



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO SOBRE LA  
FABRICACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES DE  
USO FINAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO  
GENERATIVO Y LA IMPRESIÓN 3D**

AUTORA: Gil López, Ainara

DIRECTOR: Jiménez Calzado, Mariano

CO-DIRECTORA: Fernández Villamarín, Silvia

Madrid, 2026

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO SOBRE LA FABRICACIÓN DE  
COMPONENTES INDUSTRIALES DE USO FINAL MEDIANTE LA APLICACIÓN  
DEL DISEÑO GENERATIVO Y LA IMPRESIÓN 3D

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2025/26 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.: Ainara Gil López      Fecha: ...26.../ ...06.../ ...2026...

Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Mariano Jiménez Calzado      Fecha: ...26.../ ...06.../ ...2026...



Fdo.: Silvia Fernández Villamarín      Fecha: ...26.../ ...06.../ ...2026...



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

ICADE

CIHS

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

TRABAJO FIN DE GRADO

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO SOBRE LA  
FABRICACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES DE  
USO FINAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO  
GENERATIVO Y LA IMPRESIÓN 3D**

AUTORA: Gil López, Ainara

DIRECTOR: Jiménez Calzado, Mariano

CO-DIRECTORA: Fernández Villamarín, Silvia

Madrid, 2026



## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero dar las gracias a mi director, Mariano Jimenez, por ayudarme a transformar este trabajo de una simple idea a algo real, así como por su guía y dedicación.

También, quiero agradecer a mis amigos por estar ahí durante estos años de carrera y ayudarme a avanzar. En especial, gracias a quien me ha acompañado y ayudado durante todo el desarrollo de este trabajo.

Para finalizar, gracias a mi familia por su acompañamiento y escucha incondicional. A mi padre por su esfuerzo y ejemplo, a mis hermanos por su paciencia y, a mi madre por ser el motivo por el que hoy me encuentro aquí.

A todos ellos, gracias.



# **ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO SOBRE LA FABRICACIÓN DE COMPONENTES INDUSTRIALES DE USO FINAL MEDIANTE LA APLICACIÓN DEL DISEÑO GENERATIVO Y LA IMPRESIÓN 3D**

**Autor: Gil López, Ainara**

Director: Jiménez Calzado, Mariano

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

El presente trabajo, analiza la viabilidad técnica y económica de la fabricación de componentes industriales mediante diseño generativo e impresión 3D. Para ello, se diseña y optimiza la araña de la motocicleta del equipo ISC Comillas, que participa en la competición universitaria MotoStudent. Siguiendo la metodología se ha conseguido fabricar un prototipo con una reducción de masa del 85% respecto al modelo inicial propuesto.

**Palabras clave:** Diseño generativo, Fabricación aditiva, Araña, MotoStudent, Motocicleta.

### **1. Introducción**

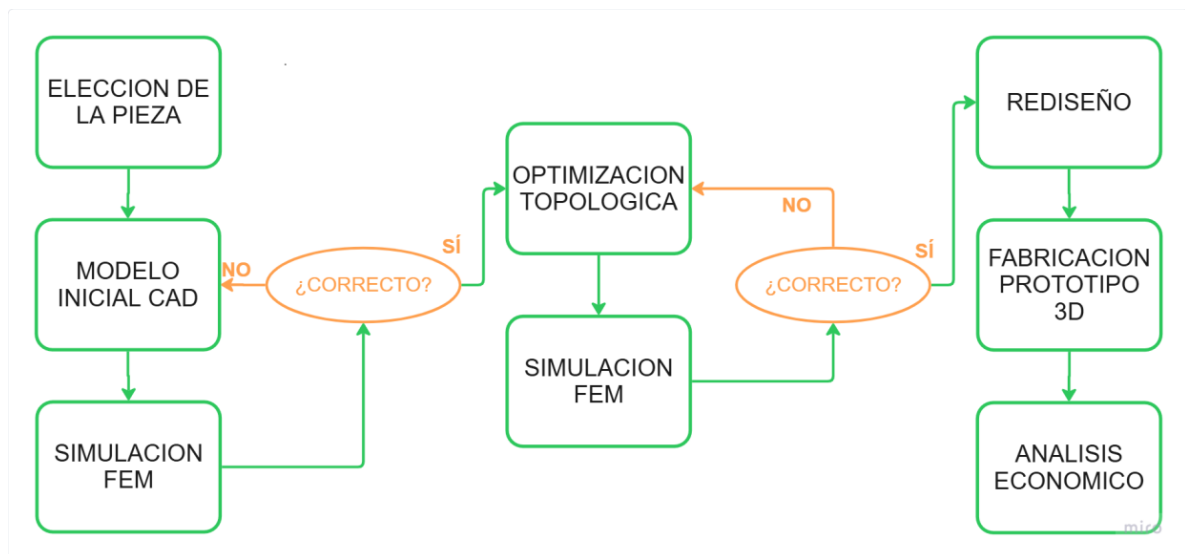
Las nuevas tecnologías de diseño generativo y fabricación aditiva presentan numerosas ventajas frente a métodos tradicionales de fabricación. La primera, utiliza algoritmos para optimizar la forma de los componentes según cargas, restricciones y objetivos. La segunda, permite crear piezas capa a capa con gran libertad.

Con el objetivo principal de comprobar como estas tecnologías pueden mejorar técnica y económicamente los procesos de fabricación, se diseña una araña de motocicleta partiendo de unas condiciones de medida máximas determinadas. Además, se fabrica y se realiza un análisis económico comparativo entre fabricación aditiva y métodos tradicionales.

Se elige la araña por ser un componente con margen de mejora en el equipo ISC Racing Team de Comillas. Una reducción de peso y mejora de la geometría de la pieza pueden suponer una ventaja en la competición MotoStudent [1]. Este componente debe cumplir los requisitos estructurales y funcionales establecidos y presenta la oportunidad perfecta para poner en práctica lo aprendido durante los años universitarios.

### **2. Definición del proyecto**

Para el desarrollo del trabajo se establece la siguiente metodología usando herramientas de software para la simulación, optimización y suavizado como SolidEdge y Altair Inspire.



*Ilustración 1: Etapas del trabajo*

La araña es una estructura situada en la parte delantera de la motocicleta, fijada al chasis o pipa de dirección. Su función es servir de soporte para el carenado frontal, el cuadro de instrumentos, el sistema de iluminación (en algunos casos) y otros elementos auxiliares. Interactúa con el resto de la motocicleta transmitiendo las cargas de estos componentes al chasis, por lo que debe proporcionar suficiente rigidez y estabilidad sin añadir peso.

### 3. Descripción del modelo/sistema/herramienta

El proceso se inicia con la definición del volumen de diseño máximo respetando las medidas de los anclajes de la araña. Realizando un estudio comparativo de la pieza original del equipo y soluciones existentes como la de Bottpower [2], se realiza un modelo inicial con un software CAD.

Para que el análisis sea funcional, se definen condiciones de contorno y se realiza un estudio de las cargas para identificar aquellas que afectan a la motocicleta en una competición. Con estos valores de fuerzas, se comienza el proceso iterativo de optimización y simulación seguido del refinado y suavizado preservando las regiones pertinentes y consiguiendo un modelo preparado para la impresión 3D.

### 4. Resultados

Tras comprobar mediante simulaciones FEM que no se supera la tensión límite de Von Mises del material elegido (Aluminio 6061-T6). Se consigue una reducción de masa del

85% sin perder su capacidad de soportar las cargas y vibraciones que experimenta la motocicleta en competición.

