COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

APLICACIÓN DEL DISEÑO LIGERO GENERATIVO PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA Y EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE COMPONENTES

Autor: Elena Bengoa Rico

Director: Mariano Jiménez Calzado

Codirector: Xavier Soldani

Madrid

Julio de 2025

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

APLICACIÓN DEL DISEÑO LIGERO GENERATIVO PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA Y EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE COMPONENTES

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el

curso académico 2024/25 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

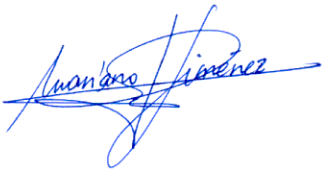
El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Fdo.: Elena Bengoa Rico Fecha: 10 / 07 / 2025

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado Fecha: 10 / 07 / 2025

EL CODIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.: Xavier Soldani Fecha: 10 / 07 / 2025

COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA
ICAI

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

APLICACIÓN DEL DISEÑO LIGERO GENERATIVO PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA Y EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE COMPONENTES

Autor: Elena Bengoa Rico

Director: Mariano Jiménez Calzado

Codirector: Xavier Soldani

Madrid

Julio de 2025

APLICACIÓN DEL DISEÑO LIGERO GENERATIVO PARA LA REDUCCIÓN DE LA HUELLA ECOLÓGICA Y EL INCREMENTO DE LA EFICIENCIA DE COMPONENTES

Autor: Bengoa Rico, Elena.

Director: Jiménez Calzado, Mariano

CoDirector: Soldani, Xavier

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

En el presente proyecto se explora el impacto que tiene en la huella de carbono la aplicación del diseño generativo en una biela de acero AISI 4340. El estudio parte de una biela escaneada en 3D que es procesada mediante herramientas de ingeniería inversa para obtener un modelo en CAD. Se realiza un análisis de elementos finitos (FEA) del modelo para evaluar el comportamiento bajo carga y se realiza posteriormente una optimización topológica (OT) del modelo. Se valida su comportamiento bajo carga y se fabrica un prototipo para validación de montaje con tecnología de polvo. También se analizan otras tecnologías para después analizar la reducción de masa y el impacto en la huella de carbono de los distintos métodos de fabricación para el modelo, así como el coste de los componentes por diferentes tecnologías.

Se obtiene un modelo optimizado con una reducción de masa del 22,3%, y se concluye que la fabricación aditiva metálica para el componente estudiado es de gran interés en cuanto a sostenibilidad y costes en aplicaciones específicas como la fabricación de componentes para vehículos de alto rendimiento, también conocidos como *hypercars,* donde priman el diseño optimizado y la innovación.

Palabras clave: Diseño generativo, Optimización Topológica, Ingeniería Inversa, Fabricación aditiva, Fabricación, Biela, Impresión 3D, Huella de Carbono, Huella ecológica.

1. Introducción

La búsqueda de soluciones sostenibles en diferentes sectores ha generado la necesidad de explorar técnicas de fabricación alternativas a las convencionales en las que se aplica el diseño ligero generativo. En el presente trabajo se analizará el impacto que tiene la aplicación de la optimización topológica (OT) en los procesos de fabricación, con el objetivo principal de generar un impacto positivo en la sostenibilidad.

Para ello, se diseñarán y optimizarán componentes usando ingeniería inversa y OT para adaptarlos a la fabricación aditiva, empleada habitualmente para la fabricación de geometrías complejas. Se analizan factores relevantes de este método de fabricación en la sostenibilidad, para posteriormente hacer una comparación entre el modelo optimizado y sin optimizar.[1]

2. Definición del Proyecto

El componente estudiado en este proyecto se trata de una biela. Mediante herramientas de ingeniería inversa, se obtiene un modelo que se simula para validar su comportamiento frente a cargas de compresión y tracción. Este modelo sirve como punto de referencia para realizar el análisis. A partir de éste, se realiza una optimización topológica que también es validada para garantizar el comportamiento de la pieza bajo los mismos esfuerzos.

La variable fundamental de este análisis es el proceso de fabricación. Para el modelo de referencia se analizará un proceso de fabricación tradicional para una biela que consta de forjado y mecanizado, mientras que, para el modelo optimizado, se analizarán diferentes procesos de fabricación aditiva. El análisis se centra en tres aspectos clave: ahorro de material, huella de carbono y coste de la pieza.

Los procesos de fabricación analizados son:

- Forjado y mecanizado de la biela: Se toma como referencia el artículo *"Connecting Rod Manufacturing"* de *A. Kar* para el estudio. [2]
- Fabricación aditiva:
    - Tecnología FDM: Se utiliza debido a su versatilidad y facilidad de uso, así como su bajo coste. El proceso de fabricación consiste en fundir material en bruto y darle forma para construir un nuevo componente por capas. [3]
    - Tecnología SLA: La estereolitografía (SLA) es un proceso que cura material fotosensible capa por capa, empleando una fuente de luz para activar la reacción de polimerización. [4]
    - Tecnología MJF: Basada en fusión de lecho en polvo que ha sido desarrollada por HP. Permite crear impresiones de gran precisión, y con buen acabado superficial. [5]
    - Tecnología SLM: Tecnología que utiliza laser para fundir capas de polvo metálico. Destaca por su versatilidad, precisión y capacidad para fabricar componentes complejos ofertando una amplia variedad de materiales. [6]

3. Descripción del modelo

Para obtener el modelo de partida, se escanea la biela en el laboratorio de la Universidad Pontificia Comillas ICAI. Se realizan una primera sesión de escaneo 3D sin spray matificante. El resultado obtenido no es el esperado por lo que se realiza otra sesión con spray matificante, como se observa en la Figura i.

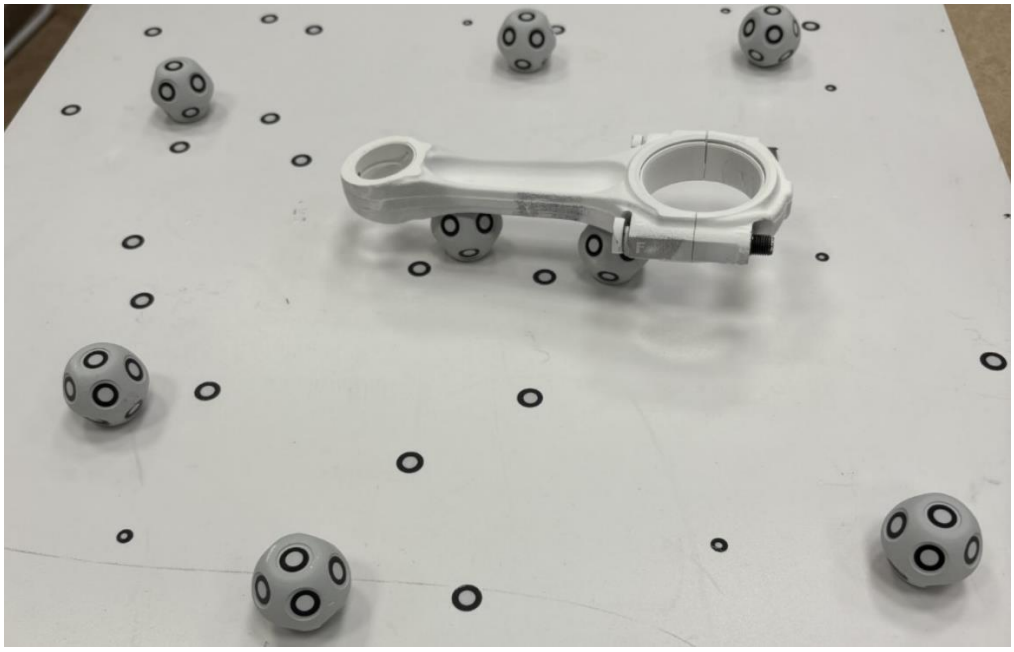


Figura i. Preparación del escaneo 3D con spray matificante. Fuente: elaboración propia

El resultado se procesa utilizando los softwares VXscan y VXmodel de la plataforma VXelements. Se modifica la geometría para generar modelo en CAD que se simulará Solid Edge, como se muestra en la Figura ii

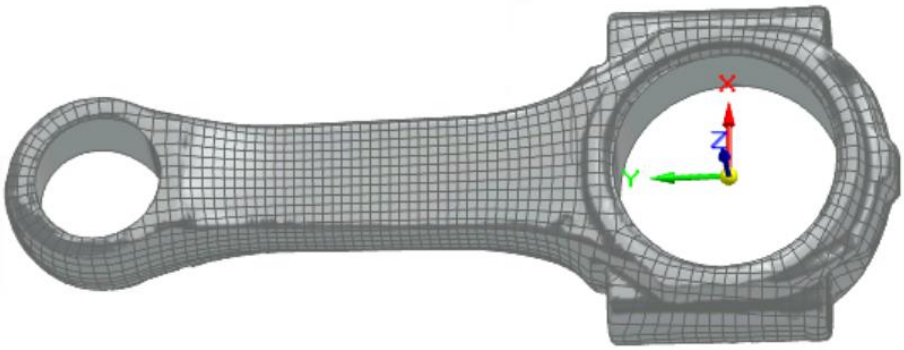


Figura ii. Biela rediseñada en Solid Edge. Fuente: elaboración propia con Solid Edge

El material asignado a la biela es acero AISI 4340. Se simula la pieza con las cargas de tracción y compresión para después poder comparar su desempeño estructural con la biela optimizada.

Una vez validado el modelo, se procede con la optimización topológica con el software Altair Inspire. Se realizan tres iteraciones hasta llegar a un modelo adecuado.

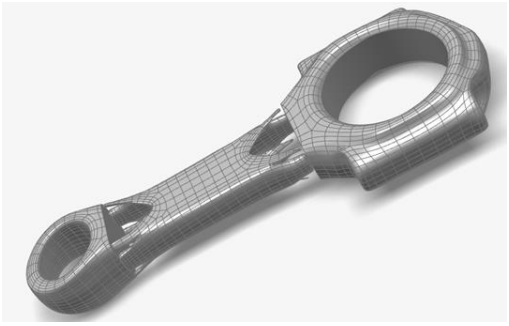


Figura iii. Primera iteración. Fuente: elaboración propia

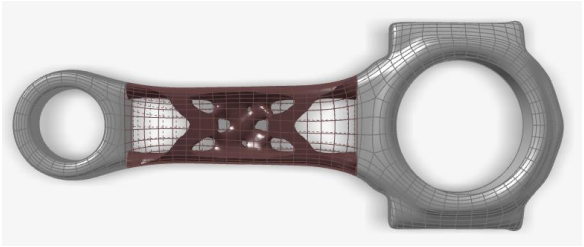


Figura iv. Segunda iteración. Fuente: elaboración propia

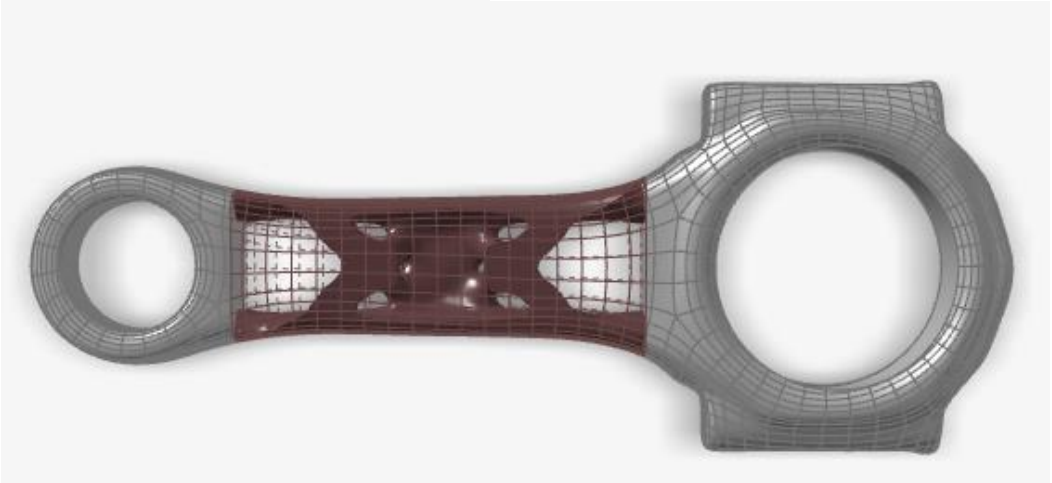


Figura v. Tercera iteración. Fuente: elaboración propia

Después de validar el modelo optimizado, se fabrica el prototipo del modelo original con la tecnología FDM () y el prototipo para validación de montaje con tecnología MJF.

Figura vi. Prototipo del modelo original con tecnología FDM. Fuente: elaboración propia

Figura vii. Prototipo para validación de montaje con tecnología MJF. Fuente: elaboración propia

Se realizan simulaciones de impresión 3D en otras tecnologías para calcular la huella de carbono y los costes asociados de las diferentes tecnologías y compararlo con el modelo original fabricado por forjado y mecanizado.

4. Resultados

Impacto del diseño generativo en el desempeño estructural y la reducción de masa

A continuación se comparan y analizan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas del componente sin optimización topológica y optimizado. En base a los datos expuestos en la Tabla 22 se puede afirmar que:

- Se ha obtenido una reducción de masa del 22,3% (192 g).
- El esfuerzo máximo soportado por la biela en el ensayo de tracción debido a la fuerza de inercia del ciclo de combustión aumenta para la biela optimizada en un 18%, reduciendo el coeficiente de seguridad. A pesar de la reducción del 15,3% del coeficiente de seguridad, 1,82 se considera un valor admisible según estudios similares.[7]

Tabla 1. Comparativa de la biela sin OT y con OT. Fuente: elaboración propia

	Biela sin OT	**Biela OT**
Peso (g)	862	670
Material	AISI 4340	AISI 4340
Esfuerzo máximo (Mpa)	511	603
Coeficiente de seguridad	2,15	1,82

Impacto del diseño generativo en la huella de carbono y costes

Los cálculos realizados para la estimación de la huella de carbono son aproximaciones, al no disponer de acceso a bases de datos para el análisis de ciclo de vida como *Ecoinvent*. Se evalua únicamente el impacto en la huella de carbono debido a la producción de material y debido a los procesos de fabricación reflejados como consumos eléctricos de las máquinas utilizadas. No se tienen en cuenta transportes o almacenamientos para la estimación.

Los resultados estimados se recogen en la Tabla 23, donde se observa lo siguiente:

- La fabricación de prototipos para comprobación de montaje por FDM y SLA son las tecnologías que menos impacto tienen en la huella de carbono, por lo que se recomienda su uso para validar la geometría, pero sus propiedades mecánicas son muy distintas del AISI 4340
- La tecnología MJF tiene una mayor huella de carbono estimada, a pesar de tener un peso significativamente inferior. Esto se debe al elevado impacto en la huella de carbono que produce la producción de polvo de PA.
- La tecnología SLM es la que mayor huella de carbono produce. Al igual que en MJF, la fabricación del polvo metálico es lo que mayor impacto genera, además de requerir mecanizado de acabado para un buen acabado del prototipo funcional.

Tabla 2. Comparativa de la estimación de la huella de carbono en función de la tecnología. Fuente: elaboración propia

	Biela sin OT	**Biela OT**				
	FORJA + MECANIZADO	**FDM**	**SLA**	**MJF**	**SLM**	**Cotización sculpteo**
Material	AISI 4340	PLA	ABS	PA	AISI 4340	Acero Inox. 316L
Peso (g)	862	52	118	86,18	670	670
Huella de Carbono ($kg\ CO_2\ eq$)	7,15 - 7,26	0,38	1,37	11,73 - 14,60	9,83-30,3	-
Precio (€)	7,15 - 7,26	15,85	78,79	75,1	340,17	894,74

En cuanto a costes, se observa lo siguiente:

- El precio de la tecnología SLM está calculado en base a estimaciones debido a la falta de información. Es el más elevado, un 353% mayor que en MJF. Se establece un rango de precio para esta tecnología de 340,17 – 894,74 € en base a la cotización proporcionada por la plataforma *sculpteo*.
- El precio de una biela comercial de características similares está alrededor de los 109,75 €, por lo que resulta una opción más económica para el usuario final que la impresión 3D metálica.

5. Conclusiones

Se extraen las siguientes conclusiones tras la realización del proyecto:

- El ahorro de material derivado de la optimización topológica se traduce en menor consumo de material, lo que supone un potencial ahorro energético durante el uso del componente debido al decremento de peso del mismo.
- La fabricación aditiva permite gran personalización y el diseño de geometrías complejas, lo que la convierte en una tecnología idónea para la fabricación de componentes de vehículos exclusivos y de alto rendimiento, como los *hypercars*, donde priman el diseño optimizado y la innovación.
- Puede ser una solución eficiente para la producción bajo demanda de repuestos de componentes descatalogados. Esto permite reducir los inventarios y reducir los tiempos de espera para el usuario.
- Aunque el diseño ligero combinado con la fabricación aditiva metálica con tecnología SLM no reduce el impacto en el proceso de fabricación del componente, las emisiones durante su uso podrían disminuir debido a una mayor eficiencia del motor. Para confirmar el impacto sería necesario realizar un análisis de ciclo de vida más detallado.
- La fabricación aditiva no puede competir en costes con métodos de fabricación tradicionales, ya que el tiempo de fabricación unitario es mucho mayor, lo que encarece el proceso significativamente.
- Se remarca la importancia de prototipados de validación de montaje antes de la fabricación del prototipo funcional. Es fundamental comprobar tanto el diseño como las tolerancias de las impresoras 3D antes de lanzar el modelo final.

6. Referencias

[1] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, y W. Zhang, «A review of topology optimization for additive manufacturing: status and challenges», ago. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020.

[2] Anurag >Kar, «Connecting Rod Manufacturing», ene. 2019.

[3] L. Zhou *et al.*, «Additive Manufacturing: A Comprehensive Review», *Abril 2024*, doi: https://doi.org/10.3390/s24092668.

[4] A. Afridi, A. Al Rashid, y M. Koç, «Recent advances in the development of stereolithography-based additive manufacturing processes: A review of applications and challenges», *Septiembre 2024*, doi: https://doi.org/10.1016/j.bprint.2024.e00360.

[5] «Impresión 3D Multi Jet Fusion (MJF): Visión general de la tecnología», Xometry. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://xometry.pro/es/articulos/impresion-3d-mjf-tecnologia/?utm_source

[6] N. Soni, G. Renna, y P. Leo, «Advancements in Metal Processing Additive Technologies: Selective Laser Melting (SLM)», doi: https://doi.org/10.3390/ met14091081.

[7] N. Lade, M. Ramachandran, y V. Fegade, «Stress and Factor of Safety for Connecting Rod using Ansys», *Agosto 2019*.

APPLICATION OF GENERATIVE LIGHTWEIGHT DESIGN FOR REDUCING ECOLOGICAL FOOTPRINT AND INCREASING COMPONENT EFFICIENCY

Author: Bengoa Rico, Elena

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano

Co-supervisor: Soldani, Xavier

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

This project explores the impact on the carbon footprint of the application of generative design in an AISI 4340 steel connecting rod. First, a 3D scanning process is applied to a connecting rod that is processed using reverse engineering tools to obtain a CAD model. A finite element analysis (FEA) of the model is made in order to evaluate the behaviour under load. After that, a topological optimisation (TO) of the model is performed. The behaviour of the part under load is validated and a prototype is manufactured for assembly validation with powder technology. Other technologies are also explored to then analyse the mass reduction and carbon footprint impact of the different manufacturing methods for the models, as well as the cost of the components for different technologies.

An optimised model with a mass reduction of 22.3% is obtained, and it is concluded that metal additive manufacturing for the connecting rod is of great interest in terms of sustainability and costs in specific applications such as the manufacture of components for high-performance vehicles, also known as hypercars, where optimised design and innovation are crucial.

Keywords: Generative Design, Topological Optimisation, Reverse Engineering, Additive Manufacturing, Manufacturing, Connecting Rod, 3D Printing, Carbon Footprint, Ecological Footprint.

1. Introduction

The search for sustainable solutions in different sectors has generated the need to explore alternative manufacturing techniques to the conventional ones in which generative lightweight design is applied. This project will analyse the impact of the application of topological optimisation (TO) in manufacturing processes, with the main objective of generating a positive impact on sustainability.

A connecting rod will be designed and optimised using reverse engineering and TO to adapt them to additive manufacturing, commonly used for the manufacture of complex geometries. Relevant factors of this manufacturing method on sustainability will be analysed, and then a comparison between the optimised and non-optimised model will be made. [1]

2. Definition of the project

The component studied in this project is a connecting rod. Using reverse engineering tools, a model is obtained and simulated to validate its behaviour under compressive and tensile loads. This model serves as a reference point for the analysis. From this, a topological optimisation is carried out which is also validated to guarantee the behaviour of the part under the same stress loads.

The fundamental variable in this analysis is the manufacturing process. For the reference model, a traditional manufacturing process for a connecting rod consisting of forging and machining will be analysed, while for the optimised model, different additive manufacturing processes will be analysed. The analysis focuses on three key aspects: material savings, carbon footprint and part cost.

The manufacturing processes analysed are:

- Forging and machining of the connecting rod: The article 'Connecting Rod Manufacturing' by A. Kar is used as a reference for the study. [2]
- Additive manufacturing:
    - FDM Technology: It is used due to its versatility and ease of use, as well as its low cost. The manufacturing process consists of melting raw material and shaping it to build a new component in layers. [3]
    - SLA technology: Stereolithography (SLA) is a process that cures photosensitive material layer by layer, using a light source to trigger the polymerisation reaction. [4]
    - MJF Technology: Based on powder bed fusion that has been developed by HP. It allows the creation of high-precision prints with a good surface finish. [5]
    - SLM Technology: Technology that uses lasers to fuse layers of metal powder. It stands out for its versatility, precision and ability to manufacture complex components offering a wide variety of materials. [6]

3. Description of the model

To obtain the starting model, the connecting rod is scanned in the laboratory of the Universidad Pontificia Comillas ICAI. A first 3D scanning session was carried out without a matting spray. The result obtained was not as expected, so another session was carried out with matting spray, as can be seen in Figure i.

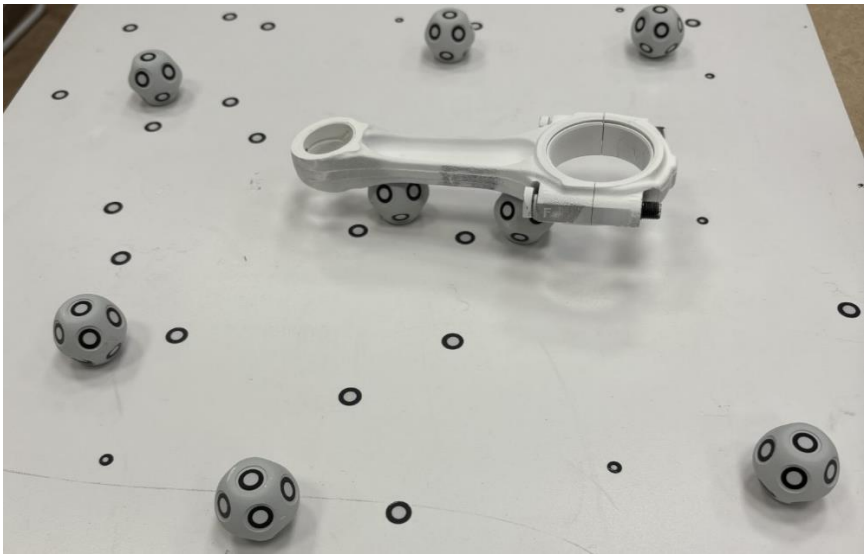


Figure i. Preparation of the 3D scan with matting spray. Source: own elaboration

The results are processed using the VXscan and VXmodel softwares of the VXelements platform. The geometry is modified to generate a CAD model to be simulated in Solid Edge, as shown in Figure ii.

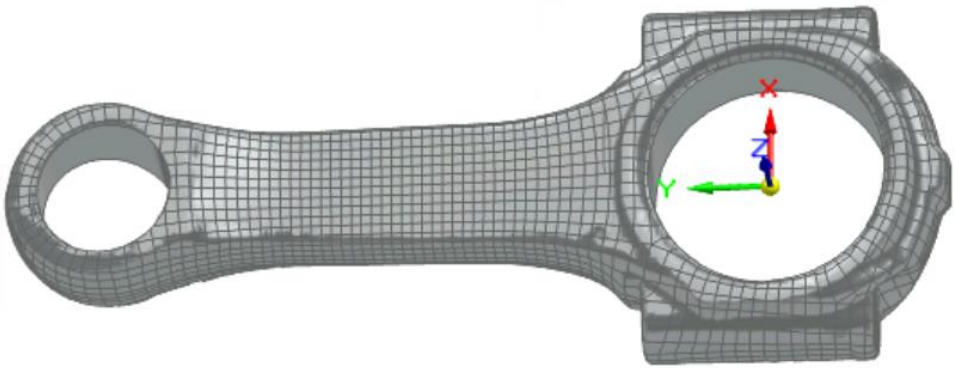


Figure ii. Connecting rod redesigned in Solid Edge. Source: own elaboration with Solid Edge

The material assigned to the connecting rod is AISI 4340 steel. The part is simulated under tensile and compressive loads in order to compare its structural performance with the optimised connecting rod.

Once the model has been validated, topological optimisation is applied with Altair Inspire software. Three iterations are carried out until a suitable model is reached.

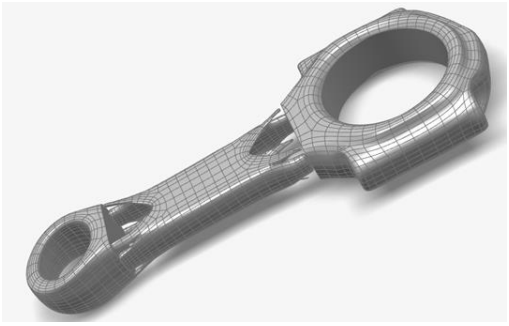


Figure iii. First iteration. Source: own elboration

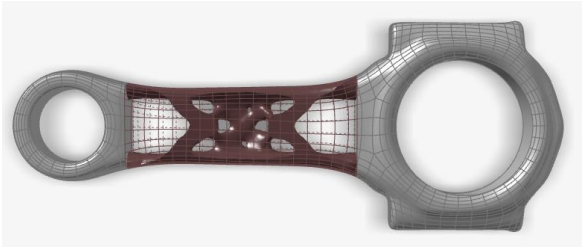


Figure iv. Second iteration. Source: own elaboration

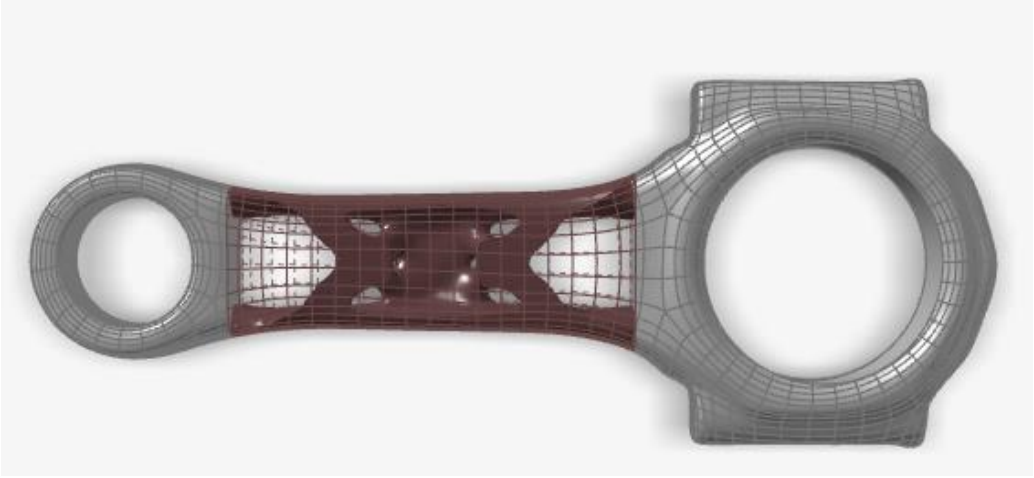


Figure v. Third iteration. Source: own elaboration

After validating the optimised model, the prototype of the original model is manufactured using FDM technology (Figure vi) and the prototype for assembly validation using MJF technology (Figure vii).

Figure vi. Prototype of the original model using FDM technology. Source: own elaboration

Figure vii. Prototype for assembly validation using MJF technology. Source: own elaboration

Simulations of 3D printing in other technologies are made to calculate the carbon footprint and associated costs of the different technologies and then compare the results with the original model manufactured by forging and machining.

4. Results

Impact of generative design on structural performance and mass reduction

The results obtained in the simulations of the component without topological optimisation and the optimised component are compared and analysed below. On the basis of the data shown in Table I, it can be stated that:

- A mass reduction of 22.3% (192 g) has been obtained.
- The maximum stress supported by the connecting rod in the tensile test due to the inertia force of the combustion cycle increases for the optimised connecting rod by 18%, reducing the safety factor. Despite the 15.3% reduction in the safety factor, 1.82 is considered an acceptable value according to similar studies.[7]

Table I. Comparison of the connecting rod without OT and with OT. Source: own elaboration

	Connecting Rod without TO	**Connecting Rod with TO**
Weight (g)	862	670
Material	AISI 4340	AISI 4340
Maximum stress (Mpa)	511	603
Safety Factor	2,15	1,82

The calculations made for the estimation of the carbon footprint are approximations, as we do not have access to databases for life cycle analysis such as *Ecoinvent*. Only the impact on the carbon footprint due to the production of material and due to the manufacturing processes

reflected as electrical consumption of the machines used are evaluated. No transport or storage is considered for the estimation.

The estimated results are shown in Table II, where the following can be observed:

- The manufacture of prototypes for assembly testing by FDM and SLA are the technologies that have the least impact on the carbon footprint, so their use is recommended to validate the geometry, but their mechanical properties are very different from AISI 4340.
- MJF technology has a higher estimated carbon footprint, despite having a significantly lower weight. This is due to the high carbon footprint impact of PA powder production.
- SLM technology has the largest carbon footprint. As with MJF, it is the manufacture of the metal powder that has the highest impact, as well as requiring finish machining for a good finish of the functional prototype.

