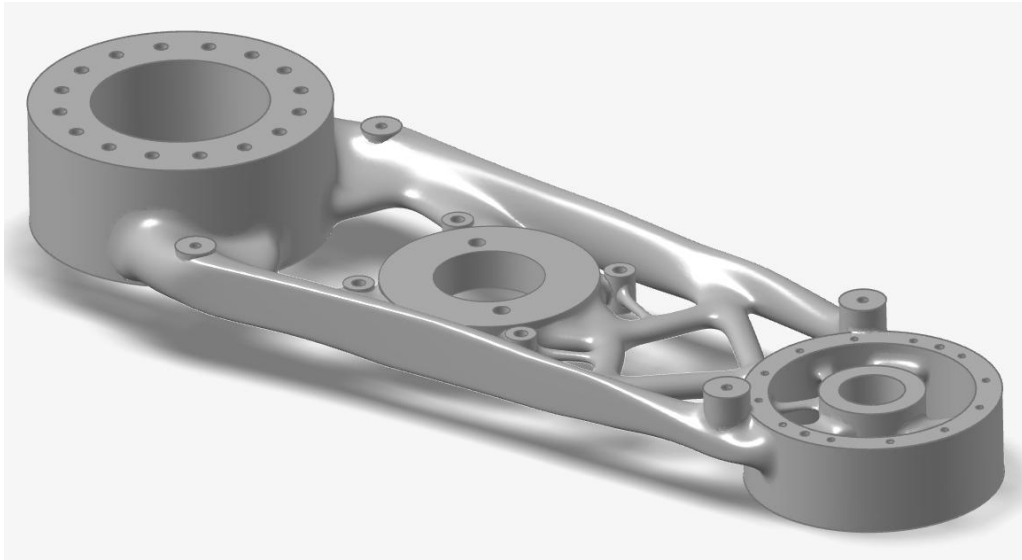


Figura 120. Pieza final lista para exportar (elaboración propia)

5.7 PREPARACIÓN PARA FABRICACIÓN ADITIVA

Una vez completada la reconstrucción geométrica y la validación del componente optimizado mediante ingeniería inversa y modelado avanzado, la fase final del proyecto consiste en transferir el modelo CAD hacia el entorno de fabricación. En este apartado se detalla la preparación del archivo para su fabricación mediante tecnologías de impresión 3D FFF (Fabricación por Filamento Fundido) y CFF (Fabricación con Fibra Continua).

5.7.1 PIEZA ORIGINAL

Para establecer la base de la comparativa, se parametriza en primer lugar el proceso de fabricación de la geometría original de la pieza. La fabricación de este componente se plantea mediante una impresora industrial de gran formato, adecuada para el prototipado rápido y la producción de piezas funcionales y utillajes de gran tamaño. Para ello se emplea la DT 600+ de Dynamical Tools, basada en tecnología de deposición de material fundido (FDM). La elección de este equipo responde principalmente a su amplio volumen de impresión, que permite fabricar la pieza a escala 1:1 en una única operación, evitando uniones posteriores y garantizando una mayor integridad dimensional. Además, su capacidad para procesar materiales termoplásticos de ingeniería la convierte en una solución adecuada para la fabricación de componentes de grandes dimensiones con buenas prestaciones mecánicas.



Figura 121. Impresora 3D DT 600+ del fabricante Dynamical Tools [52]

La preparación del modelo requiere el uso de un software de laminado o slicer para transformar el sólido CAD en código de máquina (G-code). Se utiliza el programa Simplify3D, en el cual se orienta la pieza sobre la plataforma de impresión buscando la máxima estabilidad estructural de las capas y minimizando la necesidad de material de soporte.

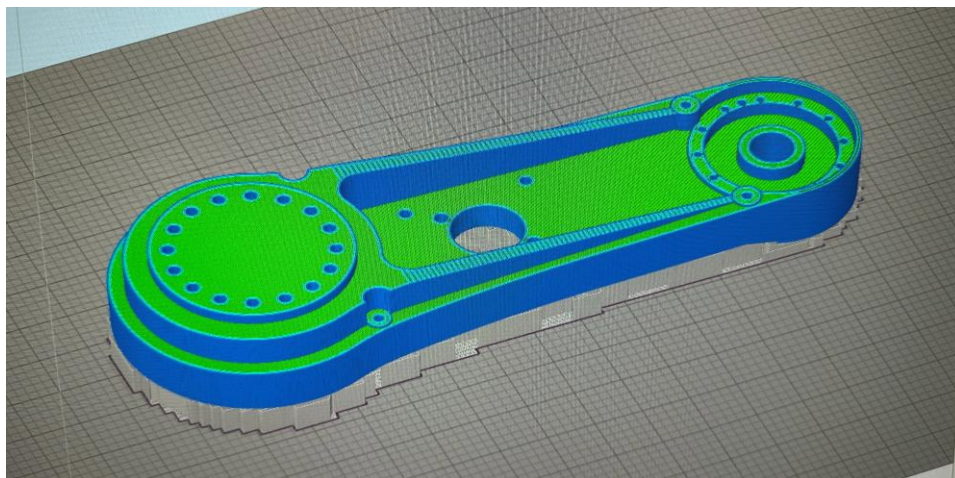


Figura 122. Pieza original dentro del slicer Simplify3D (elaboración propia)

Tras configurar los parámetros de impresión estándar para este tipo de componentes mecánicos (definiendo altura de capa, velocidad de deposición y patrones de relleno), el software procesa el laminado del cuerpo. Los datos técnicos resultantes del análisis de fabricación indican que la pieza original se imprime en PLA, requiriendo un volumen de material total de 409.171 mm³. Esta configuración se traduce en un coste de material muy económico, estimado de forma aproximada en €12,68, requiriendo la deposición secuencial de un total de 277 capas físicas.

RESUMÉN DE IMPRESIÓN	
Tiempo de impresión	22 horas 38 minutos
Longitud del material	179,11 m
Volumen del material	409171 mm ³
Peso del material	507,37 g
Coste del material	€ 12,68
Tamaño en X	386,97 mm
Tamaño en Y	142,97 mm
Tamaño en Z	55,48 mm
Recuento de capas	277

Tabla 3. Resumen de impresión de pieza original (elaboración propia)

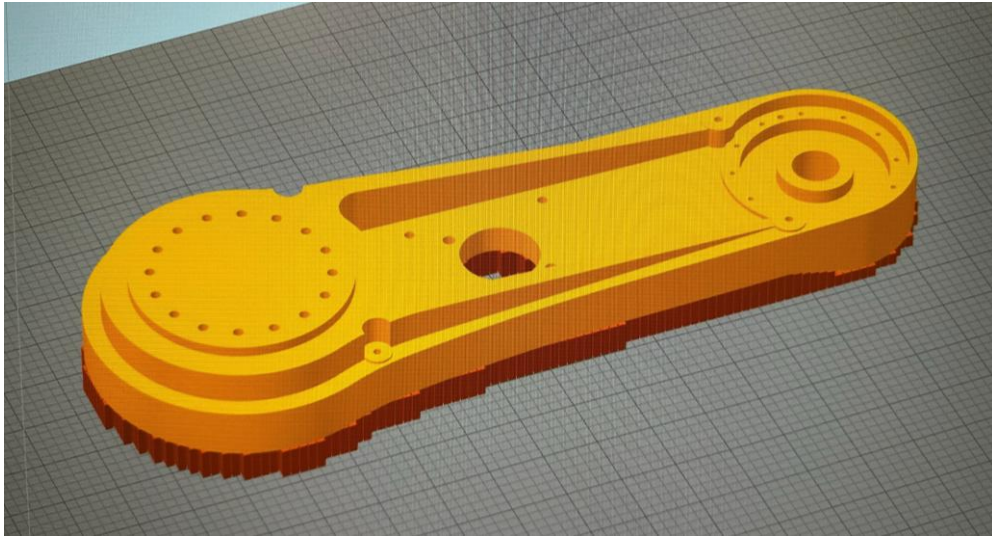


Figura 123. Pieza original preparada para imprimir en impresora DT 600+ (elaboración propia)

5.7.2 PIEZA OPTIMIZADA

En contraposición a la geometría inicial, la pieza resultante del proceso de diseño generativo presenta formas orgánicas complejas que demandan una tecnología de fabricación avanzada y materiales con propiedades mecánicas superiores. Debido a que la optimización ha reducido drásticamente la masa del componente, el material remanente debe soportar mayores concentraciones de esfuerzo, por lo que se opta por una impresora de alta gama capaz de trabajar con materiales compuestos reforzados. Para la pieza optimizada, se emplea la X7 de Markforged, basada también en tecnología FDM, complementada con el proceso Continuous Fiber Reinforcement (CFR), que permite incorporar fibras continuas de refuerzo, como fibra de carbono, fibra de vidrio o Kevlar en el interior de la pieza durante la fabricación. Esta tecnología permite obtener componentes con una elevada relación resistencia-peso y propiedades mecánicas significativamente superiores a las de las impresoras FDM convencionales, lo que la convierte en una opción especialmente adecuada para la fabricación de componentes estructurales.



Figura 124. Impresora 3D X7 del fabricante Markforged [53]

La preparación para la fabricación de este diseño complejo se realiza en el software nativo de la máquina, Eiger, parametrizando las trayectorias de deposición para un filamento técnico avanzado. En este caso, la pieza optimizada se configura para ser impresa en Onyx FR-A, una matriz de nylon cargada con microfibra de carbono. Los resultados del software de laminado revelan que el nuevo diseño ocupa un volumen total de material de 337,82 cc (337.820 mm^3), lo que representa una reducción de volumen real respecto a la original. No obstante, debido a las altísimas prestaciones mecánicas y técnicas del compuesto de carbono, el coste estimado de material se eleva hasta los \$109,79.

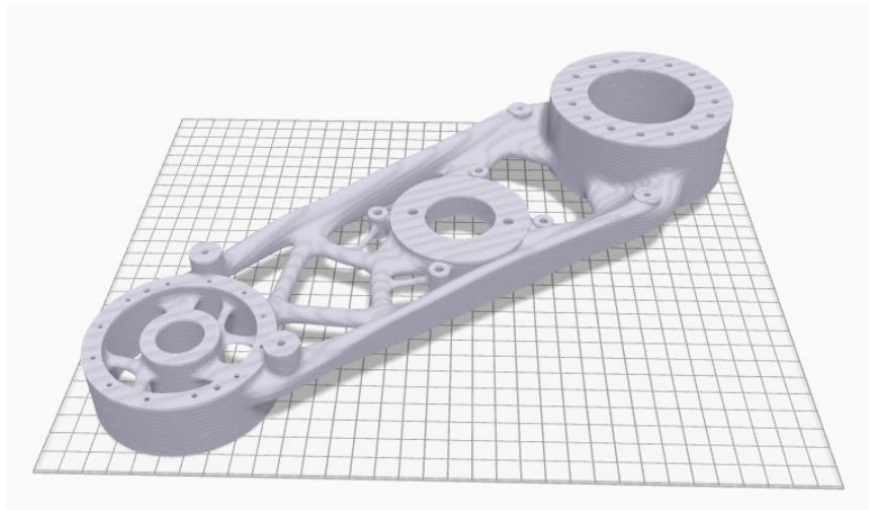


Figura 125. Pieza optimizada sobre bandeja de impresión en software Eiger (elaboración propia)