El prototipo de prueba se ha impreso mediante la técnica de impresión con filamento sólido (FDM) y mediante resina (SLA) consiguiendo el siguiente resultado:



*Ilustración 2: Araña optimizada impresa en 3D*

## 5. Conclusiones

La araña optimizada, cumple con los requerimientos de la competición MotoStudent, soporta las cargas con un coeficiente de seguridad de 5 y, se alinea con los Objetivos de Desarrollo Sostenible disminuyendo el desperdicio de material con tecnologías que mejoran los procesos de fabricación industriales.

Además, la impresión 3D reduce el coste de prototipado rápido permitiendo realizar estructuras complejas, eliminar etapas en la logística de fabricación y, acelerar el desarrollo y la validación de nuevos diseños. Esto facilita la fabricación de componentes personalizados y optimizados con menores tiempos de producción. Sin embargo, sigue presentado desafíos y costes elevados para la fabricación del prototipo final.

En conclusión, el uso del diseño generativo y fabricación aditiva representa un avance en el desarrollo de componentes de uso final, al permitir diseños más ligeros, eficientes y optimizados. La araña desarrollada en este trabajo es un claro ejemplo del potencial de estas tecnologías.

## 6. Referencias

- [1] «MS2627\_MotoStudent Regulations».
- [2] D. Sánchez, «BOTT 1000 Morlaco: step by step | Bottpower». Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.bottpower.com/bott-1000-morlaco-step-by-step/>

# **TECHNICAL AND ECONOMIC STUDY ON THE MANUFACTURE OF INDUSTRIAL COMPONENTS FOR END-USE THROUGH THE APPLICATION OF GENERATIVE DESIGN AND 3D PRINTING**

**Author: Gil López, Ainara**

Supervisor: Jiménez Calzado, Mariano

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

## **ABSTRACT**

This paper analyses the technical and economic feasibility of manufacturing industrial components using generative design and 3D printing. To this end, the fairing stay of the ISC Comillas team's motorbike – which is competing in the MotoStudent university competition – has been designed and optimised. Following this methodology, a prototype has been successfully manufactured with an 85% reduction in mass compared to the initial proposed model.

**Keywords:** Generative design, Additive manufacturing, Fairing stay, MotoStudent, Motorcycle.

## **1. Introduction**

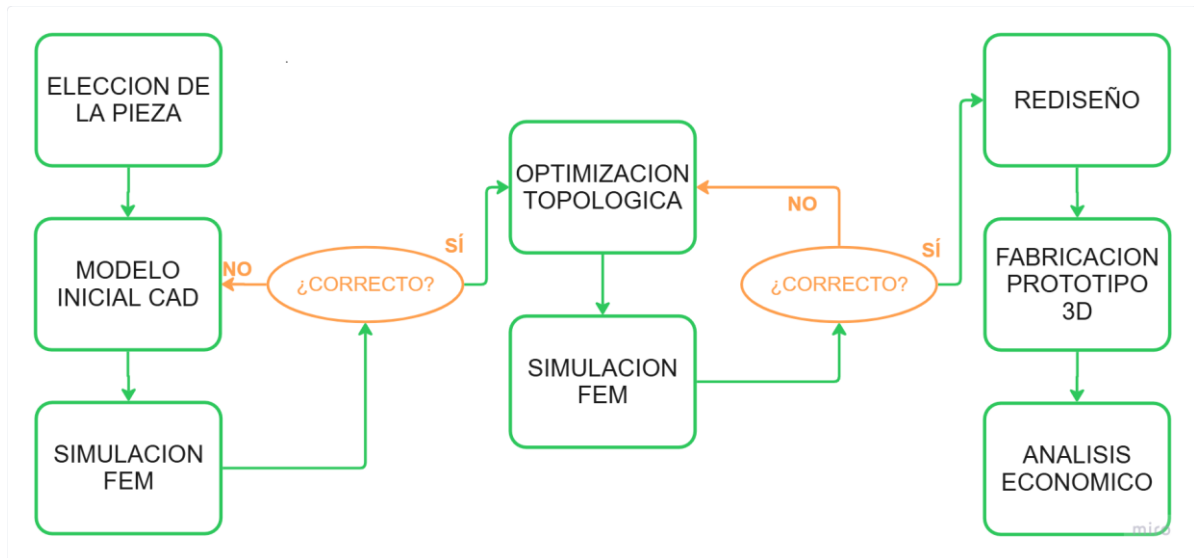
New technologies in generative design and additive manufacturing offer numerous advantages over traditional manufacturing methods. The former uses algorithms to optimise the shape of components according to loads, constraints and objectives. The latter allows parts to be created layer by layer with a great deal of freedom.

With the primary aim of assessing how these technologies can improve manufacturing processes both technically and economically, a motorcycle fairing stay has been designed based on specified maximum dimensional constraints. Furthermore, the part has been manufactured, and a comparative economic analysis has been carried out between additive manufacturing and traditional methods.

The fairing stay was chosen as it is a component with room for improvement within the Comillas ISC Racing Team; a reduction in weight and an improvement in the part's geometry could provide an advantage in the MotoStudent competition [1]. This component must meet the established structural and functional requirements and presents the perfect opportunity to put into practice what has been learnt during the students' university years.

## **2. Project Definition**

The following methodology was established for the development of this project, utilising software tools for simulation, optimisation and smoothing, such as SolidEdge and Altair Inspire.



*Ilustración 3: Stages of the project*

The fairing stay is a structure located at the front of the motorbike, attached to the chassis or steering head. Its function is to support the front fairing, the instrument panel, the lighting system (in some cases) and other auxiliary components. It interacts with the rest of the motorbike by transmitting the loads from these components to the chassis; therefore, it must provide sufficient rigidity and stability without adding weight.

### 3. Description of the model/system/tool

The process begins by defining the maximum design volume whilst adhering to the dimensions of the fairing stay's anchor points. Following a comparative study of the original component and existing solutions, such as that by Bottpower [2], an initial model is created using CAD software.

To ensure the analysis is valid, boundary conditions are defined and a load analysis is carried out to identify the loads acting on the motorbike during a race. Using these force values, the iterative process of optimisation and simulation begins, followed by meshing refinement and smoothing whilst preserving the relevant regions, resulting in a model ready for 3D printing.

### 4. Results

After verifying via FEM simulations that the von Mises stress limit of the chosen material (6061-T6 aluminium) is not exceeded, a mass reduction of 85% is achieved without compromising the part's ability to withstand the loads and vibrations experienced by the motorbike during competition.

The test prototype was printed using both fused deposition modelling (FDM) and stereolithography (SLA) techniques, yielding the following result:



*Ilustración 4: Optimised fairing stay printed in 3D*

## **5. Conclusions**

The optimised fairing stay meets the requirements of the MotoStudent competition, withstands loads with a safety factor of 5, and aligns with the Sustainable Development Goals by reducing material waste through technologies that improve industrial manufacturing processes.

Furthermore, 3D printing reduces the cost of rapid prototyping, enabling the creation of complex structures, eliminating stages in the manufacturing process and accelerating the development and validation of new designs. This facilitates the manufacture of customised and optimised components with shorter production times. However, it continues to present challenges and high costs for the manufacture of the final prototype.

In conclusion, the use of generative design and additive manufacturing represents a step forward in the development of end-use components, as it enables lighter, more efficient and optimised designs. The fairing stay developed in this study is a clear example of the potential of these technologies.