Table II. Comparison of carbon footprint estimates by technology. Source: own elaboration

	Connecting Rod without TO	**Connecting Rod with TO**				
	FORGING + MACHINING	**FDM**	**SLA**	**MJF**	**SLM**	**Quotation *sculpteo***
Material	AISI 4340	PLA	ABS	PA	AISI 4340	Stainless Steel 316L
Weight (g)	862	52	118	86,18	670	670
Carbon Footprint ($kg\ CO_2\ eq$)	7,15 - 7,26	0,38	1,37	11,73 - 14,60	9,83-30,3	-
Price (€)	7,15 - 7,26	15,85	78,79	75,1	340,17	894,74

In terms of costs, the following can be observed:

- The price of SLM technology is calculated based on estimates due to lack of information. It is the highest, 353% higher than in MJF. A price range for this technology is set at 340.17 - 894.74 € based on the quotation provided by the *sculpteo* platform.
- The price of a commercial connecting rod with similar characteristics is around €109.75, making it a cheaper option for the end user than metal 3D printing.

5. Conclusiones

The following conclusions can be drawn from the project:

- The material saving derived from topological optimisation translates into lower material consumption, which means a potential energy saving during the use of the component due to the decrease in its weight.
- Additive manufacturing allows for high customisation and the design of complex geometries, making it an ideal technology for the manufacture of components for exclusive, high-performance vehicles, such as hypercars, where optimised design and innovation are crucial.

- It can be an efficient solution for on-demand production of spare parts for discontinued components. This allows for reduced inventories and shorter lead times for the user.
- Although the lightweight design combined with metal additive manufacturing with SLM technology does not reduce the impact on the component manufacturing process, emissions during use could be reduced due to increased engine efficiency. A more detailed life cycle analysis would be necessary to confirm the impact.
- Additive manufacturing cannot compete on cost with traditional manufacturing methods, as the unit manufacturing time is much longer, which makes the process significantly more expensive.
- The importance of assembly validation prototypes before manufacturing the functional prototype is remarked. It is essential to check both the design and the tolerances of the 3D printers before launching the final model.

6. References

[1] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, y W. Zhang, «A review of topology optimization for additive manufacturing: status and challenges», ago. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020.

[2] Anurag >Kar, «Connecting Rod Manufacturing», ene. 2019.

[3] L. Zhou *et al.*, «Additive Manufacturing: A Comprehensive Review», *Abril 2024*, doi: https://doi.org/10.3390/s24092668.

[4] A. Afridi, A. Al Rashid, y M. Koç, «Recent advances in the development of stereolithography-based additive manufacturing processes: A review of applications and challenges», *Septiembre 2024*, doi: https://doi.org/10.1016/j.bprint.2024.e00360.

[5] «Impresión 3D Multi Jet Fusion (MJF): Visión general de la tecnología», Xometry. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://xometry.pro/es/articulos/impresion-3d-mjf-tecnologia/?utm_source

[6] N. Soni, G. Renna, y P. Leo, «Advancements in Metal Processing Additive Technologies: Selective Laser Melting (SLM)», doi: https://doi.org/10.3390/ met14091081.

[7] N. Lade, M. Ramachandran, y V. Fegade, «Stress and Factor of Safety for Connecting Rod using Ansys», *Agosto 2019*.

Índice de la memoria

Capítulo 1. Introducción 10

1.1. Motivación del proyecto 11

1.2. Objetivos 12

1.3. Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 12

Capítulo 2. Estado de la Cuestión 14

2.1. Diseño generativo 14

2.2. Fabricación aditiva 18

2.2.1. FDM (Fused Deposition Modeling) 20

2.2.2. MJF (Multi Jet Fusion) 22

2.2.3. SLA (Stereolithography) 23

2.3. Ingeniería inversa 24

2.4. Huella ecológica 26

2.5. Bielas 32

Capítulo 3. Metodología 39

3.1. Planificación 39

3.2. Recursos empleados 40

Capítulo 4. Desarrollo del trabajo 42

4.1. Ingeniería inversa 42

4.1.1. Escaneado 3D 42

4.1.2. Procesamiento de la malla para modelado digital 45

4.2. Análisis inicial del modelo 49

4.2.1. Preparación del modelo en Solid Edge 49

4.2.2. Análisis de cargas 53

4.3. Simulación inicial 56

4.3.1. Ensayo a tracción de la cabeza de la biela 56

4.3.2. Ensayo a compresión de la cabeza de la biela 58

4.3.3. Ensayo a tracción del pie de la biela 59

4.3.4. Ensayo a compresión del pie de la biela 61

4.4. Diseño generativo 64

4.4.1. Primera iteración ... *66*
4.4.2. Segunda iteración ... *67*
4.4.3. Tercera iteración ... *68*
4.4.4. Ensayo a tracción de la cabeza de la biela optimizada ... *70*
4.5. Validación del diseño optimizado ... 71
4.5.1. Ensayo a compresión de la cabeza de la biela optimizada ... *71*
4.5.2. Ensayo a tracción del pie de la biela optimizada ... *73*
4.5.3. Ensayo a compresión del pie de la biela optimizada ... *74*
4.6. Fabricación de prototipo del modelo sin OT por tecnología FDM ... 77
4.7. Fabricación de prototipo para validación de montaje por tecnoilogía MJF ... 77
4.8. Simulación del prototipo para validación de montaje por tecnología FDM ... 78
4.9. Simulación del prototipo para validación de montaje por tecnología SLA ... 79
4.10. Simulación de la fabricación de prototipo funcional en acero ... 80
4.11. Análisis de la huella de carbono ... 82
4.11.1. Huella de carbono por fabricación tradicional: Forjado y mecanizado ... *82*
4.11.2. Huella de carbono del prototipo para validación de montaje por tecnología MJF ... *87*
4.11.3. Huella de carbono del prototipo para validación de montaje por tecnología FDM ... *88*
4.11.4. Huella de carbono del prototipo para validación de montaje por tecnología SLA 89
4.11.5. Huella de carbono del prototipo funcional por tecnología SLM ... *90*
4.12. Análisis económico ... 93
4.12.1. Tecnología FDM ... *93*
4.12.2. Tecnología SLA ... *94*
4.12.3. Tecnología MJF ... *95*
4.12.4. Tecnología SLM ... *96*
4.12.5. Biela comercial ... *97*

Capítulo 5. Análisis de Resultados ... ***99***
5.1. Impacto del diseño generativo en el desempeño estructural y la reducción de masa ... 99
5.2. Impacto del diseño generativo en la huella de carbono ... 100
5.3. Impacto del diseño generativo en costes ... 101

Capítulo 6. Conclusiones y Trabajos Futuros ... ***102***

Capítulo 7. Bibliografía..... 104

ANEXO I: Plano de dimensiones generales de la biela..... 108

ANEXO II: Alineación con los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) 110

Índice de figuras

Figura 8. Proceso de diseño de un componente con OT [1] 14
Figura 9. Proceso del Análisis de Elementos Finitos [5] 15
Figura 10. Opciones para reciclar un producto en el final de ciclo de vida útil [8] 18
Figura 11. Proceso de fabricación aditiva [11] 19
Figura 12. Representación esquemática de una configuración típica de FDM [12] 21
Figura 13. Representación esquemática de una configuración típica de MJF de HP [15] . 23
Figura 14. Representación esquemática de una configuración típica de SLA [16] 24
Figura 15. Comparación del proceso de fabricación por ingeniería inversa vs tradicional [17] 25
Figura 16. Déficit de Biocapacidad en España en el año 2022 [20] 27
Figura 17. Análisis de sostenibilidad en tres dimensiones [26] 31
Figura 18. Tipos de biela según el cuerpo [28] 33
Figura 19. Partes de una biela [30] 33
Figura 20. Diagrama sinóptico del proceso de fabricación de una biela forjada. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del artículo "Connecting Rod Manufacturing" [31] 36
Figura 21. Diagrama sinóptico del proceso de fabricación de una biela forjada. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del artículo "Connecting Rod Manufacturing" [31] 37
Figura 22. Diagrama de Gantt del proyecto. Generado con: Online Gantt [33] 39
Figura 23. Diagrama de flujo de trabajo del proyecto. Fuente: elaboración propia. 40
Figura 24. Escáner HandySCAN3D[34] 42
Figura 25. Preparación del escaneado 3D. Fuente: elaboración propia 43
Figura 26. Resultado del escaneo de la biela sin polvo. Fuente: elaboración propia con VXmodel 43
Figura 27. Preparación del escaneo 3D con spray matificante. Fuente: elaboración propia44
Figura 28. Seguimiento en tiempo real del proceso de escaneo con VXscan. Fuente: elaboración propia 44

Figura 29. Escaneos 1 y 2 de la parte inferior de la biela sin unir. Fuente: elaboración propia con VXmodel 46
Figura 30. Fusión de los escaneados de la parte inferior de la biela. Fuente: elaboración propia con VXmodel 46
Figura 31. Alineación de las dos mitades de la biela. Fuente: elaboración propia con VXmodel 46
Figura 32. Biela modificada con entidades. Fuente: elaboración propia con VXmodel 47
Figura 33. Biela rediseñada en Solid Edge. Fuente: elaboración propia con Solid Edge ... 49
Figura 34. Propiedades del acero AISI 4340 aplicadas al modelo sin optimizar. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 52
Figura 35. Propiedades de la biela sin optimizar. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 52
Figura 36. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 1. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 57
Figura 37. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 1. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 57
Figura 38. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 2. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 58
Figura 39. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 2. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 59
Figura 40. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 3. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 60
Figura 41. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 3. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 60
Figura 42. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 4. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 61
Figura 43. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 4. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 62
Figura 44. Definición de la región de diseño en Altair Inspire. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire 64

Figura 45. Condiciones de forma y cargas aplicadas para la OT. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire 66
Figura 46. Primera iteración de OT. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire 66
Figura 47. Geometría de la iteración 2 en Altair Inspire. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire 67
Figura 48. Simulación de la segunda iteración de OT. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 68
Figura 49. Geometría de la tercera iteración en Altair Inspire. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire 69
Figura 50. Simulación de la tercera iteración de la biela. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 70
Figura 51. Coeficiente de seguridad de la biela optimizada en el caso más restrictivo. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 70
Figura 52. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 2 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 71
Figura 53. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 2 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 72
Figura 54. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 3 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 73
Figura 55. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 3 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 73
Figura 56. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 4 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 74
Figura 57. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 4 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 74
Figura 58. Propiedades de la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge 76
Figura 59. Prototipo del modelo sin OT fabricado por tecnología FDM. Fuente: elaboración propia 77
Figura 60. Prototipo para validación de montaje fabricado por tecnología MJF. Fuente: elaboración propia 78

Figura 61. Simulación de impresión 3D del prototipo para validación de montaje en FDM. Fuente: elaboración propia con el software Ultimaker Cura 79
Figura 62. Simulación de impresión 3D del prototipo para validación de montaje en SLA. Fuente: elaboración propia con el software Preform 80
Figura 63. Configuración de una impresora con tecnología SLM [45] 81
Figura 64. Máquina para tratamiento térmico WZP 160 y sus características [32] 85
Figura 65. Cotización de la biela optimizada proporcionada por sculpteo [59] 97
Figura 66. Dimensiones de las bielas comerciales para Alfa Twin Spark [60] 98
Figura 67. Precio de 4 bielas forjadas 4340 para Alfa Twin Spark[60] 98

Índice de tablas

Tabla 3. Fases, subfases y operaciones del proceso de fabricación de una biela forjada. Elaboración propia a partir de los datos del artículo "Connecting Rod Manufacturing" [32] 38
Tabla 4. Resumen de herramientas utilizadas en VXelements. Fuente: elaboración propia con datos de VXmodel 48
Tabla 5. Composición química del AISI 4340 [35] 50
Tabla 6. Propiedades físicas del AISI 4340 [35] 50
Tabla 7. Propiedades mecánicas del AISI 4340 [35] 50
Tabla 8. Rangos de valores para las propiedades mecánicas del AISI 4340 [36] 51
Tabla 9. Dimensiones principales de la biela modelada en Solid Edge 52
Tabla 10. Valores de las cargas aplicadas para cada ensayo. Fuente: elaboración propia .. 54
Tabla 11. Resumen de los resultados obtenidos en la simulación de la biela sin optimizar. Imágenes obtenidas de: [44] 63
Tabla 12. Ensayo a tracción de la cabeza de la biela (inercia) 65
Tabla 13. Resumen de los resultados obtenidos en la simulación de la biela optimizada. Imágenes obtenidas de: [44] 75
Tabla 14. Parámetros estimados por ChatGPT para el análisis de la huella de carbono y de costes [46] 82
Tabla 15. Clasificación de las operaciones para el cálculo de la huella de carbono. Fuente: elaboración propia 83
Tabla 16. Estudio empírico del consumo de energía por proceso de fabricación [47] 84
Tabla 17. Resumen de los resultados obtenidos de los cálculos estimados de la huella de carbono de los diferentes procesos. Fuente: elaboración propia 92
Tabla 18. Análisis del coste del prototipo para validación de montaje con tecnología FDM. Fuente: elaboración propia a partir de la hoja excel proporcionada por el departamento de fabricación aditiva 93

Tabla 19. Análisis del coste del prototipo para validación de montaje con tecnología SLA. Fuente: elaboración propia a partir de la hoja excel proporcionada por el departamento de fabricación aditiva 94
Tabla 20. Análisis del coste del prototipo para validación de montaje con tecnología MJF. Fuente: elaboración propia a partir de la hoja excel proporcionada por el departamento de fabricación aditiva 95
Tabla 21. Estimación del coste del prototipo funcional metálico con tecnología SLM. Fuente: elaboración propia a partir de la hoja excel proporcionada por el departamento de fabricación aditiva 96
Tabla 22. Comparativa de la biela sin OT y con OT. Fuente: elaboración propia 99
Tabla 23. Comparativa de la estimación de la huella de carbono en función de la tecnología. Fuente: elaboración propia 100
Tabla 24. Comparativa de la estimación de la huella de carbono en función de la tecnología. Fuente: elaboración propia 101

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

La búsqueda de soluciones sostenibles en diferentes sectores ha generado la necesidad de explorar técnicas de fabricación alternativas a las convencionales en las que se aplica el diseño ligero generativo. En el presente trabajo se analizará el impacto que tiene la aplicación de esta variante en los procesos de fabricación, con el objetivo principal de generar un impacto positivo en la sostenibilidad.

El desarrollo de la optimización topológica (OT) surge para proporcionar de forma optimizada diseños de alto rendimiento y, sobre todo, más ligeros, mediante la distribución eficiente del material en un dominio dado. La principal técnica de fabricación aplicada para estos diseños es la fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D. Esto se debe a que permite fabricar capa por capa el diseño previamente optimizado, al contrario que utilizando, como es habitual, técnicas de fabricación sustractiva.[1]

La OT puede ser de dos tipos en relación con la densidad del material en cada punto del dominio del diseño. Por un lado, existe la formulación continua, donde la densidad de los elementos puede variar entre 0 y 1, por lo que permite representar elementos en la discretización parcialmente sólidos. El método más utilizado de este tipo es el SIMP (*Solid Isotropic Material with Penalization).*

La optimización discreta, sin embargo, permite que la densidad del material tome valores de 0 o 1. Este tipo de OT permite diseñar geometrías más fáciles de fabricar, pero los algoritmos empleados son más complejos de resolver, por lo que generalmente su uso aumenta el coste computacional. [2]

En este proyecto se diseñarán y optimizarán componentes usando OT continua para adaptarlos a la fabricación aditiva, y se analizarán factores relevantes de este método de fabricación en la sostenibilidad, para posteriormente hacer una comparación entre el modelo optimizado y sin optimizar.

1.1. MOTIVACIÓN DEL PROYECTO

Existe una preocupación por el impacto ambiental que tienen los procesos de fabricación y la gestión de los desperdicios que estos producen. El diseño ligero generativo es una herramienta capaz de transformar estos procesos de producción, creando estructuras más ligeras y resistentes, y reduciendo el consumo de materiales y energía. Esta técnica incorpora fabricación aditiva con algoritmos avanzados que permiten crear componentes más eficientes que ayudan a reducir la huella de carbono, y, por lo tanto, la huella ecológica.

Conocer el impacto de la huella de carbono de los procesos de fabricación es clave para la toma de decisiones más sostenibles a nivel institucional u organizacional, ya que permite la optimización de procesos e impulsa la innovación en un contexto donde la sostenibilidad toma cada vez más valor.

Por otro lado, este proyecto permite explorar las oportunidades que ofrece la ingeniería inversa en aplicaciones industriales. Este proceso permite crear diseños a partir de geometrías existentes, por lo que es de gran ayuda para acortar el proceso de modelado en 3D de un componente.

El presente trabajo pretende no solo explorar las capacidades de la optimización topológica, sino también analizar el impacto de las diferentes tecnologías de fabricación aditiva que son compatibles con estos diseños, para poder analizar el impacto que tiene su uso en referencia a la sostenibilidad. De esta forma, se quiere analizar la posibilidad de transformación de los procesos de fabricación para generar un impacto positivo en la industria y en el medio ambiente.

1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal del proyecto es analizar el impacto que tiene en sostenibilidad la implementación del diseño ligero generativo para la fabricación de componentes utilizando la fabricación aditiva. Para ello, se analiza una biela de un motor de combustión. Se ha realizado un diseño haciendo uso de ingeniería inversa que ha sido simulado teniendo en cuenta las cargas principales de trabajo y se ha optimizado topológicamente para analizar el impacto que tiene la fabricación del componente optimizado y compararlo con el modelo sin optimizar.

Otros de los objetivos a alcanzar en este trabajo son:

- Investigar y analizar los principios de la optimización topológica y su aplicación en la fabricación aditiva.
- Diseñar, simular y optimizar una biela con el algoritmo SIMP, teniendo en cuenta la reducción de peso, material y energía consumida.
- Comparar los resultados obtenidos tras la aplicación de la OT con componentes fabricados sin optimizar, así como la viabilidad económica, considerando el coste del material, la fabricación, y post procesado necesario.

1.3. ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) son metas globales propuestas por las Naciones Unidas como parte de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. En el presente proyecto se abordan los siguientes:

ODS 9: Industria, innovación e infraestructuras. Este objetivo se ve reflejado en este proyecto debido a que las herramientas utilizadas para la OT utilizan tecnología innovadora para buscar componentes más eficientes y sostenibles.

ODS 12: Producción y consumo responsables. El diseño ligero generativo pretende optimizar el uso de materiales, así como minimizar los residuos y el impacto ecológico de los procesos de fabricación.

ODS 13: Acción por el clima. El objetivo del proyecto es aplicar la OT para reducir la huella ecológica, es decir, se pretende reducir la huella de carbono diseñando un proceso de fabricación que genere menos desperdicios y que suponga un ahorro de energía.

Capítulo 2. ESTADO DE LA CUESTIÓN

2.1. DISEÑO GENERATIVO

La creciente preocupación de la reducción de las emisiones de CO2 está recogida tanto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como en el Acuerdo de París. El objetivo es conseguir una producción más eficiente y respetuosa con el medio ambiente. Las técnicas de impresión 3D como la LPBD (*Laser Powder Bed Fusion)* son consideradas de gran ayuda para mejorar la eficiencia ecológica, pero para poder hacer un uso óptimo de este tipo de tecnologías es necesario explorar geometrías más complejas. Esto es posible gracias a la Optimización Topológica. [3]

Esta herramienta hace uso de métodos matemáticos basados en elementos finitos, y permite crear diseños más eficientes. Se aplica mediante softwares que permiten la simulación de los componentes para asegurar que su optimización cumpla las restricciones impuestas por las cargas que el elemento tiene que soportar y los determinados límites de masa o volumen impuestos por las condiciones de diseño [4]. Se observa el proceso de diseño de un componente utilizando OT en la Figura 8, que consta de 5 fases:

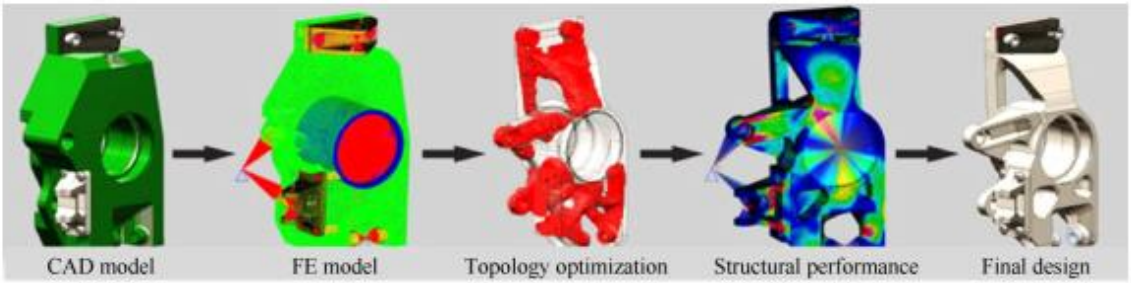


Figura 8. Proceso de diseño de un componente con OT [1]

1. Modelo CAD (Computer Aided Design): Puede obtenerse bien diseñándose desde cero con un software para modelado en 3D como Solid Edge, o mediante ingeniería inversa para acelerar el proceso, a pesar de que este método requiera tratamiento y limpieza posterior de la malla.
2. Análisis de Elementos Finitos: El método de elementos finitos o "*Finete Element Analysis"* (FEA) forma parte del proceso de diseño por optimización topológica, y se utiliza principalmente para resolver problemas en los campos del análisis de esfuerzos, transferencia de calor, flujo de fluidos, transferencia de masa y electromagnetismo. Sirve para analizar geometrías complejas o estados de carga que no se pueden resolver analíticamente.

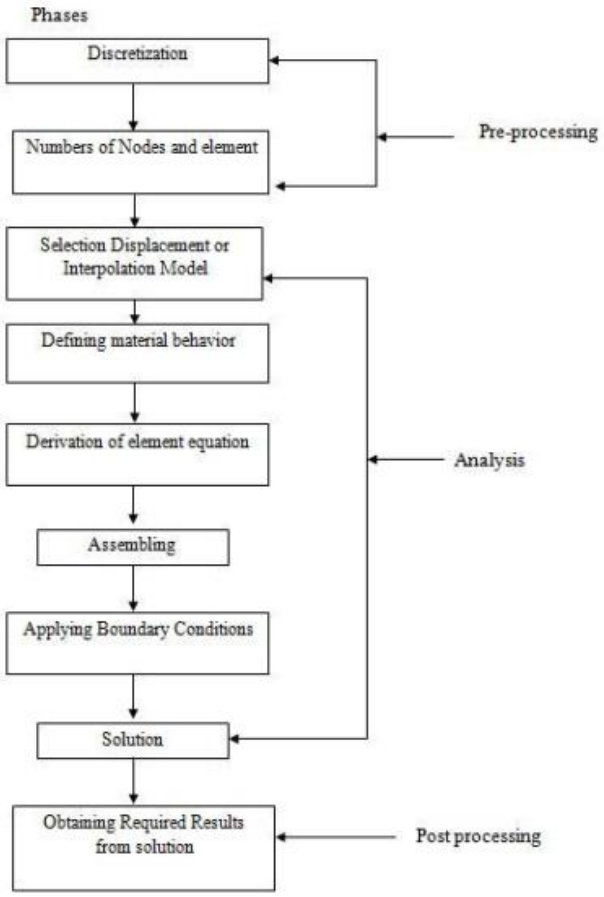


Figura 9. Proceso del Análisis de Elementos Finitos [5]

El proceso de FEA se divide en tres fases principales, como se observa en la Figura 9:

i. En la fase de Preprocesado se preparan los datos necesarios para el análisis, y se subdivide en dos sub-fases:
    a. Discretización: Consiste en dividir el dominio físico del problema en subregiones. Éstas se denominan elementos finitos y en conjunto forman la malla.
    b. Número de nodos y elementos: En este pase se definen el número de nodos y de elementos que habrá en la malla. En función de la cantidad elegida el tamaño de malla variará y la complejidad para la resolución también. Cuantos más nodos y elementos, más alto será el coste computacional del proceso.

ii. La fase de Análisis es donde se realiza el cálculo del modelo. Las sub-fases que la componen son:
    a. Selección del modelo de desplazamiento o interpolación: Se elige cómo se interpolará la variable dentro de cada elemento, lo que afecta a la precisión del análisis. Las más comunes son lineal o cuadrática.
    b. Definición del comportamiento del material: Se especifican las propiedades mecánicas del material.
    c. Derivación de la ecuación del elemento: Se generan las ecuaciones que describen el comportamiento de cada uno de los elementos de la malla.
    d. Ensamblaje: Se agrupan todas las ecuaciones de los elementos y se crea un sistema de ecuaciones global.
    e. Aplicación de condiciones de contorno: Se aplican las restricciones que tenga el sistema a resolver. Pueden ser cargas, temperaturas o condiciones de desplazamiento, entre otras.
    f. Solución: Se resuelve el sistema de ecuaciones global para obtener las variables deseadas en los nodos.

iii. Por último, está el Post-procesado. En esta fase se obtienen los resultados requeridos en base a la solución del análisis, como esfuerzos y deformaciones si es un análisis estructural, flujo de calor para análisis térmicos, o velocidades de los flujos si es un análisis de fluidos. [5]

3. Optimización topológica: Gracias a softwares como Solid Edge o Altair Inspire que incorporan módulos de diseño generativo, se pueden utilizar algoritmos de OT de forma para optimizar la pieza. Generalmente se diseña en base al porcentaje de masa que desea reducir, o al factor de seguridad que debe tener el componente final.
4. Simulación: Después de optimizar la pieza topológicamente es necesario simular la parte optimizada con las cargas de trabajo para verificar que el nuevo diseño cumple con las especificaciones requeridas.
5. Diseño final: Una vez se ha verificado la geometría, se puede aplicar un post procesado de refinado de la misma antes de la impresión, para un mejor acabado.

Aunque la mayoría de los estudios que asocian la optimización topológica a la sostenibilidad están centrados en la reducción del material utilizado, existen otros enfoques. Los autores *R.H. Kundu* y *X.S. Zhang* presentan la OT multimaterial, que utiliza tanto biomateriales como metal para diseñar estructuras efectivas y con impacto ambiental significativo. En el estudio considera el bambú y madera como biomateriales transversalmente isotrópicos y el acero como un material isotrópico. [6]

Otra de los enfoques de la OT consiste en maximizar la capacidad de carga de componentes de aeronaves, reduciendo los esfuerzos máximos que soportan determinados componentes. De esta manera, se consigue alargar la vida útil por fatiga de estos vehículos reduciendo además su peso significativamente, haciéndolos más sostenibles. [7]

También se explora el impacto que puede tener la optimización topológica en el ciclo de vida de un componente. En este enfoque se centra en el uso que se le puede dar a un producto cuando está al final de su ciclo de vida útil. Se plantean las opciones de reciclado de productos al final de su vida útil para generar materia prima, la refabricación del producto haciendo uso de tecnología de fabricación aditiva y la refabricación sustractiva. De esta forma, no solo se optimiza el diseño o el desempeño de un componente, sino que se maximiza la eficiencia de los productos y se consigue un ciclo de vida más cerrado. [8]

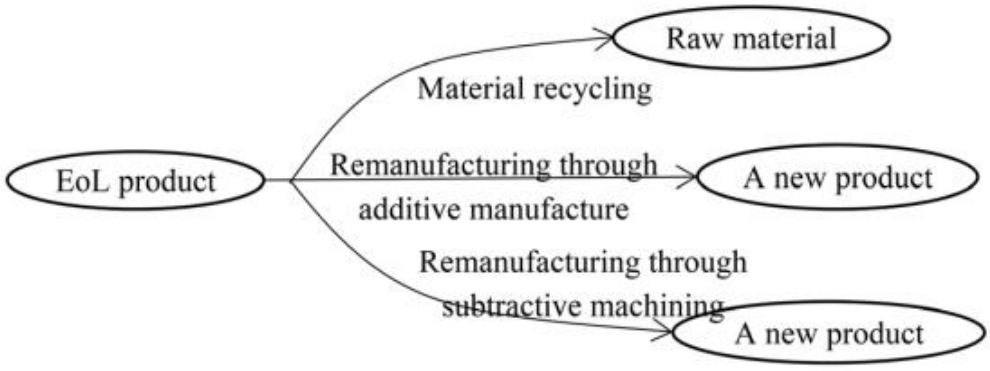


Figura 10. Opciones para reciclar un producto en el final de ciclo de vida útil [8]

Como se ha mencionado anteriormente, las aplicaciones de la OT son muy variadas, ya que se aplica en diferentes industrias como la de automoción, aeronáutica, ingeniería civil, ciencia de materiales y biomecánica entre otras. [9]

El método más común utilizado para optimización topológica es el SIMP. Con este método se busca una distribución óptima del material para un diseño específico, teniendo en cuenta las condiciones de contorno y las cargas que se apliquen al modelo, junto con las restricciones de fabricación y los requisitos de rendimiento [4]. Existen otros métodos como el *Level Set*, que está recomendado para formas suaves y cambios topológicos continuos; el *Bidirectional Evolutionary Structural Optimization* (BESO), que es eficiente para diseños iterativos; o el *Variational Topology Optimization Method* (VARTOP), utilizado para geometrías más complejas. [10]

2.2. FABRICACIÓN ADITIVA

Se ha mencionado anteriormente la fabricación aditiva como técnica de fabricación conveniente para la fabricación de componentes optimizados topológicamente. A continuación, se explican los fundamentos de esta tecnología.

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D apareció por primera vez en la década de 1980, y ha evolucionado considerablemente desde entonces. Tradicionalmente se ha utilizado para prototipado, pero actualmente es una técnica utilizada para la fabricación

de componentes en muchas industrias. Se caracteriza por la libertad geométrica que permite, así como por la reducción de desperdicio de material. Otra de las características principales es la amplia variedad de materiales que se pueden utilizar, entre los que se encuentran polímeros, metales, materiales cerámicos y materiales compuestos. A pesar de estas ventajas, tiene varios inconvenientes. El tamaño de las piezas está limitado al tamaño de la impresora, y generalmente requieren de postprocesado, debido a la falta de precisión de la pieza acabada. También hay que tener en cuenta la orientación de la pieza en la impresión y las particularidades de cada método de impresión. [11] .