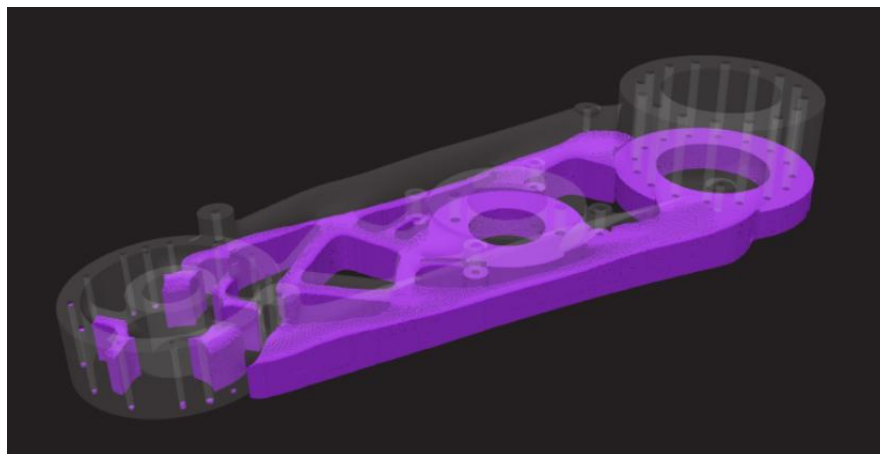


Figura 126. Estimación en Eiger de material de soporte (elaboración propia)

RESUMÉN DE IMPRESIÓN	
Tiempo de impresión	1 día 10 horas
Volumen del material	337,82 cc (337820 mm ³)
Coste del material	109,79 USD (€ 96,15)

Tabla 4. Resumen de impresión de pieza optimizada (elaboración propia)

5.8 IMPRESIÓN 3D Y POSTPROCESADO

Una vez completada la configuración en los respectivos programas de laminado y exportados los archivos de código de máquina, se inicia la fase de fabricación aditiva en los equipos industriales. Tras concluir los ciclos térmicos de extrusión y enfriamiento dentro de las cámaras de construcción, las piezas entran en la etapa de postprocesado. Esta fase, que comprende la retirada física de las estructuras de soporte y el acabado superficial de las interfaces, resulta crítica para evaluar la viabilidad de la fabricación.

5.8.1 PIEZA ORIGINAL

Debido a la geometría robusta del diseño inicial, al retirar el componente original de la plataforma de la impresora DT 600+, se observa que se generan estructuras de soporte masivas para sostener las grandes superficies planas y los contornos que se encuentran suspendidos en el aire.

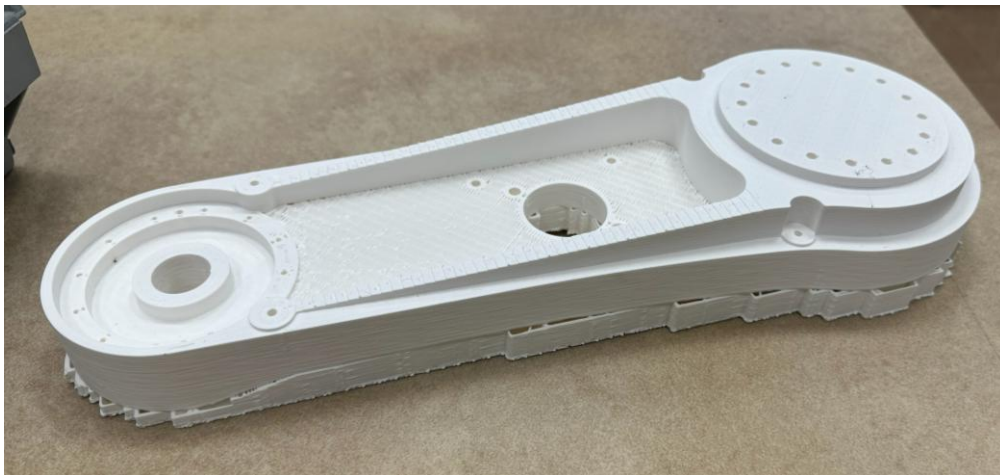


Figura 127. Pieza original impresa con material de soporte (elaboración propia)

Tras la retirada de la máquina, se procede a la eliminación del material de soporte. El proceso de postprocesado para esta geometría resulta sumamente complejo y laborioso. Al haberse utilizado el mismo material (PLA) tanto para la estructura de la pieza como para el soporte, la fusión interlaminar en las zonas de contacto es muy elevada, lo que provoca que en múltiples regiones críticas sea extremadamente difícil discernir visualmente dónde termina

el soporte y dónde empieza la superficie real del componente. Dejar la pieza completamente finalizada y libre de rebabas exige una gran cantidad de tiempo de mano de obra y el uso intensivo de herramientas mecánicas de corte y pulido manual.



Figura 128. Pieza original tras postprocesado (elaboración propia)

5.8.2 PIEZA OPTIMIZADA

En contraste a la pieza anterior, el desmontaje de la pieza optimizada de la plataforma de la impresora Markforged X7 es muy distinto. A pesar de que las formas orgánicas y los brazos helicoidales del diseño generativo requieren la presencia de material de soporte para sostener los volúmenes volados durante la deposición del Onyx FR-A, la naturaleza del software de laminado de alta gama y el propio algoritmo optimizador minimizan la superficie de contacto real de estos elementos de sacrificio.



Figura 129. Pieza optimizada impresa con material de soporte (elaboración propia)

El proceso de postprocesado resulta ser extremadamente rápido, fácil y sencillo. Gracias a las tolerancias de separación configuradas por el ecosistema de Markforged y a las propiedades del filamento técnico, las estructuras de soporte se desprenden de la pieza de forma prácticamente limpia con una leve presión manual, sin necesidad de aplicar esfuerzos mecánicos ni herramientas que puedan dañar las fibras de carbono.



Figura 130. Pieza optimizada tras postprocesado (elaboración propia)

Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

6.1 ANÁLISIS DE PIEZAS

El análisis global de los resultados obtenidos a lo largo de este proyecto permite evaluar el éxito de la metodología de ingeniería inversa y diseño generativo aplicada sobre el componente mecánico. A través de una secuencia lógica de digitalización, reconstrucción geométrica, optimización estructural y fabricación avanzada, se consolida la transformación de una pieza convencional en un componente orgánico de alta eficiencia.

A continuación, se presenta un examen analítico de los diferentes estados morfológicos por los que atraviesa el componente durante el desarrollo del trabajo, contrastando los objetivos técnicos planteados inicialmente con las metas alcanzadas en la fase de prototipado real.

El punto de partida del flujo de trabajo se materializó con la obtención de la nube de puntos y la malla poligonal mediante escaneo láser tridimensional. Este primer modelo virtual representa fielmente el estado físico, los desgastes y las tolerancias del componente original, sirviendo como la base de datos indispensable para iniciar la reconstrucción.

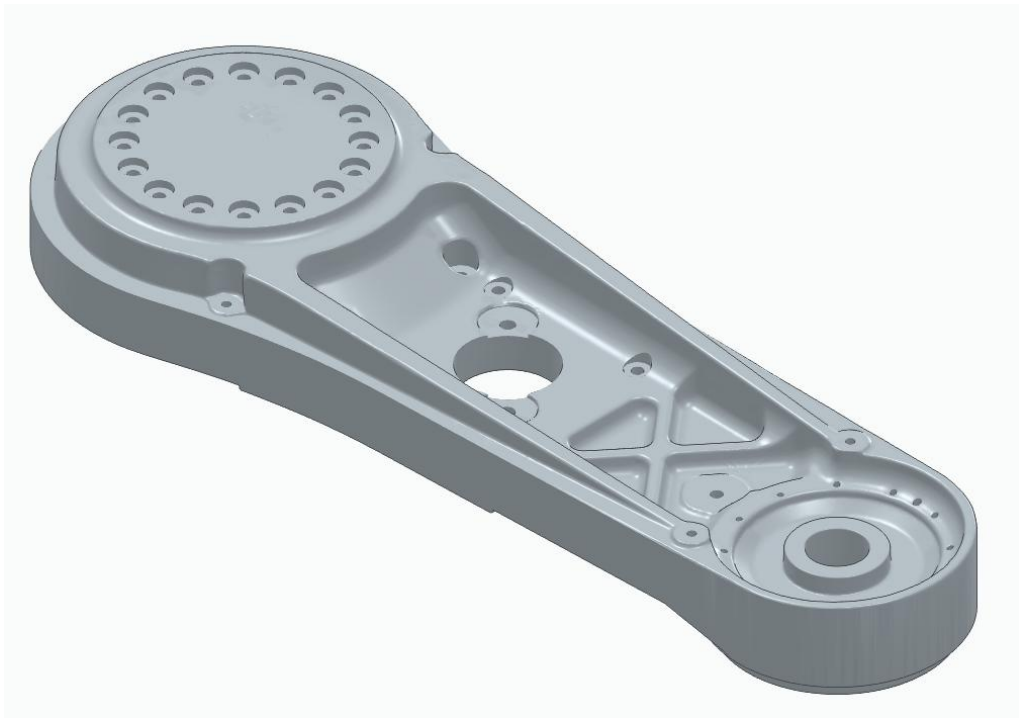


Figura 131. Link 2 obtenido por ingeniería inversa (elaboración propia)

Con los datos de la malla de escaneo validados, se procedió a la fase de modelado e ingeniería inversa de precisión. En este hito se tradujo la geometría en un sólido paramétrico editable, reconstruyendo de manera idónea las interfaces funcionales, los planos auxiliares y los cilindros que envuelven los agujeros de conexión, eliminando el ruido superficial inherente al escaneo óptico.



Figura 132. Link 2 creado desde cero en SolidWorks (elaboración propia)

Antes de transferir el modelo hacia los algoritmos de optimización, el criterio de ingeniería exigía una fase de preparación geométrica. Se eliminaron las operaciones secundarias, redondeos no estructurales y vaciados estéticos para obtener un volumen regular continuo (espacio de diseño base), maximizando así la libertad del software para calcular las trayectorias de carga óptimas.

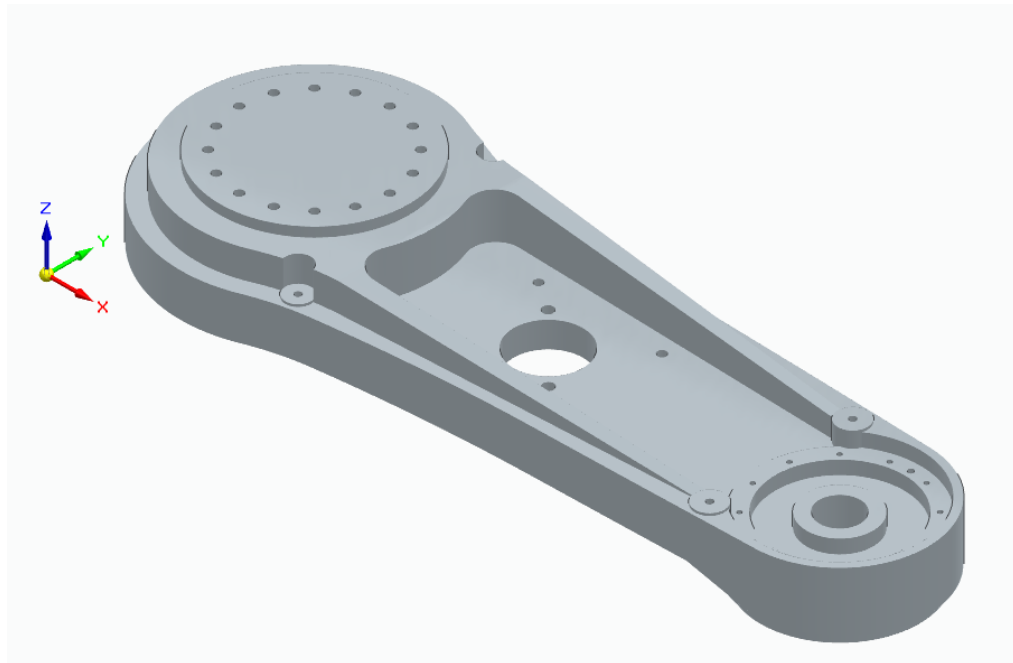


Figura 133. Link 2 simplificado para optimización topológica (elaboración propia)

La aplicación de las restricciones físicas y la resolución del entorno iterativo se consolidaron en el núcleo del proyecto. Mediante la metodología aplicada, se logró alcanzar con éxito el objetivo principal de este trabajo, una reducción de masa del 59% respecto al sólido original, pasando de una masa de 2,583 kg en aluminio L-2560 a 1,059 kg. El nuevo diseño redistribuye el material mediante brazos y uniones orgánicas que, según las simulaciones numéricas, continúan soportando con total seguridad los esfuerzos mecánicos combinados de fuerza, flexión y torsión, operando de manera holgada dentro del régimen elástico de la aleación. Asimismo, la posterior reconstrucción de superficies PolyNURBS y el modelado booleano implícito garantizan que las interfaces de preservación mantengan una precisión geométrica perfecta para su acoplamiento.