## **6. References**

- [1] «MS2627\_MotoStudent Regulations».
- [2] D. Sánchez, «BOTT 1000 Morlaco: step by step | Bottpower». Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.bottpower.com/bott-1000-morlaco-step-by-step/>

## Índice de la Memoria

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Capítulo 1: INTRODUCCION.....</b>                    | <b>21</b> |
| 1.1. MOTIVACION DEL PROYECTO .....                      | 22        |
| 1.2. OBJETIVOS.....                                     | 23        |
| 1.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE .....           | 23        |
| <b>Capítulo 2: DESCRIPCION DE LAS TECNOLOGIAS .....</b> | <b>25</b> |
| 2.1. DISEÑO GENERATIVO.....                             | 25        |
| 2.1.1. HERRAMIENTAS.....                                | 26        |
| 2.1.2. ETAPAS.....                                      | 26        |
| 2.1.3. VENTAJAS Y LIMITACIONES .....                    | 28        |
| 2.1.4. APLICACIONES Y FUTURO .....                      | 28        |
| 2.2. FABRICACION ADITIVA .....                          | 29        |
| 2.2.1. HERRAMIENTAS.....                                | 30        |
| 2.2.2. TIPOS.....                                       | 30        |
| 2.2.3. ETAPAS.....                                      | 32        |
| 2.2.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES .....                    | 33        |
| 2.2.5. APLICACIONES Y FUTURO .....                      | 34        |
| <b>Capítulo 3: ESTADO DE LA CUESTION.....</b>           | <b>36</b> |
| 3.1. SECTORES Y APLICACIONES .....                      | 36        |
| 3.1.1. SECTOR AEROESPACIAL.....                         | 36        |
| 3.1.2. SECTOR AUTOMOTRIZ .....                          | 37        |
| 3.1.3. SECTOR MEDICO .....                              | 38        |
| 3.1.4. SECTOR DEPORTIVO.....                            | 39        |
| 3.1.5. SECTOR DE LA CONTRUCCION .....                   | 41        |
| 3.2. CONSIDERACIONES TECNICAS .....                     | 42        |
| 3.2.1. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO GENERATIVO.....     | 42        |
| 3.2.2. CONSIDERACIONES EN LA FABRICACION ADITIVA .....  | 43        |
| 3.3. MATERIALES.....                                    | 46        |
| 3.3.1. TERMOPLASTICOS.....                              | 46        |
| 3.3.2. RESINAS (FOTOPOLIMEROS) .....                    | 46        |
| 3.3.3. METALES.....                                     | 47        |
| 3.3.4. COMPUESTOS.....                                  | 47        |



|   |  |           |
|---|--|-----------|
| 3.3.5.  | <i>CONTRUCCION</i> .....                       | 47        |
| 3.3.6.  | <i>EN DESARROLLO</i> .....                     | 47        |
| 3.4.  | COSTES Y BENEFICIOS .....                      | 48        |
| 3.5.  | COMPETICION MOTOSTUDENT .....                  | 50        |
| 3.5.1.  | <i>FASES</i> .....                             | 51        |
| 3.5.2.  | <i>CIRCUITO</i> .....                          | 53        |
| <b>Capítulo 4: DEFINICION DEL TRABAJO .....</b> |  | <b>54</b> |
| 4.1.  | METODOLOGIA .....                              | 54        |
| 4.2.  | PIEZA A DISEÑAR .....                          | 56        |
| 4.2.1.  | <i>TIPOS DE ARAÑAS</i> .....                   | 57        |
| 4.2.2.  | <i>EXIGENCIAS</i> .....                        | 58        |
| 4.2.3.  | <i>COMPETICION</i> .....                       | 58        |
| 4.3.  | ESTUDIO DE LA GEOMETRÍA.....                   | 59        |
| 4.3.1.  | <i>NORMATIVA MOTOSTUDENT</i> .....             | 59        |
| 4.3.2.  | <i>PUNTOS DE ANCLAJE Y ACCESORIOS</i> .....    | 60        |
| 4.3.3.  | <i>MEDIDAS MAXIMAS</i> .....                   | 62        |
| 4.4.  | ESTUDIO DE CARGAS .....                        | 63        |
| 4.4.1.  | <i>FUERZA DEBIDA AL PESO</i> .....             | 63        |
| 4.4.2.  | <i>FUERZA DEBIDA AL VIENTO</i> .....           | 64        |
| 4.4.3.  | <i>FUERZA DE INERCIA POR ACELERACIÓN</i> ..... | 65        |
| 4.4.4.  | <i>FUERZAS DE INERCIA POR FRENADO</i> .....    | 66        |
| 4.5.  | MATERIAL DE FABRICACION.....                   | 68        |
| 4.6.  | PARAMETROS PARA LA SIMULACION FEM.....         | 70        |
| <b>Capítulo 5: DESARROLLO DEL TRABAJO .....</b> |  | <b>73</b> |
| 5.1.  | PROTOTIPO 1 .....                              | 73        |
| 5.1.1.  | <i>VALIDACION POR SIMULACION FEM</i> .....     | 76        |
| 5.1.2.  | <i>OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA</i> .....           | 77        |
| 5.2.  | PROTOTIPO 2 .....                              | 80        |
| 5.2.1.  | <i>OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA</i> .....           | 80        |
| 5.3.  | Prototipo 3 .....                              | 85        |
| 5.3.1.  | <i>OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA</i> .....           | 85        |
| 5.4.  | REDISEÑO .....                                 | 92        |
| 5.5.  | FABRICACION .....                              | 97        |
| 5.5.1.  | <i>TECNOLOGIAS DE IMPRESION</i> .....          | 98        |
| 5.5.2.  | <i>PIEZA IMPRESA</i> .....                     | 100       |

|   |            |
|---|------------|
| <b>Capítulo 6: ANALISIS DE RESULTADOS.....</b>              | <b>104</b> |
| 6.1. METODOLOGIA PARA EL ESTUDIO ECONOMICO.....             | 104        |
| 6.2. COSTES I3D.....  | 105        |
| 6.3. ANALISIS DE COSTES PROTOTIPO DE PRUEBA.....            | 106        |
| 6.3.1. ARAÑA EN BRUTO EN FDM.....                           | 106        |
| 6.3.2. ARAÑA OPTIMIZADA EN FDM.....                         | 108        |
| 6.3.3. ARAÑA OPTIMIZADA EN SLA.....                         | 112        |
| 6.3.4. ARAÑA OPTIMIZADA EN SLS.....                         | 115        |
| 6.4. ANALISIS DE COSTES PROTOTIPO FINAL.....                | 118        |
| 6.5. VIABILIDAD AMBIENTAL.....                              | 119        |
| 6.5.1. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO.....              | 120        |
| <b>Capítulo 7: CONCLUSIONES.....</b>                        | <b>122</b> |
| <b>Capítulo 8: BIBLIOGRAFIA.....</b>                        | <b>124</b> |
| <b>ANEXO I: Resultados MotoStudent.....</b>                 | <b>127</b> |
| <b>ANEXO II: Iteraciones y Condiciones de Contorno.....</b> | <b>130</b> |
| <b>ANEXO III: Plano del circuito.....</b>                   | <b>131</b> |
| <b>ANEXO IV: Plano del modelo inicial.....</b>              | <b>132</b> |