Para poder fabricar una pieza en FDM se siguen los pasos mostrados en la Figura 11:

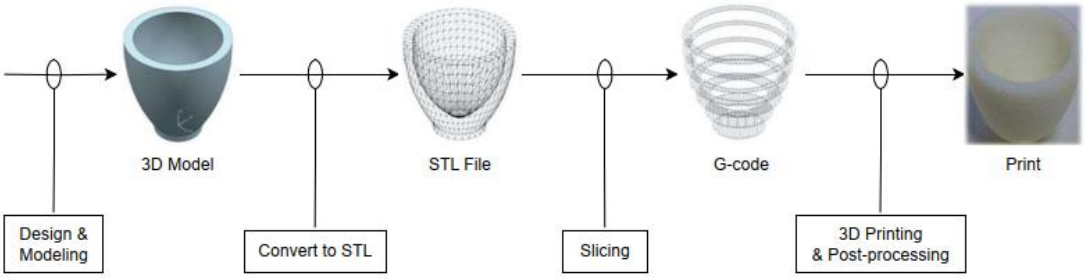


Figura 11. Proceso de fabricación aditiva [11]

El modelado y diseño de la parte es el primer paso para el proceso de fabricación aditiva. Para ello, se utilizan softwares CAD (*Computer-Aided Design*), en los que también se puede simular la pieza para garantizar un diseño correcto.

Una vez el diseño está validado, se convierte a un archivo STL (*stereolithography*), que es el formato que las impresoras pueden interpretar para la fabricación por capas. Este formato descompone la superficie del modelo en triángulos, y la resolución del archivo dependerá del tamaño de estos. El modelo debe estar cerrado, es decir, sin huecos ni errores geométricos para que no haya fallos en la impresión.

Después, este archivo es procesado por un software de "*slicing*" que divide la pieza en capas horizontales para preparar la impresión capa a capa. El *sofware* genera un *G-code,* que consiste en un conjunto de instrucciones precisas para guiar la extrusión, laser o proyector

en función de la tecnología. y poder materializar el diseño digital. Se pueden personalizar parámetros como la altura de la capa, la densidad de relleno o las estructuras de soporte que pueda necesitar el componente, lo cual afectará a la calidad, resistencia y apariencia del mismo. Una vez esté listo, se envía a la impresora para iniciar el proceso de impresión. [11]

Para la materialización de este proceso, existen diferentes tipos de tecnologías o métodos. Se exponen los de mayor relevancia para este proyecto en los siguientes apartados.

2.2.1. FDM (FUSED DEPOSITION MODELING)

Este método de fabricación aditiva es el más conocido y utilizado debido a su versatilidad y facilidad de uso, así como su bajo coste. El proceso de fabricación consiste en fundir material en bruto y darle forma para construir un nuevo componente por capas.

El material utilizado para FDM consiste en un filamento enrollado en una bobina que posteriormente es introducido mediante una rueda motriz en una boquilla o extrusor con control de temperatura, donde se calienta hasta quedar semilíquido. La boquilla se encarga de extruir el material de forma precisa siguiendo las instrucciones generadas en el *G-code*, creando una superposición de finas capas, como se muestra en la Figura 12. [11]

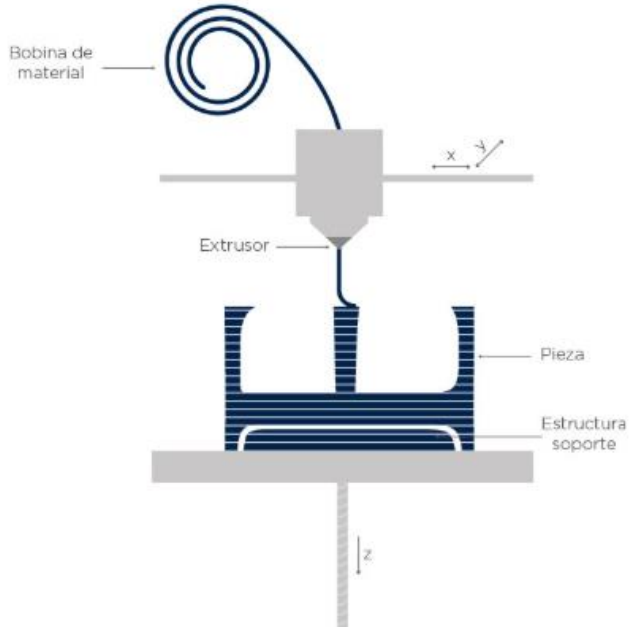


Figura 12. Representación esquemática de una configuración típica de FDM [12]

La termoplasticidad del material juega un papel crucial, ya que la calidad de la unión y solidificación de las capas variará en función de esta propiedad. Es por eso que la mayor parte de las impresoras utilizan materiales poliméricos, porque son los que mejores resultados ofrecen. Los polímeros más frecuentes son el ácido poliláctico (PLA), el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) o el polietileno tereftalato glicol (PETG). Actualmente se ha comenzado a utilizar materiales como el polipropileno (PP) por ser uno de los plásticos más utilizados en la actividades cotidianas. [13]

Las principales limitaciones de esta tecnología son la alta temperatura que requieren los materiales para ser fundidos correctamente, lo cual puede derivar en un mayor consumo de energía. También es importante tener en cuenta que si la pieza que se va a imprimir tiene voladizos o geometrías complejas serán necesarias estructuras de refuerzo para que no haya deformaciones en el proceso, lo que incrementa tanto el tiempo de impresión como la necesidad de post-procesado de la pieza posteriormente. Otro de los factores a tener en cuenta es la geometría de la pieza. En función del modelo de impresora que se esté utilizando,

los espesores mínimos pueden variar y las tolerancias también, por lo que hay que tener en cuenta la orientación de la pieza en la impresión.[11]

2.2.2. MJF (MULTI JET FUSION)

Es una tecnología basada en fusión de lecho en polvo que ha sido desarrollada por HP, y es parecida al método SLS (Sinterizado Selectivo por Laser). Permite crear impresiones de gran precisión, y con buen acabado superficial. [14]

El proceso comienza aplicando una fina capa de material sobre el área de trabajo de la impresora. Después, el carro recubridor de material (*Material recoater*) deposita polvo moviéndose de arriba hacia abajo. El carro de impresión y fusión que contiene los cabezales de impresión (*HP Thermal Inkjet array*) se desplaza de derecha a izquierda sobre el área de trabajo. Las fuentes de energía sirven para precalentar el área de trabajo antes de la impresión para que la temperatura sea constante durante todo el proceso. Los cabezales depositan agentes funcionales para definir la geometría de la pieza, y cuando el carro se mueve izquierda a derecha se fusionan las zonas marcadas anteriormente. Cuando una capa finaliza, el área de trabajo desciende para preparar la impresión de la siguiente capa y el carro recubridor vuelve a añadir material. Se repite este proceso hasta completar la pieza. Se observa la configuración de la impresora en la Figura 13. [15]

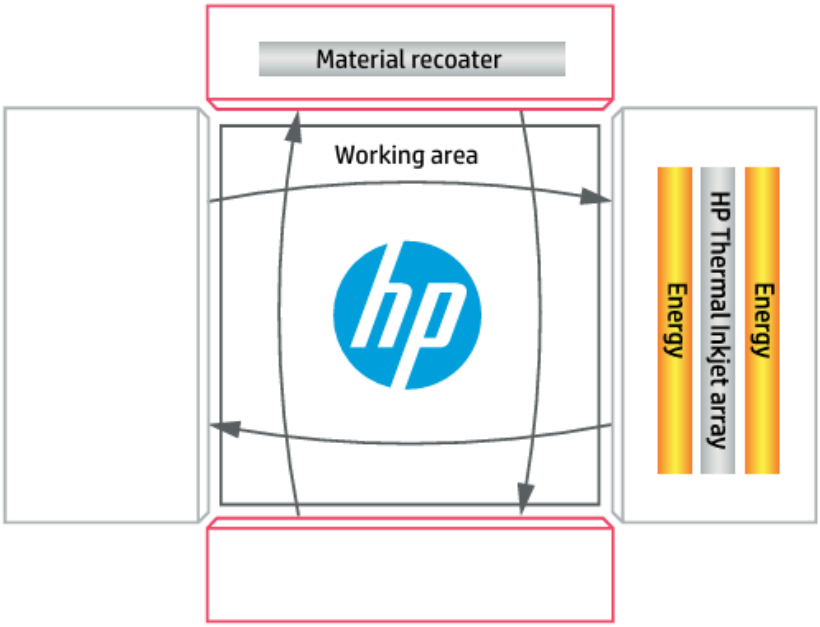


Figura 13. Representación esquemática de una configuración típica de MJF de HP [15]

Los materiales típicos se dividen principalmente en dos tipos: plásticos rígidos, como el Nylon PA11, Nylon PA12 o PP y plásticos flexibles como Estane 3D TPU M95A. La variedad de materiales puede resultar escasa en comparación con otras tecnologías de fabricación aditiva.

Las estructuras de soporte no son necesarias, ya que los espacios vacíos de las piezas que se fabrican son rellenados durante la impresión con polvo suelto. También permite imprimir en color, y generalmente permite reutilizar más del 50% del polvo no fusionado, por lo que se puede reducir el desperdicio de material considerablemente. [14]

2.2.3. SLA (STEREOLITHOGRAPHY)

La estereolitografía (SLA) es un proceso que cura material fotosensible capa por capa, empleando una fuente de luz para activar la reacción de polimerización. Existen varios procesos de fotopolimerización pero el SLA es el más antiguo, y utiliza el láser (luz ultravioleta) como fuente de luz y resina fotosensible como material para conformar la pieza.

La luz ultravioleta inicia una rección de polimerización en una solución de monómeros y solidifica cada capa selectivamente. Los monómeros activados por la luz ultravioleta reaccionan con otros monómeros y se transforman en cadenas poliméricas, y se van formando las capas. Cuando se completa ese proceso, la resina que no se ha polimerizado se descarta, y se aplica el tratamiento de post-curado a la pieza para que alcance las propiedades deseadas. Se muestra un esquema de la configuración en la Figura 14.[16]

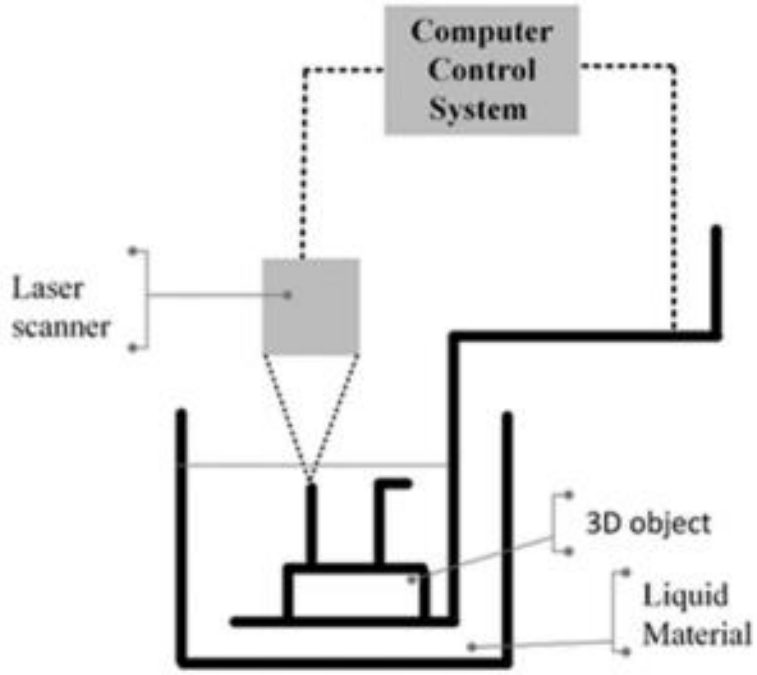


Figura 14. Representación esquemática de una configuración típica de SLA [16]

La limitada variedad de materiales aptos para esta tecnología es uno de los principales desafíos que enfrenta este método, lo que restringe los campos en los que puede ser utilizada. Al igual que en FDM, para preservar la geometría se requieren refuerzos que hacen que se requiera más material, lo cual deriva en un mayor consumo de electricidad.[16]

2.3. *INGENIERÍA INVERSA*

Según Z. Geng y B. Bidanda [17], la ingeniería inversa se puede definir como "un proceso sistemático que extrae información de diseño a partir de un producto existente". También se

indica que puede ser una herramienta que permite reducir los tiempos de ciclo en un proceso de fabricación.

En los procesos de fabricación tradicionales, la etapa de diseño y modelado en softwares CAD consume mucho tiempo. En la Figura 15 se observan las diferencias entre un proceso de fabricación tradicional frente a uno realizado con ingeniería inversa.

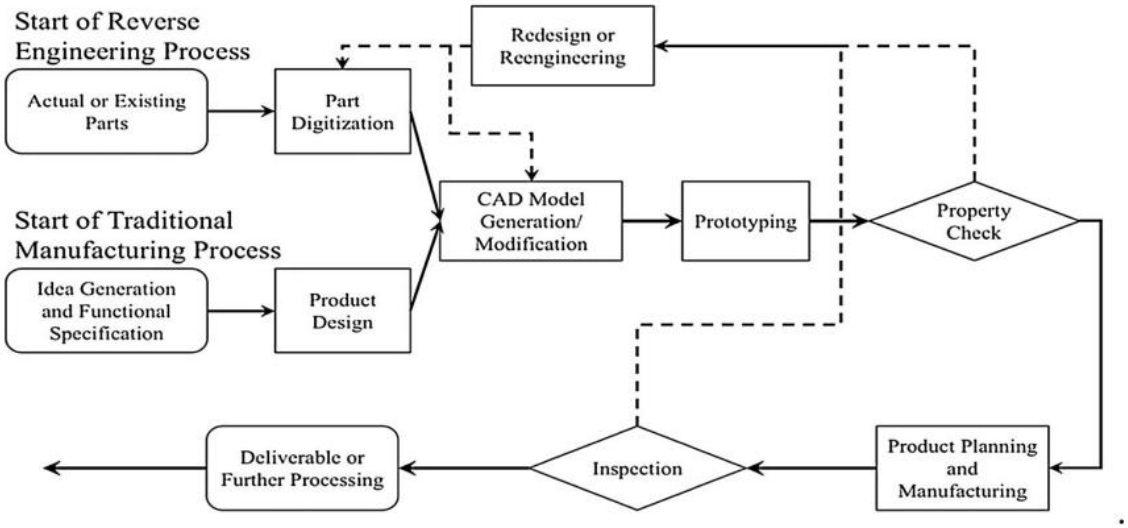


Figura 15. Comparación del proceso de fabricación por ingeniería inversa vs tradicional [17]

Para el modelado tradicional, se requieren las especificaciones funcionales de la parte que se va a diseñar, mientras que para un diseño por ingeniería inversa se necesita tener la pieza existente. Esto puede ser de gran utilidad cuando se tienen elementos y los fabricantes no proporcionan las especificaciones de diseño de los mismos, como, por ejemplo, turbinas. [17]

Las principales aplicaciones de la ingeniería inversa son las siguientes:

- Diseñar un nuevo producto: Se puede generar nuevos diseños a partir de productos existentes los cuales no tienen ninguna información en CAD.
- Modificar productos existentes: Se realizan modificaciones en productos existentes para mejorar su funcionalidad.

- Pérdida de los archivos de diseño del producto: En ocasiones, los modelos CAD de determinadas piezas dejan de estar disponibles o se vuelven corruptos, por lo que dejan de ser accesibles.
- Verificación de productos: Se puede utilizar para comparar el CAD diseñado para verificar que en la fabricación no se han producido desviaciones respecto del diseño original.[17]

Los pasos a seguir para generar un modelo CAD con ingeniería inversa con los siguientes:

1. Preparación del objeto: En ocasiones, antes de escanear la parte puede ser necesario preparar la superficie y aplicar un producto específico a la pieza, ya que los escáneres utilizan láseres para obtener la información, y en función del material pueden reflejarse.
2. Escaneo: Se utilizan escáneres 3D para obtener una malla de punto digital. Se escanea la pieza desde varios ángulos para obtener la mejor calidad de malla posible.
3. Procesamiento y refinamiento de los datos: En la mayor parte de los casos, se requieren escáneres adicionales para refinar la malla y capturar bien todos los detalles de la pieza.
4. Conversión de los datos a archivo CAD: Una vez se tiene la malla refinada, es necesario exportarla en un archivo que el software CAD que se vaya a emplear pueda manejar.[18]

2.4. HUELLA ECOLÓGICA

Aplicar el diseño ligero generativo puede ayudar a reducir la Huella Ecológica, que es una herramienta que permite medir el impacto total de cada una de las actividades realizadas en el planeta. Para el cálculo de la huella ecológica se tiene en cuenta el consumo de recursos, junto con los residuos que este consumo genera. También es relevante el factor de huella ecológica, ya que varía en función del recurso o actividad que se esté realizando. La biocapacidad de la Tierra es otro de los factores a considerar para este cálculo, debido a la importancia que tiene saber cuál es esta capacidad para regenerar recursos y absorber los

deshechos generados. Comparar el consumo con la biocapacidad disponible nos da como resultado la huella ecológica de una actividad, que se mide en unidades de área. [19]

La situación de la huella ecológica en España estimada del año 2022 es la siguiente:

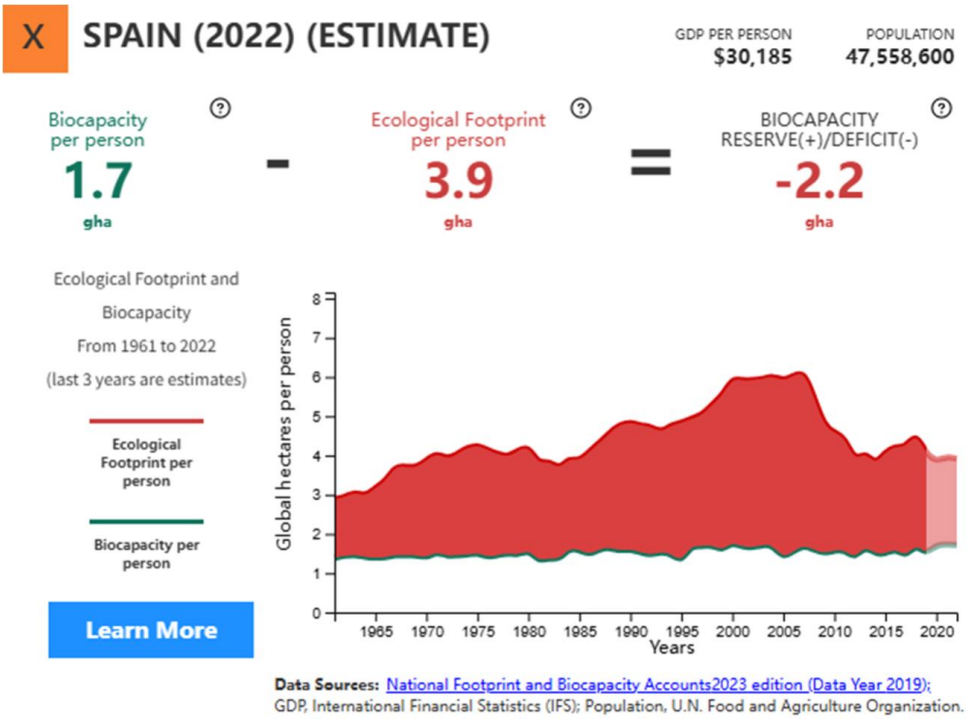


Figura 16. Déficit de Biocapacidad en España en el año 2022 [20]

En la Figura 16 se puede observar que la biocapacidad disponible por persona es inferior a la huella ecológica por persona, por lo que España, al igual que la mayoría de los países europeos, se está generando un déficit de biocapacidad.

La huella de carbono es una forma más precisa de medir el impacto ambiental, ya que se enfoca en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que generan las actividades realizadas, mientras que la huella ecológica es de carácter global, y por lo tanto, su cálculo resulta más complejo. Al ser una métrica más estrecha, la huella de carbono puede ser de mayor utilidad para mejorar la sostenibilidad de una actividad, o en este caso, de un proceso de fabricación. [21]

Para el cálculo de la huella de carbono se deben todas las fuentes de emisiones de GEI. Una vez se obtiene el número, resulta de gran utilidad para aplicar medidas de reducción efectivas a organizaciones o productos. Si se habla de la huella de carbono de una organización, se incluyen para el cálculo el total de GEI que se emiten por efecto directo o indirecto que provienen del desarrollo de la actividad de la misma. En cuanto a la huella de carbono de un producto, se tienen en cuenta los GEI que han sido emitidos a lo largo del ciclo de vida. Este periodo incluye la extracción de materias primas, procesado y fabricación, distribución, uso y final de la vida útil.

Las emisiones producidas pueden ser directas o indirectas. A continuación, se explica la diferencia:

- Emisiones directas de GEI: Son las que provienen o están bajo control total de la entidad que las reporta. Esto incluye las emisiones debido a procesos de fabricación, como los gases emitidos por una fábrica.
- Emisiones indirectas de GEI: Son las generadas debido al consumo de electricidad por fuentes externas. También incluyen los servicios subcontratados [22].

A pesar de que la definición de los distintos alcances está definida principalmente para la huella ecológica referida a las organizaciones, también se aplica para productos. Se definen tres alcances:

Alcance 1: Incluye las emisiones directas para el cálculo mencionadas anteriormente No se incluyen las emisiones que proceden de la combustión de biomasa.

Alcance 2: Son las emisiones indirectas causadas por energía, es decir, las emisiones derivadas del consumo de electricidad del proceso.

Alcance 3: Estas emisiones son las más complejas de calcular, ya que provienen de fuentes que no están directamente controladas ni son propiedad de la empresa que reporta las emisiones, por lo que incluyen la cadena de suministro. Para muchas industrias, la mayor parte de las emisiones totales de GEI pertenecen a este alcance [23].

En cuanto a la formulación para el cálculo de la huella de carbono, se muestra en la Ecuación 1:

$$Huella\ de\ carbono = Dato\ Actividad\ x\ Factor\ Emisión$$

Ecuación 1. Fórmula para el cálculo de la huella de carbono

Donde:

- Dato de actividad: Parámetro que define el grado de actividad que genera emisiones de GEI. Ej. KWh de electricidad consumidos por una máquina.
- Factor de emisión: Valor que representa la cantidad de GEI que se emiten por unidad del dato de actividad analizado. Puede variar en función de varios factores, como por ejemplo, el territorio, o en el caso de la electricidad, el origen de la misma.

Las unidades en las que se mide dato de actividad tienen que ser coherentes con las del factor de emisión para que el cálculo sea correcto. El resultado que se obtiene es una cantidad medida en unidades de masa (g, kg, t, etc) de CO_2 equivalente.[22]

El CO_2 equivalente es una unidad estandarizada que sirve para representar la cantidad de CO_2 que tiene un impacto equivalente al que tendrían otros GEI durante un periodo de tiempo de aproximadamente 100 años. Según el Protocolo de Kioto y el Acuerdo de París, los principales GEI son: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC), hexafluoruro de azufre (SF_6).

Para calcular el CO_2 equivalente, se multiplica el GEI por su potencial de calentamiento global (PCA) correspondiente. El PCA indica cuánto calor puede atrapar el GEI tomando como base el CO_2.[24]

Existen diferentes normas, metodologías y protocolos para calcular la huella de carbono, entre las que se encuentran las siguientes:

1. *Greenhouse Gas Protocol Corporate Standard (GHG Protocol*). Sus desarrolladores son el *World Resource Insititute* (Instituto de Recursos Mundiales) y el *World*

Business Council for Sustainable Development (Consejo Empresarial Mundial para el Desarrollo Sostenible), y es uno de los más utilizados internacionalmente.

2. *UNE-EN ISO 14064-1*. Fue desarrollada en 2006 y se compone de 3 partes. En la primera parte, que es la relevante para el cálculo de la huella de carbono, se definen los principios y requisitos para la cuantificación y el informe de emisiones y remociones de GEI.
3. *UNE-EN ISO 14065*: 2021. Contiene los requisitos para los organismos encargados de validar la verificación de los GEI.
4. UNE-ISO/TR 14069: 2015. Sirve como guía para la aplicación de la ISO 14064-1.
5. *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*. Es una guía completa que permite calcular los GEI que provienen de distintas fuentes y sectores. Incluye una lista detallada de factores de emisión.
6. *Bilan Carbone* (Francia). Herramienta metodológica para la medición de emisiones GEI, elaborada por la *Agence d'Enviroment et de la Maîtrise de l'Energie* (Agencia Francesa del Medio Ambiente y gestión de la Energía), e implementada en 2004.
7. Indicadores GRI (Global Reporting Initiative). Es una iniciativa internacional, y tiene como objetivo establecer un marco de trabajo común a nivel mundial. Comunica de una forma clara y transparente las cuestiones relacionadas con sostenibilidad a través de sus Memorias de Sostenibilidad.
8. Recomendación de la comisión de 9 de abril de 2013. Trata sobre el uso de métodos comunes para medir y comunicar el comportamiento ambiental que los productos y las organizaciones tienen en su ciclo de vida.
9. ISAE 3410. Norma internacional aprobada en marzo de 2012 por el Consejo de Normas Internacionales de Auditoría y Aseguramiento (IAASB). Abarca los Contratos de Aseguramiento de Informes de GEI.

Cabe destacar que las metodologías reconocidas se basan en los principios de relevancia, integridad, consistencia, exactitud y transparencia.[22]

El proceso de fabricación más común para aplicar OT es la fabricación aditiva, debido a que permite mediante algoritmos crear diseños que por métodos de fabricación tradicionales

sería demasiado complejo fabricar. A pesar de tener muchas ventajas en el diseño, se deben tener en consideración algunos factores como el acabado final, la resistencia y flexibilidad del componente a fabricar o los costes de la impresora y el material. [25]

Para analizar el impacto en la sostenibilidad que tiene la OT en la fabricación aditiva, se pueden analizar las diferentes etapas que forman parte en el proceso de fabricación, tomando como ejemplo la tecnología FDM. Se distinguen tres etapas: Producción de filamentos, fabricación y post procesado. Para analizar la sostenibilidad, se muestran en la Figura 17 las tres dimensiones que se tienen en cuenta: La dimensión de material, la dimensión de energía y la dimensión de tiempo.

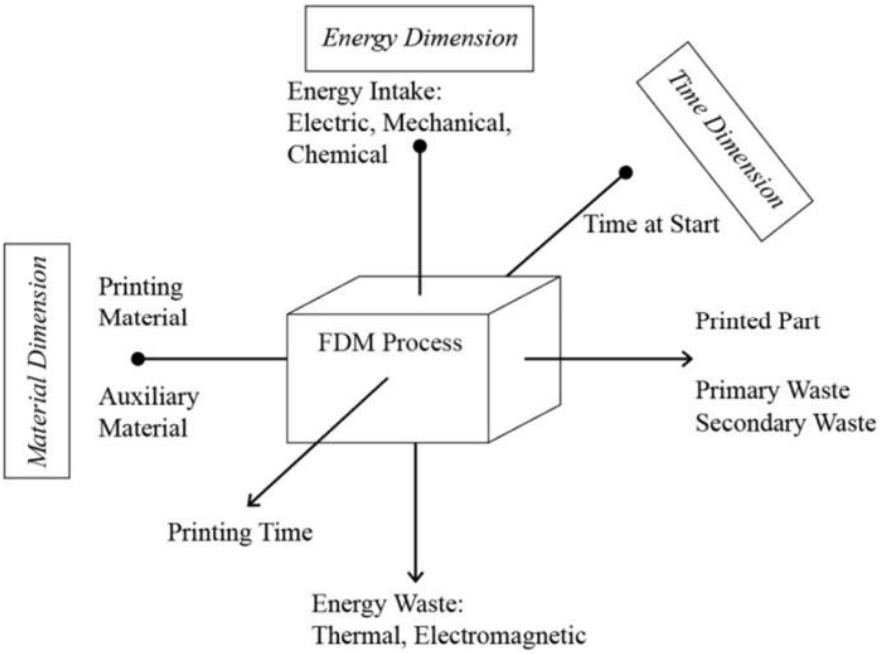


Figura 17. Análisis de sostenibilidad en tres dimensiones [26]

Dentro de la dimensión de material se encuentra el material utilizado como material principal y el auxiliar. En la dimensión de energía, se tiene en cuenta la energía eléctrica, mecánica y química que se ha suministrado, y en la dimensión de tiempo, se tiene en cuenta el tiempo del proceso. Estas variables, junto con otras como la densidad de impresión o la resistencia

que soporte la pieza final, serán las que se analizarán en este proyecto para ver el impacto que tiene la OT en la sostenibilidad. [26]

2.5. BIELAS

La biela es un elemento esencial en los motores de combustión interna. Se encarga de transmitir la potencia generada por la combustión en movimiento, por lo que debe soportar cargas de tracción y compresión altas. Tiene forma de brazo, está articulada en los extremos, conecta el cigüeñal con el pistón y se aloja en la culata del motor.

Debido a las cargas que tiene que soportar la pieza, es habitual fabricarlas mediante forjado y mecanizado. El material típico es el acero templado, pero también existen motores de alto rendimiento para los que se usan bielas fabricadas en titanio o aluminio.

Su función principal es transmitir la presión del pistón accionado por los gases de combustión al cigüeñal. El movimiento que se transmite a esta parte del motor es rotacional, por lo que hay una transformación de movimiento lineal en circular que se denomina efecto biela-manivela. [27]

Las principales partes de una biela son las siguientes:

1. La cabeza, también conocida como "anillo grande" o "*big end*". Tiene forma de abrazadera y está formada por dos mitades. Una de ellas está pegada al cuerpo de la biela, y la otra va unida a la primera mitad por dos tornillos y recibe el nombre de sombrerete. Esta parte de la biela es la que está unida a la muñequilla del cigüeñal.
2. El cuerpo es la parte central de la biela, y la más crítica, por ser la que más esfuerzos soporta. Puede tener diferentes formas según el tipo, siendo de cruz la más común, en I la más utilizada en motores convencionales y en H en motores de alto rendimiento.