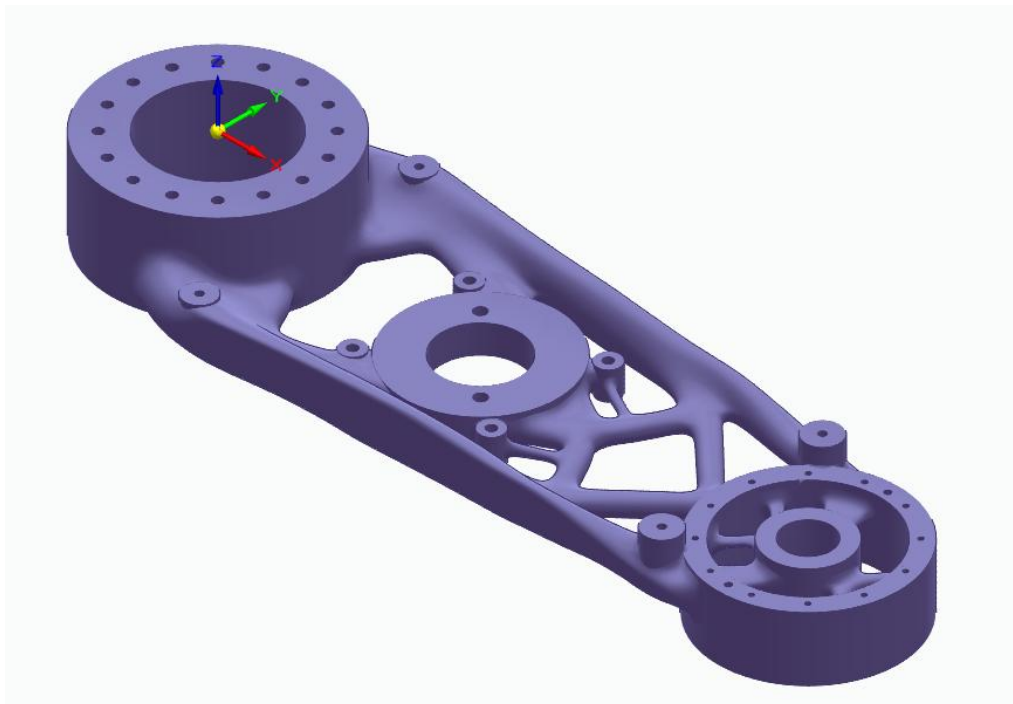


Figura 134. Link 2 optimizado en Solid Edge y adaptado en Altair Inspire (elaboración propia)

Finalmente, la validación del proyecto pasó del entorno virtual a la materialización física de los diseños. El proceso culminó de forma satisfactoria al demostrar la viabilidad de fabricación de ambas geometrías mediante fabricación aditiva. Mientras que la pieza original sirvió para validar el volumen y los contornos en un material de prototipado rápido (PLA), el componente optimizado se fabricó con éxito en Onyx FR-A (nylon reforzado con microfibra de carbono) en la impresora Markforged X7. El resultado físico destaca por una excelente calidad superficial, una alta fidelidad dimensional y una resistencia mecánica estructural óptima, lo que confirma la idoneidad de este flujo de trabajo industrial para la obtención de prototipos funcionales de altas prestaciones.

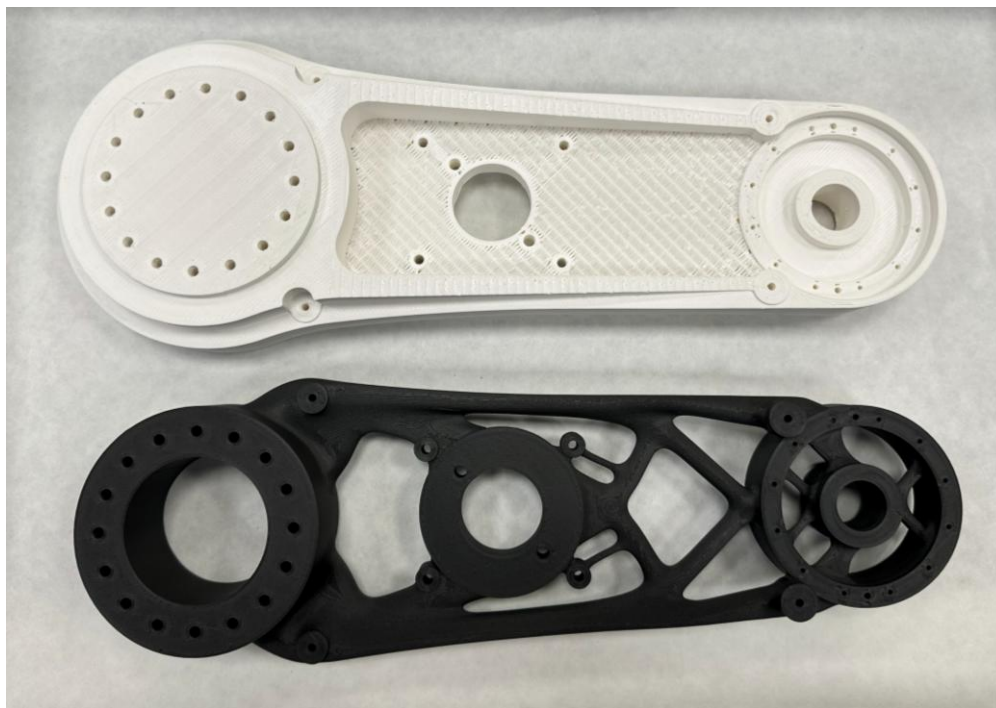


Figura 135. Piezas fabricadas por impresión 3D (elaboración propia)

6.2 ANÁLISIS DE COSTES

El análisis de costes constituye una fase crítica dentro de cualquier proyecto de ingeniería, actuando no solo como un indicador de viabilidad financiera, sino como un elemento conductor y regulador del propio proceso de diseño orientado a la fabricación aditiva. Tras identificar el potencial de la fabricación aditiva y seleccionar el proceso tecnológico adecuado, la etapa de comprobación de costes sirve como un pilar que condiciona el avance del desarrollo. Esta evaluación económica actúa como un filtro estratégico. Si los costes son viables, el flujo permite progresar hacia la definición detallada de los requisitos del proceso, integrando los parámetros específicos de la tecnología y los requisitos de la aplicación en un bucle iterativo de optimización del diseño. En este ciclo de mejora continua se entrelazan la consideración de los límites técnicos de la maquinaria, el diseño de aspectos de integración funcional y las optimizaciones mecánicas, estructurales y topológicas, un proceso de refinamiento guiado por el control de costes que finalmente culmina en la obtención del diseño final optimizado para fabricación aditiva.

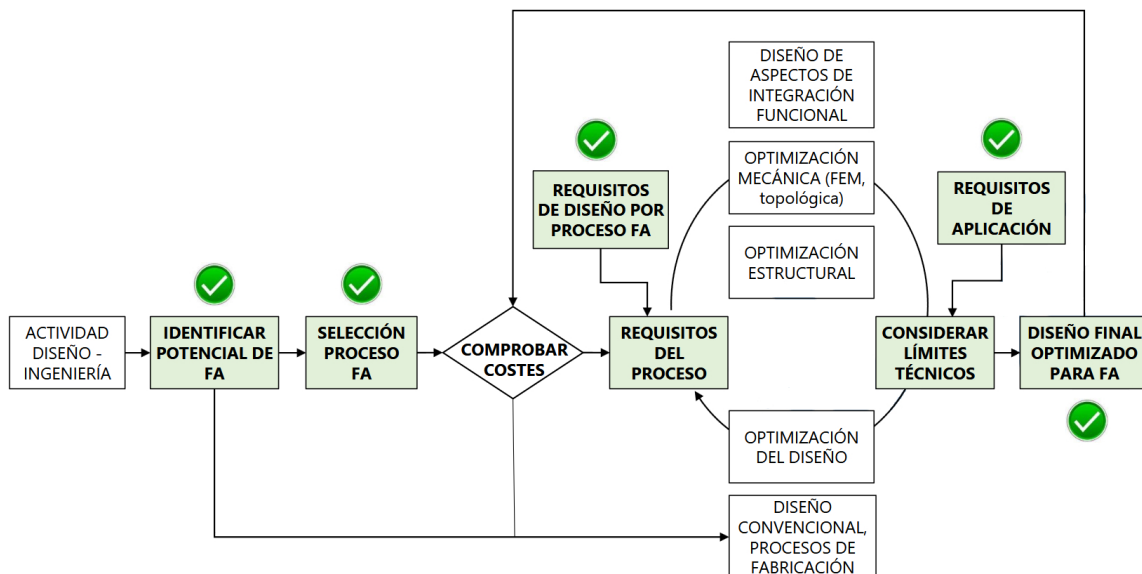


Figura 136. Diagrama de flujo de fabricación aditiva con criterio económico (Prof. Mariano Jiménez

Calzado (ETSI – ICAI))

La gráfica comparativa de curvas de coste de la Figura 137 ilustra el principio económico fundamental que rige la selección entre la fabricación aditiva y los métodos tradicionales en función del tamaño del lote de producción. Para volúmenes reducidos o tiradas unitarias, como el escenario de prototipado de este proyecto, la impresión 3D (curva azul) ofrece un coste por pieza significativamente inferior al evitar los elevados costes fijos de utillaje y preparación de maquinaria característicos de la fabricación convencional (curva roja). A medida que el número de piezas aumenta, la fabricación tradicional amortiza estos costes iniciales gracias a una mayor velocidad de ciclo, alcanzando un punto de equilibrio (breakeven point) a partir del cual se convierte en la opción más económica. Asimismo, el gráfico destaca el impacto de los costes ocultos (representados en las líneas discontinuas), los cuales desplazan el punto de equilibrio hacia la derecha. Esto significa que al contabilizar factores indirectos como el almacenamiento de stock, los plazos de entrega prolongados o los costes de postprocesado complejo, la ventana de viabilidad económica de la impresión 3D se amplía sustancialmente para series cortas y medianas.