## Índice de Ilustraciones

|  |    |
|--|----|
| Ilustración 1: Etapas del trabajo .....  | 8  |
| Ilustración 2: Araña optimizada impresa en 3D .....  | 9  |
| Ilustración 3: Stages of the project .....   | 11 |
| Ilustración 4: Optimised fairing stay printed in 3D .....  | 12 |
| Ilustración 5: Motocicleta del equipo ISC Comillas .....   | 22 |
| Ilustración 6: Objetivos de Desarrollo Sostenible .....  | 24 |
| Ilustración 7: Ejemplo de diseño generativo .....  | 25 |
| Ilustración 8: Fases de diseño generativo .....  | 27 |
| Ilustración 9: Implantes ortopédicos, investigación del TEC [12] .....                                 | 29 |
| Ilustración 10: Primera impresora de estereolitografía SLA-1 .....                                     | 29 |
| Ilustración 11: Ejemplo de fabricación aditiva .....   | 30 |
| Ilustración 12: Categorías de fabricación aditiva según ISO/ASTM 52900 .....                           | 32 |
| Ilustración 13: Comparación del desperdicio métodos tradicionales (A) vs fabricación aditiva (B) ..... | 34 |
| Ilustración 14: Futuros hábitats en Marte de la NASA [12] .....  | 35 |
| Ilustración 15: Boquilla de combustible impresa en 3D por GE Aviation .....                            | 37 |
| Ilustración 16: Impresión 3D de piezas de coches clásicos .....  | 38 |
| Ilustración 17: Órtesis de pie y tobillo impresa en 3D para Nik .....                                  | 39 |
| Ilustración 18: Remo de fibra de carbono de Emma Wiggs optimizado e impreso en 3D .....                | 40 |
| Ilustración 19: Casco SpeedFlex Precision Diamond con forro impreso en 3D .....                        | 40 |
| Ilustración 20: Construcción mediante 3D Concrete Printing .....                                       | 41 |
| Ilustración 21: Puente metálico MX3D en Ámsterdam impreso en 3D .....                                  | 42 |
| Ilustración 22: Error por el efecto de escalonamiento en impresión 3D .....                            | 44 |
| Ilustración 23: Representación ángulo crítico de impresión creada con IA ( ChatGPT) .....              | 44 |
| Ilustración 24: Diferencia de los pesos soportados en función de la dirección de capas .....           | 45 |
| Ilustración 25: Costes de la fabricación aditiva .....   | 49 |
| Ilustración 26: Logo competición MotoStudent .....   | 50 |
| Ilustración 27: Equipo ISC Racing Team Comillas 2023 .....   | 50 |
| Ilustración 28: Circuito Motorland Aragón .....  | 53 |

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 29: Etapas del trabajo .....  | 55 |
| Ilustración 30: Araña y cristal frontal de la motocicleta creada con IA (ChatGPT) ..... | 56 |
| Ilustración 31: Araña optimizada realizada por Bottpower [35] .....                     | 57 |
| Ilustración 32: Motocicleta ISC Comillas en competición MotoStudent.....                | 59 |
| Ilustración 33:Carenado frontal y conductos de aire motocicleta ISC Comillas.....       | 60 |
| Ilustración 34: Punto de anclaje a chasis motocicleta equipo ISC Comillas.....          | 61 |
| Ilustración 35: Puntos de anclaje a carenado frontal motocicleta equipo ISC Comillas    | 61 |
| Ilustración 36: AiM MXS 1.3 Strada .....  | 62 |
| Ilustración 37: Representación de las fuerzas debidas al peso .....                     | 63 |
| Ilustración 38: Representación de las fuerzas debidas al viento .....                   | 64 |
| Ilustración 39: Representación de las fuerzas debidas a la aceleración .....            | 66 |
| Ilustración 40: Representación de las fuerzas debidas a la frenada.....                 | 67 |
| Ilustración 41: Definición de la restricción fija .....                                 | 70 |
| Ilustración 42: Cuerpo Prototipo 1 mallado .....  | 71 |
| Ilustración 43: Representación de las fuerzas para el caso de compresión .....          | 72 |
| Ilustración 44: Representación de las fuerzas para el caso de tracción.....             | 72 |
| Ilustración 45: Prototipo 1 .....   | 73 |
| Ilustración 46: Tornillos superiores de unión al carenado.....                          | 74 |
| Ilustración 47: Zona de soporte del dashboard.....                                      | 74 |
| Ilustración 48: Anclaje a pipa de dirección .....                                       | 75 |
| Ilustración 49: Medidas máximas modelo inicial.....                                     | 75 |
| Ilustración 50:Simulación Prototipo 1 para el caso de compresión.....                   | 76 |
| Ilustración 51: Simulación Prototipo 1 para el caso de tracción .....                   | 76 |
| Ilustración 52: Condiciones de contorno optimización Prototipo 1 .....                  | 78 |
| Ilustración 53: Optimización al 70% del Prototipo 1 .....                               | 79 |
| Ilustración 54: Errores en la optimización del Prototipo 1 .....                        | 79 |
| Ilustración 55: Prototipo 2 .....   | 80 |
| Ilustración 56: Condiciones de contorno optimización Prototipo 2 .....                  | 81 |
| Ilustración 57: Optimización al 50% del Prototipo 2 .....                               | 81 |
| Ilustración 58: Simulación optimización al 50% del Prototipo 2.....                     | 82 |
| Ilustración 59: Optimización al 60% del Prototipo 2 .....                               | 83 |
| Ilustración 60: Simulación optimización al 60% del Prototipo 2.....                     | 83 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 61: Optimización al 70% del Prototipo 2 .....                             | 84  |
| Ilustración 62: Error en la optimización del Prototipo 2 .....                        | 84  |
| Ilustración 63: Prototipo 3 .....   | 85  |
| Ilustración 64: Condiciones de contorno optimización Prototipo 3 .....                | 86  |
| Ilustración 65: Optimización al 70% del Prototipo 3 .....                             | 86  |
| Ilustración 66: Simulación optimización al 70% del Prototipo 3 .....                  | 87  |
| Ilustración 67: Optimización al 85% del Prototipo 3 .....                             | 87  |
| Ilustración 68: Simulación optimización al 85% del Prototipo 3 .....                  | 88  |
| Ilustración 69: Simulación desplazamiento optimización al 85% del Prototipo 3 .....   | 89  |
| Ilustración 70: Optimización al 90% del Prototipo 3 .....                             | 89  |
| Ilustración 71: Simulación optimización al 90% del Prototipo 3 .....                  | 90  |
| Ilustración 72: Masa final prototipo elegido .....                                    | 90  |
| Ilustración 73: Prototipo con reducción de masa al 85% .....                          | 91  |
| Ilustración 74: Araña en Altair Inspire .....   | 92  |
| Ilustración 75: Prototipo convertido a PolyNURBS .....                                | 93  |
| Ilustración 76: Errores del prototipo suavizado .....                                 | 93  |
| Ilustración 77: Extrusiones para conservación .....                                   | 94  |
| Ilustración 78: Aparición de esquinas por la conservación de paredes inferiores ..... | 94  |
| Ilustración 79: Extrusión para mantener anclaje inferior completo .....               | 95  |
| Ilustración 80: Eliminación de partes a conservar en la PolyNURB .....                | 95  |
| Ilustración 81: Extrusión suavizada anclaje inferior .....                            | 96  |
| Ilustración 82: Resultado final del prototipo .....                                   | 96  |
| Ilustración 83: Metodología para la fabricación 3D .....                              | 97  |
| Ilustración 84: Orientación y soportes araña FDM, Bumbu Studio .....                  | 98  |
| Ilustración 85: Orientación y soportes araña SLA, PreForm .....                       | 99  |
| Ilustración 86: Orientación y soportes araña SLS, PreForm .....                       | 100 |
| Ilustración 87: Error de impresión .....  | 101 |
| Ilustración 88: Herramienta de corte software .....                                   | 101 |
| Ilustración 89: Preparación de la pieza .....   | 101 |
| Ilustración 90: Partes impresas .....   | 102 |
| Ilustración 91: Araña impresa en FDM final .....                                      | 102 |
| Ilustración 92: Post-procesado impresión SLA, soportes y horno .....                  | 103 |