Figura 18. Tipos de biela según el cuerpo [28]

3. El pie está situado en el otro extremo de la biela, y abraza el eje del pistón. Su diámetro es inferior al de la cabeza y también es conocido como "anillo pequeño" o "*small end*". [29]

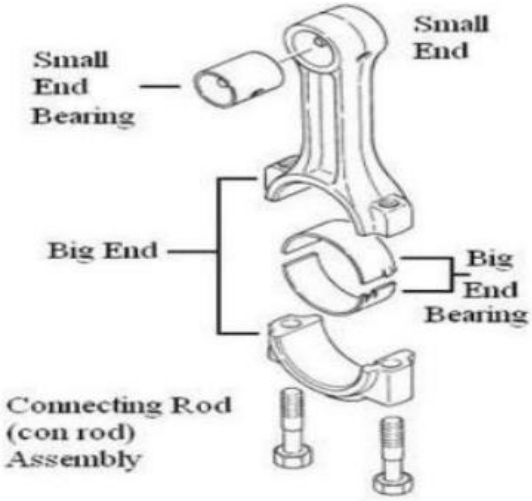


Figura 19. Partes de una biela [30]

Existen diversos métodos para la fabricación de estos componentes, pero los más comunes son la forja y la fundición.

En la forja se obtiene la forma del componente metálico mediante la aplicación de fuerzas de compresión en el material cuando está en estado sólido. Para ello, se utilizan herramientas y matrices. Este proceso de fabricación está compuesto por las siguientes fases de forma genérica:

- Corte: Es el primer paso, y consiste en recortar el material en la forma deseada para comenzar el proceso de forjado.
- Calentamiento: Se calienta la pieza previamente cortada por encima de la temperatura de recristalización para hacerla más maleable. Generalmente se usan hornos de inducción para esta parte del proceso.
- Forja por laminación: Se pasa por diferentes rodillos para obtener la forma del material deseado antes de pasar a la forja en matriz cerrada.
- Forja en matriz cerrada: La pieza se coloca en la matriz cerrada para después ser comprimida hasta alcanzar la forma final.
- Recorte y punzonado: Se quita el exceso de material y se realizan los agujeros y taladros pertinentes.
- Tratamiento térmico: Se aplica un tratamiento térmico a la pieza, generalmente un temple, para mejorar sus propiedades mecánicas.
- Granallado: Se aplica este proceso para eliminar las impurezas o la cascarilla de la pieza.
- Corrección: Se realizan correcciones finales para que la pieza cumpla con los requerimientos técnicos y los estándares de calidad.

Por otro lado, el método de fundición utiliza metal líquido que es vertido en un molde, típicamente de arena, Una vez solidificado, el molde se rompe para poder completar el proceso. Los procesos principales que sigue este método son los siguientes:

- Fabricación del modelo: Se fabrica un modelo con el diseño deseado, generalmente hecho de metal y con alta precisión.
- Moldeo: El modelo se coloca en una caja que se rellena con arena para crear el molde. La arena debe ser compactada para garantizar la forma del molde.

- Fusión del metal: El metal que se va a utilizar para la pieza es fundido en un horno y llevado a la temperatura óptima de vertido.
- Vertido: Una vez fundido, se vierte el material en el molde con cuidado, y se espera hasta que solidifique.
- Enfriamiento: Se espera a que toda la pieza haya solidificado y se enfríe antes de retirarla del molde para su correcta conformación.
- Desmoldeo: Una vez ha solidificado por completo, se rompe el molde para obtener la pieza final.
- Acabado: Al igual que en el forjado, puede ser necesario aplicar tratamientos térmicos o mecanizados posteriores para cumplir con las especificaciones requeridas.

Ambos métodos incluyen controles de calidad a lo largo del proceso productivo para garantizar la correcta elaboración de la pieza. Para estos procesos también es necesario realizar un diseño previo en softwares CAD y simulaciones para comprobar la funcionalidad del componente, así como un correcto empaquetamiento y almacenamiento para asegurar el buen estado del producto al comprador final. [31]

Estos procesos de fabricación requieren moldes y matrices que limitan la geometría y el diseño de las bielas. Las formas de las piezas son relativamente simples para evitar defectos y problemas en el conformado, lo que resulta en componentes con exceso de masa, y muchas veces, sobredimensionados. Para mejorar estos aspectos, en este proyecto se analizan las posibilidades que ofrece la OT.

Se analiza en mayor profundidad un proceso de fabricación de biela de acero forjado para poder hacer después una estimación de la huella de carbono, en base al artículo *"Connecting Rod Manufacturing"* de *A. Kar*. [32]
Para el análisis del proceso, se realiza un diagrama sinóptico haciendo hincapié en las operaciones e inspecciones que lo conforman.

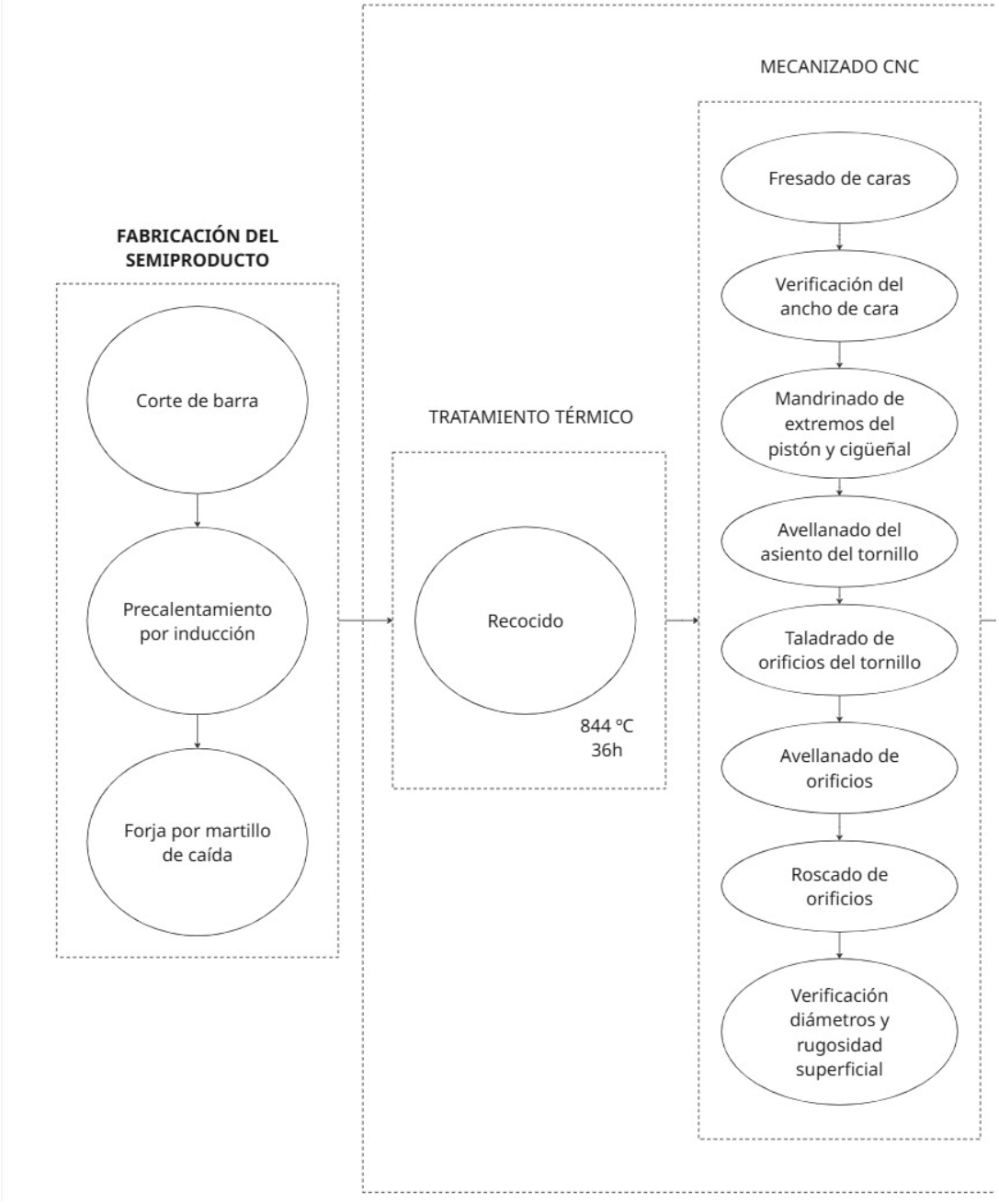


Figura 20. Diagrama sinóptico del proceso de fabricación de una biela forjada. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del artículo "Connecting Rod Manufacturing" [31]

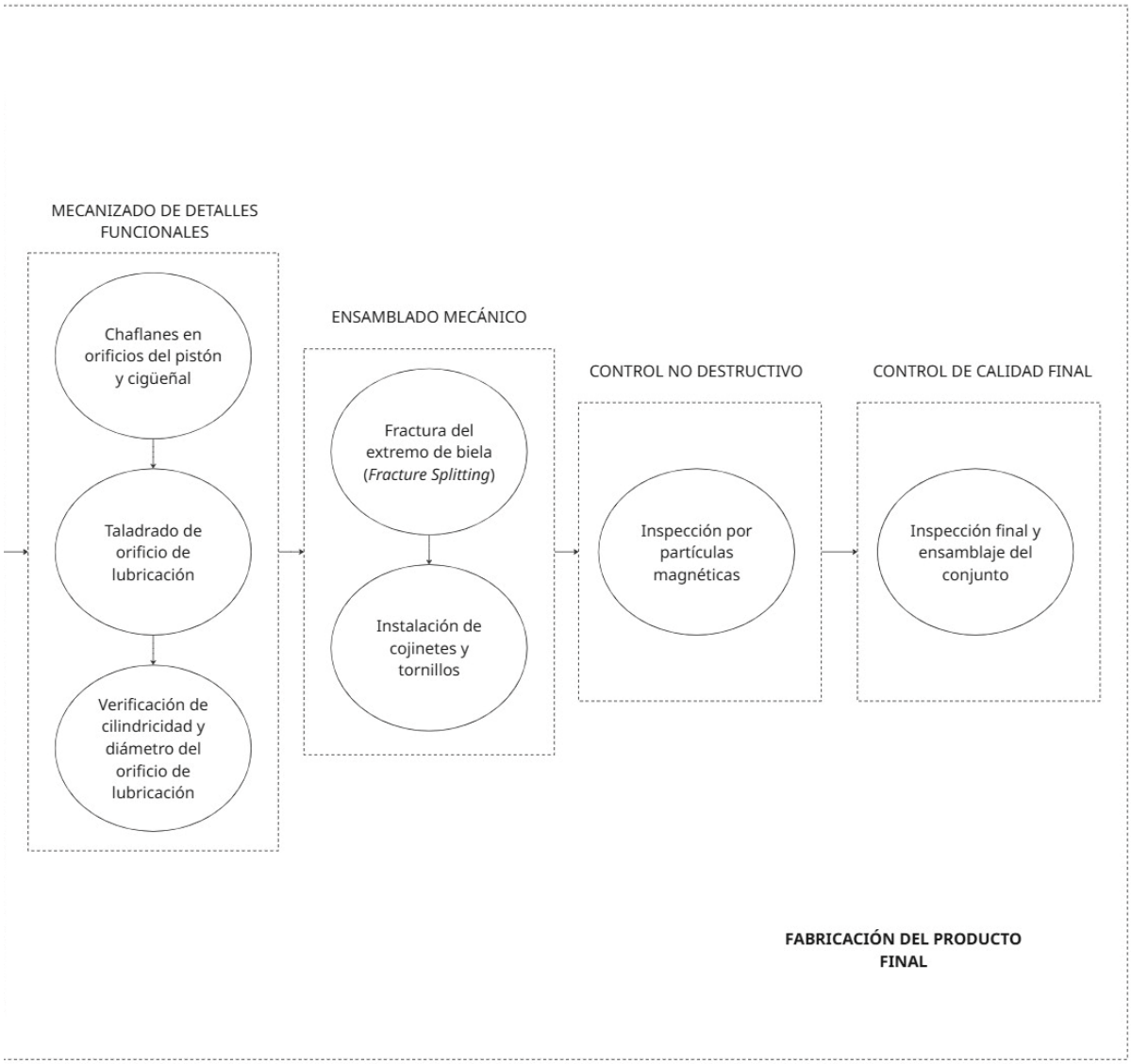


Figura 21. Diagrama sinóptico del proceso de fabricación de una biela forjada. Fuente: Elaboración propia a partir de los datos del artículo "Connecting Rod Manufacturing" [31]

Tabla 3. Fases, subfases y operaciones del proceso de fabricación de una biela forjada. Elaboración propia a partir de los datos del artículo "Connecting Rod Manufacturing" [32]

	Fase	Subfase	Operación	Descripción
SEMIPRODUCTO	10	10	10	Corte de barra
			20	Precalentamiento por inducción
			30	Forja por martillo de caida
PRODUCTO FINAL	20	10	10	Recocido del semiproducto forjado a 844 °C
		20	10	Fresado de caras
			20	Verificación del ancho de cara
		30	10	Mandrinado de extremos de pistón y cigüeñal
			20	Avellanado del asiento de los tornillos
			30	Taladrado de orificios para tornillos
			40	Avellanado de orificios de tornillo
			50	Roscado de orificios
			60	Verificación de diámetros y rugosidad superficial
		40	10	Chaflanes en orificios del pistón y del cigüeñal
			20	Taladrado de orificio de lubricación
			30	Verificación de cilindricidad y diámetro del orificio de aceite
		50	10	Fractura controlada del extremo de la biela
			20	Montaje de cojinetes y tornillos
		60	10	Inspección por partículas magnéticas
		70	10	Inspección final y ensamblaje del conjunto

El diseño no ha sido incluido en el diagrama sinóptico de la Figura 21, porque se ha realizado exclusivamente el análisis de las fases y operaciones particulares de una biela por forjado. La Tabla 3 muestra la información resumida de las fases, subfases y operaciones del proceso.

Capítulo 3. METODOLOGÍA

3.1. PLANIFICACIÓN

La planificación del proyecto se muestra en la Figura 8:

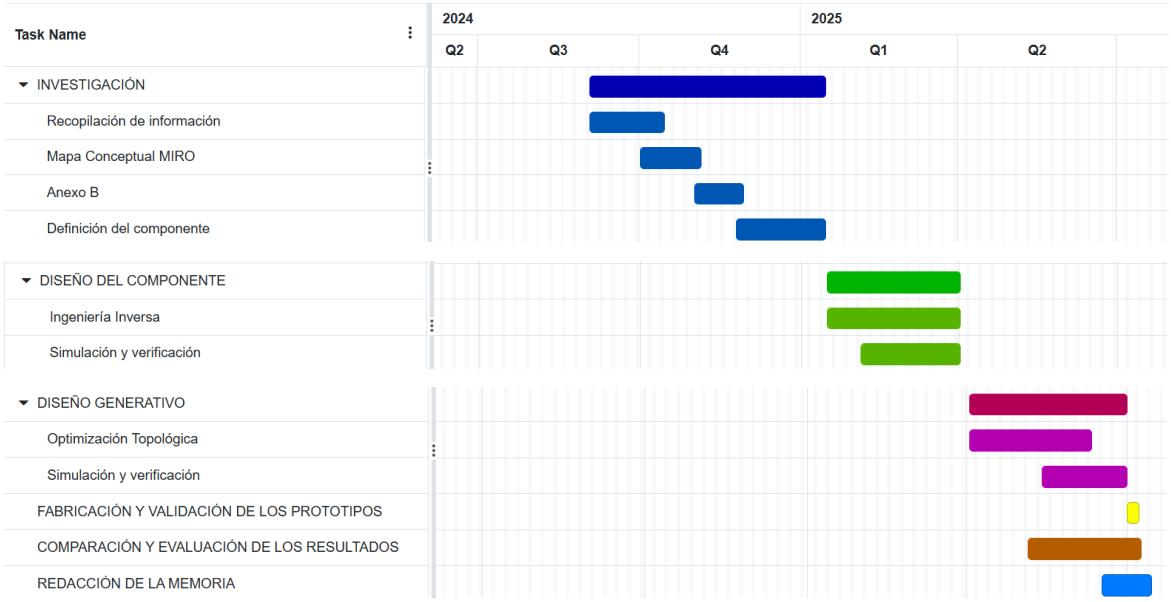


Figura 22. Diagrama de Gantt del proyecto. Generado con: Online Gantt [33]

Se ha detallado el proceso en el diagrama de flujo mostrado en la Figura 23:

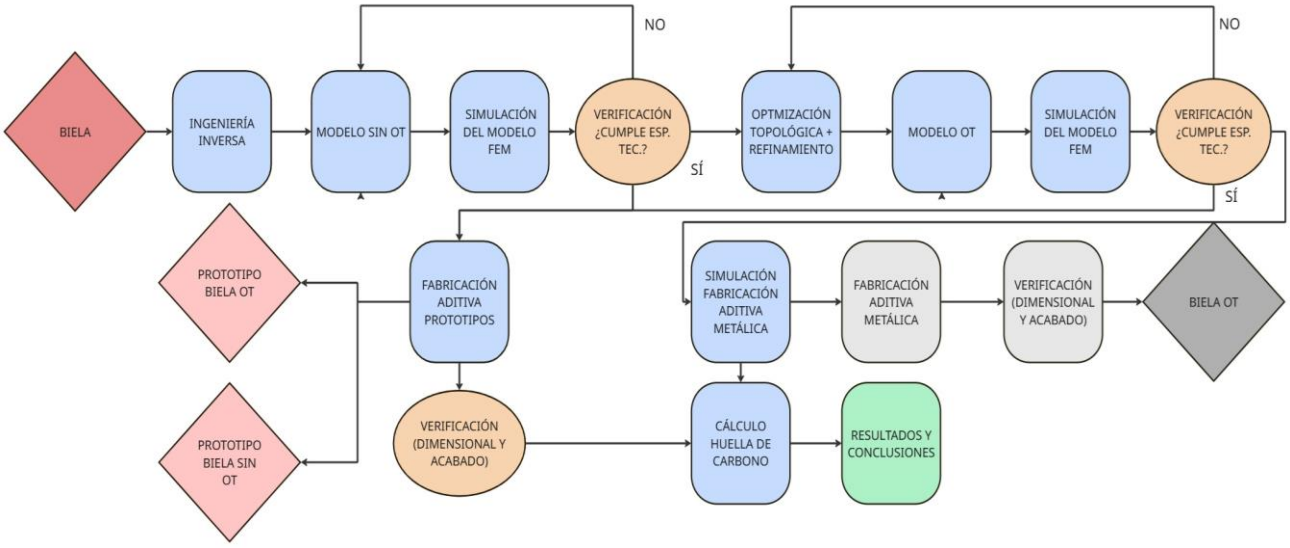


Figura 23. Diagrama de flujo de trabajo del proyecto. Fuente: elaboración propia.

3.2. RECURSOS EMPLEADOS

Se selecciona una biela como componente mecánico a analizar, por ser un elemento sometido a cargas críticas dentro de un motor de combustión. Además, se ha explicado en el Capítulo 2. que, debido a los procesos de fabricación actuales, son piezas que están generalmente sobredimensionadas por las limitaciones geométricas que estos métodos presentan.

Al disponer de este elemento en el laboratorio, se ha decidido realizar un proceso ingeniería inversa, escaneando la biela, en lugar de modelarla desde cero. Para esta fase se han utilizado los siguientes recursos:

- Escáner HandySCAN3D con tecnología láser

- VXelements: Es una plataforma de Creaform que ofrece softwares 3D de forma integrada, enfocada principalmente en escaneo y medición 3D. Los softwares de la plataforma utilizados para en proyecto son:
    - VXscan: Permite ver el escaneado en tiempo real y adaptar los parámetros de escaneado.
    - VXmodel: Se utiliza para procesar el escaneado.

Para la simulación y verificación de la geometría se ha utilizado:

- Solid Edge 2023: Software de diseño CAD de Siemens. Se utiliza para realizar las simulaciones iniciales en la pieza sin optimizar y para validar la pieza una vez optimizada mediante análisis elementos finitos.

Para la optimización topológica:

- Altair Inspire: Pertenece a Altair Engineering Inc., empresa adquirida por Siemens en 2025. Es un software de simulación y diseño generativo con el que se ha optimizado la biela en este proyecto.

Las impresoras utilizadas para la fabricación de prototipos es la siguiente:

- HP Jet Fusion 580 (MJF)

Para simular la impresión en otras tecnologías, se han utilizado los siguientes softwares:

- Preform (FDM)
- Ultimaker cura (SLA)

Capítulo 4. DESARROLLO DEL TRABAJO

4.1. INGENIERÍA INVERSA

4.1.1. ESCANEADO 3D

Para obtener el modelo CAD, se realiza un escaneo 3D partiendo de una biela con el cuerpo en I disponible en laboratorio de fabricación de la Universidad Pontificia Comillas ICAI. El escáner utilizado es el HandySCAN3D mostrado en la Figura 24:

Figura 24. Escáner HandySCAN3D[34]

Primero se prepara la superficie donde se colocará el componente. La superficie empleada es una tabla blanca con *targets* adhesivos, que son unos pequeños puntos que utiliza el escáner como referencia. También se colocan seis esferas de referencia.

En primer lugar, se realiza un primera sesión de escaneo 3D de la pieza sin spray matificante. Al ser un elemento tridimensional, el escáner tiene que ser realizado en dos partes, escaneándose primero la parte superior y posteriormente la inferior.

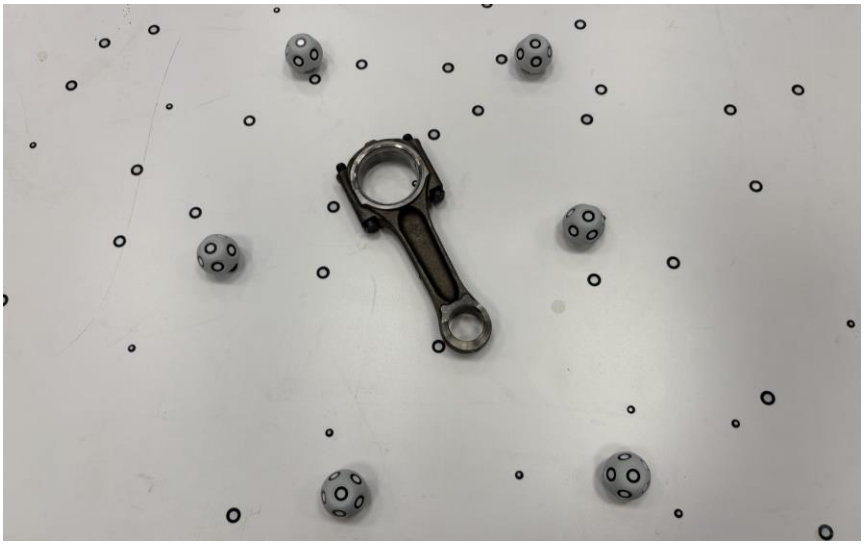


Figura 25. Preparación del escaneado 3D. Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos del escaneado se exportan a formato STL para realizar el procesamiento de la malla. Al abrir los archivos en VXmodel se observa que la calidad de la malla no ha sido la esperada, ya que se percibe una rugosidad excesiva. Se puede interpretar que el escaneo no se ha procesado correctamente debido a que la pieza es metálica y el láser ha podido reflejar, empeorando la calidad de la nube de puntos como se muestra en la Figura 26.

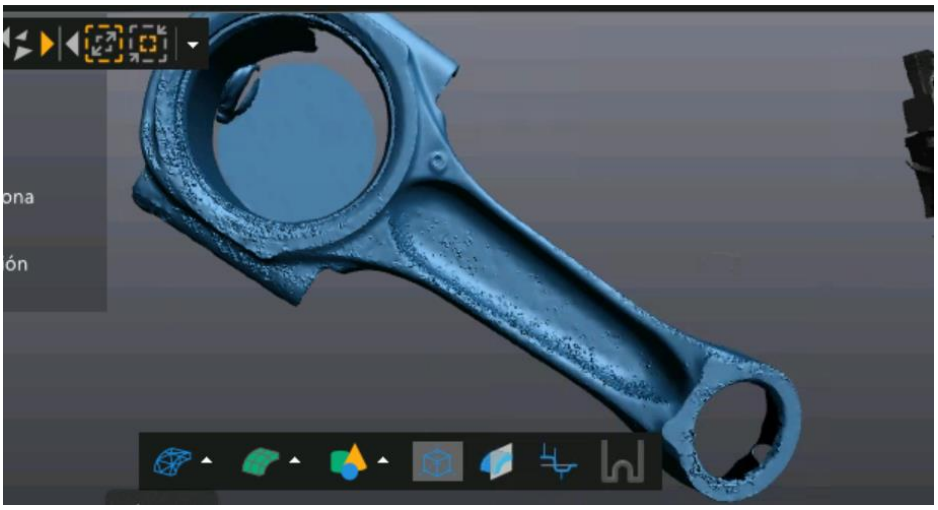


Figura 26. Resultado del escaneo de la biela sin polvo. Fuente: elaboración propia con VXmodel

Se procede a escanear la biela con spray matificante. La preparación del escaneo es similar, pero en esta segunda iteración se utilizan dos esferas de posición adicionales para elevar la pieza y conseguir una mejor calidad en el proceso, además del polvo blanco matificante.

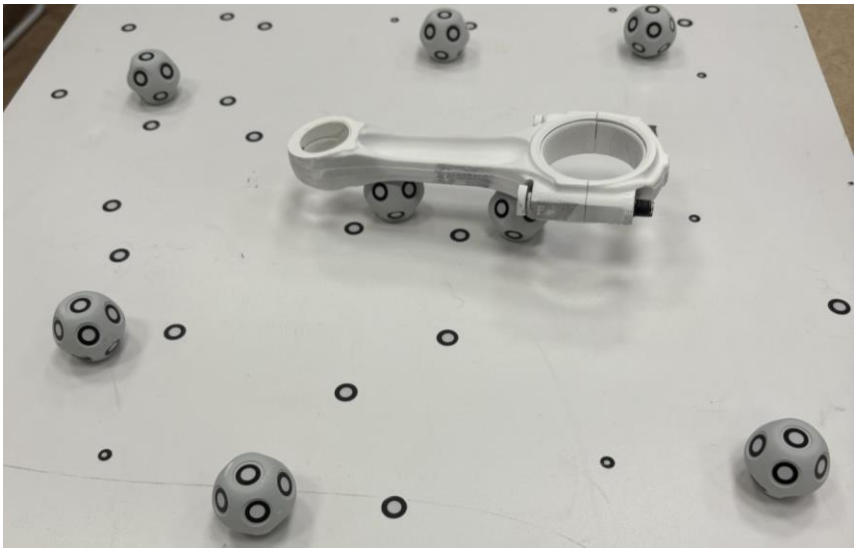


Figura 27. Preparación del escaneo 3D con spray matificante. Fuente: elaboración propia

En el software VXscan se puede observar en tiempo real el proceso, como se muestra en la Figura 28.

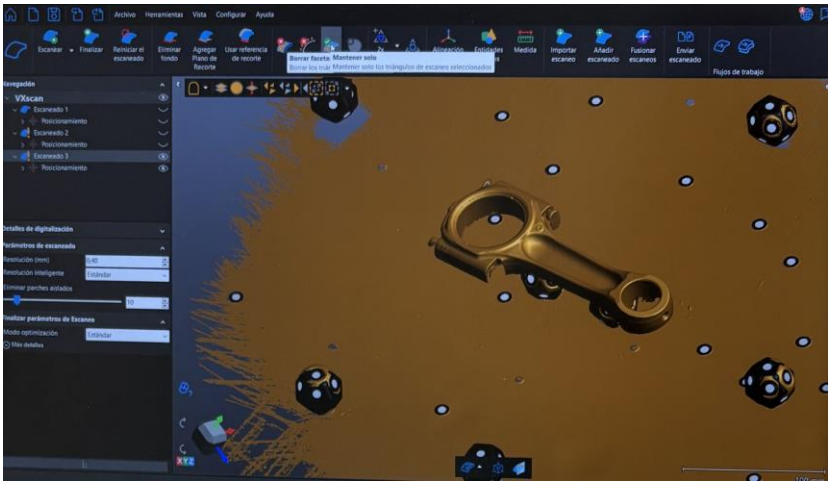


Figura 28. Seguimiento en tiempo real del proceso de escaneo con VXscan. Fuente: elaboración propia

Durante la ejecución del escaneo, hay que mantener una distancia determinada entre el escáner y la pieza. El equipo marca con una luz la distancia a la que se coloca respecto de la pieza, y varía en función de si está situado demasiado lejos (azul), a una distancia adecuada (verde) o demasiado cerca (rojo).

En esta sesión se han realizado tres escaneos, uno de la parte superior de la pieza, y dos de la parte inferior, para asegurar la calidad del procesamiento de la malla. Se puede observar en la Figura 28 el fondo también queda escaneado y forma parte de la geometría que procesa la herramienta, por lo que es necesario eliminarlo antes de exportar la malla para facilitar el procesamiento de la parte.

Una vez terminada la sesión de escaneo se guarda y se exportan los archivos en STL para proceder con el siguiente paso.

4.1.2. PROCESAMIENTO DE LA MALLA PARA MODELADO DIGITAL

Para el procesamiento y refinamiento de la malla se ha utilizado el software VXmodel de la plataforma VXelements. Se utilizan los resultados del escaneado con spray matificante.

Inicialmente, se parte de tres escaneos diferentes. Debido a que la calidad del escaneado obtenida en una de las mitades de la biela no resulta lo suficientemente precisa. Se detallan en orden los pasos dados para obtener la modelo digital de la biela.

1. Se juntan los dos escaneos de la parte inferior como se muestra en la Figura 29 y Figura 30. Para ello, se ha utilizado la herramienta de mejor ajuste (*Best fit*), que permite alinear dos mallas. Se puede hacer automática o manualmente. Se ha optado por el proceso manual, ya que permite seleccionar puntos comunes en ambas mallas para realizar una alineación más precisa. Después, con el comando fusionar, se fusionan para que el programa las identifique como una única

Figura 29. Escaneos 1 y 2 de la parte inferior de la biela sin unir. Fuente: elaboración propia con VXmodel

Figura 30. Fusión de los escaneados de la parte inferior de la biela. Fuente: elaboración propia con VXmodel

2. Posteriormente, se alinea la malla fusionada en el primer paso con la misma herramienta, como se muestra en la Figura 31. Despúes se fusionan las mallas, dando lugar a una nube de puntos que representa la geometría completa de la biela.