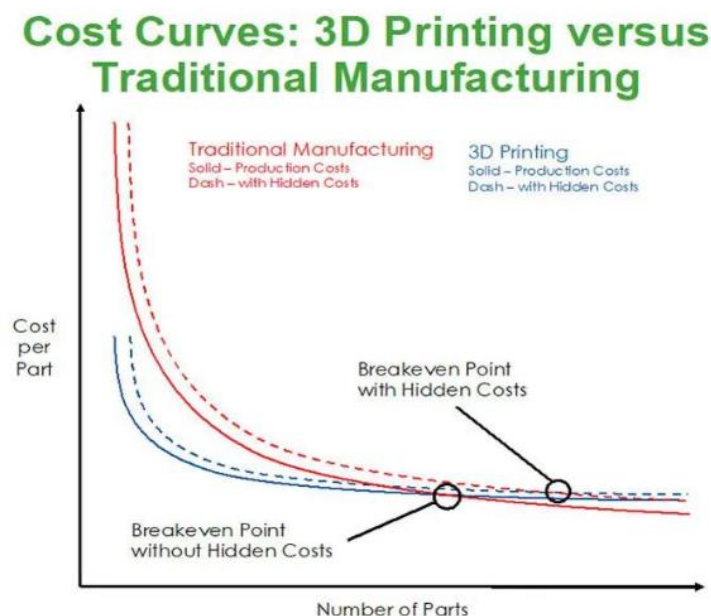


Figura 137. Comparativa costes I3D y fabricación tradicional en función de lote (Prof. Mariano Jiménez

Calzado (ETSI – ICAI))

Con el propósito de materializar esta comprobación de costes y fundamentar las decisiones logísticas del proyecto, en este apartado se presenta un estudio comparativo detallado entre los modelos analíticos de fabricación interna, desarrollados mediante hojas de cálculo personalizadas, y las tarifas comerciales emitidas por plataformas de cotización digital bajo demanda. Para ofrecer una visión global del impacto del rediseño, el análisis se ha estructurado en dos bloques diferenciados. En primer lugar, se evalúa el presupuesto de la variante geométrica original, determinando el coste de su producción interna en la impresora Dynamical 3D DT600+ y contrastándolo con proveedores externos. En segundo lugar, se realiza un estudio homólogo para la pieza optimizada topológicamente, cuantificando su fabricación interna en la impresora de alta gama Markforged X7 y comparándola con servicios de impresión industrial. Esta metodología de evaluación cruzada permitirá, por un lado, validar la solidez de las hipótesis financieras adoptadas en nuestros modelos matemáticos frente a la realidad del mercado, y por otro lado, cuantificar con precisión el beneficio económico y el ahorro de recursos derivados directamente de la optimización geométrica del componente.

6.2.1 PIEZA ORIGINAL

Para evaluar la viabilidad económica del prototipado del Link 2 Original, se ha empleado un modelo de costes basado en la amortización industrial de la impresora 3D FDM Dynamical Tools DT600+. El coste de adquisición de la maquinaria (36.785 €) se ha extraído del dossier bibliográfico oficial de la universidad, estimando un coste de mantenimiento anual indexado del 10% de dicho valor y un periodo de amortización lineal de 5 años. Se asume un régimen de operación estándar para un entorno de laboratorio de 223 días laborables al año con jornadas de 8 horas diarias, lo que resulta en un uso neto de 1784 h/año. El coste horario de amortización de la máquina se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Precio hora máquina} - \text{amort. } [\text{€/h}] = \frac{\text{precio máquina } [\text{€}] + (\text{mant. anual } [\text{€}] \cdot 3)}{\text{años amort. } [\text{años}] \cdot \text{amort. anual } [\text{h/año}]}$$

Se obtiene una tasa base de 5,36 €/h, sobre la cual se aplica un factor de margen comercial de 1,5 para establecer un precio de venta al público (PVP) de 8,04 €/h.

Los parámetros específicos de fabricación se han obtenido directamente del software de laminación (slicer), en nuestro caso Simplify 3D. Debido a que el programa cuantifica el material total integrado, se ha asignado la totalidad del filamento al volumen del modelo, omitiendo el desglose independiente de soportes. El proceso requiere un consumo de 507,37 g de material, utilizando como referencia el coste del filamento PLA suministrado por un distribuidor especializado (Filament2Print), equivalente a 9,99 €/kg (5,07 €/unidad). El tiempo de impresión neto reportado es de 22 horas y 38 minutos (22,63 h). Asimismo, se ha computado una tasa fija de 20 €/h asociada al coste del técnico analista, estimando un tiempo dedicado de 1,00 hora para las tareas de preparación del archivo digital, lanzamiento y postprocesado/desmoldeo de la pieza. Con todo ello, el coste unitario final de fabricación para este prototipo (incluyendo la repercusión de tasas de IVA) se sitúa en 207,08 €.

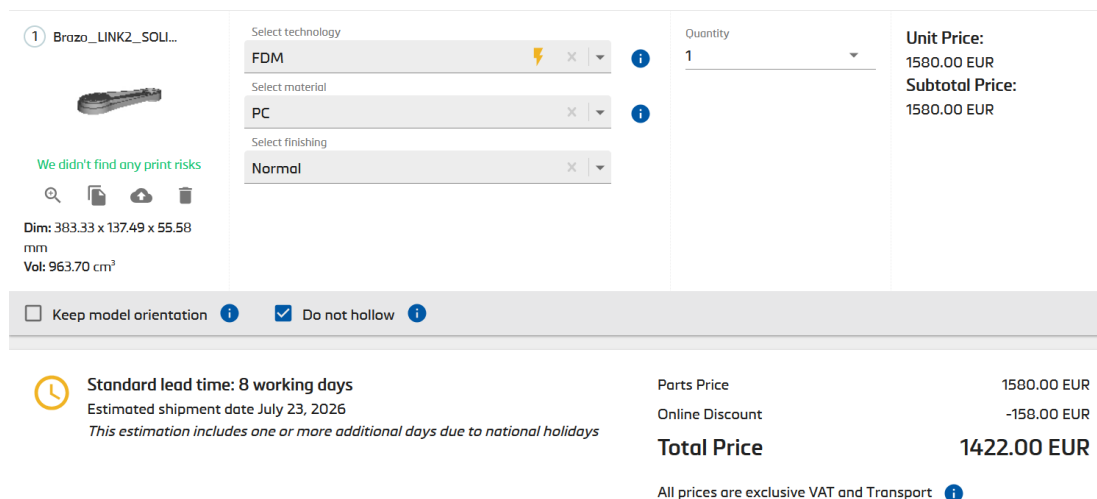
ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM	
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA	
Precio máquina (€)	36.785
Coste mantenimiento anual (€)	3.679
Años de amortización	5
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día	1784
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	5,36
Precio Hora venta-público (€/h)	8,04
DATOS COSTE MATERIAL	
Coste material PLA modelo: (€/kg)	9,99
Coste material PLA soporte: (€/kg)	9,99
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA	
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20

PIEZA Ricardo Hernández Schnelzer - Brazo Link 2 Original		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Solido	Costes parciales
Material modelo (g)	507,37	5,07 €/ud
Soporte modelo (g)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	22,63	182,01 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	1,00	20,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	207,08 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	207,08 €	

Tabla 5. Análisis de costes pieza original (elaboración propia)

Para comparar el coste de fabricación interna estimado en 207,08 € se ha realizado un estudio de mercado consultando diferentes plataformas globales de fabricación bajo demanda, reflejando los resultados una enorme disparidad de precios condicionada por el modelo de negocio del proveedor y la naturaleza técnica del material seleccionado. En primer lugar, la cotización de Materialise Onsite se eleva a 1422,00 €, representando el extremo superior del espectro. Aunque el Policarbonato empleado posee propiedades mecánicas y térmicas superiores al PLA, el coste del material base no justifica por sí solo esta diferencia, sino que la explicación radica en los elevados costes fijos de puesta en marcha de este proveedor premium y las complejas condiciones que exige procesar el PC en tecnología FDM, requiriendo impresoras industriales con cámara calefactada a alta

temperatura para mitigar la contracción térmica o warping. Al tratarse de una única unidad, Materialise repercute todo el coste operativo y de preparación de maquinaria en la pieza, penalizando el prototipo inicial. Por el contrario, las plataformas Xometry, con un precio de 170,79 € en material ABS, y Protolabs Network, con una tarifa de 105,06 €, funcionan bajo un modelo de marketplace distribuido cuyos algoritmos optimizan las bandejas de impresión agrupando pedidos de múltiples clientes en un mismo lote dentro de talleres locales asociados, lo que diluye drásticamente el coste fijo de preparación de la máquina y permite ofrecer tarifas sumamente competitivas para tiradas unitarias, llegando a rebajar el coste de Protolabs a prácticamente la mitad del presupuesto interno.



The screenshot shows the Materialise Onsite pricing interface for a part named "Brazo_LINK2_SOLI...". The interface includes a 3D model of the part, a table of specifications, and a pricing summary.

Specification	Value
Select technology	FDM
Select material	PC
Select finishing	Normal
Quantity	1
Unit Price	1580.00 EUR
Subtotal Price	1580.00 EUR

Additional information: We didn't find any print risks. Dim: 383.33 x 137.49 x 55.58 mm. Vol: 963.70 cm³.

Options: ☐ Keep model orientation, ☒ Do not hollow.

Standard lead time: 8 working days. Estimated shipment date July 23, 2026. This estimation includes one or more additional days due to national holidays.

Item	Price
Parts Price	1580.00 EUR
Online Discount	-158.00 EUR
Total Price	1422.00 EUR

All prices are exclusive VAT and Transport.

Figura 138. Cotización de pieza original en Materialise Onsite (elaboración propia)

☐ 1
 

Brazo_LINK2_...L_SIMPLIFIED.stl
v0

[Revise CAD](#)
[Upload Drawings](#)
[Attach Files](#)
[Remove Part](#)

☐ Repeat Part ⓘ

Quantity - 1 +

[Edit Configuration](#)

Process: 3D Printing
Material: ABS, Color: White, Infill: UltraLight
Measurement:
 383.33 mm × 137.49 mm × 55.58 mm,
 963701.20 mm³ | 15.092 in × 5.413 in × 2.188 in, 58.809 in³
☐ in ☒ mm
Technology: Fused Deposition Modeling (FDM)
Finish: Standard
Threads and Tapped Holes: None
Inserts: None
Inspection: Standard Inspection

Price and Lead Time

\$ Least Expensive Lead Time: 6 business days	\$195.13 ea. \$195.13 \$258.09 (Save \$62.96)
Standard Lead Time: 3 business days	\$260.54 ea. \$260.54 \$339.23 (Save \$78.69)
Fastest Lead Time: 1 business day	\$653.05 ea. \$653.05 \$847.47 (Save \$194.42)

Figura 139. Cotización de pieza original en Xometry con PLA (elaboración propia)

Parts and specifications 3D printing [Change technology](#)

☐ Select all parts

	Specifications	Quantity	Price
	Brazo_LINK2_SOLID_FINAL_SIMPLIFIED.STL 3D printing Prototyping PLA (FDM) As printed Color: White ☐ Infill: 20% Layer height: 200µm	1	US\$120.03 US\$120.03 p/part

[View DFM analysis](#)

383.3 × 137.5 × 55.6 mm
976,745.806 mm³

[Change specifications](#)

Figura 140. Cotización de pieza original en Protolabs Network con PLA (elaboración propia)

Al contrastar estas cotizaciones externas con el cálculo de amortización desarrollado para la Dynamical Tools DT600+ de 207,08 €, se extraen conclusiones estratégicas clave para el proyecto, evidenciando en primer lugar que el coste en propiedad calculado, que incluye un margen comercial de 1,5 y una hora íntegra de ingeniería dedicada en exclusiva al prototipo, resulta ligeramente superior al de las plataformas distribuidas comerciales como Xometry y Protolabs, lo que demuestra que para piezas únicas en materiales estándar la externalización aprovecha economías de escala y de ocupación difíciles de replicar en un entorno universitario de uso intermitente. Asimismo, el hecho de que nuestro cálculo analítico se sitúe en el mismo orden de magnitud que los precios competitivos del mercado de impresión industrial valida la solidez de las hipótesis financieras adoptadas en el modelo de Excel en cuanto a tasas de amortización, mantenimiento y costes laborales. En conclusión, para la fase de prototipado rápido del eslabón, la vía de la fabricación distribuida se presenta como la opción más eficiente económicamente, aunque disponer del modelo de costes de la DT600+ garantiza la autonomía del laboratorio y permite presupuestar con precisión futuros escenarios de producción interna.