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 93: Araña impresa en SLA con soportes .....              | 103 |
| Ilustración 94:Diagrama de flujo de los costes de impresión 3D ..... | 104 |
| Ilustración 95: Comparativa de la cadena logística [38] .....        | 105 |
| Ilustración 96: Comparativa de costes por unidad producida.....      | 105 |
| Ilustración 97: Comparativa de costes por complejidad.....           | 106 |
| Ilustración 98: Bambu Lab P2S .....                                  | 106 |
| Ilustración 99: Simulación de laminado modelo inicial FDM .....      | 107 |
| Ilustración 100: Datos de simulación en bruto FDM .....              | 107 |
| Ilustración 101: Simulación de laminado modelo optimizado FDM .....  | 109 |
| Ilustración 102: Datos de simulación FDM.....                        | 109 |
| Ilustración 103: Form 3L .....                                       | 112 |
| Ilustración 104: Simulación de impresión modelo optimizado SLA ..... | 112 |
| Ilustración 105: Datos de simulación SLA.....                        | 113 |
| Ilustración 106: Fuse X1 .....                                       | 115 |
| Ilustración 107: Simulación de impresión modelo optimizado SLS ..... | 115 |
| Ilustración 108: Datos de simulación SLS .....                       | 116 |
| Ilustración 109: Impresora EOS M400.....                             | 118 |
| Ilustración 110: Mejora de suavizado 1.....                          | 123 |
| Ilustración 111: Mejora de suavizado 2.....                          | 123 |
| Ilustración 112: Plano circuito Motorland Aragón.....                | 131 |

## Índice de Tablas

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 1: Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva según ISO/ASTM 52900    | 31  |
| Tabla 2: Tipos de materiales y tecnologías en los que se usan.....                   | 48  |
| Tabla 3: Medidas máximas de diseño del cristal delantero .....                       | 62  |
| Tabla 4: Medidas máximas de diseño de la pipa de dirección .....                     | 63  |
| Tabla 5: Resumen de las fuerzas .....  | 68  |
| Tabla 6: Propiedades del Aluminio 6061-T6 .....                                      | 69  |
| Tabla 7: Comparativa de materiales para una araña de MotoStudent .....               | 69  |
| Tabla 8: Costes modelo inicial FDM ICAI .....  | 108 |
| Tabla 9: Costes modelo optimizado FDM ICAI .....                                     | 110 |
| Tabla 10: Costes de servicio modelo optimizado FDM Bitfab .....                      | 111 |
| Tabla 11: Costes de pedido modelo optimizado FDM Bitfab .....                        | 111 |
| Tabla 12: Costes modelo optimizado SLA ICAI.....                                     | 113 |
| Tabla 13: Costes de servicio modelo optimizado SLA Bitfab .....                      | 114 |
| Tabla 14: Costes de pedido modelo optimizado SLA Bitfab .....                        | 114 |
| Tabla 15: Costes modelo optimizado SLS ICAI .....                                    | 116 |
| Tabla 16: Costes de servicio modelo optimizado SLS Bitfab .....                      | 117 |
| Tabla 17: Costes de pedido modelo optimizado SLS Bitfab.....                         | 117 |
| Tabla 18: Costes prototipo final DMLS ICAI.....                                      | 119 |
| Tabla 19: Comparación energética y ambiental tecnologías fabricación .....           | 120 |
| Tabla 20: Comparación ambiental entre el diseño inicial y el diseño optimizado ..... | 121 |
| Tabla 21: Excel de iteraciones.....  | 130 |
| Tabla 22: Excel de decisiones .....  | 130 |
| Tabla 23: Excel valores de desplazamiento para simulaciones .....                    | 130 |

## Capítulo 1: INTRODUCCION

Actualmente la industria está experimentando una transformación y un crecimiento enorme gracias a la digitalización, la automatización de procesos y las nuevas tecnológicas de diseño y fabricación. Se busca sustituir los métodos tradicionales como torneado, fundición o moldeo por métodos que requieran añadir solo el material necesario. Asimismo, buscan la fabricación de piezas complejas y personalizadas disminuyendo los elementos de unión, mejorando la eficiencia y resistencia de las estructuras mientras se simplifica el proceso logístico al eliminar pasos en el montaje.

Este cambio, está provocando que las empresas apuesten por nuevas medidas que mejoren su eficiencia, reduciendo así los costes y tiempos de fabricación, optimizando el uso de los materiales y cumpliendo con los criterios de calidad, sostenibilidad y personalización del cliente.

Entre las tecnologías emergentes, destaca el diseño generativo. Este tipo de diseño está ganando importancia porque permite generar múltiples soluciones de diseño a partir de ciertas restricciones u objetivos específicos. Utilizando técnicas de optimización topológica, es capaz de disminuir tanto los tiempos de diseño como de producción.

Por otro lado, la fabricación aditiva o impresión 3D permite fabricar geometrías complejas añadiendo material capa a capa en vez de quitar material, como se ha estado haciendo en los procesos de fabricación tradicionales.

Por lo tanto, la combinación de ambas tecnologías abre nuevas posibilidades de diseño de componentes más ligeros, optimizados y personalizados.

Además, en un contexto de competición como el proyecto MotoStudent el uso de estas tecnologías es esencial. Esta, es una competición universitaria internacional en la que los equipos deben diseñar, desarrollar y fabricar una motocicleta de competición funcional [1].

El uso de las tecnologías previamente mencionadas presenta una gran mejora frente a métodos tradicionales gracias a la libertad que ofrecen en el diseño. En primer lugar, el diseño generativo permite estructuras más ligeras y eficientes sin comprometer la seguridad estructural. También, requiere de simulaciones iterativas para optimizar las piezas y este, es precisamente un requisito en el reglamento de la competición para garantizar la seguridad de cada pieza en la motocicleta. Por otro lado, la impresión 3D capa a capa permite fabricar prototipos rápidos y económicos, realizando pequeñas mejoras más fácilmente para después probarlas sin necesidad de moldes o procesos complejos que aumentan el coste de un equipo con un presupuesto limitado por los patrocinadores.

Sin embargo, a pesar de los continuos avances todavía se cuestiona la viabilidad técnica y económica de las piezas obtenidas frente a procesos convencionales. Los costes de

material, los tiempos de fabricación, la repetibilidad del proceso y las propiedades mecánicas finales son factores importantes que se deben analizar.

En este contexto, este Trabajo Fin de Grado, pretende analizar la viabilidad técnica de la producción y la rentabilidad económica del proyecto respecto a la utilización del diseño generativo y la fabricación aditiva (impresión 3D) en el desarrollo de componentes industriales de uso final, evaluando su potencial real, sus limitaciones y su posible implantación en el ámbito industrial.