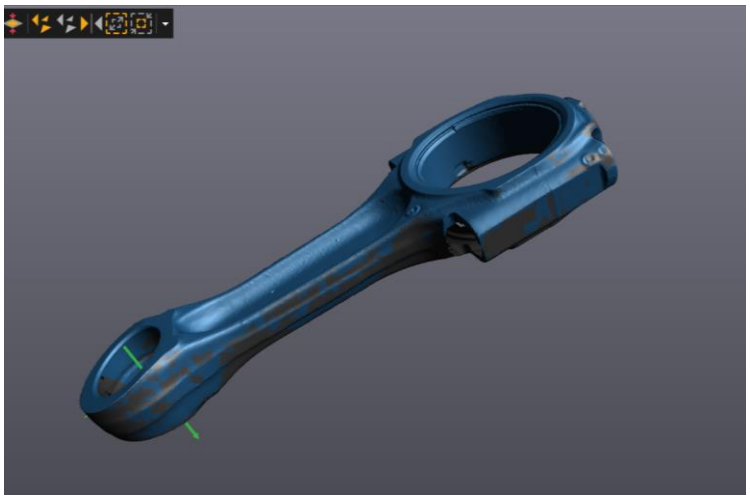


Figura 31. Alineación de las dos mitades de la biela. Fuente: elaboración propia con VXmodel

3. Se generan entidades para poder alinear la pieza y facilitar su modelado posterior en Solid Edge. Se crean dos planos de simetría y cilindros en ambos extremos de la biela con la herramientas disponibles de entidades.

4. Una vez definidas las entidades, se alinea la pieza con los ejes de referencia, haciendo uso de la herramienta de alineación por entidades.

5. Se observa en la Figura 31 que la biela escaneada tiene el cuerpo en forma I, pero para aplicar optimización topológica en los siguientes pasos es de mayor interés que sea en forma de H. También se elimina el agujero pasante situado en el pie de la biela para simplificar el mallado en las simulaciones posteriores. Los agujeros de los tornillos de la cabeza de la biela se cierran por el mismo motivo. Se modifica la geometría con las herramientas del bloque "Mejorar" para darle la forma buscada.

6. Una vez corregido el cuerpo de la biela, se trabajan los posibles huecos que pueda haber en el resto de la geometría con el objetivo de crear una nube de puntos cerrada que permita crear un sólido en Solid Edge. Para ello, se utilizan las herramientas del grupo de "Malla" y "Mejorar". Se aplica finalmente la operación "Arreglar Malla" para eliminar puntas o agujeros pequeños que no sean identificables a simple vista. En la Figura 32 se observan todas las operaciones realizadas.

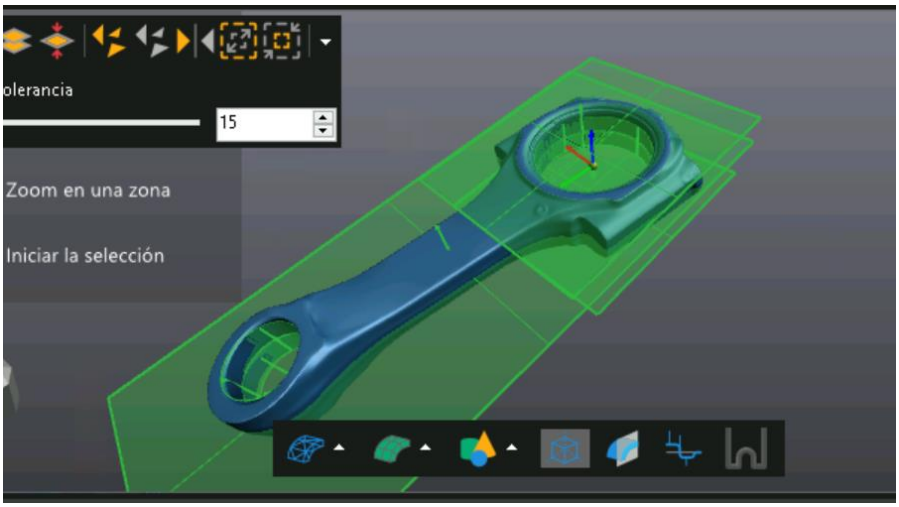
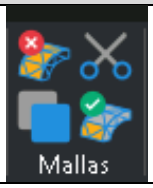


Figura 32. Biela modificada con entidades. Fuente: elaboración propia con VXmodel

7. Por último, se genera una superficie de la geometría para poder exportar la geometría en formato STEP y así poder trabajar con ella en los distintos softwares. El número de NURBS obtenido en esta superficie es de 1355.

A continuación, se muestran en la Tabla 4 las herramientas utilizadas del software VXelements para el proceso de procesamiento de malla para el modelado digital.

Tabla 4. Resumen de herramientas utilizadas en VXelements. Fuente: elaboración propia con datos de VXmodel

Grupo de herramientas	Operaciones utilizadas	Aplicación
	• Borrar • Mantener solo	Eliminar o mantener partes de la malla.
	• Fusionar	Fusiona dos mallas.
	• Plano • Cilindro	Se generan entidades para facilitar las alineaciones.
	• Mejor ajuste • Alineación basada en entidades	Facilita la alineación de mallas, ya sea entre dos distintas o con los ejes de referencia.
	• Rellenar orificios • Alisar malla • Reducir • Borrar elementos • Lija	Se modifica la malla para obtener la forma y la calidad requerida.
	• Arreglar la malla	Permite arreglar imperfecciones de la malla de forma semiautomática.

4.2. ANÁLISIS INICIAL DEL MODELO

4.2.1. PREPARACIÓN DEL MODELO EN SOLID EDGE

La malla en formato STEP generada gracias a la ingeniería inversa se importa en Solid Edge con el objetivo de prepararla para la simulación. Cuando se abre la nube de puntos, se genera automáticamente un sólido, lo cual indica que el procesado en VXelements ha sido correctamente realizado.

Los agujeros pasantes de la cabeza y pie de la biela se rediseñan con la operación agujero para que sean completamente cilíndricos y evitar así problemas futuros en la aplicación de cargas en la simulación, como se observa en la Figura 33 .

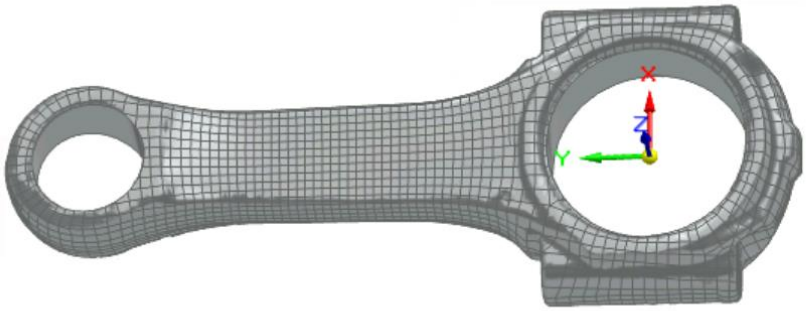


Figura 33. Biela rediseñada en Solid Edge. Fuente: elaboración propia con Solid Edge

Una vez se ha modificado la geometría, se asigna material a la pieza para evaluar el peso. Debido a que la geometría de partida se ha modificado, se tomarán como referencia las dimensiones y el peso proporcionado por el CAD.

El material seleccionado es el AISI 4340. Es un acero al carbono de baja aleación, y su composición química, propiedades físicas y propiedades mecánicas se observan en las siguientes tablas:

Tabla 5. Composición química del AISI 4340 [35]

Elemento	Contenido (%)
Hierro, Fe	95.2 - 96.3
Níquel, Ni	1.7 - 2.0
Cromo, Cr	0.7 - 0.9
Manganeso, Mn	0.6 - 0.8
Carbono, C	0.4 - 0.4
Molibdeno, Mo	0.2 - 0.3
Silicio, Si	0.2 - 0.3
Azufre, S	0.04
Fósforo, P	0.04

Tabla 6. Propiedades físicas del AISI 4340 [35]

Propiedades	Métrica
Densidad	7,85 g/cm³
Punto de fusión	1427°C

Tabla 7. Propiedades mecánicas del AISI 4340 [35]

Propiedades	Métrica
Resistencia a la tracción	745 MPa
Límite elástico	470 MPa
Módulo de masa (típico del acero)	140 GPa
Módulo de cizallamiento (típico del acero)	80 GPa
Módulo elástico	190 - 210 GPa
Relación de Poisson	0.27 - 0.30
Alargamiento a la rotura	22%
Reducción de la superficie	50%
Dureza, Brinell	217

Las propiedades mostradas en las tablas anteriores son de la aleación sin ningún tratamiento térmico, pero la realidad es que las propiedades mecánicas pueden variar en función de los tratamientos aplicados. En la Tabla 8 se observan los rangos entre los que pueden oscilar estas propiedades.

Tabla 8. Rangos de valores para las propiedades mecánicas del AISI 4340 [36]

Propiedad	**Valor (métrico)**
Límite elástico	740 – 1860 MPa
Resistencia máxima a la tracción	860 – 1980 MPa
Alargamiento	11 – 23%
Tenacidad a la fractura por deformación plana	53 – 110 MPa√m
Módulo volumétrico	159 GPA
Coeficiente de Poisson	0.29

Para conseguir un límite elástico tan elevado, es necesario aplicar tratamientos de temple y revenido. El acero debe ser calentado entre 830 y 860 ºC, y una vez alcance una temperatura uniforme, templado rápidamente en aceite para crear una estructura martensítica. Posteriormente, se baja a temperaturas de entre 400 y 600 ºC para mejorar su tenacidad, manteniendo su resistencia [36]. Los tiempos de aplicación varían en función del tamaño de la pieza, pero se recomienda que en el temple se mantenga la temperatura una hora por cada 25 mm de espesor de la pieza, durante un mínimo de dos horas. [37]

Si se quiere refinar la estructura del acero para facilitar su mecanizado, se puede aplicar un recocido, que consiste en calentar el acero aproximadamente a 844 ºC y dejarlo enfriar lentamente en un horno. [36]

Se opta finalmente por usar un acero AISI 4340 para la simulación en Solid Edge con las siguientes propiedades mecánicas:

Propiedades

Nombre de propiedad	Valor
Densidad	7850,000 kg/m^3
Coeficiente de expansión térmica	0,0000 /C
Conductividad térmica	0,044 kW/m-C
Calor específico	477,000 J/kg-C
Módulo de elasticidad	210000,000 MPa
Coeficiente de Poisson	0,290
Límite elástico	1100,000 MPa
Tensión de rotura	1300,000 MPa

Figura 34. Propiedades del acero AISI 4340 aplicadas al modelo sin optimizar. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

Una vez definido el material, obtienen el peso de la pieza sin optimizar, que es de 0,862 kg, como se observa en la Figura 35.

Figura 35. Propiedades de la biela sin optimizar. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

.

En la Tabla 9se observan las dimensiones principales de la biela:

Tabla 9. Dimensiones principales de la biela modelada en Solid Edge

Medida	**mm**
Diámetro de la cabeza de la biela	52
Diámetro del pie de la biela	29,5
Distancia entre ejes	145

4.2.2. ANÁLISIS DE CARGAS

El estudio de cargas realizado en este proyecto se centra en las cargas estáticas de compresión y de tracción que sufre la biela cuando el motor está en funcionamiento.

No se ha realizado un análisis de fatiga, ya que el objetivo principal del proyecto es la optimización topológica. Una vez realizada la optimización, sería conveniente realizar un análisis de fatiga detallado para evaluar la durabilidad del diseño.

Se ha realizado el estudio estático siguiendo la estructura del análisis de elementos finitos realizado por A. K. Yadav, K. Ratre y B. Biswas [38], donde se realizan cuatro ensayos:

1. Ensayo de tracción aplicando carga en la cabeza de la biela, dejando el extremo del pie de la biela fijo.
2. Ensayo a compresión aplicando carga en la cabeza de la biela, dejando el extremo del pie de la biela fijo.
3. Ensayo a tracción aplicando carga en el pie de la biela, dejando el extremo de la cabeza de la biela fijo.
4. Ensayo a compresión aplicando carga en el pie de la biela, dejando el extremo de la cabeza de la biela fijo.

Estos ensayos representan los diferentes puntos del ciclo de combustión, por lo que se captura en este análisis la posible variabilidad de las cargas a lo largo del ciclo.

Los valores de las cargas aplicadas se han estimado en base a los ensayos de A. Muhammad, M. A. H. Ali, I. H. Shanono [39] y R.Ravi, K.V.P.P.Chandu, B.V Subhramanyam [40]. Se ha decidido realizar el ensayo con las cargas expuestas en la Tabla 10.

Tabla 10. Valores de las cargas aplicadas para cada ensayo. Fuente: elaboración propia

Ensayo	Carga	Valor
1. Tracción en la cabeza de la biela	• Cabeza: fuerza axial de tracción • Pie: fijo	40 kN a tracción (180º)
2. Compresión en la cabeza de la biela	• Cabeza: fuerza axial de compresión • Pie: fijo	40 kN a compresión (180º)
3. Tracción en el pie de la biela	• Pie: fuerza axial de tracción • Cabeza: fijo	15kN a tracción (180º)
4. Compresión en el pie de la biela	• Pie: fuerza axial de compresión • Cabeza: fijo	15kN a compresión (180º)

Se puede observar que los valores de las cargas de tracción y compresión para ambos extremos de la biela son iguales. R. Bottini et al. [41] indican que a altas revoluciones las fuerzas de inercia pueden generar fuerzas de tracción que tienden a arrancar la biela del cigüeñal. Estas fuerzas pueden ser similares e incluso mayores a la fuerza de compresión que sufre el pistón, y por lo tanto la biela, debido a la fuerza de compresión generada por la combustión del gas.

A continuación, se comprueba que los valores de las fuerzas seleccionados para hacer el estudio son coherentes con las presiones de combustión que puede ejercer un motor sobre la biela. Se observa un resumen de los datos de partida:

- Diámetro de la cabeza $D_1 = 52$ mm
- Fuerza axial en la cabeza (tracción o compresión) $F_1 = 40$ kN
- Diámetro del pie $D_2 = 29{,}5$ mm

- Fuerza axial en la cabeza (tracción o compresión) $F_1 = 15$ kN

Primero, se calcula el área transversal tanto de la cabeza como del pie de la biela.

$$A_1 = \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 2126{,}8\ mm^2$$

$$A_2 = \frac{\pi \cdot D_2^2}{4} = 683{,}4\ mm^2$$

Se utiliza el área transversal para calcular la presión por tratarse de fuerzas axiales. Los resultados son los siguientes:

$$p_1 = \frac{F_1}{A_1} = 18{,}81\ MPa$$

$$p_2 = \frac{F_2}{A_2} = 21{,}95\ MPa$$

Se observa que las presiones obtenidas están alrededor de 20MPa. Se comparan estos valores con valores de motores reales.

En el artículo "*2014 F1 explained: The power unit*" [42] publicado por *Racecar engineering* se menciona que el cigüeñal y los pistones están sometidos a grandes esfuerzos, y que la presión dentro de la cámara de combustión puede alcanzar alrededor de los 200 bares, o lo que es lo mismo, aproximadamente 20 MPa. Los motores EcoBoost 1.6L y 2.0L también están preparados para trabajar con presiones alrededor de los 20 MPa. [43]

Esta información valida el uso de las fuerzas mencionada para el análisis de elementos finitos que se va a realizar para optimizar topológicamente la pieza.

4.3. SIMULACIÓN INICIAL

Una vez realizado el análisis de cargas y definidas para el análisis de elementos finitos, se realiza la simulación del los distintos casos en Solid Edge.

Para realizar las simulaciones, se utiliza el módulo de "Simulación" disponible en en el programa. Se genera un estudio estático lineal nuevo de malla tetraédrica para cada uno de los ensayos. Para cada caso se define el material, se selecciona la geometría que se va a analizar, las cargas que aplican y las restricciones de movimiento. También se debe mallar la geometría. Tras definir todos estos parámetros, se resuelve por FEA y se analizan los resultados. En los siguientes cuatro ensayos, son comunes las siguientes características:

- Material: AISI 4340. Propiedades definidas en la Figura 34.
- Geometría: Biela sin optimizar
- Tamaño de malla: 4 mm

4.3.1. ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CABEZA DE LA BIELA

En este ensayo se analiza la fuerza debido a la inercia que podría sufrir la biela. Se aplica una carga axial de 40 kN de tracción en la cabeza de la biela, mientras se fija el extremo del pie de la biela. Los resultados obtenidos son los siguientes:

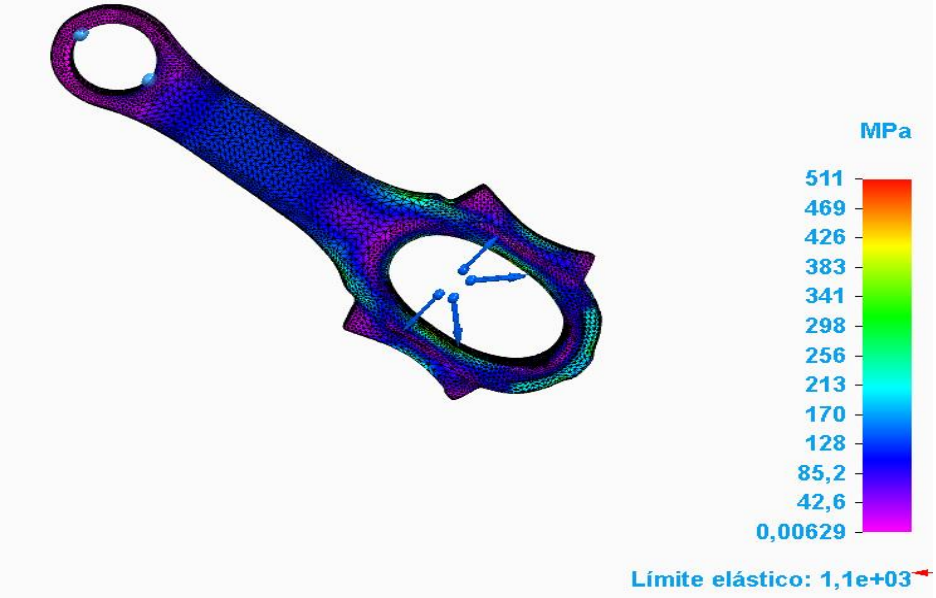


Figura 36. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 1. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

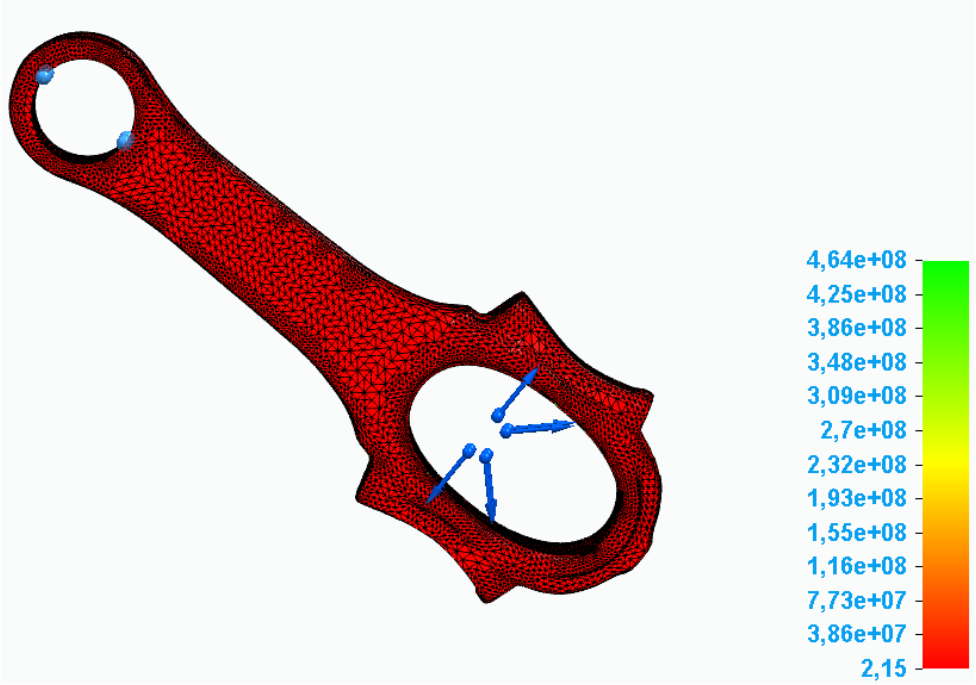


Figura 37. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 1. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

- Tensión de Von Mises máxima: 511 MPa
- Coeficiente de seguridad más restrictivo: 2,15

4.3.2. ENSAYO A COMPRESIÓN DE LA CABEZA DE LA BIELA

En este ensayo se analiza la fuerza soportada por la cabeza de la biela en el momento de la combustión. Se aplica una carga axial de 40 kN de compresión en extremo de la cabeza, mientras se fija el extremo del pie de la biela. Los resultados obtenidos son los siguientes:

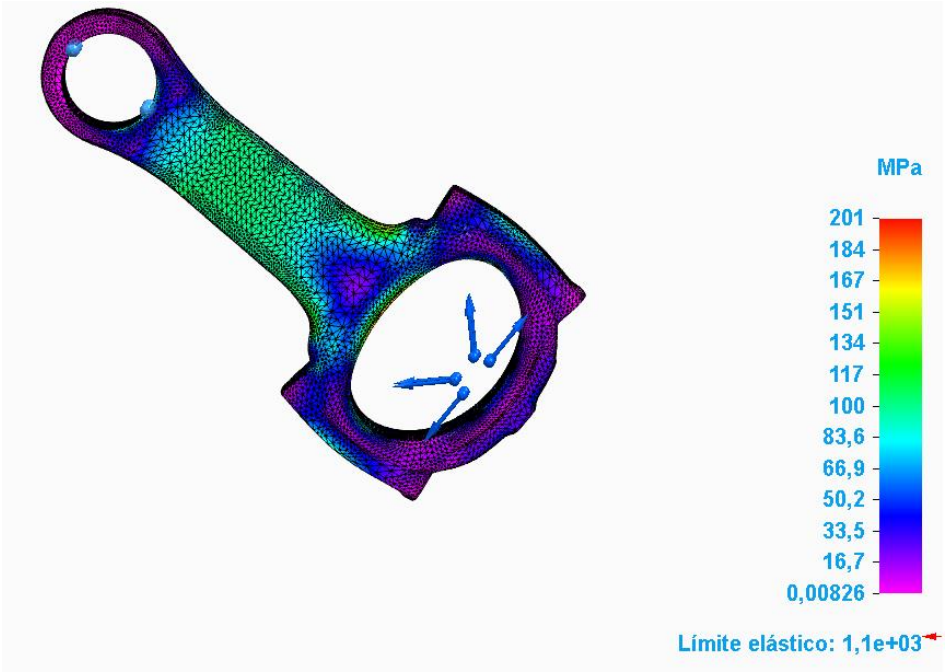


Figura 38. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 2. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

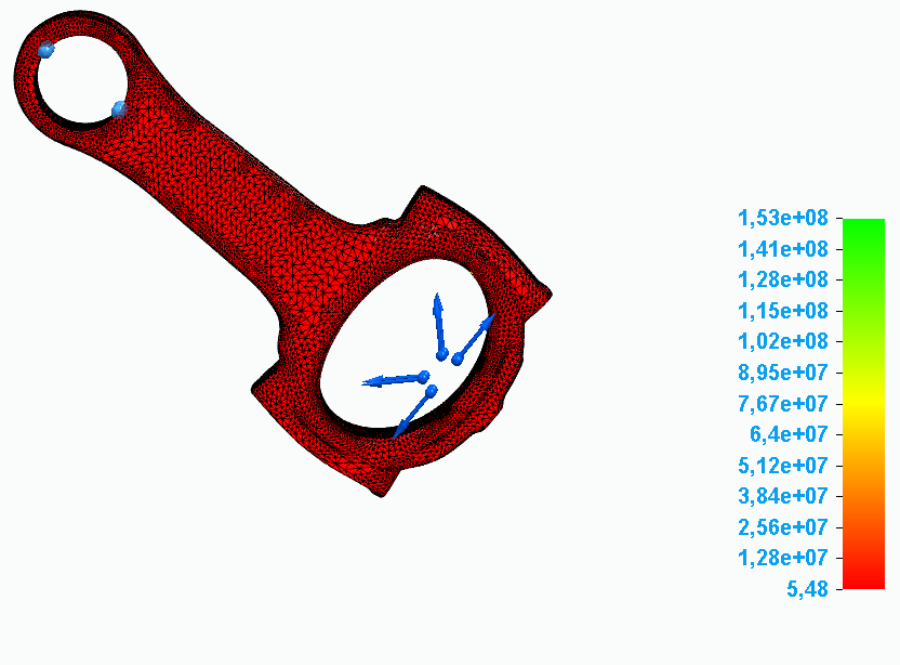


Figura 39. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 2. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

- Tensión de Von Mises máxima: 201 MPa
- Coeficiente de seguridad más restrictivo: 5,48

4.3.3. ENSAYO A TRACCIÓN DEL PIE DE LA BIELA

Se analiza la fuerza soportada por el pie de la biela debido a la inercia. Se aplica una carga axial de 15 kN de tracción en el extremo pequeño, mientras se fija el extremo de la cabeza de la biela. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Figura 40. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 3. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

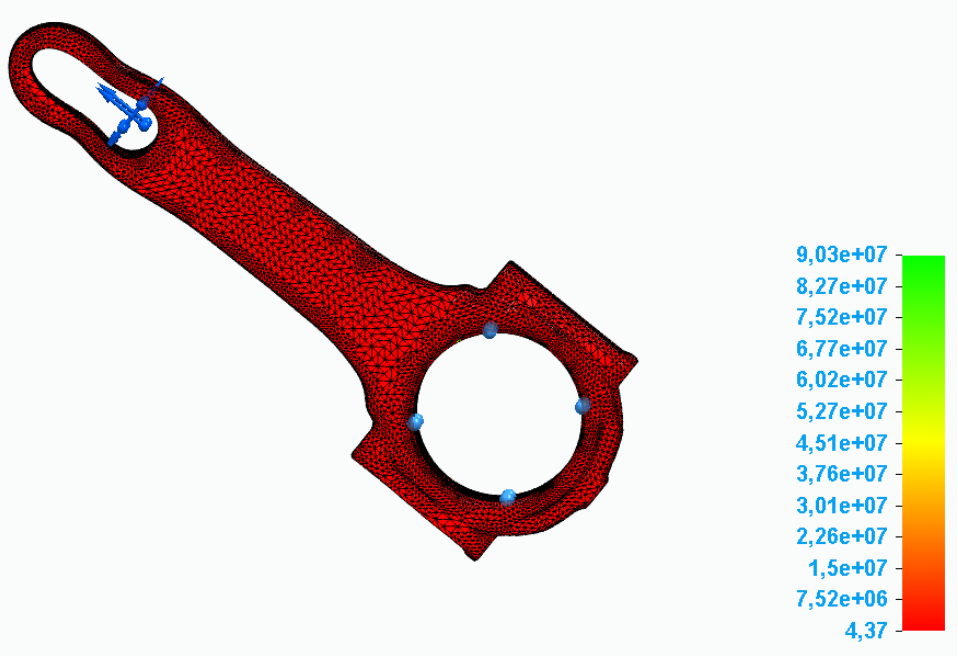


Figura 41. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 3. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

- Tensión de Von Mises máxima: 252 MPa
- Coeficiente de seguridad más restrictivo: 4,37

4.3.4. ENSAYO A COMPRESIÓN DEL PIE DE LA BIELA

Se simula la fuerza soportada por el pie de la biela producida por la combustión. Se aplica una carga axial de 15 kN de compresión en el pie de la biela, mientras se fija el extremo de la cabeza de la biela. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Figura 42. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 4. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

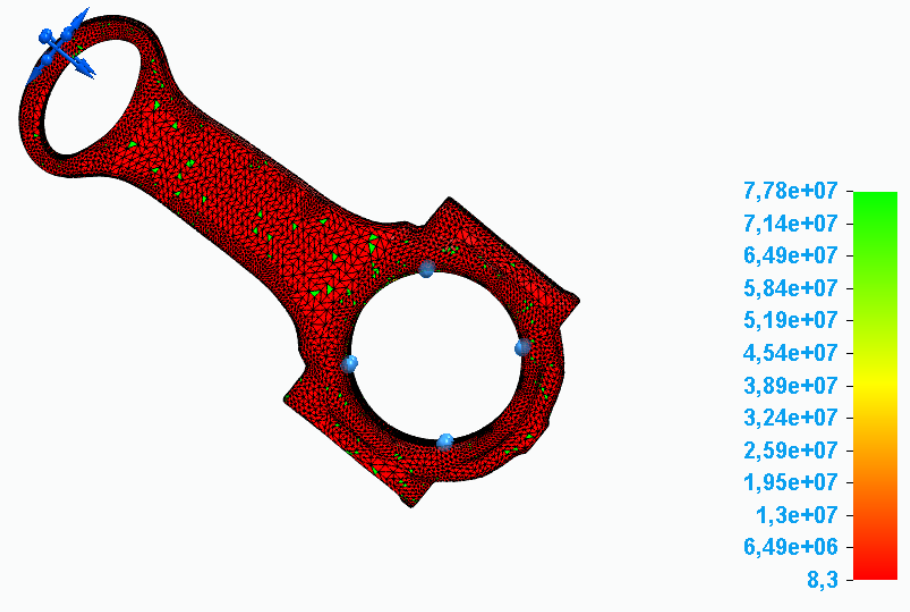
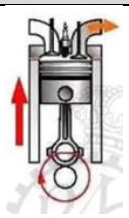
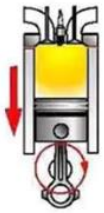


Figura 43. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 4. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

- Tensión de Von Mises máxima: 132 MPa
- Coeficiente de seguridad más restrictivo: 8,3

En la Tabla 11 se puede observar un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 11. Resumen de los resultados obtenidos en la simulación de la biela sin optimizar. Imágenes obtenidas de: [44]

Momento del ciclo de combustión	**Ensayo**	**Tensión de Von Mises Máxima (MPa)**	**Coeficiente de seguridad más restrictivo**
	1. Ensayo a tracción de la cabeza de la biela (inercia)	511	2,15
	2. Ensayo a compresión de la cabeza de la biela (combustión)	201	5,48
	3. Ensayo a tracción del pie de la biela (inercia)	252	4,7
	4. Ensayo a tracción del pie de la biela (inercia)	132	8,3

Después de analizar los resultados de la simulación se destaca que el ensayo más restrictivo es el debido a la carga de inercia de la cabeza de la biela (ensayo 1), por lo que se utilizará este caso para optimizar topológicamente el componente.