ANÁLISIS DE COSTES PIEZA ORIGINAL		
Responsable de impresión	Material	Coste
Fabricación interna (laboratorio ICAI) Impresora DT 600+	PLA	207,08 €
Materialise Onsite	PC	1422,00 €
Xometry	ABS	170,79 €
Protolabs Network	PLA	105,06 €

Tabla 6. Resumen costes pieza original (elaboración propia)

6.2.2 PIEZA OPTIMIZADA

De manera similar a la pieza original, para evaluar la viabilidad económica del prototipo optimizado, se ha desarrollado un modelo de costes basado en la amortización industrial de la impresora 3D Markforged X7, tomando el coste de adquisición de la máquina (66.500 €) del dossier bibliográfico oficial de la universidad. Para el cálculo se asume un coste de mantenimiento anual indexado del 10% de dicho valor, un periodo de amortización lineal de 5 años y un régimen de operación estándar para un entorno de laboratorio de 223 días laborables al año con jornadas de 8 horas diarias, lo que resulta en un uso neto de 1784 h/año. El coste horario de amortización se calcula mediante la fórmula:

$$\text{Precio hora máquina} - \text{amort.} [\text{€/h}] = \frac{\text{precio máquina} [\text{€}] + (\text{mant. anual} [\text{€}] \cdot 3)}{\text{años amort.} [\text{años}] \cdot \text{amort. anual} [\text{h/año}]}$$

Se obtiene una tasa basada de 9,69 €/h, sobre la cual se aplica un factor de margen comercial de 1,5 para establecer un precio de venta al público (PVP) de 14,54 €/h. El coste volumétrico del material se determina dividiendo el precio comercial del filamento (141 €) entre su volumen total (950 cc), lo que resulta en una tasa de 0,15 €/cc, incorporando además al modelo una densidad de empaquetado estimada del 10% y un coste fijo por bandeja de 100,00 €/bandeja. Los datos técnicos de deposición provienen directamente de las especificaciones del fabricante, definiendo una tasa de deposición de 10,37 cc/h y un precio hora de máquina por deposición resultante de 1,539 €/h al multiplicar la tasa de deposición por el coste del material.

Los parámetros de fabricación específicos para el Link 2 Optimizado se han extraído del software de laminación propio de Markforged, Eiger, y al cuantificar este el material total integrado, se ha asignado la totalidad del volumen al modelo omitiendo el desglose independiente de soportes. El proceso requiere un volumen de 337,82 cc de material (equivalente a un coste parcial de 50,14 €/unidad) y un tiempo de impresión neto de 1 día y 10 horas (34,00 h, que computa un coste de máquina de 494,28 €/unidad). Adicionalmente, se computa una tasa fija de 20 €/h asociada al coste del técnico analista, estimando un tiempo dedicado de 0,50 horas (10,00 €) para las tareas conjuntas de

preparación digital en el slicer, lanzamiento y postprocesado/desmoldeo de la pieza. Con la fabricación de una única unidad y la consideración de los costes fijos de la bandeja, el coste unitario final de fabricación interna (incluyendo la repercusión de tasas de IVA) se sitúa en 654,42 €.

ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	66.500	
Coste mantenimiento anual (€)	6.650	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día	1784	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	9,69	
Precio Hora venta-público (€/h)	14,54	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (141 €-950 cc)	0,15	
Densidad de Empaquetado (%)	10,00	
Precio Bandeja (€/bandeja)	100,00	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)	20	
DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN		
Tipo de modelo	Malla	Sólido
Tasa de deposicion (cc/h)	10,37	10,37
Precio hora máquina-deposición (€/h)	1,539126316	1,53912632

PIEZA Ricardo Hernández Schnelzer - Brazo Link 2 Optimizado		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	Opción Sólido	Costes parciales
Material modelo (cc)	337,82	50,14 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	34,00	494,28 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	100,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	10,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	654,42 €/Ud	
Coste total (€) en ICAI + IVA	654,42 €	

Tabla 7. Análisis de costes pieza optimizada (elaboración propia)

Para contrastar el coste de fabricación interna estimado en 654,42 € para la pieza optimizada se ha realizado un estudio de mercado consultando diferentes plataformas globales de fabricación bajo demanda, evidenciando los resultados el fuerte impacto que tienen los materiales técnicos de altas prestaciones en el presupuesto de adquisición unitario. En primer lugar, la cotización de Materialise Onsite se sitúa en el extremo superior con un precio de 729,90 € empleando el material ABS-M30, un coste elevado que responde a la política de tarifas fijas de puesta en marcha de este proveedor premium y a las propiedades mejoradas de dicha variante de ABS industrial. Por su parte, la plataforma Xometry ofrece una tarifa de 143,10 € y Protolabs Network un presupuesto de 117,04 €, aunque en ambos casos estas cotizaciones corresponden a configuraciones básicas utilizando material ABS y PLA respectivamente, que resultan mucho más económicos, pero ofrecen unas prestaciones mecánicas y térmicas significativamente inferiores a las del material compuesto de ingeniería contemplado en nuestro modelo. Con el objetivo de aproximar la comparativa a las exigencias reales del diseño, se evaluó en Protolabs Network la opción de FDM Industrial de altas prestaciones empleando el material compuesto Markforged Onyx original. Aunque el software de la plataforma advirtió que las dimensiones de la pieza excedían las capacidades de su maquinaria disponible, el algoritmo emitió un presupuesto estimado de 523,44 €, una cifra que ya se aproxima de manera más estrecha al coste calculado en nuestro análisis.

1 4_BRAZO_OPTIMIZ...



The model may have printing risks

[VIEW ANALYSIS](#)

Dim: 359.46 x 117.47 x 55.58 mm
Vol: 424.28 cm³

Select technology

FDM

Select material

ABS-M30 - black

Select finishing

Normal

☐ Print this part faster

Quantity

1

Unit Price: 811.00 EUR
Subtotal Price: 811.00 EUR

☐ Keep model orientation

☒ Do not hollow

Standard lead time: 8 working days
Estimated shipment date July 23, 2026
This estimation includes one or more additional days due to national holidays

Parts Price	811.00 EUR
Online Discount	-81.10 EUR
Total Price	729.90 EUR

All prices are exclusive VAT and Transport

Figura 141. Cotización de pieza optimizada en Materialise Onsite (elaboración propia)

1



4_BRAZO_OPTIMIZADO.STL v0

[Revise CAD](#) [Upload Drawings](#) [Attach Files](#) [Remove Part](#)

☐ Repeat Part

Quantity: - 1 +

[Edit Configuration](#)

Process: 3D Printing
Material: ABS, Color: White, Infill: UltraLight

Measurement:
359.46 mm × 117.47 mm × 55.58 mm,
424255.74 mm³ | 14.152 in × 4.625 in × 2.188 in, ☐ in ☒ mm
25.890 in³

Technology: Fused Deposition Modeling (FDM)
Finish: Standard
Threads and Tapped Holes: None
Inserts: None
Inspection: Standard Inspection

Price and Lead Time

Least Expensive Lead Time: 6 business days	\$163.20 ea. \$163.20 ~~\$209.17~~ (Save \$45.97)
Standard Lead Time: 3 business days	\$217.90 ea. \$217.90 ~~\$275.36~~ (Save \$57.46)
Fastest Lead Time: 1 business day	\$546.17 ea. \$546.17 ~~\$688.14~~ (Save \$141.97)

Figura 142. Cotización de pieza optimizada en Xometry en PLA (elaboración propia)

Parts and specifications 3D printing Change technology			
☐ Select all parts	Specifications	Quantity	Price
 View DFM analysis 359.5 × 117.5 × 55.6 mm 440,312.092 mm ³	4_BRAZO_OPTIMIZADO.STL	1	US\$133.47
			US\$133.47 p/part
	3D printing		
	Prototyping PLA (FDM)		
	As printed		
	Color: White ○		
	Infill: 20%		
	Layer height: 200µm		

Figura 143. Cotización de pieza optimizada en Protolabs Network con PLA (elaboración propia)

 1 of your parts contains an error Errors must be resolved before you can lock this quote or place an order Show more			
Parts and specifications 3D printing Change technology			
☐ Select all parts	Specifications	Quantity	Price
 View DFM analysis 359.5 × 117.5 × 55.6 mm 440,312.092 mm ³	4_BRAZO_OPTIMIZADO.STL	1	—
	3D printing		
	Markforged Onyx (Industrial FDM)		
	As printed		
	Color: Black ●		
	Infill: 20%		
	Layer height: 200µm		
 This part is too big to print with Markforged Onyx. We currently support parts of up to 320.0 × 154.0 × 132.0 mm.			

Lead time

Manufactured globally		
Expedited	1 business day	US\$895.41
Standard	2 business days	US\$686.48
Economy	3 business days	US\$596.94

Shipping including customs costs

Next business day	US\$20.00
Estimated delivery	
—	

Shipping address
[Enter shipping address](#)

Figura 144. Cotización de pieza optimizada en Protolabs Network con Onyx FR-A (elaboración propia)

Al comparar estas cotizaciones externas con el modelo desarrollado para la Markforged X7 de 654,42 €, se consolida la validez de las hipótesis financieras planteadas y se justifica la viabilidad del proyecto. La drástica diferencia entre las tarifas de gama baja en PLA (entre 117 € y 143 €) y el presupuesto de FDM Industrial en Onyx (523,44 €) demuestra que el verdadero motor del coste en este escenario no es la geometría, sino la tecnología de impresión y la exclusividad del material compuesto de fibra. Que nuestro cálculo analítico resulte ligeramente superior al escenario industrial de Protolabs se justifica por la inclusión del margen comercial de 1,5, el coste de la hora de ingeniería y, de manera muy notable, el impacto del coste fijo por bandeja de 100,00 € aplicado de forma íntegra a una única pieza. En conclusión, el estudio de mercado confirma que para fabricar piezas definitivas de robótica en materiales avanzados como el Onyx, las ventajas de coste de las economías de escala comerciales se reducen frente a los materiales convencionales, validando que el coste interno calculado es plenamente competitivo y posiciona a la infraestructura de la universidad como una alternativa real, eficiente y autónoma para la producción de componentes de altas prestaciones.