## 1.1. MOTIVACION DEL PROYECTO

Este proyecto, surge gracias al interés por las tecnologías de diseño generativo y fabricación aditiva y su aplicación real en la ingeniería y los procesos. Participando en un club universitario dedicado al diseño y fabricación de una motocicleta (ISC Racing Team), se presenta la oportunidad perfecta para aplicar de manera directa los conocimientos adquiridos durante el grado.

El proyecto se orienta a la optimización de uno de los componentes de esta motocicleta, en concreto, la araña. Esta pieza, deberá cumplir los requisitos estructurales y funcionales establecidos, eligiendo también un material que permita reducir el peso de la pieza, manteniendo la resistencia para su uso final.

Rediseñar y fabricar este componente mediante impresión 3D hace que este proyecto conecte el ámbito académico y la industria real. Además, permite evaluar de forma práctica y objetiva las ventajas y limitaciones del diseño generativo y la fabricación aditiva en una aplicación concreta, reforzando el carácter aplicado y experimental del Trabajo Fin de Grado.



*Ilustración 5: Motocicleta del equipo ISC Comillas*

## 1.2. OBJETIVOS

El objetivo principal de este trabajo consiste en:

- Analizar la viabilidad técnica y económica de la fabricación de componentes industriales mediante diseño generativo e impresión 3D.

Además, se listan otros objetivos específicos que ayudarán a entender mejor el objetivo principal y redactar conclusiones al respecto:

- Desarrollar el rediseño optimizado de un componente industrial mediante técnicas de optimización topológica.
- Fabricar el componente diseñado utilizando tecnologías de fabricación aditiva.
- Realizar un análisis económico comparativo entre fabricación aditiva y métodos tradicionales.
- Evaluar las ventajas y limitaciones del proceso para su aplicación industrial.

## 1.3. OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), son un conjunto de metas globales establecidas por la Organización de las Naciones Unidas (ONU) que pretenden mejorar la vida de las personas mientras se protege el planeta. Se trata de diecisiete objetivos que buscan resolver problemas que afectan actualmente de una manera u otra al mundo en el que vivimos, garantizando que el progreso económico no discrimine a poblaciones ni destruya el planeta [3].



Ilustración 6: Objetivos de Desarrollo Sostenible

En concreto, este trabajo se alinea principalmente con tres de los objetivos establecidos en la Agenda 2030. Con esto, se demuestra como la aplicación de tecnologías en el proceso tiene un impacto positivo tanto a nivel técnico-económico como a nivel de sostenibilidad y responsabilidad ambiental.

En primer lugar, el objetivo número **9: Industria, innovación e infraestructura**. El trabajo se alinea con este objetivo porque estudia la aplicación del diseño generativo y la fabricación aditiva como herramientas para mejorar los procesos industriales. Fomenta la innovación integrando estas tecnologías para desarrollar componentes optimizados desde la fase de diseño hasta el producto final.

Por otro lado, el objetivo **12: Producción y consumo responsables**. La optimización topológica permite reducir significativamente la cantidad de material empleado en la fabricación de los componentes, eliminando material innecesario sin comprometer la funcionalidad ni la resistencia mecánica. Esta reducción del consumo de recursos se traduce en una disminución del desperdicio de material y una mejora de la eficiencia del proceso de producción.

Por último, el objetivo **13: Acción por el clima**. La fabricación aditiva, utiliza únicamente el material necesario para fabricar los componentes, ya que va capa a capa. Esto, reduce el impacto ambiental y las emisiones asociadas a procesos de fabricación, desperdicio de material y consumo energético, cuando influyen factores como el peso (que se ve reducido gracias a estas técnicas).

## Capítulo 2: DESCRIPCION DE LAS TECNOLOGIAS

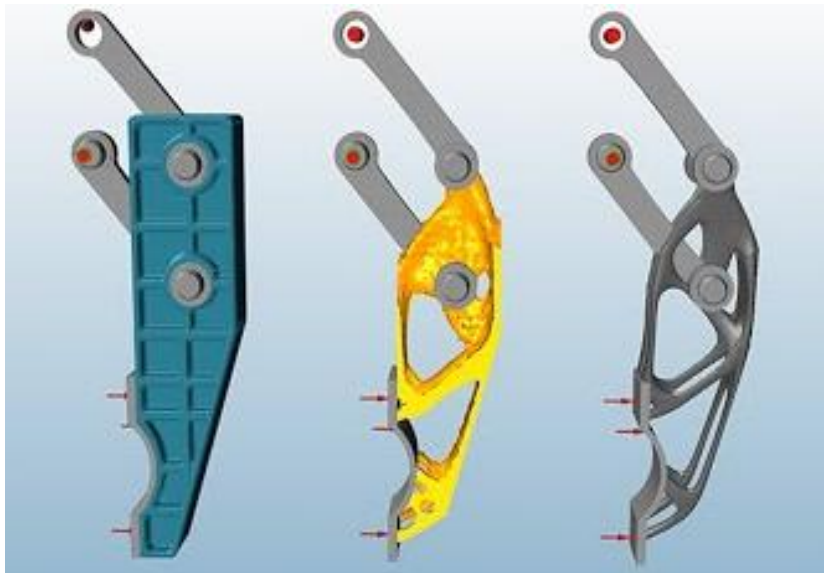
### 2.1. DISEÑO GENERATIVO

Para entender esta primera tecnología, es necesario diferenciar dos conceptos relacionados, pero no iguales, la optimización topológica y el diseño generativo.

En primer lugar, la optimización topológica es un método de optimización que utiliza modelos algorítmicos para organizar el material dentro de un espacio definido para un conjunto de cargas y restricciones establecidas previamente [4]. Se utiliza desde principios de los años 90 para mejorar modelos CAD siempre partiendo de un diseño creado por personas y eliminando el material innecesario sobre todo en zonas donde no hay esfuerzos críticos soportados [5].

Por otro lado, el diseño generativo es un proceso avanzado que utiliza inteligencia artificial y aprendizaje automático para estudiar todas las posibilidades de diseño basadas no en un modelo inicial sino directamente en restricciones definidas como; el material, los costes o el método de fabricación [5].

Ambos, buscan maximizar la eficiencia y permiten obtener geometrías óptimas más ligeras y adaptadas. Además, ayudan a resolver problemas como la resonancia que ocurre cuando la frecuencia de una fuerza externa coincide con la frecuencia natural del componente y la amplitud de la vibración aumenta drásticamente o problemas como el esfuerzo térmico ante cambios en la temperatura por fricción interna o factores internos que generan fatiga y deformaciones en las piezas [4].



*Ilustración 7: Ejemplo de diseño generativo*

### 2.1.1. HERRAMIENTAS

Existen numerosas herramientas o softwares que ayudan a integrar estos métodos de diseño desde el inicio del proceso, evitando así posibles fallos en la geometría final difíciles de solucionar y lo que es peor caros de resolver.

Entre estas herramientas destacan:

- nTopology: agiliza el diseño combinando geometrías avanzadas, simulaciones y datos experimentales [4].
- SolidWorks Simulation: permite modificar la rigidez de las piezas y crear diseños estudiando la topología de las piezas o estructuras [6].
- Autodesk Fusion 360: plataforma en la nube para optimizar la forma y verificar diseños antes de la fabricación [4].
- Altair Inspire: herramienta que ofrece definir objetivos de masa mínima y rigidez máxima considerando variables de vibraciones y transferencia de calor [7].
- Creo 7.0: software que cuenta con varias extensiones que disminuyen el tiempo empleado en el diseño a partir de las limitaciones de la pieza [4].