4.4. DISEÑO GENERATIVO

El diseño generativo se ha realizado en Altair Inspire. Este software permite trabajar con las mallas procesadas anteriormente.

Una vez se importa la malla, lo primero que se realiza es la división de la geometría para distinguir entre la zona de diseño y la zona de la geometría que no se verá afectada por la optimización topológica.

Para ello, realiza un boceto y se utiliza la herramienta "Dividir" dentro de la sección "Geometría", que permite seleccionar las secciones de la pieza que se han dividido de forma individual. Se selecciona la sección del cuerpo de la biela como región de diseño, mostrada en marrón en la Figura 44. La cabeza y el pie de la biela no se modificarán durante el proceso de diseño generativo.

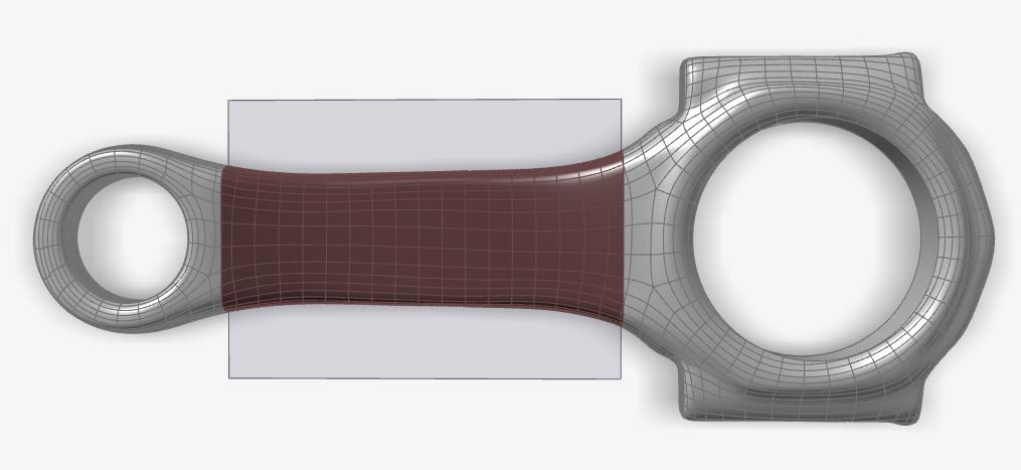


Figura 44. Definición de la región de diseño en Altair Inspire. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire

El siguiente paso es añadir las cargas con las que se va a realizar la OT. Se recuerda en la Tabla 12 el ensayo más restrictivo de los resultados de la simulación, que será el que se aplique en esta fase. Se tratará de mantener el coeficiente de seguridad mínimo en el diseño optimizado, siempre manteniéndolo por encima de 1,5, para no comprometer la integridad de la pieza en caso de variaciones puntuales de las cargas.

Tabla 12. Ensayo a tracción de la cabeza de la biela (inercia)

Momento del ciclo de combustión	**Ensayo**	**Tensión de Von Mises Máxima (MPa)**	**Coeficiente de seguridad más restrictivo**	**Cargas y restricciones aplicadas**	**Valor aplicado**
	1. Ensayo a tracción de la cabeza de la biela (inercia)	511	2,15	• Cabeza: fuerza axial de tracción • Pie: fijo	40 kN a tracción (180º)

Se aplican controles de forma para asegurar que la parte de la geometría que se va a optimizar cumpla con las condiciones de diseño. Por un lado, se aplican condiciones de simetría respecto de los planos *yz* y *xy*. Se aplican también condiciones de desmoldeo para que la geometría optimizada se pueda fusionar fácilmente con las regiones que se mantienen sin modificar. Estas características se aplican en el módulo de "Estructura" del software.

En cuanto a las cargas y restricciones, se aplica una carga de cojinete de 40 kN en la cabeza de la biela y se deja fijo el pie de la biela, como en las simulaciones realizadas en Solid Edge. Se aplican también desde el mismo módulo que los controles de forma.

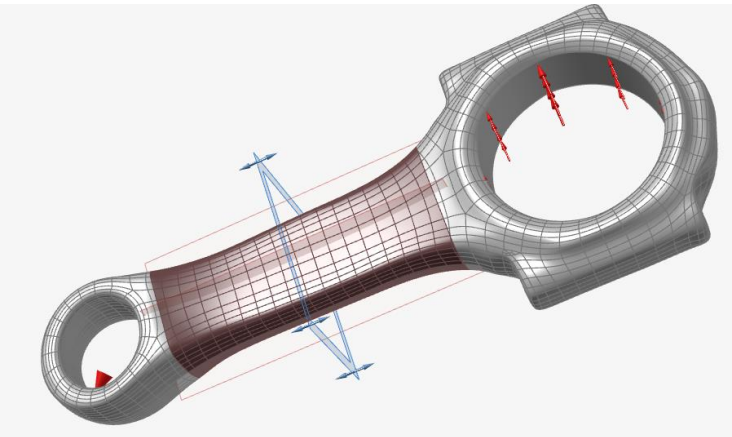


Figura 45. Condiciones de forma y cargas aplicadas para la OT. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire

4.4.1. PRIMERA ITERACIÓN

En la primera iteración, se busca la rigidez máxima y una reducción de masa donde se mantiene aproximadamente el 25% de la masa total del cuerpo de la biela. Se puede observar que, una vez realizada la unión booleana de la geometría, no es lo suficientemente precisa. Cuando se genera el sólido no se llega a unir el extremo del cuerpo con la cabeza, por lo que se procede a una segunda iteración.

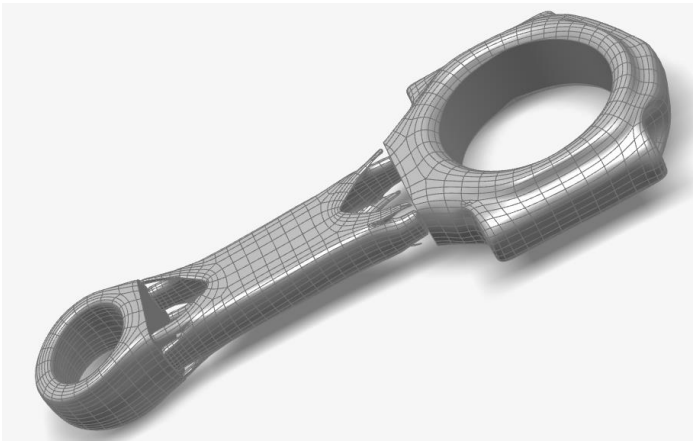


Figura 46. Primera iteración de OT. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire

4.4.2. SEGUNDA ITERACIÓN

La segunda iteración también tiene como objetivo principal mantener la rigidez máxima de la estructura, pero se cambia el porcentaje de masa mantenida en el cuerpo del 30%. Se obtiene la geometría mostrada en la Figura 48.

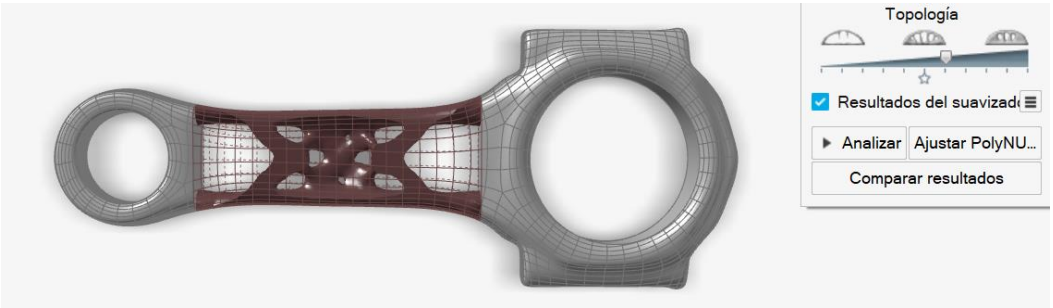


Figura 47. Geometría de la iteración 2 en Altair Inspire. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire

Tras realizar operaciones de unión y generar la polynurb con el comando "Ajustar" se exporta el modelo a Solid Edge para simular la pieza bajo las condiciones más restrictivas. Se ajustan las dimensiones de los agujeros a los definidos en la Tabla 9 para corregir posibles modificaciones durante el proceso de diseño generativo.

Figura 48. Simulación de la segunda iteración de OT. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

A pesar de conseguir una reducción significativa en masa obteniéndose una pieza de 662g, se descarta esta geometría debido a que la máxima tensión es demasiado cercana al límite elástico del material, y se desea diseñar con un coeficiente de seguridad superior a 1,5.

4.4.3. TERCERA ITERACIÓN

Se parte de la optimización anterior, ya que el software Altair Inspire propone diferentes topologías para un mismo análisis de diseño generativo. En la iteración pasada se parte de la geometría mostrada en la Figura 47.

En la barra de topología, el software permite añadir masa a la geometría optimizada, por lo que se realiza esa operación, modificando ligeramente la geometría como se observa en la Figura 49.

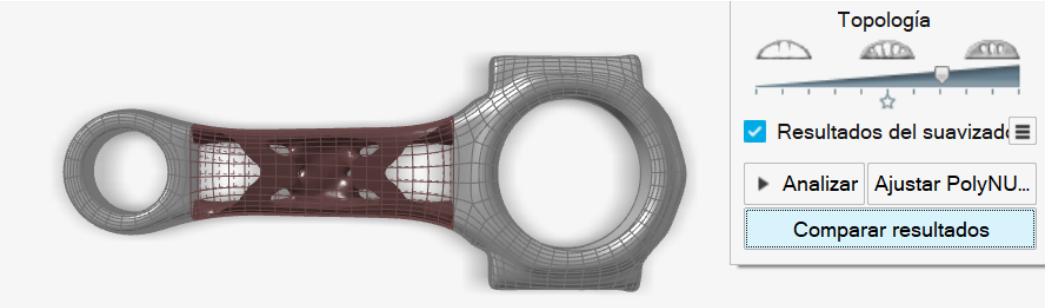


Figura 49. Geometría de la tercera iteración en Altair Inspire. Fuente: elaboración propia en Altair Inspire

A partir de esta geometría, se crea el sólido correspondiente como se realiza en el caso anterior y se valida el caso más crítico en Solid Edge. Además de las modificaciones geométricas relacionadas con las dimensiones de los agujeros (Tabla 9), también se aplica simetría respecto de los planos yz y xy para asegurar un diseño equilibrado. Los resultados se muestran en la Figura 50 y Figura 51.

4.4.4. ENSAYO A TRACCIÓN DE LA CABEZA DE LA BIELA OPTIMIZADA

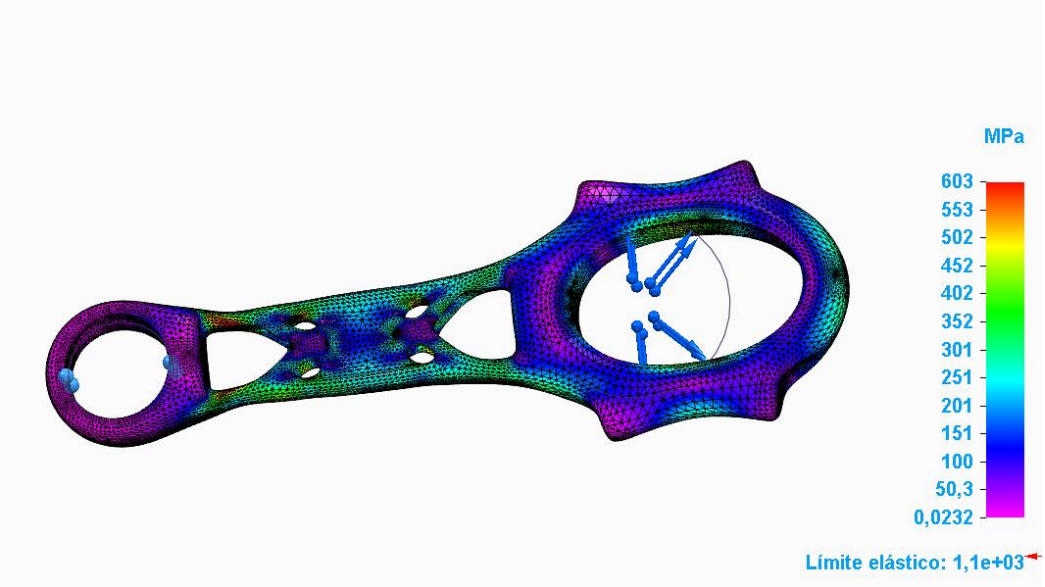


Figura 50. Simulación de la tercera iteración de la biela. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

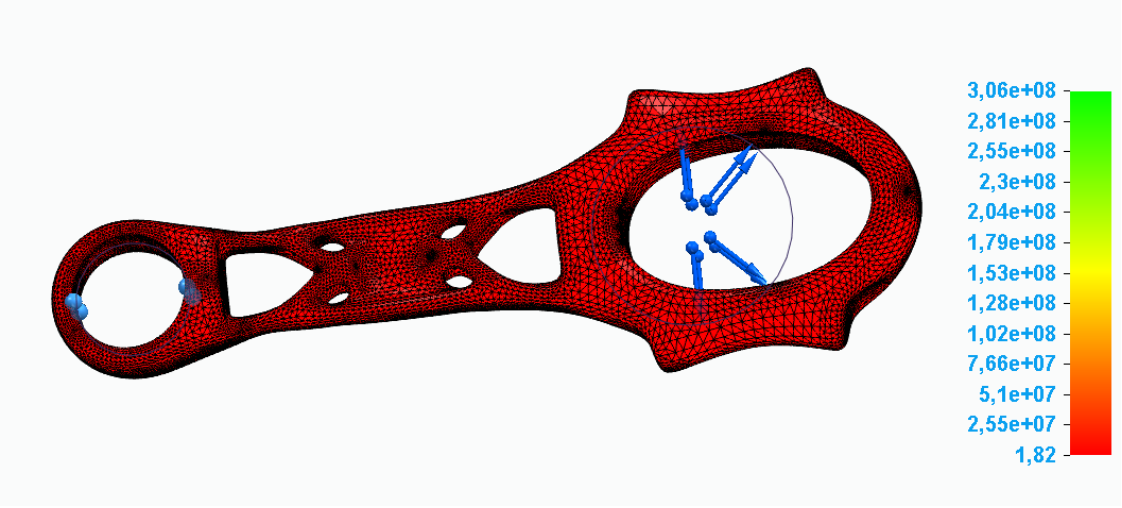


Figura 51. Coeficiente de seguridad de la biela optimizada en el caso más restrictivo. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

Se observa que el límite elástico no es superado, obteniendo un valor máximo de 603 MPa, y que el coeficiente de seguridad más restrictivo es mayor a 1,5, alcanzando un valor de 1,82. Se considera un diseño válido, por lo que se procede a validar el resto de los casos de estudio.

4.5. VALIDACIÓN DEL DISEÑO OPTIMIZADO

Se ha comprobado que el diseño optimizado cumple con las restricciones del ensayo más restrictivo, por lo que se procede a validar si el resto de los estados de cargas cumplen las condiciones de diseño. Se realiza un análisis del resto de ensayos.

4.5.1. ENSAYO A COMPRESIÓN DE LA CABEZA DE LA BIELA OPTIMIZADA

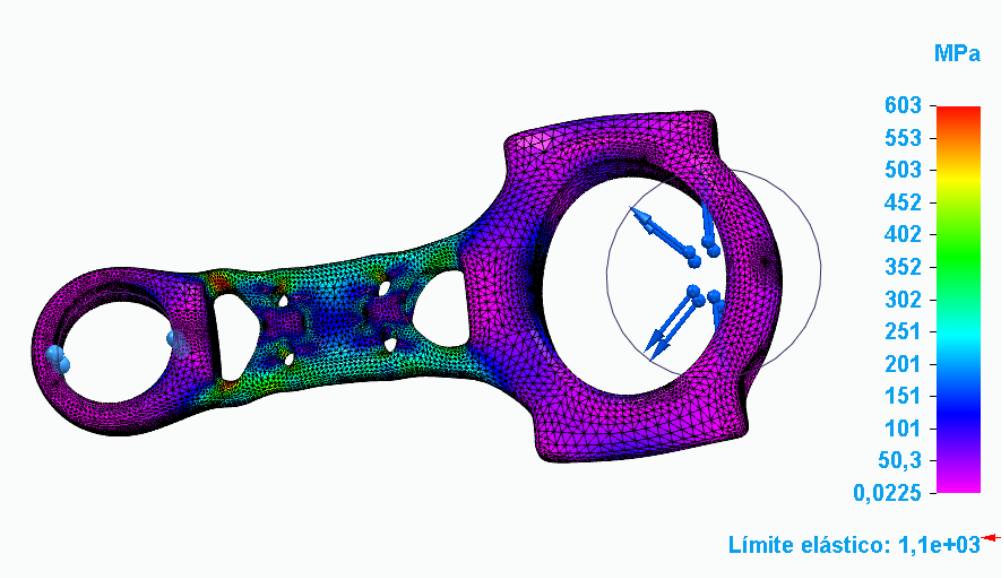


Figura 52. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 2 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

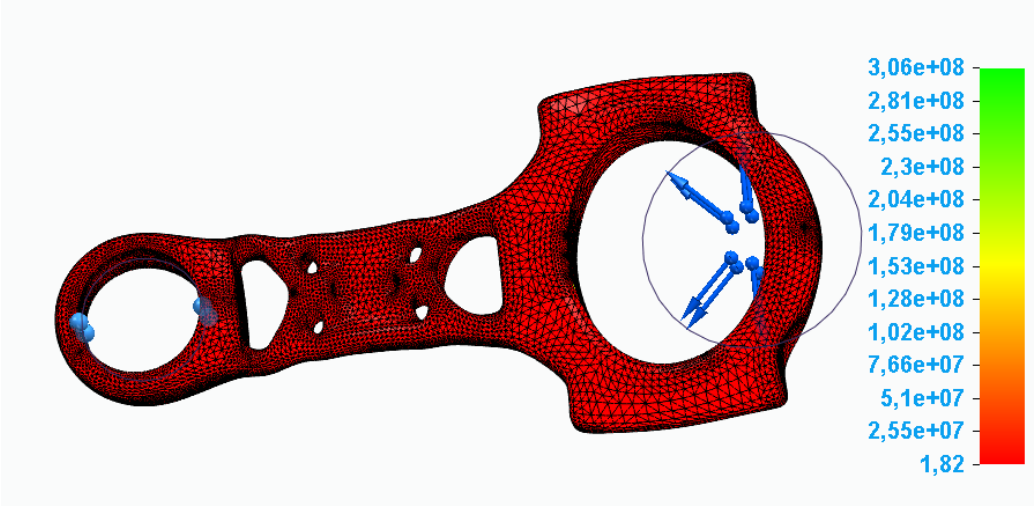


Figura 53. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 2 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

- Tensión de Von Mises máxima: 603 MPa
- Coeficiente de seguridad más restrictivo: 1,82

4.5.2. ENSAYO A TRACCIÓN DEL PIE DE LA BIELA OPTIMIZADA

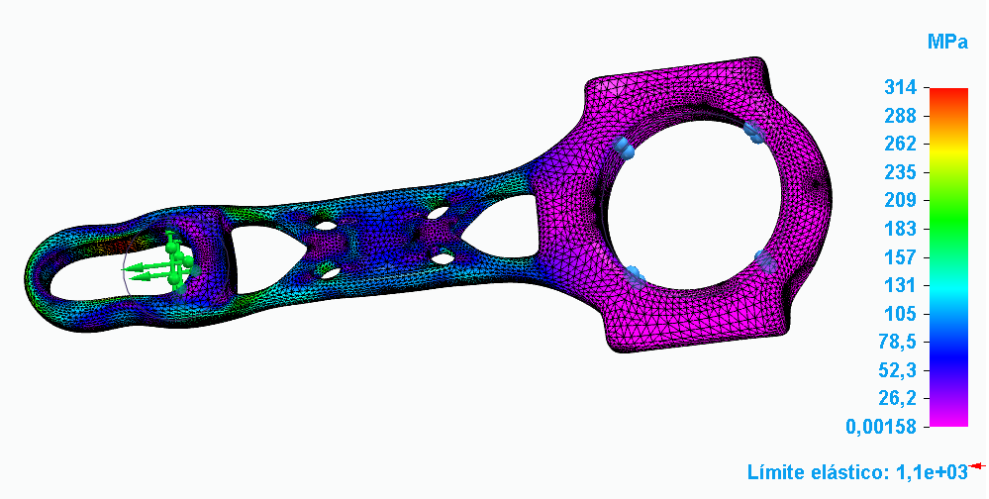


Figura 54. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 3 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

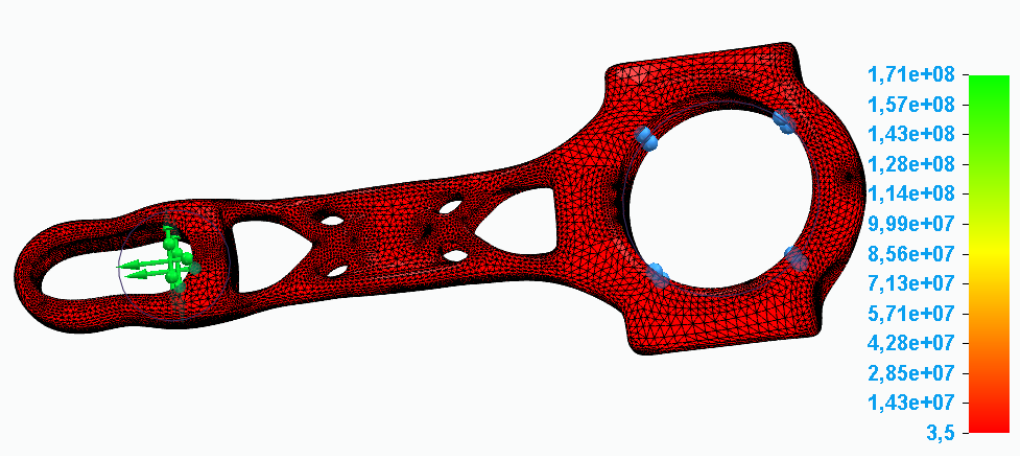


Figura 55. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 3 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

- Tensión de Von Mises máxima: 314 MPa
- Coeficiente de seguridad más restrictivo: 3,5

4.5.3. ENSAYO A COMPRESIÓN DEL PIE DE LA BIELA OPTIMIZADA

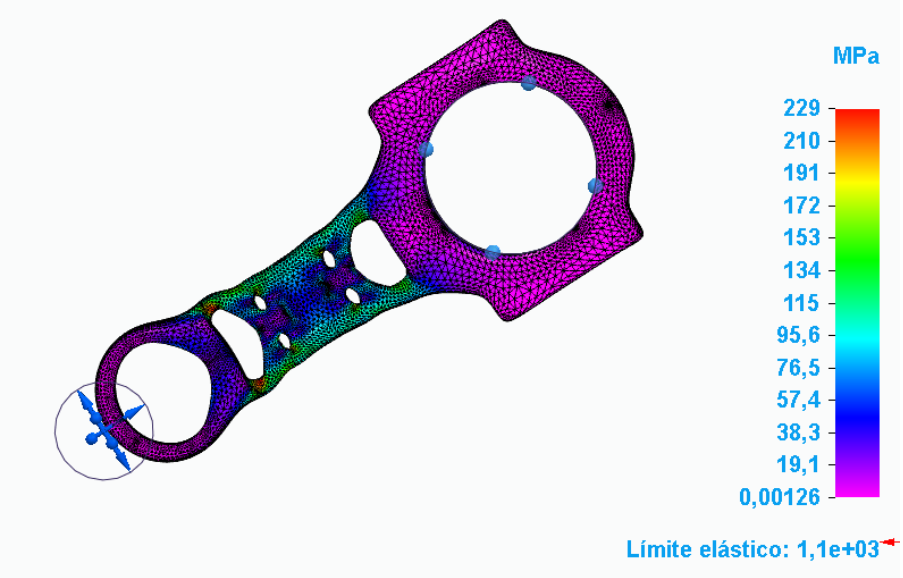


Figura 56. Resultado de las Tensiones de Von Mises del ensayo 4 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

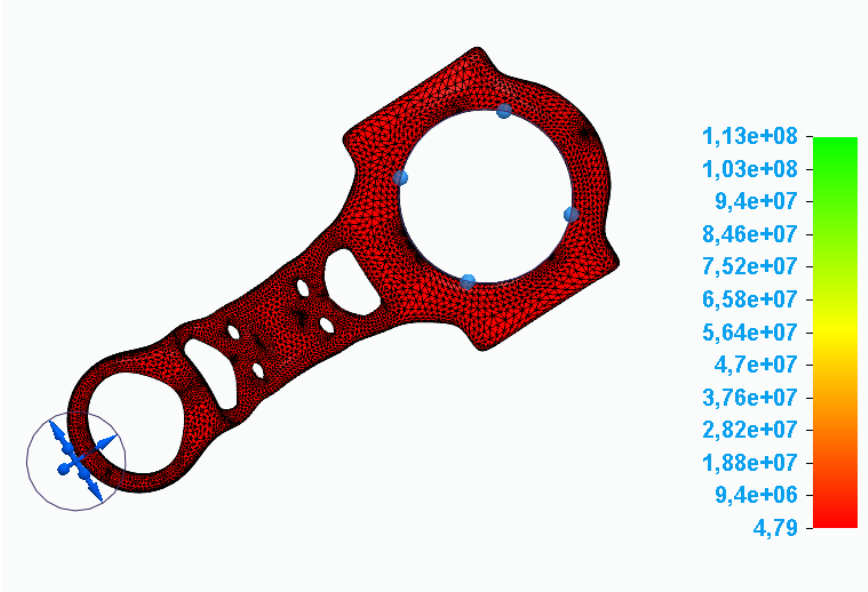
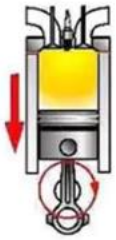
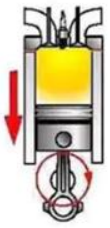


Figura 57. Coeficiente de seguridad obtenido en el ensayo 4 en la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

- Tensión de Von Mises máxima: 229 MPa
- Coeficiente de seguridad más restrictivo: 4,79

Se muestran en la Tabla 13 el resumen de los resultados obtenidos en los ensayos.

Tabla 13. Resumen de los resultados obtenidos en la simulación de la biela optimizada. Imágenes obtenidas de: [44]

Momento del ciclo de combustión	Ensayo	Tensión de Von Mises Máxima (MPa)	Coeficiente de seguridad más restrictivo
	1. Ensayo a tracción de la cabeza de la biela (inercia)	603	1,82
	2. Ensayo a compresión de la cabeza de la biela (combustión)	603	1,82
	3. Ensayo a tracción del pie de la biela (inercia)	314	3,5
	4. Ensayo a tracción del pie de la biela (inercia)	229	4,79

El peso de la biela optimizada es de 0,670 kg, como se puede observar en la Figura 58.

Figura 58. Propiedades de la biela optimizada. Fuente: elaboración propia en Solid Edge

4.6. FABRICACIÓN DE PROTOTIPO DEL MODELO SIN OT POR TECNOLOGÍA FDM

Se ha fabricado un prototipo del modelo de referencia utilizando tecnología FDM con la impresora Prusa i3 MK3 disponible en el laboratorio de fabricación aditiva de la facultad. El material empleado ha sido PLA, el tiempo de impresión han sido 6 horas y el peso es de 48 gramos. Se observan los resultados en la Figura 59.

Figura 59. Prototipo del modelo sin OT fabricado por tecnología FDM. Fuente: elaboración propia

4.7. FABRICACIÓN DE PROTOTIPO PARA VALIDACIÓN DE MONTAJE POR TECNOILOGÍA MJF

Para la fabricación del prototipo se utiliza la impresora HP Jet Fusion 580, que utiliza la tecnología MJF explicada en el Capítulo 2. Estado de la cuestión, en el apartado MJF (Multi Jet Fusion).

Este prototipo sirve principalmente para validar la geometría, y si es necesario, mejorar el diseño. No se necesitan tolerancias muy ajustadas debido a que una vez se tenga el prototipo funcional metálico, se requerirá mecanizado posterior para garantizar las dimensiones especificadas en el diseño.

El material utilizado ha sido polvo de poliamida, la impresión ha durado 11 horas y el peso es de 86,18 gramos. Se observa el resultado en la Figura 60

Figura 60. Prototipo para validación de montaje fabricado por tecnología MJF. Fuente: elaboración propia

4.8. SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO PARA VALIDACIÓN DE MONTAJE POR TECNOLOGÍA FDM

Para poder evaluar la huella de carbono de otras tecnologías disponibles en el laboratorio se ha simulado en el software UltiMaker Cura la fabricación 3D del componente con la tecnología FDM, también explicada en el Capítulo 2.

La impresora utilizada para la simulación ha sido la Prusa disponible en el laboratorio. Se observa en la Figura 61 que la cantidad de material utilizado ha sido 52 gramos de PLA para una densidad del 20%, y el tiempo de impresión es de 6 horas y 26 minutos.