ANÁLISIS DE COSTES PIEZA OPTIMIZADA		
Responsable de impresión	Material	Coste
Fabricación interna (laboratorio ICAI) Impresora Markforged X7	Onyx FR-A	654,42 €
Materialise Onsite	ABS-M30	729,90 €
Xometry	ABS	143,10 €
Protolabs Network	PLA	117,04 €
Protolabs Network	Markforged Onyx	523,44 €

Tabla 8. Resumen costes pieza optimizada (elaboración propia)

Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo de este Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo un estudio detallado del proceso de diseño y optimización topológica aplicado al ámbito de la robótica. Se ha integrado la ingeniería inversa y la optimización topológica iterativa para el aligeramiento de un componente estructural avanzado. Concretamente, se seleccionó un componente de responsabilidad del robot ABB IRB 120, el Brazo Link 2, sobre el cual se ejecutó una metodología completa que comenzó con la captura digital mediante escaneo 3D y la posterior limpieza y procesamiento de la malla de facetas en el software VX Model.

A partir de estos datos, se realizó una reconstrucción paramétrica exacta en SolidWorks para devolver la pieza a un formato geométrico editable. La validación estructural y mecánica del diseño base se contrastó mediante simulación por elementos finitos (FEA) en Solid Edge, plataforma donde también se ejecutó el proceso de optimización topológica iterativa. Para resolver las complejas transiciones orgánicas generadas por el algoritmo, se recurrió a Altair Inspire, logrando un refinamiento geométrico avanzado que preservó las zonas críticas de montaje y las coronas de agujeros de los actuadores del robot, reduciendo de manera drástica la masa del eslabón sin comprometer su rigidez estructural ni su funcionalidad cinemática.

Para validar la viabilidad industrial del diseño optimizado, se recurrió a la tecnología de fabricación aditiva por deposición de filamento fundido (FDM). Las geometrías orgánicas resultantes del refinamiento se demostraron plenamente replicables y fabricables, validándose mediante un minucioso análisis económico estructurado en dos fases. En la primera fase, se evaluó la pieza original simulando su producción en la impresora Dynamical Tools DT600+ en material PLA, y en la segunda, se presupuestó la variante optimizada en la plataforma de alta gama Markforged X7 empleando un material compuesto avanzado como el Onyx. Los modelos analíticos de amortización desarrollados en Excel, que situaron los costes en 207,08 € y 654,42 € respectivamente, se contrastaron frente a plataformas de cotización bajo demanda como Xometry, Protolabs Network y Materialise Onsite. Esta comparativa cruzada demostró que, mientras que la fabricación tradicional y los agregadores

digitales en PLA son altamente eficientes para geometrías masivas o tiradas convencionales, la optimización topológica combinada con materiales técnicos como el Onyx compensa los costes fijos de la maquinaria de alta gama, reduciendo significativamente el consumo de material y ofreciendo una alternativa interna competitiva para la producción autónoma de componentes robóticos finales de altas prestaciones.

No obstante, a pesar del éxito alcanzado en la obtención de los demostradores funcionales, en condiciones reales de servicio un brazo robótico de estas características se encuentra sometido a solicitaciones mecánicas dinámicas continuas, fatiga y requisitos de tolerancia dimensional muy estrictos. Las piezas impresas en este TFG deben interpretarse como modelos de validación geométrica y de proceso dentro del ciclo de diseño, pero abren la puerta a diversas líneas de investigación futura para su implementación definitiva en un entorno operativo real. A futuro, se plantea la necesidad de evaluar el comportamiento del eslabón optimizado utilizando tecnologías de impresión 3D metálica o mediante sistemas de deposición con refuerzo de fibra continua (CFF) de carbono pura para aproximar los límites elásticos de la pieza a los de un componente industrial de alta responsabilidad.

Asimismo, dado que las impresoras de tecnologías de fusión en lecho de polvo metálico o de materiales compuestos avanzados presentan costes de adquisición muy elevados, se propone como línea de investigación prioritaria la realización de un estudio de viabilidad técnica y económica comparativo. Este análisis deberá determinar si resulta más eficiente recurrir a la externalización de la fabricación aditiva avanzada o si, por el contrario, es mecánicamente superior y económicamente viable adaptar procesos tradicionales combinados, tales como la fundición mediante moldes impresos en arena o cera perdida complementada con un posterior mecanizado CNC de precisión para las coronas de agujeros y las zonas de asiento de los rodamientos. Por último, se plantea como trabajo futuro la fabricación física de un prototipo del eslabón optimizado mediante estos métodos alternativos para someterlo a ensayos experimentales destructivos y de fatiga en un banco de pruebas real, permitiendo correlacionar de manera empírica los datos de deformación físicos con los resultados predictivos obtenidos en los modelos virtuales de simulación por elementos finitos.

Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Hägele, K. Nilsson, J. N. Pires, and R. Bischoff, “Industrial Robotics,” in *Springer Handbook of Robotics*, B. Siciliano and O. Khatib, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2016, pp. 1385–1422. doi: 10.1007/978-3-319-32552-1_54.
- [2] P. Yao, K. Zhou, Y. Lin, and Y. Tang, “Light-Weight Topological Optimization for Upper Arm of an Industrial Welding Robot,” *Metals*, vol. 9, no. 9, p. 1020, Sep. 2019, doi: 10.3390/met9091020.
- [3] M. Kumaran and V. Senthilkumar, “Generative Design and Topology Optimization of Analysis and Repair Work of Industrial Robot Arm Manufactured Using Additive Manufacturing Technology,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 1012, no. 1, p. 012036, Jan. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1012/1/012036.
- [4] S. Junk, B. Klerch, L. Nasdala, and U. Hochberg, “Topology optimization for additive manufacturing using a component of a humanoid robot,” *Procedia CIRP*, vol. 70, pp. 102–107, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.03.270.
- [5] ABB Robotics, “Especificaciones del producto IRB 120,” Technical Report 3HAC035960-005, 2023. [Online]. Available: <https://library.e.abb.com/public/f1b3a6bc1c6748998c6efaca9bb86101/3HAC035960%20PS%20IRB%20120-es.pdf?x-sign=MNT9NwE8VeumxBWHWxc1blkU+JihN+k3LWX0bFrYlOVv8YqgpyC2Uz3Ryknc2Vi/>
- [6] S. Rahimifard and H. Trollman, “UN Sustainable Development Goals: an engineering perspective,” *Int. J. Sustain. Eng.*, vol. 11, no. 1, pp. 1–3, Jan. 2018, doi: 10.1080/19397038.2018.1434985.
- [7] “La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible,” Desarrollo Sostenible. Accessed: Jul. 12, 2026. [Online]. Available: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>
- [8] “ISO 8373:2012(en), Robots and robotic devices — Vocabulary.” Accessed: Apr. 07, 2026. [Online]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/es/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en>
- [9] K. Mathia, *Robotics for Electronics Manufacturing: Principles and Applications in Cleanroom Automation*. Cambridge University Press, 2010.
- [10] A. Gasparetto and L. Scalera, “From the Unimate to the Delta Robot: The Early Decades of Industrial Robotics,” in *Explorations in the History and Heritage of Machines and Mechanisms*, B. Zhang and M. Ceccarelli, Eds., Cham: Springer International Publishing, 2019, pp. 284–295. doi: 10.1007/978-3-030-03538-9_23.
- [11] “Development of human–robot cooperation.” ResearchGate. Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Development-of-human-robot-cooperation_fig1_339425084
- [12] M. Veloso, J. Biswas, B. Coltin, and S. Rosenthal, “CoBots: Robust Symbiotic Autonomous Mobile Service Robots”.

- [13] C. E. Staff, "Top 5 industrial robot trends for 2024," Control Engineering. Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: <https://www.controleng.com/top-5-industrial-robot-trends-for-2024/>
- [14] "Kinematic configuration of an ABB IRB120 robot. a Solid model. b...," ResearchGate. Accessed: Jun. 18, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Kinematic-configuration-of-an-ABB-IRB120-robot-a-Solid-model-b-Linkage-coordinate-system_fig1_377722992
- [15] M. Granja, N. Chang, V. Granja, M. Duque, and F. Llulluna, "Comparison between Standard and Modified Denavit-Hartenberg Methods in Robotics Modelling," presented at the The 2nd World Congress on Mechanical, Chemical, and Material Engineering, Jul. 2016. doi: 10.11159/icmie16.118.
- [16] "Figure 1. The attached frames and D-H parameters of robot IRB 120.," ResearchGate. Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/The-attached-frames-and-D-H-parameters-of-robot-IRB-120_fig1_345359781
- [17] "2024-09-26_Robótica Industrial 03_D-H.pdf." Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: https://sifo.comillas.edu/pluginfile.php/5014667/mod_resource/content/7/2024-09-26_Rob%C3%B3tica%20Industrial%2003_D-H.pdf
- [18] "2025-09-29_Robótica Industrial 04_PUMA.pdf." Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: https://sifo.comillas.edu/pluginfile.php/5014671/mod_resource/content/5/2025-09-29_Rob%C3%B3tica%20Industrial%2004_PUMA.pdf
- [19] S. Kucuk and Z. Bingul, "The inverse kinematics solutions of industrial robot manipulators," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, 2004. ICM '04.*, Jun. 2004, pp. 274–279. doi: 10.1109/ICMECH.2004.1364451.
- [20] A. Haleem *et al.*, "Exploring the potential of 3D scanning in Industry 4.0: An overview," *Int. J. Cogn. Comput. Eng.*, vol. 3, pp. 161–171, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.ijcce.2022.08.003.
- [21] "Servicio de Ingeniería Inversa | Qué es y Cómo Funciona | Maquinaria y Componentes." Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: <https://maquinariaycomponentes.com/procesos/ingenieria-inversa/>
- [22] R. H. Helle and H. G. Lemu, "A case study on use of 3D scanning for reverse engineering and quality control," *Mater. Today Proc.*, vol. 45, pp. 5255–5262, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.828.
- [23] B. Szabó and I. Babuška, *Finite Element Analysis: Method, Verification and Validation*. John Wiley & Sons, 2021.
- [24] "IJESIT201503_24-libre.pdf." Accessed: Jul. 09, 2026. [Online]. Available: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/44371406/IJESIT201503_24-libre.pdf?1459742975=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DIJESIT.pdf&Expires=1783556078&Signature=d8G8hbN2qdmlZSIKPnvXKLGqnebpaoJqoRNDS9-Wve6LZ0hJu5DD96Ma5COyYPQTvd7VE5UzCyN4d2KICx13LlyafPo4-1Poy61KtILxOZuUEIEYPwsDDuc~0wMcmrbv5lh1p30gYvHnBibgAaV5G61bV1lO2s2oGJCUW14jfibSgH7eYa35OaELLC8CMY0mStHvll6qP1Wr1PE8BWwbIxIGQW