### 2.1.2. ETAPAS

El diseño generativo cuenta con varias fases de proceso basadas en el Método de Elementos Finitos (FEM) y que hacen posible analizar y mejorar el comportamiento estructural de las piezas antes de la fabricación de prototipos:

- 1- **Definición del espacio:** se establece los límites geométricos, es decir, el volumen máximo en el que se genera el componente. Para ello, hay que identificar las zonas protegidas como puntos de unión o superficies de contacto que no pueden sufrir modificaciones.
- 2- **Aplicación de condiciones:** se incorporan las condiciones físicas que pueden afectar a la pieza. Por ejemplo, las cargas que actúan sobre la superficie, las restricciones de los soportes o las propiedades mecánicas del material. Toda esta información, hace posible que en la simulación se obtenga el comportamiento real aproximado durante el funcionamiento de la estructura.
- 3- **Ejecución del algoritmo (FEM):** el software divide el modelo en una malla compuesta por pequeños elementos interconectados a través de nodos. Mediante la discretización, el sistema se pueden calcular tensiones, deformaciones y

distribuciones de esfuerzos en toda la geometría, prediciendo el comportamiento físico de la pieza [8].

- 4- **Validación y Umbral de densidad:** una vez realizado el análisis, el algoritmo asigna a cada elemento un valor de densidad comprendido entre 0 y 1. Los elementos con valores cercanos a 0 se consideran innecesarios y se eliminan, generando espacios vacíos, mientras que aquellos próximos a 1 se conservan por su importancia estructural. Este proceso permite reducir material sin comprometer la resistencia mecánica del diseño [4].
- 5- **Refinado:** el modelo optimizado, se transforma en una geometría fabricable y funcional. Tras el proceso FEM, las piezas suelen presentar formas irregulares, superficies rugosas o transiciones poco realistas, por lo que es necesario realizar ajustes adicionales antes de su fabricación. Algunas de esas modificaciones son el suavizado de superficies, redondeo de bordes o corrección de espesores.
- 6- **Exportación:** en diseño generativo, el resultado suele exportarse directamente como un archivo CAD en formato STEP listo para fabricación. En cambio, en procesos de optimización topológica, puede ser necesaria una conversión o reconstrucción manual adicional antes de su producción definitiva. [5].



*Ilustración 8: Fases de diseño generativo*

### **2.1.3. VENTAJAS Y LIMITACIONES**

Los métodos tradicionales, están limitados por la necesidad de moldes costosos, ángulos de desmoldeo y el acceso de las herramientas de corte [9]. Lo que implica diseños más pesados, simples y grandes volúmenes de fabricación para obtener rentabilidad.

Por ello, la optimización topológica, ofrece importantes ventajas económicas y medioambientales. Al utilizar únicamente el material necesario para garantizar la resistencia estructural, se reduce el consumo de materia prima y disminuyen los costes asociados al transporte y combustible. Además, permite la consolidación de múltiples componentes en una única pieza compleja, simplificando el ensamblaje y reduciendo posibles errores de montaje [10]. Desde el punto de vista ambiental, también contribuye a la sostenibilidad, ya que genera una menor huella de carbono y produce menos residuos en comparación con procesos tradicionales de fabricación, como el mecanizado [11].

A pesar de sus ventajas, todavía existen limitaciones importantes. Por ejemplo, el elevado coste del software, las licencias pueden ser extremadamente caras, un ejemplo es Autodesk Netfabb que cuesta aproximadamente 5.700€/año [5]. Además, su utilización requiere personal altamente capacitado en análisis estructural y simulación numérica, lo que incrementa la complejidad técnica del proceso.

Por lo tanto, aún existen barreras económicas y técnicas que se deberán superar para lograr una implementación generalizada.

### **2.1.4. APLICACIONES Y FUTURO**

Actualmente el diseño generativo se usa en numerosas industrias muy diferentes.

En la industria aeroespacial la optimización topológica es clave para reducir el peso y, por lo tanto, el consumo de combustible sin comprometer la resistencia de las estructuras.

En el ámbito de la automoción, se utiliza para fabricar piezas más ligeras y resistentes que pueden mejorar el rendimiento de los motores y mejorando el comportamiento mecánico.

Asimismo, en el ámbito biomédico, este tipo de diseño permite diseñar implantes personalizados con estructuras porosas similares al hueso natural. Estas geometrías favorecen la osteointegración, es decir, la unión entre el implante y el tejido óseo del paciente. Gracias a ello, se mejora la estabilidad del implante y se reduce el riesgo de rechazo o desgaste prematuro [4].

De cara al futuro, las investigaciones actuales apuntan a nuevas aplicaciones en distintos campos tecnológicos como su aplicación en nanotecnología. También, se prevén grandes avances en el sector de la medicina con el desarrollo de los implantes óseos o el desarrollo de andamios biodegradables para ingeniería de tejidos, capaces de servir como soporte temporal para el crecimiento celular y la regeneración de órganos o tejidos [4].



*Ilustración 9: Implantes ortopédicos, investigación del TEC [12]*

## 2.2. FABRICACION ADITIVA

La fabricación aditiva o impresión 3D es una tecnología de producción que crea objetos tridimensionales colocando el material capa a capa. A través de este método, se obtienen piezas sin necesidad de moldes ni utillajes porque se parte de un modelo digital para fabricar el componente.

Surgió en la década de los 80, en concreto, 1983 cuando el ingeniero Charles W. Hull imprimió una pieza impresa en 3D utilizando el primer aparato de estereolitografía (SLA-1) [13].



*Ilustración 10: Primera impresora de estereolitografía SLA-1*

La impresión 3D es una técnica que ha evolucionado mucho dejando de ser un método de prototipado rápido (fines estéticos y geométricos) para ser una alternativa viable de fabricación de componentes de uso final. La fabricación aditiva, ofrece gran libertad geométrica para crear los diseños que se han obtenido mediante optimización topológica.



*Ilustración 11: Ejemplo de fabricación aditiva*

### 2.2.1. HERRAMIENTAS

El proceso de fabricación aditiva necesita que tanto software, hardware y ciencia de materiales estén alineados y trabajen conjuntamente. Para cada uno de ellos, las herramientas más comunes son:

- **Software:**
  - CAD (Diseño Asistido por Ordenador): utilizado para diseñar y modelar un objeto en tres dimensiones de manera digital.
  - Slicer: software que traduce el modelo 3D en capas horizontales y genera las instrucciones que la máquina puede interpretar.
- **Hardware:** la impresora y sus componentes como boquillas de extrusión, cabezales de inyección o láseres.
- **Material:** existen diversas opciones dependiendo de los requerimientos, como filamentos (termoplásticos), resinas líquidas, polvos (metálicos o poliméricos) o bio-tintas que están compuestas por células vivas.

### 2.2.2. TIPOS

De acuerdo con la clasificación ISO/ASTM 52900 existen varios tipos de tecnologías de fabricación aditiva dividido en 7 categorías dependiendo de cómo se deposita y consolida el material.