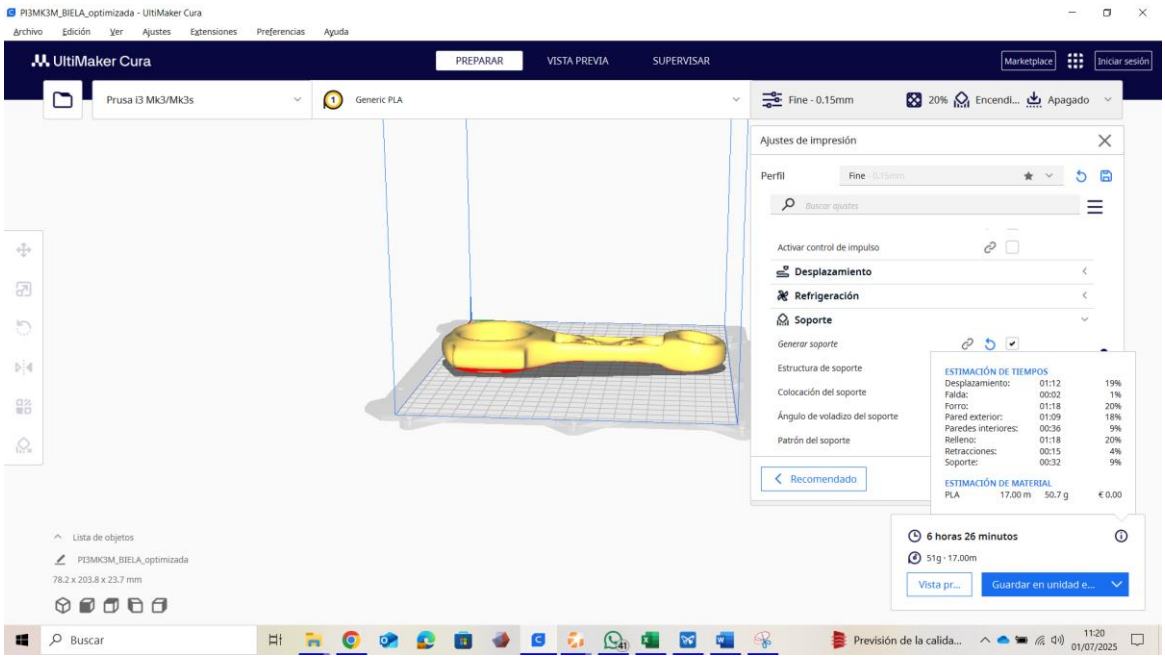


Figura 61. Simulación de impresión 3D del prototipo para validación de montaje en FDM. Fuente: elaboración propia con el software Ultimaker Cura

Esta información también servirá para realizar una estimación de costes de la fabricación de la pieza usando la tecnología FDM.

4.9. SIMULACIÓN DEL PROTOTIPO PARA VALIDACIÓN DE MONTAJE POR TECNOLOGÍA SLA

Se analiza también la tecnología SLA como opción para realizar un prototipo. Para ello, se utiliza el software PreForm. Se escoge la impresora Form 3L para la simulación. La cantidad de material utilizado son 118 mililitros, y el tiempo estimado de impresión son 7 horas y 23 minutos, como se observa en la Figura 62.

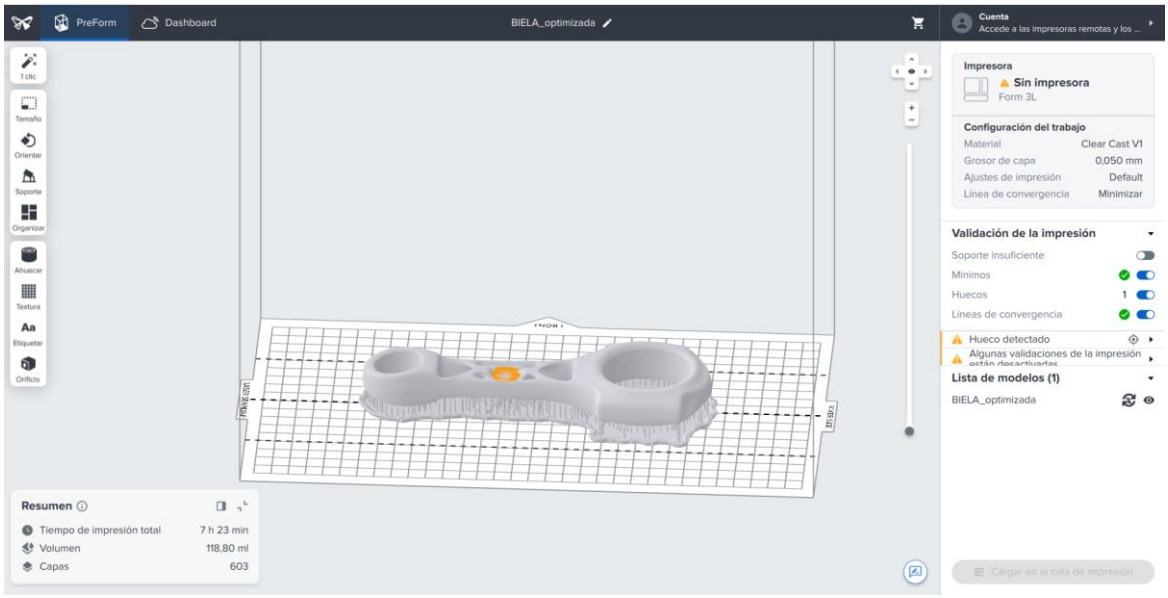


Figura 62. Simulación de impresión 3D del prototipo para validación de montaje en SLA. Fuente: elaboración propia con el software Preform

Con los datos obtenidos en la simulación se realizará la estimación de la huella de carbono que supone fabricar el prototipo mediante esta tecnología, así como su coste.

4.10. SIMULACIÓN DE LA FABRICACIÓN DE PROTOTIPO FUNCIONAL EN ACERO

Al no disponer en el laboratorio de la facultad de una impresora 3D con tecnología SLM (*Selective Laser Melting*) no se ha podido realizar una simulación. Esta tecnología deposita una capa de polvo con un grosor aproximadamente de 20-100µm mediante un esparcidor con cuchilla sobre el área de construcción. El material de la cuchilla depende del material que se use para la impresión, La fusión del material ocurre gracias a un rayo láser de alta potencia guiado con espejos galvanométricos. Una vez terminada la primera capa, se repite el proceso y el área de trabajo desciende gracias a pistones hidráulicos. Se observa la configuración de la máquina se en la Figura 63.[45]

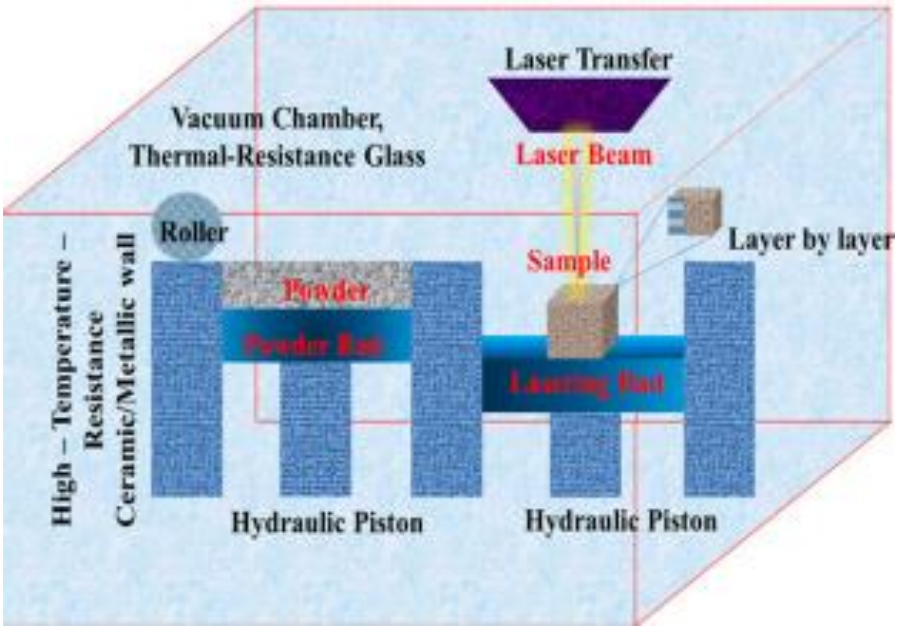


Figura 63. Configuración de una impresora con tecnología SLM [45]

En tecnologías que trabajan con metal es fundamental tener en cuenta los tiempos de enfriamiento, ya que el tamaño de grano de la microestructura puede variar, alterando así las propiedades mecánicas de la pieza. [45]

Con el fin de realizar una estimación de costes y de huella de carbono, se ha buscado información sobre los parámetros a tener en cuenta para realizar el análisis en diferentes plataformas. Al no disponer de esta información en ninguna web ni artículo científico, se ha realizado una consulta a *ChatGPT* con el *prompt* "*Estimación del tiempo de fabricación de una biela de dimensiones: 145mm entre ejes, 52 mm diámetro grande y 32 mm diámetro pequeño, 22 mm de alto de 670gramos con la impresora Samylabs ALBA 300, de material AISI 4340 y precio de la impresora (formato tabla)"* [46]. Se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 14. Parámetros estimados por ChatGPT para el análisis de la huella de carbono y de costes [46]

Parámetro	Valor estimado
Material	AISI 4340
Masa de la biela	670 g
Volumen aproximado	85.35 cm^3
Tasa de deposición (SLM)	10 cm^3/h (valor medio para SLM de acero)
Tiempo de fabricación estimado	8.5 horas
Impresora utilizada	Samylabs ALBA 300
Precio de la impresora (2025)	230.000 – 270.000 €
Tecnología	SLM con láser de 200 W
Grosor de capa	30–40 µm típico

4.11. ANÁLISIS DE LA HUELLA DE CARBONO

4.11.1. HUELLA DE CARBONO POR FABRICACIÓN TRADICIONAL: FORJADO Y MECANIZADO

Se va a realizar el cálculo de la huella de carbono de uno de los métodos de fabricación tradicionales, que consiste en forjado y mecanizado. Para ello, se toma como referencia el proceso de fabricación analizado en la Tabla 3. Fases, subfases y operaciones del proceso de fabricación de una biela forjada. Elaboración propia a partir de los datos del artículo "Connecting Rod Manufacturing" [32]. Las operaciones correspondientes al proceso de fabricación se van a clasificar de la siguiente manera:

Tabla 15. Clasificación de las operaciones para el cálculo de la huella de carbono. Fuente: elaboración propia

Tipo de operación	Operaciones del proceso
Obtención del acero	-
Tratamiento térmico	• Precalentamiento por inducción • Recocido del semiproducto forjado a 844ºC
Forjado	• Forja por martillo de caida
Mecanizado	• Corte de la barra • Fresado de caras • Avellanado del asiento de los tornillos • Taladrado de orificios para tornillos • Avellanado de orificios de tornillo • Roscado de orificios • Chaflanes en los orificios del pistón y cigüeñal • Fractura controlada del extremo de la biela
Mecanizado de acabado	• Mandrinado de extremos de pistón y cigüeñal • Taladrado de orificio de lubricación

Esta clasificación se ha realizado en base al artículo de N. Duque Ciceri et al [47], donde se calcula de forma empírica el consumo energético de cada uno de los procesos de fabricación. Se recogen estos datos en la Tabla 16.

Tabla 16. Estudio empírico del consumo de energía por proceso de fabricación [47]

Manufacturing Process	Energy Requirement Range (MJ/kg processed)			Source
Coventional Manufacturing				
Machining	5.3	-	7.5	[4]
Milling	1.3	-	2.6	
Grinding		8.8		[5]
Iron Casting	19	-	29	[3]
Sand casting	11.6	-	15.4	[6]
die casting		14.9		[7]
Forging		16.3		[8]
Finish Machining		24		[9]
Advanced Manufacturing				
Waterjet (Nylon)	150	-	214	
Waterjet (Steel)	167	-	238	[10]
Waterjet (Al)	195	-	1670	

En esta tabla no están contemplados ni la obtención del acero ni el tratamiento térmico. Los datos que se van a utilizar para el cálculo son:

- Obtención del acero: Según la *World Steel Association* el factor de emisión del acero es 1,92 toneladas de CO_2 / tonelada de acero crudo fundido. [48]
- Tratamiento térmico: En el artículo "Connecting Rod Manufacturing" se utiliza la máquina para el tratamiento térmico WZP 160. Las características se muestran en la Figura 58. En el artículo se indican los siguientes tiempos:

    - Recocido a 844 ºC: 36 horas.

Figure 4 Heat Treatment WZP 160

Table 2 Specifications of WZP 160 KW

Model	WZP-160 KW
Work power	3 phase 380V+/-10%, 50-60HZ
Input voltage	320V-420V
Input current	6-300A
Input power	6-160KW
Temperature	300-1200 C
Oscillation frequency	10-80 KHZ
Cooling water pressure	0.3 MPA
Size of generator: Transformer	850*600*1330mm 780*540*520mm
Weight of generator; transformer	147kgs; 108kgs
Water cooling protection point	Below 50 degrees

Figura 64. Máquina para tratamiento térmico WZP 160 y sus características [32]

- Precalentamiento por inducción: 105 segundos.

El factor de emisiones de la electricidad es de 0,174 toneladas de CO_2 / MWh en España en el año 2021, según el IPCC [49]. Otras de los factores a tener en cuenta para este cálculo son:

- La pieza final pesa alrededor de 0,862 kg en base al modelo CAD. El peso final será inferior porque se tiene en cuenta el mecanizado de los agujeros de los tornillos de la cabeza de la biela que no están incluidos en el modelo.
- Se estima que el material inicial, es decir, el material procesado será 1kg de acero. Esto se debe a los procesos de forjado y mecanizado donde se retira material. Se considera que una pérdida de material aproximadamente del 15% a lo largo de todo el proceso de fabricación es una cantidad admisible.
- El factor de conversión para pasar de MJ a kWh es 0,28 kWh/MJ. [50]
- Se plantean las siguientes hipótesis:
  - La potencia de la máquina con la que se realiza el precalentamiento es similar a la del tratamiento térmico. (160 kW)
  - Se considera que la máquina de tratamiento térmico tiene una capacidad para 1000 bielas. (Aproximadamente 1000 kg)

Se calcula el valor de huella de carbono para cada tipo de operación del proceso. Para ello se utiliza la Ecuación 1. Fórmula para el cálculo de la huella de carbono.

$$Huella\ de\ carbono = Dato\ Actividad\ x\ Factor\ Emisión$$

- Obtención del acero:

$$HC_1 = 1\ kg\ acero\ x\ 1{,}92\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kg\ acero} = 1{,}92\ kg\ CO_2\ eq.$$

- Tratamiento térmico:
  - Precalentamiento:

$$HC_{2,1} = 160\ kW\ x\ 0{,}03\ h\ x\ 0{,}174\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kWh} = 0{,}84\ kg\ CO_2\ eq.$$

  - Recocido

$$HC_{2,2} = 160\ kW\ x\ 0{,}036\ h\ x\ 0{,}174\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kWh} = 1\ kg\ CO_2\ eq.$$

- Forjado:

$$HC_3 = 16{,}3\ \frac{MJ}{kg}\ x\ 1kg\ x\ 0{,}28\ \frac{\text{kWh}}{\text{MJ}}\ x\ 0{,}174\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kWh} = 0{,}79\ kg\ CO_2\ eq.$$

- Mecanizado:
  - Límite superior:

$$HC_{4\ sup} = 7{,}5\frac{MJ}{kg}\ x\ 1kg\ x\ 0{,}28\frac{\text{kWh}}{\text{MJ}}\ x\ 0{,}174\ \frac{kg\ CO_2\ eq.}{kWh} = 0{,}37\ kg\ CO_2\ eq.$$

  - Límite inferior:

$$HC_{4,inf} = 5{,}3\frac{MJ}{kg}\ x\ 1kg\ x\ 0{,}28\frac{\text{kWh}}{\text{MJ}}\ x\ 0{,}174\frac{kg\ CO_2\ eq.}{kWh} = 0{,}26\ kg\ CO_2$$

- Mecanizado de acabado:

$$HC_5 = 24\frac{MJ}{kg}\ x\ 1kg\ x\ 0{,}28\frac{\text{kWh}}{\text{MJ}}\ x\ 0{,}174\ \frac{kg\ CO_2\ eq.}{kWh} = 1{,}17\ kg\ CO_2\ eq.$$

Por lo tanto, se estima que la huella de carbono total del proceso de fabricación oscila entre los siguientes valores:

- Límite superior:

$$HC_{total,sup} = 1{,}92\ kg\ CO_2\ eq. + 0{,}84\ kg\ CO_2 eq. + 1{,}17\ kg\ CO_2 eq. + 1\ kg\ CO_2\ eq. + 0{,}79\ kg\ CO_2\ eq. + 0{,}37\ kg\ CO_2\ eq. + 1{,}17\ kg\ CO_2\ eq. = 7{,}26\ kg\ CO_2\ eq.$$

- Límite inferior:

$$HC_{total,sup} = 1{,}92\ kg\ CO_2\ eq. + 0{,}84\ kg\ CO_2\ eq. + 1{,}17\ kg\ CO_2\ eq. + 1\ kg\ CO_2\ eq. + 0{,}79\ kg\ CO_2\ eq. + 0{,}26\ kg\ CO_2\ eq. + 1{,}17\ kg\ CO_2\ eq. = 7{,}15\ kg\ CO_2\ \ eq.$$

Tras realizar el análisis, se ha obtenido que la huella de carbono estimada del proceso de fabricación de una biela por forja y mecanizado oscila entre los 7,15 y 7,26 kg de CO_2.

4.11.2. HUELLA DE CARBONO DEL PROTOTIPO PARA VALIDACIÓN DE MONTAJE POR TECNOLOGÍA MJF

Para el cálculo estimado de la huella de carbono producida por la fabricación del prototipo para validación de montaje se tienen en cuenta los siguientes parámetros:

1. Impacto en la huella de carbono debido a la producción de polvo PA: En el artículo *Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review* escrito por S. Kokare et al., se indica que el consumo de energía por kg de PA12 producida es 129,1 MJ/kg.
2. Cantidad de PA usado: 86,18 gramos.
3. Tiempo de impresión: 11 horas.
4. Potencia de la impresora HP Jet Fusion 580: 4,5 – 6 kW [51]
5. Factor de emisiones de la electricidad en España en 2021: 0,174 toneladas de CO_2 / MWh [52]

Se estima la huella de carbono generada en base a los parámetros definidos:

- Producción de PA:

$$HC_1 = 129{,}1\ \frac{MJ}{kg}\ x\ 0{,}086kg\ x\ 0{,}28\ \frac{\text{kWh}}{\text{MJ}}\ x\ 0{,}174\ \frac{kg\ CO_2\ eq.}{kWh} = 3{,}12\ kg\ CO_2\ eq.$$

- Impresión 3D:
  - Límite superior:

$$HC_{2,sup} = 6kW\ x\ 11\ h\ x\ 0{,}174\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kWh} = 11{,}48\ kg\ CO_2\ eq.$$

  - Límite inferior:

$$HC_{2,inf} = 4{,}5kW\ x\ 11h\ x\ 0{,}174\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kWh} = 8{,}61\ kg\ CO_2\ eq.$$

Por lo tanto, se estima que la huella de carbono producida por el prototipo fabricado en el laboratorio oscila entre 11,73 y 14,60 $kg\ CO_2\ eq.$

4.11.3. HUELLA DE CARBONO DEL PROTOTIPO PARA VALIDACIÓN DE MONTAJE POR TECNOLOGÍA FDM

Al igual que en el caso anterior, los elementos a tener en cuenta para el cálculo estimado de la huella de carbono son:

1. Impacto en la huella de carbono debido a la producción de PLA: Según *NatureWorks*, la producción de PLA tiene un impacto de 2,023 kg CO_2 eq/kg PLA. [53]
2. Cantidad de PLA utilizado: 52 g
3. Tiempo de impresión: El tiempo de impresión según la simulación realiazada son 6 horas y 23 minutos.
4. Potencia de la impresora 3D Prusa i3 MK3: 240 W [54]
5. Factor de emisiones de la electricidad en España en 2021: 0,174 toneladas de CO_2 / MWh [52]

Una vez definidos los valores, se realiza el cálculo de la huella de carbono:

- Producción de PLA:

$$HC_1 = 0{,}052\ kg\ PLA\ x\ 2{,}023\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kg\ PLA} = 0{,}105\ kg\ CO_2\ eq.$$

- Impresión 3D:

$$HC_2 = 0{,}240\ kW\ x\ 6{,}43\ h\ x\ 0{,}174\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kWh} = 0{,}27\ kg\ CO_2\ eq.$$

Por lo tanto, la estimación de la huella de carbono total producida por la fabricación del prototipo para validación de montaje en FDM es de 0,38 $kg\ CO_2\ eq.$

4.11.4. HUELLA DE CARBONO DEL PROTOTIPO PARA VALIDACIÓN DE MONTAJE POR TECNOLOGÍA SLA

Se repite el proceso de con la simulación de la fabricación del componente con tecnología SLA. Se definen los siguientes parámetros:

1. Impacto en la huella de carbono debido a la producción de resina: Según el estudio *A Modelling-Based Framework for Carbon Emissions Calculation in Additive Manufacturing: A Stereolithography Case Study* de Panagiotopouloula et al., la producción de resina tiene un impacto de 4,523 kg CO_2 eq/kg Resina. [55]
2. Cantidad de resina utilizada: 118 ml ≈ 118 g (para el cálculo)
3. Tiempo de impresión: El tiempo de impresión según la simulación realiazada es de 7 horas y 26 minutos.
4. Potencia de la impresora 3D Formlabs Form 3L: 650 W [56]
5. Factor de emisiones de la electricidad en España en 2021: 0,174 toneladas de CO_2 / MWh[49]

Se procede a calcular la estimación de la huella de carbono como en los casos anteriores:

- Producción de Resina:

$$HC_1 = 0{,}118\ kg\ Resina\ x\ 4{,}523\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kg\ Resina} = 0{,}53\ kg\ CO_2\ eq.$$

- Impresión 3D:

$$HC_2 = 0{,}650\ kW\ x\ 7{,}38\ h\ x\ 0{,}174\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kWh} = 0{,}834\ kg\ CO_2\ eq.$$

Para el caso de la fabricación del prototipo simulado con la impresora 3D de resina, la huella de carbono estimada es de 1,37 $kg\ CO_2\ eq$.

4.11.5. HUELLA DE CARBONO DEL PROTOTIPO FUNCIONAL POR TECNOLOGÍA SLM

Para la estimación de la huella de carbono del prototipo funcional se utilizarán los datos de tiempo de impresión obtenidos en la Tabla 14. Los parámetros a tener en cuenta para la estimación son los siguientes:

1. Producción del polvo metálico: En el artículo *Environmental Impact of Powder Production for Additive Manufacturing: Carbon Footprint and Cumulative Energy Demand of Gas Atomization* publicado por Conrads J. et al.,[52] se explica que el impacto de la fabricación de polvo metálico para fabricación aditiva tiene un gran impacto ambiental, y en función del proceso de atomización utilizado se estima que la fabricación varía entre los 4,61 y 24,81 $kg\ CO_2\ eq$.
2. Cantidad de polvo metálico AISI 4340: 670 g. Se supone reciclado del polvo, por lo que no se consideran pérdidas.
3. Tiempo de impresión: 8,5h [46]
4. Potencia de la impresora 3D: 3000 W [57]
5. Factor de emisiones de la electricidad en España en 2021: 0,174 toneladas de CO_2 / MWh [49]
6. Mecanizado de acabado:

Analizando únicamente la huella de carbono generada por la producción de polvo metálico se puede afirmar que la huella de carbono producida por esta tecnología es la más alta,

superando incluso la del proceso de fabricación por forjado y mecanizado. Se calcula el rango de valores en los que puede estar:

- Producción de polvo metálico
  - Límite superior:

$$HC_{1,sup} = 24{,}81\ kg\ CO_2\ eq.$$

  - Límite inferior:

$$HC_{1,inf} = 4{,}61\ kg\ CO_2\ eq.$$

- Impresión 3D:

$$HC_2 = 3\ kW\ x\ 8{,}5\ h\ x\ 0{,}174\ {}^{kg\ CO_2\ eq.}/_{kWh} = 4{,}44\ kg\ CO_2\ eq.$$

- Mecanizado de acabado:

$$HC_5 = 24\frac{MJ}{kg} x\ 0{,}670 kg\ x\ 0{,}28\frac{\text{kWh}}{\text{MJ}}\ x\ 0{,}174\ \frac{kg\ CO_2\ eq.}{kWh} = 0{,}78\ kg\ CO_2\ eq.$$

Por lo tanto, se obtiene un rango de valores estimados de la huella de carbono producida por la fabricación del prototipo funcional de 9,83 – 30,25 $kg\ CO_2\ eq.$

En la Tabla 17 se observan los resultados obtenidos y se verifica que la huella de carbono más alta es la de la fabricación del prototipo funcional con la tecnología SLM.

Tabla 17. Resumen de los resultados obtenidos de los cálculos estimados de la huella de carbono de los diferentes procesos. Fuente: elaboración propia

Tecnología	**Huella de carbono producida ($kg\ CO_2\ eq.$)**
Forja + Mecanizado	7,15 - 7,26
MJF	11,73 - 14,60
FDM	0,38
SLA	1,37
SLM	9,83 – 30,03

4.12. ANÁLISIS ECONÓMICO

Para el análisis económico de las piezas se utiliza una hoja Excel facilitada por el Laboratorio de Fabricación Aditiva de ICAI. En este estudio se tiene en cuenta el valor de la impresora, la amortización y el precio de los materiales utilizados, entre otros.

4.12.1. TECNOLOGÍA FDM

El coste de fabricación del prototipo es de 15,85€ por unidad, con un margen de beneficio del 50%, como se observa en la Tabla 18.

Tabla 18. Análisis del coste del prototipo para validación de montaje con tecnología FDM. Fuente: elaboración propia a partir de la hoja excel proporcionada por el departamento de fabricación aditiva

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	1.325	
Coste mantenimiento anual (€)	133	
Años de amortización	2	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 8 horas-día	1784	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	**0,48**	
Precio Hora venta-público (€/h)	**0,72**	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento PLA (€/cc) (18,20€-750 cc)	0,02	
Coste material soporte: filamento PLA (€/cc) (20€-750 cc)	0,00	
Coste material bandeja (€/Ud.): (20€-100 uds.)	0,20	
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)~~		
~~Precio hora máquina-deposición (€/h)~~		
PIEZA PROTOTIPO BIELA PARA VALIDACIÓN DE MONTAJE FDM - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	**Opción Solido**	**Costes parciales**
Material modelo (cc)	40,89	0,99 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	6,43	4,66 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,20 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	10,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	**15,85 €/Ud**	
Coste total (€) en ICAI + IVA	**15,85 €**	

4.12.2. TECNOLOGÍA SLA

El precio del prototipo en SLA asciende a un total de 78,79€ por pieza, también con un 50% de margen de beneficio. El precio del técnico analista también es mayor, al igual que el tiempo de trabajo, debido a que el postprocesado de la pieza requiere mayor esfuerzo. Se puede ver el desglose en la Tabla 19

Tabla 19. Análisis del coste del prototipo para validación de montaje con tecnología SLA. Fuente: elaboración propia a partir de la hoja excel proporcionada por el departamento de fabricación aditiva

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -FDM		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	20.000	
Coste mantenimiento anual (€)	2.000	
Años de amortización	5	
Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día	1784	
Precio Hora máquina-amortización (€/h)	**2,91**	
Precio Hora venta-público (€/h)	**4,37**	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material modelo: filamento abs (€/cc) (150€-950 cc)	0,14	
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)	11	16
Precio hora máquina-deposición (€/h)		
PIEZA PROTOTIPO BIELA PARA VALIDACIÓN DE MONTAJE SLA - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	**Opción Solido**	**Costes parciales**
Material modelo (cc)	118,00	16,52 €/ud
Soporte modelo (cc)	0,00	0,00 €/ud
Tiempo modelo (h)	7,38	32,27 €/ud
Piezas por bandeja (ud)	1,00	0,00 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	1,50	30,00 €
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	**78,79 €/Ud**	
Coste total (€) en ICAI + IVA	**78,79 €**	

4.12.3. TECNOLOGÍA MJF

Se obtiene un coste de 75,10€ para el prototipo para validación de montaje fabricado en tecnología MJF. El coste real de impresión debido a las características de la máquina es de 0,7€/cm^3, siendo el coste real de la pieza 59,73€ y obteniéndose un beneficio del 50%. En la Tabla 20 se desglosa el cálculo realizado.

Tabla 20. Análisis del coste del prototipo para validación de montaje con tecnología MJF. Fuente: elaboración propia a partir de la hoja excel proporcionada por el departamento de fabricación aditiva

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D -HP 580		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	80.000	
Coste mantenimiento anual (€)	2.000	
Años de amortización	5	
Días impresión/año	249	
Impresiones/día	1,0	
Precio impresión (€)	**72,29**	
Precio Impresión venta-público (€)	**108,43**	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)	100,00	
Coste material: (€/cc)	0,11	
Volumen Total (cc)	2006,14	
Densidad de Empaquetado	10,00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	20	
PIEZA monica-lucia4-maxilar - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	**Opción Solido**	**Costes parciales**
Material modelo (cc)	85,33	8,98 €/ud
Impresión	-	46,12 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	0,50	10,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	0,50	10,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	**75,10 €/Ud**	
Coste total (€) en ICAI + IVA	**75,10 €**	

4.12.4. TECNOLOGÍA SLM

La estimación del coste para el prototipo funcional se realiza en base a los datos obtenido en la Tabla 14. El coste de mantenimiento anual se ha considerado un 5% del precio de la máquina, y el precio del material se ha consultado en *met3dp*, donde se proporciona un rango para el polvo AISI 4340 de entre $35 y $55.[58] Se observa en la Tabla 21 que el precio final de la pieza es de 340,17€, calculado con un 50% de beneficio.

Tabla 21. Estimación del coste del prototipo funcional metálico con tecnología SLM. Fuente: elaboración propia a partir de la hoja excel proporcionada por el departamento de fabricación aditiva

ANALISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D - Samylabs ALBA 300		
DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA		
Precio máquina (€)	250.000	
Coste mantenimiento anual (€)	12.500	
Años de amortización	5	
Días impresión/año	249	
Impresiones/día	0,5	
Precio impresión (€)	**502,01**	
Precio Impresión venta-público (€)	**753,01**	
DATOS COSTE MATERIAL		
Coste material: (€/kg)	50,00	
Coste material: (€/cc)	0,05	
Volumen Total (cc)	4000,00	
Densidad de Empaquetado	10,00%	
DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA		
Coste técnico analista del modelo - inc. limpieza (€/h)	50	
PIEZA PROTOTIPO FUNCIONAL BIELA METÁLICO SLM - Orientación HORIZONTAL		
CONCEPTOS PRESUPUESTADOS	**Opción Solido**	**Costes parciales**
Material modelo (cc)	85,35	4,49 €/ud
Impresión	-	160,67 €/ud
Tiempo técnico-analista (h)	2,00	100,00 €/ud
Tiempo Limpieza (h)	1,50	75,00 €/ud
Cantidad de piezas	1,00	
Coste unitario (€) en ICAI + IVA	**340,17 €/Ud**	
Coste total (€) en ICAI + IVA	**340,17 €**	

El precio final de la biela será mayor si se tienen en cuenta los tratamientos térmicos y procesos de mecanizado de acabado necesarios para obtener las tolerancias y propiedades

mecánicas requeridas por el diseño. No se desarrolla la estimación económica de estos procesos en este proyecto.