- d0SKXaK4FG~zvYeLLP4uwMzyCi7GrLDfRi2I0uPXZX~Y7hUdbe2XFGdEXGAoIwqoBBLurGesEO8OoqUcFI0dhzeemHUMIeU2bEvJl9ym2a4BIKyVfJmbPLAys~Ow__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- [25] “What Is FEA | Finite Element Analysis? (Ultimate Guide) | SimScale.” Accessed: Jul. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.simscale.com/docs/simwiki/fea-finite-element-analysis/what-is-fea-finite-element-analysis/>
- [26] E. Tyflopoulos, F. D. Tollnes, M. Steinert, and A. Olsen, “State of the art of generative design and topology optimization and potential research needs,” in *DS 91: Proceedings of NordDesign 2018, Linköping, Sweden, 14th - 17th August 2018*, 2018. Accessed: Jul. 09, 2026. [Online]. Available: https://www.designsociety.org/publication/40924/state_of_the_art_of_generative_design_and_topology_optimization_and_potential_research_needs
- [27] “Performing Topology Optimization with the Density Method,” COMSOL. Accessed: Jul. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/performing-topology-optimization-with-the-density-method>
- [28] N. Ath. Kallioras and N. D. Lagaros, “DzAIN: Deep learning based generative design,” *Procedia Manuf.*, vol. 44, pp. 591–598, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.02.251.
- [29] I. E. Khadiri, M. Zemzami, N.-Q. Nguyen, M. Abouelmajd, N. Hmina, and S. Belhouideg, “Topology optimization methods for additive manufacturing: a review,” *Int. J. Simul. Multidiscip. Des. Optim.*, vol. 14, p. 12, 2023, doi: 10.1051/smdo/2023015.
- [30] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, and M. Dolen, “The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0,” *Procedia Manuf.*, vol. 11, pp. 545–554, Jan. 2017, doi: 10.1016/j.promfg.2017.07.148.
- [31] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, “An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications,” *Procedia Manuf.*, vol. 35, pp. 1286–1296, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2019.06.089.
- [32] “What is FDM 3D Printing?,” HLH Rapid. Accessed: Jul. 09, 2026. [Online]. Available: <https://hlhrapid.com/knowledge/what-is-fdm-3d-printing/>
- [33] V. G. Gokhare and D. D. N. Raut, “A Review paper on 3D-Printing Aspects and Various Processes Used in the 3D-Printing,” *Int. J. Eng. Res.*, vol. 6, no. 06, 2017.
- [34] “ISO 17296-2: Procesos de Fabricación Aditiva | PDF | Organización internacional para la estandarización.” Accessed: Jul. 11, 2026. [Online]. Available: <https://es.scribd.com/document/635606301/EX-UNE-EN-ISO-17296-2-2017>
- [35] F. Calignano *et al.*, “Overview on Additive Manufacturing Technologies,” *Proc. IEEE*, vol. 105, no. 4, pp. 593–612, Apr. 2017, doi: 10.1109/JPROC.2016.2625098.
- [36] “Temas 7-Fabricación Aditiva-vMJC01-OK-2122.pdf.” Accessed: Jul. 11, 2026. [Online]. Available: https://sifo.comillas.edu/pluginfile.php/4611343/mod_resource/content/0/Temas%207-Fabricaci%C3%B3n%20Aditiva-vMJC01-OK-2122.pdf
- [37] J. R. C. Dizon, C. C. L. Gache, H. M. S. Cascolan, L. T. Cancino, and R. C. Advincula, “Post-Processing of 3D-Printed Polymers,” *Technologies*, vol. 9, no. 3, p. 61, Sep. 2021, doi: 10.3390/technologies9030061.

- [38] “ABB IRB 120 - Robots Done Right.” Accessed: Jun. 20, 2026. [Online]. Available: <https://robotsdoneright.com/ABB/100-Series/ABB-IRB-120.html>
- [39] “Figure 14: Workspace of a 6 DOF industrial robot, model ABB IRB120 [73],” ResearchGate. Accessed: Jul. 04, 2026. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Workspace-of-a-6-DOF-industrial-robot-model-ABB-IRB120-73_fig14_337181731
- [40] L. N. Truc and T. Nguyen, “Quasi-physical modeling of robot IRB 120 using Simscape Multibody for dynamic and control simulation,” *Turk. J. Electr. Eng. Comput. Sci.*, vol. 28, pp. 1949–1964, Jul. 2020, doi: 10.3906/elk-1909-131.
- [41] “Product manual - IRB 120”.
- [42] Federación Española de Fundidores (FEJOTA), “Aleaciones para fundición.” [Online]. Available: <https://fundicion.fejota.com/aleaciones.pdf>
- [43] S. A. Kouritem, M. I. Abouheaf, N. Nahas, and M. Hassan, “A multi-objective optimization design of industrial robot arms,” *Alex. Eng. J.*, vol. 61, no. 12, pp. 12847–12867, Dec. 2022, doi: 10.1016/j.aej.2022.06.052.
- [44] L. Srinivas G and A. Javed, “Topology Optimization of KUKA KR16 Industrial Robot Using Equivalent Static Load Method,” in *2021 IEEE International IOT, Electronics and Mechatronics Conference (IEMTRONICS)*, Apr. 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/IEMTRONICS52119.2021.9422633.
- [45] S. Erhart and S. Hirche, “Internal Force Analysis and Load Distribution for Cooperative Multi-Robot Manipulation,” *IEEE Trans. Robot.*, vol. 31, no. 5, pp. 1238–1243, Oct. 2015, doi: 10.1109/TRO.2015.2459412.
- [46] D. Kelly, C. Reidsema, A. Bassandeh, G. Pearce, and M. Lee, “On interpreting load paths and identifying a load bearing topology from finite element analysis,” *Finite Elem. Anal. Des.*, vol. 47, no. 8, pp. 867–876, Aug. 2011, doi: 10.1016/j.finel.2011.03.007.
- [47] K. Marhadi and S. Venkataraman, “Comparison of Quantitative and Qualitative Information Provided by Different Structural Load Path Definitions,” *Int. J. Simul. Multidiscip. Des. Optim.*, vol. 3, no. 3, pp. 384–400, Jul. 2009, doi: 10.1051/ijsmdo/2009014.
- [48] “Optimización Topológica,” Estudio de Ingeniería y Tecnología Avanzada S.L. Accessed: Jul. 11, 2026. [Online]. Available: <https://eitaingenieros.com/optimizacion/>
- [49] “HandySCAN 3D | Metrology-Grade Handheld 3D Laser Scanner | Creaform.” Accessed: Jul. 07, 2026. [Online]. Available: <https://www.creaform3d.com/Products/Portable-3D-scanners/Portable-3D-scanner-HandySCAN-3D>
- [50] “HandySCAN 3D | Silver Series,” Proto3000. Accessed: Jun. 24, 2026. [Online]. Available: <https://proto3000.com/product/creaform-handyscan-3d-scanners/>
- [51] “Everything You Want To Know about 3D Scanning Markers,” GoMeasure3D. Accessed: Jul. 08, 2026. [Online]. Available: <https://shop.gomeasure3d.com/blogs/articles/3d-scanning-basics-everything-you-want-to-know-about-3d-scanning-markers>
- [52] L. C, “SLS, la nueva impresora 3D de Dynamical Tools en Formnext,” 3Dnatives. Accessed: Jul. 09, 2026. [Online]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/dynamical-tools-en-formnext-141120172/>

-
- [53] “X7™.” Accessed: Jul. 11, 2026. [Online]. Available: <https://markforged.com/es/3d-printers/x7>

Capítulo 9. ANEXOS

9.1 ANEXO I. ESPECIFICACIONES DYNAMIC TOOLS DT600+



ESPECIFICACIONES DT 600



Electrónica

Alimentación	240V, 50-60Hz
Máximo consumo de energía	3Kw/h
Conectividad	Wifi, Ethernet, Hot Spot, Mobile phone interface
Tipo de Drivers	Industrial Stepper Driver
Tipo de Motor	Industrial Stepper motor
Interface	7" Touch Screen LCD
Procesador	QuadCore 1,6 GHz

Datos de impresión

Precisión de fabricación	Standard ISO 2678-1
Diámetro del filamento	1.75mm
Software	Simplify 3D
Tipos de archivos	STL/OBJ/AMF
Diámetro de cabezal	0.4
*Otros diámetros opcionales	0.2, 0.6, 0.8, 1.0, 1.2
Extrusor	Doble cabezal independiente
Modos de impresión	Twin Mode - Dual Mode - Single Mode
Materiales	Materiales técnicos como ABS, ASA, HIPS, PC, PP, EP, Wood, Flex, Fibra de carbono, conductivos o magnéticos.

Mecánica

Temperatura máxima de superficie de impresión	150° c
Temperatura máxima de extrusor	500° c.
Estructura de aluminio anodizado	
Sistema de extracción rápida de la superficie de impresión	
Ejes X/Y anti-backlash	
Husillos de bolas con tuerca flotante	
Sistema de guiado lineal de alta precisión	
Asistente de alineación de cabezales	
Sistema de fabricación modular para un bajo mantenimiento	

Dimensiones

Tamaño de Impresora	1145X790X930 mm.
Volumen de construcción	600X450X450 mm.

Hotend con separación térmica de titanio
Entorno calefactado - Temperatura interior controlada.


Wi-Fi


Protección de potencia


Procesador 1,6 GHz


Hot-End hasta 500°


Doble cabezal independiente


Fabricación híbrida


Cámara de monitorización


Sistema modular


Nivelación asistida


Entorno calefactado & HB


Notificación PUSH


Mecánica de precisión

9.2 ANEXO II. ESPECIFICACIONES MARKFORGED X7



Propiedades de la impresora	Proceso	Fabricación con filamento fundido, fabricación con filamento continuo
	Volumen de construcción	330 x 270 x 200 mm
	Peso	48 kg
	Tamaño de la máquina	584 x 483 x 914 mm
	Lecho de impresión	Acoplamiento cinemático, plano con una precisión de 80 µm
	Láser	Inspección durante el proceso, calibración de la impresión activa, nivelación del lecho
	Sistema de extrusión	Extrusor de segunda generación, detección de falta de plástico y fibra
	Alimentación	100-240 V CA, 150 W (pico 2 A)
	Módulo de RF	Banda de frecuencias 2,4 GHz, estándar Wi-Fi 802.11 b/g/n
Materiales	Plásticos disponibles	Onyx, Onyx retardante de llama (FR), Onyx ESD, Nylon White, P-PLA, S-TPU 95A**
	Fibras disponibles	Fibra de carbono, fibra de carbono retardante de llama (FR), fibra de vidrio, fibra de aramida (Kevlar®), fibra de vidrio HSH
	Resistencia a la tracción	800 MPa (25,8 veces más que el ABS, 2,6 veces más que el aluminio 6061-T6)*
	Módulo de elasticidad a la tracción	60 GPa (26,9 veces más que el ABS, 0,87 veces más que el aluminio 6061-T6)*
Propiedades de las piezas	Altura de capa	100 µm predeterminada, 50 µm mínima, 250 µm máxima
	Relleno	Relleno de celdas cerradas: varias geometrías disponibles
Software	Eiger Cloud	Laminador, gestión de piezas/lotos (más opciones disponibles a un coste adicional)
	Seguridad	Autenticación de dos factores, acceso del administrador de la organización, inicio de sesión único
	Blacksmith	Plataforma de fabricación adaptativa (a un coste adicional)

SOFTWARE: Con el control automático de versiones, la gestión automática de múltiples impresoras y la infraestructura de colaboración basada en la nube, Eiger es el software de impresión 3D más avanzado del mundo, diseñado para que la producción sea lo más sencilla posible, Eiger le permite imprimir materiales plásticos, metálicos y compuestos directamente desde su navegador.