Para comparar el precio unitario obtenido, se ha subido la pieza optimizada a la plataforma *sculpteo* para obtener un presupuesto[59]. La página no permite imprimir en acero AISI 4340, por lo que el precio es orientativo, ya que el presupuesto es para acero inoxidable. El precio que *sculpteo* proporciona (Figura 65), 894,74€, sirve para validar que la impresión 3D metálica es significativamente más cara que las tecnología utilizadas para los prototipos de validación de montaje.

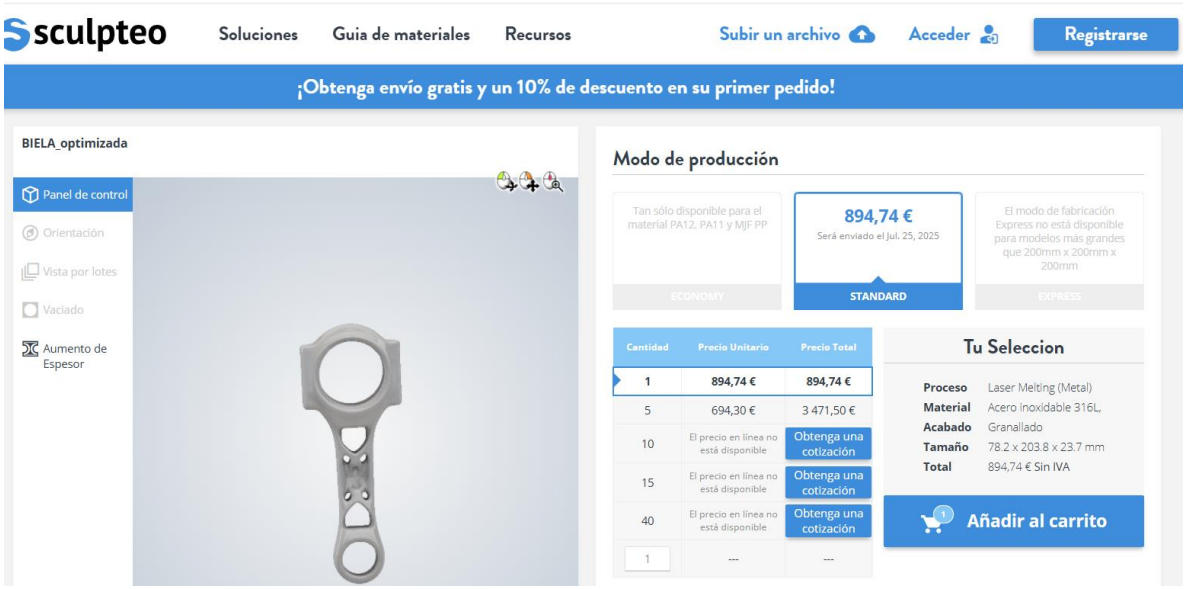


Figura 65. Cotización de la biela optimizada proporcionada por sculpteo [59]

4.12.5. BIELA COMERCIAL

Se comparan los precios obtenidos en el apartado anterior con un set de 4 bielas comerciales fabricadas en AISI 4340 y de características dimensionales similares, como se muestra en la Figura 66.

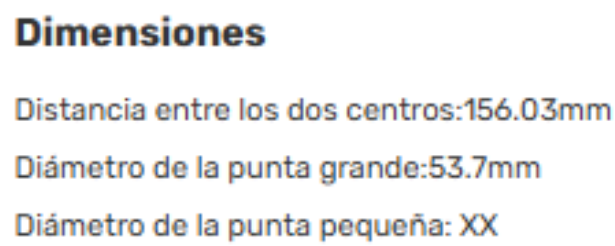


Figura 66. Dimensiones de las bielas comerciales para Alfa Twin Spark [60]

Se observa en la Figura 67 que el precio para cuatro unidades es de 439€, o lo que es lo mismo, 109,75€ por biela. Esto se debe a que los procesos de forja y mecanizado utilizados para la fabricación de bielas están establecidos en el mercado, al contrario que la fabricación aditiva metálica, especialmente para grandes volúmenes.

Figura 67. Precio de 4 bielas forjadas 4340 para Alfa Twin Spark[60]

Capítulo 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. IMPACTO DEL DISEÑO GENERATIVO EN EL DESEMPEÑO ESTRUCTURAL Y LA REDUCCIÓN DE MASA

A continuación se comparan y analizan los resultados obtenidos en las simulaciones realizadas del componente sin optimización topológica y optimizado. En base a los datos expuestos en la Tabla 22 se puede afirmar que:

- Se ha obtenido una reducción de masa del 22,3% (192 g).
- El esfuerzo máximo soportado por la biela en el ensayo de tracción debido a la fuerza de inercia del ciclo de combustión aumenta para la biela optimizada en un 18%, reduciendo el coeficiente de seguridad.

Tabla 22. Comparativa de la biela sin OT y con OT. Fuente: elaboración propia

	Biela sin OT	**Biela OT**
Peso (g)	862	670
Material	AISI 4340	AISI 4340
Esfuerzo máximo (Mpa)	511	603
Coeficiente de seguridad	2,15	1,82

El ahorro de material derivado de la optimización topológica se traduce en menor consumo de material, lo que supone un potencial ahorro energético durante el uso del componente debido al decremento de peso del mismo.

A pesar de la reducción del 15,3% del coeficiente de seguridad, 1,82 se considera un valor admisible según estudios similares.[61]

5.2. IMPACTO DEL DISEÑO GENERATIVO EN LA HUELLA DE CARBONO

Los cálculos realizados para la estimación de la huella de carbono son aproximaciones, al no disponer de acceso a bases de datos para el análisis de ciclo de vida como *Ecoinvent*. Se ha evaluado únicamente el impacto en la huella de carbono causado por la producción de material y debido a los procesos de fabricación reflejados como consumos eléctricos de las máquinas utilizadas. No se han tenido en cuenta transportes o almacenamientos para la estimación.

Los resultados estimados se recogen en la Tabla 23, donde se observa lo siguiente:

- La fabricación de prototipos para comprobación de montaje por FDM y SLA son las tecnologías que menos consumen, por lo que se recomienda su uso para validar la geometría, pero sus propiedades mecánicas son muy distintas del AISI 4340
- La tecnología MJF tiene una mayor huella de carbono estimada, a pesar de tener un peso significativamente inferior. Esto se debe al elevado impacto en la huella de carbono que produce la producción de polvo de PA.
- La tecnología SLM es la que mayor huella de carbono produce. Al igual que en MJF, la fabricación del polvo metálico es lo que mayor impacto genera, además de requerir mecanizado de acabado para un buen acabado del prototipo funcional.

Tabla 23. Comparativa de la estimación de la huella de carbono en función de la tecnología. Fuente: elaboración propia

	Biela sin OT	**Biela OT**			
	FORJA + MECANIZADO	**FDM**	**SLA**	**MJF**	**SLM**
Material	AISI 4340	PLA	ABS	PA	AISI 4340
Peso (g)	862	52	118	86,18	670
Huella de Carbono ($kg\ CO_2\ eq$)	7,15 - 7,26	0,38	1,37	11,73 - 14,60	9,83-30,3

Analizando los datos obtenidos, se detecta que no se consigue reducir la huella de carbono fabricando la biela mediante fabricación aditiva metálica. Esto se debe a que los procesos de forja y mecanizado son procesos consolidados en la industria, y están optimizados y preparados para producción masiva. La impresión 3D todavía no está preparada para la producción en serie, lo que hace que el consumo energético por componente sea significativamente más elevado que para procesos tradicionales de fabricación.

5.3. *IMPACTO DEL DISEÑO GENERATIVO EN COSTES*

En el análisis de costes de los prototipos se tienen en cuenta el precio de la impresora empleada, su amortización, el precio del material, el coste de la mano de obra, así como la cantidad de material utilizado o las horas de impresión. En la Tabla 24 se resumen los precios obtenidos en función de la tecnología. Se destaca lo siguiente:

- El proceso de fabricación más barato es el FDM, por lo que puede ser una buena opción para realizar un prototipo inicial antes de invertir en tecnologías más costosas.
- El precio de la tecnología SLM está calculado en base a estimaciones debido a la falta de información. Es el más elevado, un 353% mayor que en MJF. Se establece un rango de precio para esta tecnología de 340,17 – 894,74 € en base a la cotización proporcionada por la plataforma *sculpteo*.
- El precio de una biela comercial de características similares está alrededor de los 109,75 €, por lo que resulta una opción más económica para el usuario final que la impresión 3D metálica.

Tabla 24. Comparativa de la estimación de la huella de carbono en función de la tecnología. Fuente: elaboración propia

	Biela sin OT	**Biela OT**				
	FORJA + MECANIZADO	**FDM**	**SLA**	**MJF**	**SLM**	**Cotización *sculpteo***
Material	AISI 4340	PLA	ABS	PA	AISI 4340	Acero Inox. 316L
Peso (g)	862	52	118	86,18	670	670
Precio (€)	109,75	15,85	78,79	75,1	340,17	894,74

Capítulo 6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Tras realizar analizar los resultados, se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- La fabricación aditiva permite gran personalización y el diseño de geometrías complejas, lo que la convierte en una tecnología idónea para la fabricación de componentes de vehículos exclusivos y de alto rendimiento, como los *hypercars*, donde priman el diseño optimizado y la innovación.
- Puede ser una solución eficiente para la producción bajo demanda de repuestos de componentes descatalogados. Esto permite reducir los inventarios y reducir los tiempos de espera para el usuario.
- Aunque el diseño ligero combinado con la fabricación aditiva metálica con tecnología SLM no reduce el impacto en el proceso de fabricación del componente, las emisiones durante su uso podrían disminuir debido a una mayor eficiencia del motor. Para confirmar el impacto sería necesario realizar un análisis de ciclo de vida más detallado.
- La fabricación aditiva no puede competir en costes con métodos de fabricación tradicionales, ya que el tiempo de fabricación unitario es mucho mayor, lo que encarece el proceso significativamente.
- Se remarca la importancia de prototipados de validación de montaje antes de la fabricación del prototipo funcional. Es fundamental comprobar tanto el diseño como las tolerancias de las impresoras 3D antes de lanzar el modelo final.

Una vez concluido el proyecto, se plantean trabajos futuros que permitirán profundizar en los resultados obtenidos:

- Validación estructural de la geometría optimizada mediante análisis de fatiga para asegurar un correcto comportamiento y garantizar su durabilidad.
- Fabricación y validación de la biela metálica optimizada topológicamente, con los tratamientos térmicos correspondientes y el mecanizado de acabado necesario para que cumpla las especificaciones técnicas requeridas.
- Exploración de materiales compuestos de alto rendimiento como material sustitutivo al AISI 4340 para aligerar el componente y reducir los costes de fabricación.

Capítulo 7. BIBLIOGRAFÍA

[1] J. Zhu, H. Zhou, C. Wang, L. Zhou, S. Yuan, y W. Zhang, «A review of topology optimization for additive manufacturing: status and challenges», ago. 2020, doi: https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020.

[2] Noe Faurrieta Ortíz, «Optimización de estructuras con Algoritmo de Estimación de Distribución». septiembre de 2014.

[3] C. Weiss, B. Beck, y C. L. Häfner, «Implications of topology optimization on the ecological efficiency of the LPBF process», *Septiembre 2024*, doi: 10.1016/j.procir.2024.08.091.

[4] H. Mina, A. Bailo, y E. Giordano, «Aplicaciones de la optimización topológica en ingeniería mecánica».

[5] R. Kirti, «Finite Element Analysis of a Rocker Arm of a Diesel Engine Using Radioss Linear».

[6] R. D. Kundu y X. S. Zhang, «Sustainability-oriented multimaterial topology optimization: designing efficient structures incorporating environmental effects», ene. 2025, doi: https://doi.org/10.1007/s00158-024-03930-8.

[7] D. j. Munk y J. D. Miller, «Topology Optimmmization of Aircraft Components for Increased Sustainability», *Agosto 2021*, doi: https://doi.org/10.2514/1.J060259.

[8] J. Liu y Y. Ma, «Sustainable Design-Oriented Level Set Topology Optimization», *Noviembre 2016*, doi: 10.1115/1.4035052.

[9] A. Kentli, «Topology Optimization Applications on Engineering Structures».

[10] D. Yago, J. Cante, O. Llobreras-Valls, y J. Oliver, «Topology Optimization Methods for 3D Structural Problems: A Comparative Study», ago. 2021, doi: https://doi.org/10.1007/s11831-021-09626-2.

[11] L. Zhou *et al.*, «Additive Manufacturing: A Comprehensive Review», *Abril 2024*, doi: https://doi.org/10.3390/s24092668.

[12] «Fused Deposition Modeling (FDM) o Fused Filament Fabrication (FFF)», INGENIUS. Accedido: 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://eddm.es/blog-ingenius/fused-deposition-modeling-fdm/

[13] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidallah, y Z. Arifin, «A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials and printing parameters», *Enero 2021*, doi: doi.org/10.1515/eng-2021-0063.

[14] «Impresión 3D Multi Jet Fusion (MJF): Visión general de la tecnología», Xometry. Accedido: 30 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://xometry.pro/es/articulos/impresion-3d-mjf-tecnologia/?utm_source

[15] HP, «HP Multi Jet Fusion technology».

[16] A. Afridi, A. Al Rashid, y M. Koç, «Recent advances in the development of stereolithography-based additive manufacturing processes: A review of applications and challenges», *Septiembre 2024*, doi: https://doi.org/10.1016/j.bprint.2024.e00360.

[17] Z. Geng y B. Bidanda, «Review of reverse engineering systems - current state of art», *Marzo 2017*, doi: http://dx.doi.org/10.1080/17452759.2017.1302787.

[18] «The Comprehensive 6-Step Reverse Engineering Process», Tangent Solutions. Accedido: 1 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://usetangent.com/how-does-the-6-step-reverse-engineering-process-work/
[19] «Huella Ecológica: qué es y cómo se calcula», Fundeen. [En línea]. Disponible en: https://www.fundeen.com/blog-energias-renovables/huella-ecologica?srsltid=AfmBOoqOyvoAPvVaASljhMF51ktGiICreudGAUeRBc5vKzyAiMkYkCuK
[20] «Global Footprint Network», Global Footprint Network. [En línea]. Disponible en: Global Footprint Network
[21] SGS, «Descifrando las Diferencias: Huella Ecológica vs. Huella de Carbono», SGS. [En línea]. Disponible en: https://www.sgs.com/es-es/noticias/2023/12/descifrando-las-diferencias-huella-ecologica-vs-huella-de-carbono
[22] MITECO, «Guía para el cálculo de la huella de carbono y para la elaboración de un plan de mejora continua de una organización». junio de 2024.
[23] «What To Know About Direct & Indirect Emissions: Scope 1, 2, and 3 Emissions». Accedido: 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://ecochain.com/blog/scope-1-2-and-3-emissions-overview-to-direct-and-indirect-emissions/
[24] «CO2 Equivalente», manglai. Accedido: 26 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.manglai.io/glossary/co2-equivalente
[25] O. Diegel, S. Singamneni, S. Reay, y A. Whithell, «Tools for Sustainable Product Design: Additive Manufacturing».
[26] A. Espach y K. Grupta, «An Investigation on Achieving Sustainability in Fused Deposition Modeling via Topology Optimization», doi: doi.org/10.3991/ijes.v9i3.23595.
[27] «Biela del motor: qué es una biela, función de la biela, problemas y averías típicas», AUTODOC CLUB. Accedido: 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://club.autodoc.es/magazin/biela-del-motor-funciones-y-problemas
[28] «BIELAS FORJADAS», rodiauto Sport. Accedido: 27 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://rodiautosport.es/es/1707-bielas-forjadas
[29] «Las bielas del motor ¿Qué son? ¿Cuál es su principal función?» Accedido: 26 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.rodesrecambios.es/blog/motores/elementos-del-motor/biela-motor-coche-que-es-funciones-caracteristicas-tipos/
[30] Chari, «Modeling and Analysis of Connecting Rod Using Various Materials with FEM», jul. 2020.
[31] «Your Guide to Connecting Rod Manufacturing Process: Casting vs Forging», Khatabook. Accedido: 25 de junio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://khatabook.com/blog/rod-manufacturing-process-casting-vs-forging/
[32] Anurag >Kar, «Connecting Rod Manufacturing», ene. 2019.
[33] «Online Gantt». [En línea]. Disponible en: https://www.onlinegantt.com/
[34] «Dynamic 3D». Accedido: 30 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://dynamic-3d.com/handyscan-silver-elite/

[35] «Acero aleado 4340», ALLOYS INTERNATIONAL, INC. Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://alloysintl.com/es/inventory/alloys-steels-supplier/alloy-steel-4340/

[36] «Acero AISI 4340: Propiedades, Productos y Usos», Steel Pro Group. Accedido: 3 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://steelprogroup.com/es/alloy-steel/4340-steel/#:~:text=Es%20un%20acero%20con%20un,una%20resistencia%20al%20desgaste%20excepcionales.

[37] «Through-Hardening Low Alloy Steel Bar 4340».

[38] A.K. Yadav, K. Ratre, y B. Biswas, «Design and Comparative FE Analysis of Connecting Rod», junio de 2022.

[39] A. Muhammad, M. A. H. Ali, y I. H. Shanono, «Finite Element Analysis of a connecting rod in ANSYS: An overview», mar. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/736/2/022119.

[40] R. Ravi, K. V. P. P. Chandu, y B. V. Subhramanyam, «Dynamic Load Analysis and Optimization of a Connecting Rod», abr. 2014.

[41] R. Bottini, J. C. Petras, y M. A. Cavalieri, «INFLUENCIA DE LAS FUERZAS ALTERNATIVAS DE INERCIA EN EL DISEÑO Y RESISTENCIA DE BIELAS EN MOTORES DE ELEVADAS VUELTAS», 2016.

[42] Sam, «2014 F1 explained: The power unit». [En línea]. Disponible en: https://www.racecar-engineering.com/articles/f1/2014-f1-the-power-unit-explained/2/

[43] «Actualización del sensor de presión HPFP para Ecoboost 1.6 y 2.0», Nostrum High Performance. [En línea]. Disponible en: https://nostrum.mybigcommerce.com/ecoboost-1-6-2-0-hpfp-pressure-sensor-upgrade/

[44] RACE, «¿Cómo funciona un motor de combustión interna?», RACE.

[45] N. Soni, G. Renna, y P. Leo, «Advancements in Metal Processing Additive Technologies: Selective Laser Melting (SLM)», doi: https://doi.org/10.3390/met14091081.

[46] OPENAI, «Consulta SLM». Accedido: 8 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://chatgpt.com/share/686d69f3-4d28-8011-96ab-c96033d10fc4

[47] M. Duque Ciceri, T. G. Gutowski, y M. Garetti, «A tool to estimate materials and manufacturing energy for a product», jun. 2010, doi: 10.1109/ISSST.2010.5507677.

[48] «Sustainability Indicators 2024 report», World Steel Association. Accedido: 6 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://worldsteel.org/wider-sustainability/sustainability-indicators

[49] IPCC, «CoM GHG Emission factors for national electricity».

[50] FreeConvert, «Megajoules a Kilowatt-hours». [En línea]. Disponible en: https://www.freeconvert.com/es/unit/megajoules-to-kilowatt-hour

[51] HP, «Impresoras 3D HP Jet Fusion 580/380 Color y 540/340».

[52] J. Conrads, M. Klar, y J. C. Aurich, «Environmental Impact of Powder Production for Additive Manufacturing: Carbon Footprint and Cumulative Energy Demand of Gas Atomization», *Marzo 2025*, doi: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-6202700/v1.

[53] E. T. H. Vink, D. A. Glassner, J. J. Kolstad, R. J. Wooley, y R. P. O'Connor, «The eco-profiles for current and near-future NatureWorks® polylactide (PLA) production», 2007.

[54] «Prusa i3 MK3», La Mejor Impresora 3D. Accedido: 8 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://lamejorimpresora3d.com/impresoras-3d/prusa-i3-mk3

[55] V. C. Panagiotopoulou, Aikaterini Paraskevopoulou, y Panagiotis Stavropoulos, «A Modelling-Based Framework for Carbon Emissions Calculation in Additive Manufacturing: A Stereolithography Case Study», *Agosto 2023*, doi: https://doi.org/10.3390/pr11092574.

[56] «Formlabs Form 3L», Impresoras3D.com. Accedido: 8 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.impresoras3d.com/producto/form-3l-formlabs/?gad_source=1&gad_campaignid=15030475653&gbraid=0AAAADnv7z303aoWoxx_AK0X8o93OkiFd&gclid=CjwKCAjwg7PDBhBxEiwAf1CVu4-OTAOAaeSn1T63vAoLUHTxsNdnVfkEIg3eR7jDOjiRiRmyiWdR9RoCG8oQAvD_BwE

[57] SAMYLABS, «Samylabs. Ficha Técnica ALBA 300».

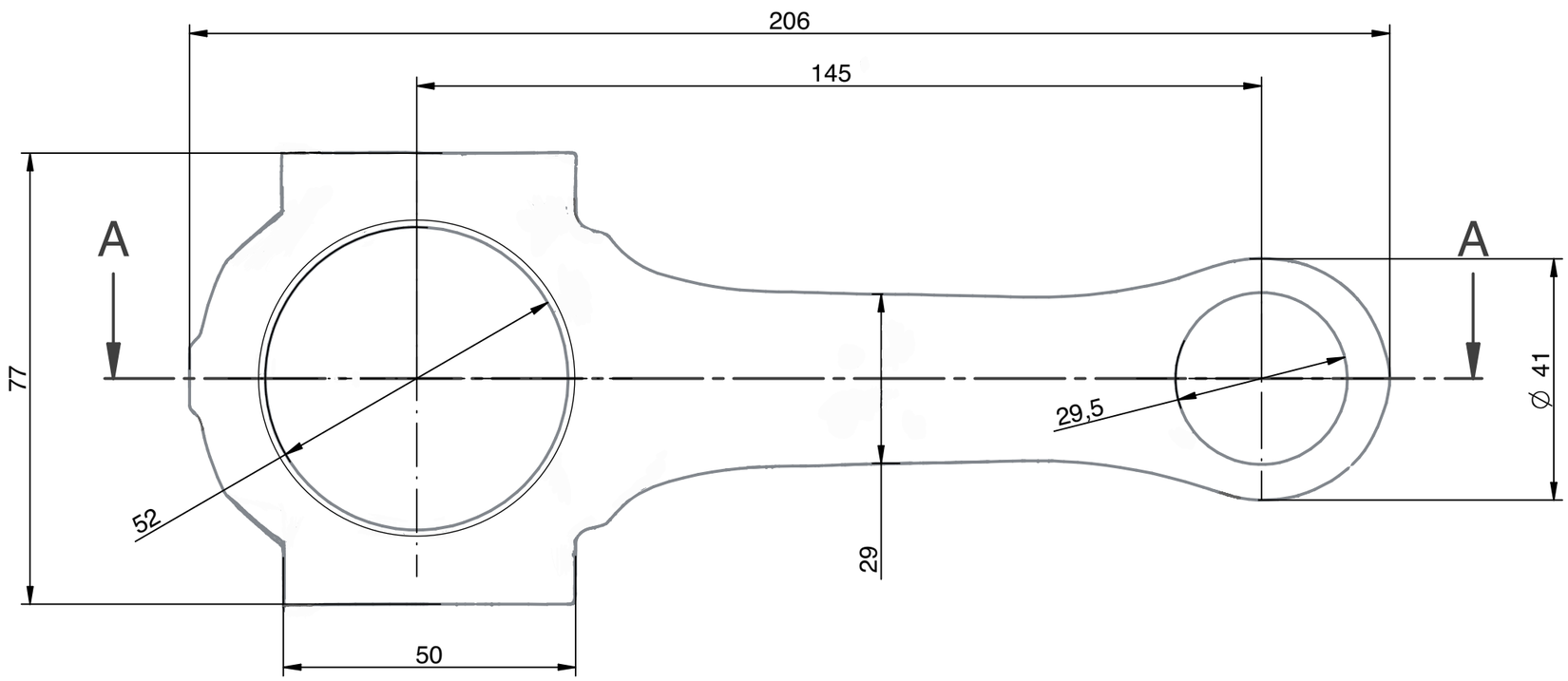
[58] met3dp, «Polvo de acero de alta resistencia», met3dp. Accedido: 8 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://met3dp.com/es/high-strength-steel-powder-202406248/

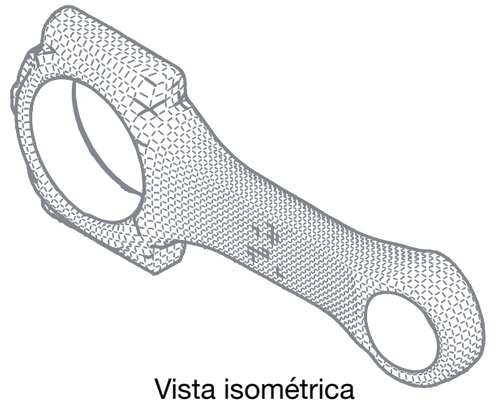
[59] «Cotización biela optimizada», sculpteo. Accedido: 7 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://www.sculpteo.com/es/print/dc1426c790614520a846983914b89258/YwsLV3b2?uuid=N2mw1pM7NUYwINP0sfiK2b

[60] «4 piezas Bielas Forjados 4340 Bielas para Alfa Twin Spark 75 2.0 ARP 2000», maxpeedingRods. Accedido: 8 de julio de 2025. [En línea]. Disponible en: https://es.maxpeedingrods.com/product/for-alfa-romeo-75-milano-20l-twin-spark-ts-h-beam-conrods-connecting-rods.html?tracking=GSES&code=EUR&srsltid=AfmBOorhrMputJGuFPKoKoOCMSlXrLGLB9xklIxGycHL5rEbTGfKcmkLDcI

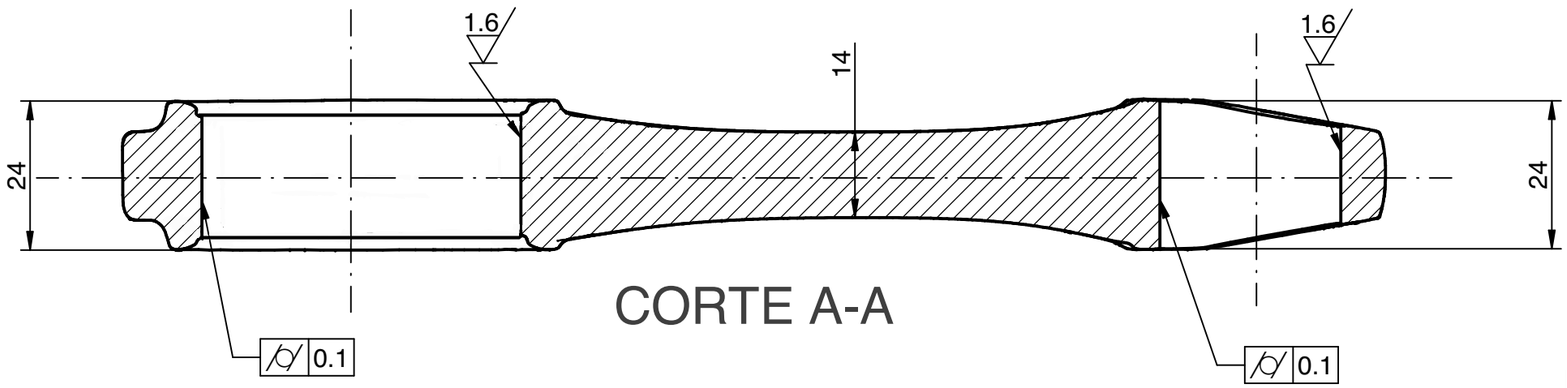
[61] N. Lade, M. Ramachandran, y V. Fegade, «Stress and Factor of Safety for Connecting Rod using Ansys», *Agosto 2019*.

ANEXO I: PLANO DE DIMENSIONES GENERALES DE LA BIELA





Vista isométrica



CORTE A-A

Forjado 11

Mecanizado (1.6)

Para las dimensiones no acotadas,
consultar el modelo 3D

Tolerancias generales para dimensiones lineales		Desviaciones admisibles respecto al nominal (en mm)				
Designación	Descripción	0,51 hasta 3	más de 3 hasta 6	más de 6 hasta 30	más de 30 hasta 120	más de 120 hasta 400
m	media	±0,1	±0,1	±0,2	±0,3	±0,5

SOLO COPY

MATERIAL	AISI 4340		Tabajo Fin de Master 2025
TOLERANCIA	ISO 2768 - m,H		
	NOMBRE	FECHA	
DIBUJADO	EBR	9/07/25	BIELA: DIMENSIONES GENERALES
COMPROBADO			
ESCALA: 1:1	FIRMA:	I.C.A.I.	Nº DE LÁMINA: 1

ANEXO II: ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE (ODS)

Los Objetivos de Desarrollo Sostenibles (ODS) son metas globales propuestas por las Naciones Unidas como parte de la Agenda 2030 para el desarrollo sostenible. En el presente proyecto se abordan los siguientes:

ODS 9: Industria, innovación e infraestructuras. Este objetivo se ve reflejado en este proyecto debido a que las herramientas utilizadas para la OT utilizan tecnología innovadora para buscar componentes más eficientes y sostenibles.

ODS 12: Producción y consumo responsables. El diseño ligero generativo pretende optimizar el uso de materiales, así como minimizar los residuos y el impacto ecológico de los procesos de fabricación.

ODS 13: Acción por el clima. El objetivo del proyecto es aplicar la OT para reducir la huella ecológica, es decir, se pretende reducir la huella de carbono diseñando un proceso de fabricación que genere menos desperdicios y que suponga un ahorro de energía.