9.3 ANEXO III. MATERIALES DE IMPRESIÓN



The Filament

PLA - THE FILAMENT

Referencia: THEFIL-PLA-TWHIT-175-1000

9,99 € 11,75 € Sin IVA

Diámetro: 1.75 mm

Formato: Bobina 1 Kg

Color: Blanco - Traffic White

Ver todas las opciones

Ver más opciones



polymaker

PC-FR (IGNÍFUGO) POLYMAKER

Referencia: PC-FR-POLYMAKER-BLACK-285-1000

42,46 € 49,95 € Sin IVA

Diámetro: 2.85 mm

Formato: Bobina 1 Kg

Descuentos por volumen

Compra 10 unidades Ahorra un 10%	449,55 € Sin IVA Precio unidad 44,95 € 49,95 €
Compra 15 unidades Ahorra un 12%	659,34 € Sin IVA Precio unidad 43,96 € 49,95 €



3DXTECH

OBSIDIAN PA6+CF (ALTERNATIVA ONYX MARKFORGED)

Referencia: 3DXTECH-OBS-PA6CF-175-750

99,99 € Sin IVA

Diámetro: 1.75 mm

Formato: Bobina 750 g

Color: Negro

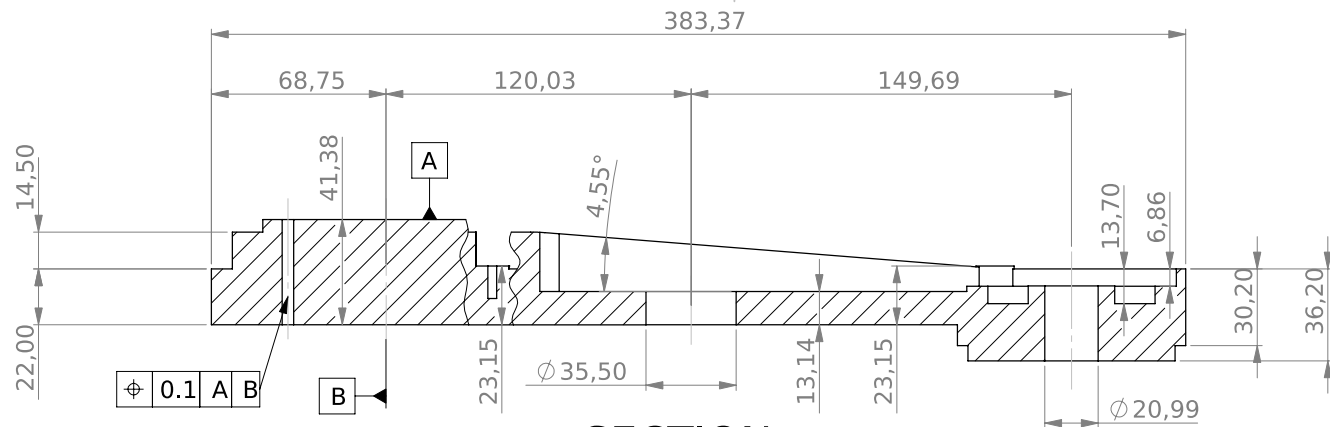
Ver todas las opciones

Descuentos por volumen

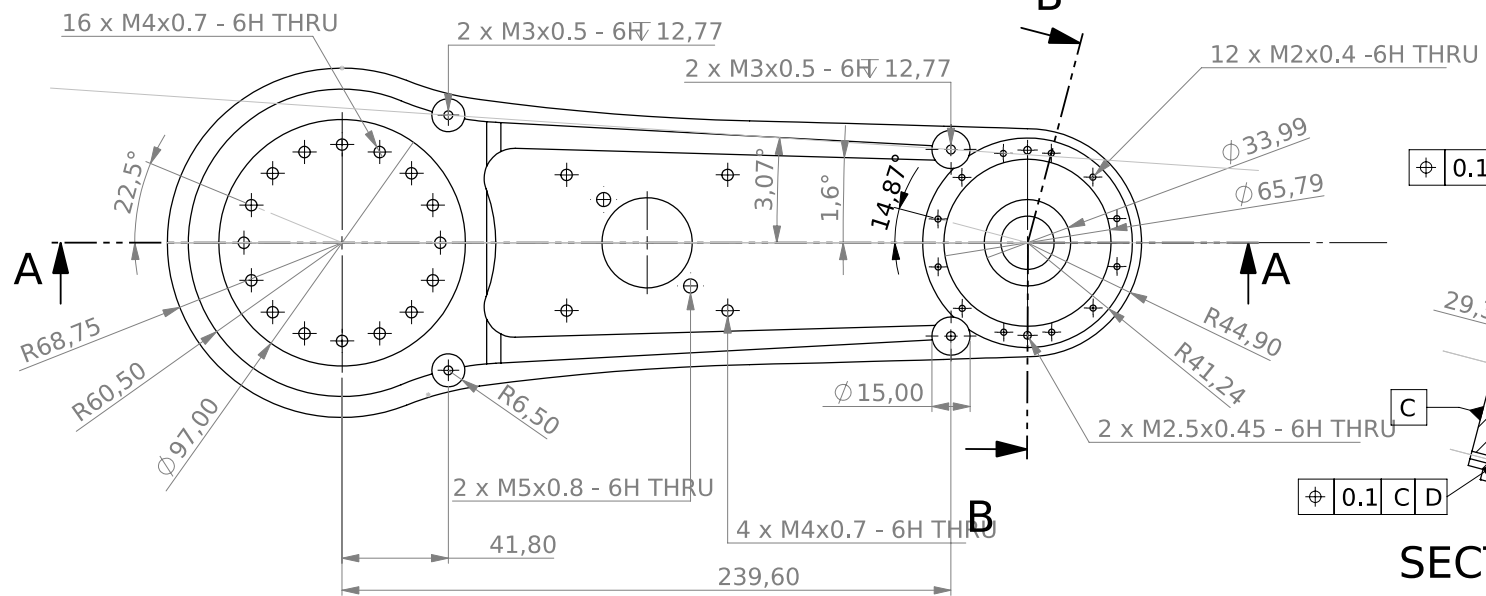
9.4 ANEXO IV. TABLA DE ALEACIONES DE ALUMINIO PARA FUNDICIÓN

Designación Corta		L-2520	L-2521	L-2530	L-2551	L-2560	L-2561	L-2570	L-2610	L-2620	L-2630	L-2631	L-2640	L-2651
Densidad a 20 °C	Kg / dm ³	2,65	2,63	2,67	2,7	2,68	2,65	2,68	2,75	2,79	2,75	2,70	2,67	2,68
Intervalo de fusión	°C	575 a 585	570 a 585	570 a 590	535 a 565	555 a 590	555 a 585	555 a 625	515 a 615	515 a 610	510 a 610	510 a 610	525 a 580	555 a 615
Contracción al solidificar	%	1,1	1,1	1,1	1,2	1,2	1,2	1,3	1,3	1,3	1,2	1,2	1,1	1,2
Coefficiente de dilatación	x 10 ⁻⁶ K ⁻¹	20,0	20,5	20,0	19,5	20,0	21,0	23,0	21,0	21,5	21,5	21,5	20,0	21,5
Conductividad térmica	W / m x K	146 a 167	125	146 a 163	117 a 154	138 a 159	125	146 a 180	125 a 159	113 a 125	109	109	138	151 a 167
Conductividad eléctrica	mW x cm ² / cm	4,5 a 5,0	5,5	4,4 a 5,0	5,0 a 6,0	4,5 a 5,0	5,5	4,5 a 5,3	4,5 a 6,0	5,5 a 6,5	7,5	7,5	5,2	4,0 a 4,8
Resistencia a la tracción, R _m	N / mm ²	150 a 170	170	150 a 170	190 a 270	160 a 250	180	125 a 250	130 a 280	145 a 160	170	170	180	140 a 260
Límite elástico, Rp0,2%	N / mm ²	70 a 80	-	80 a 90	-	80 a 200	-	80 a 180	70 a 230	80 a 90	100	100	-	80 a 220
Módulo elasticidad	N / mm ²	75.000	75.000	75.000	76.000	75.000	75.000	72.000	72.000	72.000	72.500	72.500	76.000	72.600
Alargamiento	%	4 a 5	2	1 a 2	-	2 a 3,5	1	1 a 2	1 a 2	1	1	1	1	1 a 2,5
Dureza Brinell	-	50 a 55	-	50 a 55	80 a 125	80 a 90	-	55 a 95	65 a 100	70 a 75	75	75	-	50 a 90
Designación simbólica		Al-12Si	Al-12SiCuFe	Al-12SiCu	Al-10SiNi	Al-12SiMg	Al-10SiMgFe	Al-5SiMg	Al-5Si3Cu	Al-6Si4Cu	Al-9Si3Cu3ZnFe	Al-9Si3CuZnFe	Al-12Si2Cu	Al-7SiMg
Si	%	13,5 10,5	13,5 11,0	13,5 10,5	13,0 11,0	10,5 9,0	11,0 9,0	5,5 4,0	6,0 4,0	7,5 5,5	11,0 8,0	11,0 8,0	13,0 11,0	7,5 6,5
Fe	%	0,65	1,3	0,80	0,80	0,60	1,0	0,60	0,80	1,3	1,3	1,3	1,0	0,55
Cu	%	0,15	1,0	1,0	0,50 1,50	0,10	0,10	0,10	2,0 4,0	3,0 5,0	2,0 4,0	2,0 4,0	1,75 2,50	0,20
Mn	%	0,55	0,50	0,05 0,55	0,3	0,30 0,50	0,55	0,60	0,30 0,70	0,20 0,60	0,55	0,55	0,50	0,35
Mg	%	0,10	0,20	0,35	0,70 1,50	0,20 0,40	0,20 0,50	0,50 0,80	0,15	0,10 0,30	0,05 0,55	0,05 0,55	0,30	0,20 0,65
Ni	%	0,10	0,50	0,30	0,50 1,50	0,10	0,15	0,10	0,30	0,30	0,55	0,55	0,30	0,15
Zn	%	0,15	0,50	0,55	0,20	0,10	0,15	0,10	0,50	2,00	3,00	1,20	1,50	0,15
Ti	%	0,20	0,20	0,20	0,20	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,25	0,25	0,10	0,05 0,25
Pb	%	0,10	0,15	0,20	0,10	0,05	0,15	0,10	0,10	0,20	0,35	0,35	0,15	0,15
Sn	%	0,05	0,10	0,10	0,10	0,05	0,05	0,05	0,05	0,10	0,25	0,25	0,10	0,05
Al	%	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto	Resto
Gran Bretaña (BS) ,		LM 6	-	LM 20	LM 13	LM 2	-	LM 8	LM 4	LM 21	LM 24	-	-	LM 25
Francia (NF) ,		A-S 13-Y	-	A-S 12-1	A 12 UN	A-S 10 G	AS 10 G-Y4	A-SAG-Y	A-S5 U	A-S5UZ	AS9U3	A-S9U3	-	A-S7G
Alemania (DIN) ,		GD-AlSi12	GD-AlSi12(Cu)	-	-	G-AlSi 10 Mg	GD-AlSi 10 (Cu)	G-AlSi 5 Mg	-	G-AlSi6Cu4	G-AlSi9Cu3	-	-	-
España (UNE) , 1706-98		EN AC-44100	EN AC-47100	EN AC-47000	EN AC-48000	EN AC-43000	EN AC-43400	-	EN AC-45200	EN AC-45000	EN AC-46500	EN AC-46000	-	EN AC-42000

9.5 ANEXO V. PLANO DETALLADO DE LA PIEZA ORIGINAL



SECTION A-A



SECTION B-B

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES ISO 2768 - m,K
LINEAR:
ANGULAR:



DEBURR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

REVISION

SCALE: 1:1

TITLE:

Link 2
Simplificado

DWG NO.

PART_LINK2_SIM_01

A3

MATERIAL:

EN AC-4300
Al-12SiMg

WEIGHT:

SHEET 1 OF 1

NAME	SIGNATURE	DATE
RHS	<i>[Signature]</i>	10/07/26
CHK'D		
APPV'D		
MFG		
Q.A		