En la siguiente tabla se muestra de manera visual y ordenada cada una de estas categorías:

| <b>CATEGORIA</b>                       | <b>FUNCIONAMIENTO</b>   | <b>TECNOLOGIA</b>  | <b>MATERIAL</b>   |
|--|---|--|---|
| <b>Extrusión de material</b>           | Empuja material fundido a través de una boquilla que dibuja la pieza.                   | <b>FDM</b> ( <i>Fused Deposition Modeling</i> )<br><b>FFF</b> ( <i>Fused Filament Fabrication</i> )  | Termoplásticos en filamento (PLA, ABS, PETG, Nylon)             |
| <b>Fotopolimerización en cuba</b>      | Fuente de luz (láser o proyector) endurece una resina líquida.                          | <b>SLA</b> ( <i>Stereolithography</i> )<br><b>DLP</b> ( <i>Digital Light Processing</i> )<br><b>LCD</b> ( <i>Liquid Crystal Display</i> )  | Resinas líquidas fotosensibles (fotopolímeros)                  |
| <b>Fusión de lecho de polvo</b>        | Láser o haz de electrones funde y une partículas de polvo capa por capa.                | <b>SLS</b> ( <i>Selective Laser Sintering</i> )<br><b>SLM</b> ( <i>Selective Laser Melting</i> )<br><b>DMLS</b> ( <i>Direct Metal Laser Sintering</i> )<br><b>EBM</b> ( <i>Electron Beam Melting</i> ) | Polvos metálicos (Titanio, Acero) o plásticos (Nylon en polvo). |
| <b>Inyección de Material</b>           | Cabezales inyectan gotas de fotopolímero líquido que se curan con luz UV.               | <b>PolyJet</b> ( <i>Polymer Jetting</i> )<br><b>NPJ</b> ( <i>Nanoparticle Jetting</i> )  | Fotopolímeros líquidos o ceras.                                 |
| <b>Inyección de Aglutinante</b>        | Cabezal inyecta un pegamento líquido (aglutinante) sobre una capa de polvo para unirlo. | <b>BJ</b> ( <i>Binder Jetting</i> )  | Polvos cerámicos, arena, yeso o metales.                        |
| <b>Deposición por Energía Dirigida</b> | Fuente de energía (láser/arco) funde el material mientras este se deposita.             | <b>LENS</b> ( <i>Laser Engineering Net Shaping</i> )<br><b>EBAM</b> ( <i>Electron Beam Additive Manufacturing</i> )  | Alambre o polvo metálico.                                       |
| <b>Laminación de Capas</b>             | Hojas o láminas de material se pegan unas sobre otras y se cortan con la forma deseada. | <b>LOM</b> ( <i>Laminated Object Manufacturing</i> )   | Papel, láminas plásticas o cintas metálicas.                    |

Tabla 1: Clasificación de tecnologías de fabricación aditiva según ISO/ASTM 52900

Además, en la siguiente figura, se representa de manera grafica cada una de estas 7 categorías pudiendo observar de manera simplificada cómo se deposita el material en cada una de ellas:

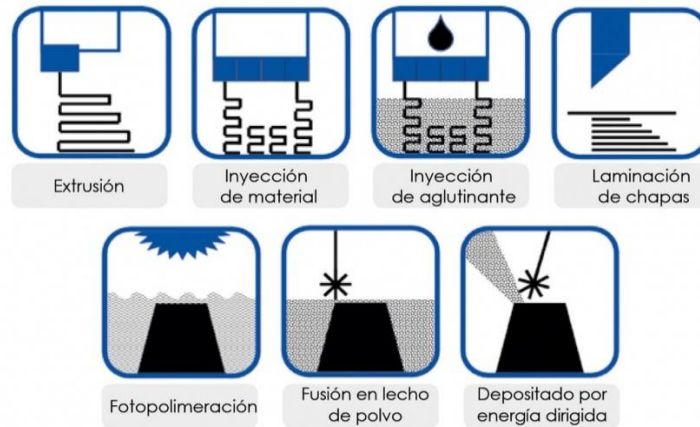


Ilustración 12: Categorías de fabricación aditiva según ISO/ASTM 52900

### 2.2.3. ETAPAS

Para transformar una idea en una pieza real mediante fabricación aditiva, se deben llevar a cabo una serie de fases que influyen directamente en la calidad, la precisión y en la funcionalidad del componente final. Para ello, se combinan herramientas de diseño con técnicas de fabricación capa a capa, junto con operaciones posteriores de acabado y validación.

- 1- **Desarrollo conceptual:** partiendo de una idea o una necesidad, se establecen los requisitos funcionales de la pieza, sus dimensiones, limitaciones, resistencia y peso. Además, se debe evaluar el mejor método de fabricación según los materiales y el uso que se le va a dar al componente.
- 2- **Diseño CAD:** se crea un modelo digital tridimensional exacto mediante software. Gracias a este modelo se pueden hacer modificaciones antes de su fabricación y, es posible realizar optimizaciones estructurales y simulaciones básicas.
- 3- **Generación de archivo STL/AMF:** el diseño se debe convertir a formatos compatibles con las impresoras 3D. Los más comunes son:
  - a. **STL (Standard Triangle Language o Stereolithography):** formato clásico, universal y más utilizado. Traduce la superficie del objeto 3D en una malla de pequeños triángulos de la que dependerá la calidad final de la pieza. Solo es capaz de guardar geometría, por lo tanto, el color, material, texturas o unidades de medidas no se guardan.

- b. AMF (*Additive Manufacturing File Format*): formato moderno oficial estándar (ISO/ASTM 52900) que soluciona las limitaciones del STL. Utiliza un código para describir el objeto guardando las curvas reales en lugar de sustituirlo por triángulos planos.
- 4- **Laminado y generación de código G (instrucciones):** el archivo convertido se procesa mediante un software de laminado (*slicer*). Se encarga de dividir el modelo en capas horizontales e instrucciones de movimiento, velocidad, temperatura y deposición de material que seguirá la impresora durante la fabricación.
- 5- **Fabricación:** se realiza la pieza mediante la deposición o solidificación sucesiva de material capa a capa. El método dependerá del material según la norma ISO/ASTM 52900.
- 6- **Post-procesado o limpieza:** se retiran los soportes o estructuras auxiliares, que han sido necesarias en la etapa de fabricación. Además, en tecnologías de resina (SLA) se debe sumergir la pieza en alcohol isopropílico para quitar el exceso de líquido pegajoso. Y, en lecho de polvo (SLS), se debe retirar el polvo que se hayan quedado pegado a la pieza.
- 7- **Acabado y verificación:** tratamientos adicionales (no obligatorios), para mejorar las propiedades del componente. El acabado se encarga de la mejora superficial estética (lijado o pulido), tratamientos térmicos para aliviar tensiones internas y evitar grietas y, de la pintura para proteger la pieza de la humedad. La verificación, se encarga del control de calidad mediante medición con calibres, escáneres o máquinas CMM (Máquina de Medición por Coordenadas) para asegurar las medidas requeridas y, mediante pruebas no destructivas con rayos X o ultrasonidos para comprobar que no quedaron burbujas de aire o grietas internas ocultas.

#### **2.2.4. VENTAJAS Y LIMITACIONES**

Como se ha indicado anteriormente, los métodos tradicionales, como fresado o fundición, están limitados ángulos de desmoldeo, el acceso de las herramientas y la generación de grandes cantidades de residuos [9].

En este sentido la impresión 3D presenta ventajas más allá de la reducción del peso de la estructura, ya que gracias a la libertad en el diseño es posible realizar piezas con canales internos, formas orgánicas y cavidades muy complicadas con métodos tradicionales [10].

Además, permite crear mecanismos ya ensamblados en una sola operación como, por ejemplo, una rótula dentro de su carcasa.

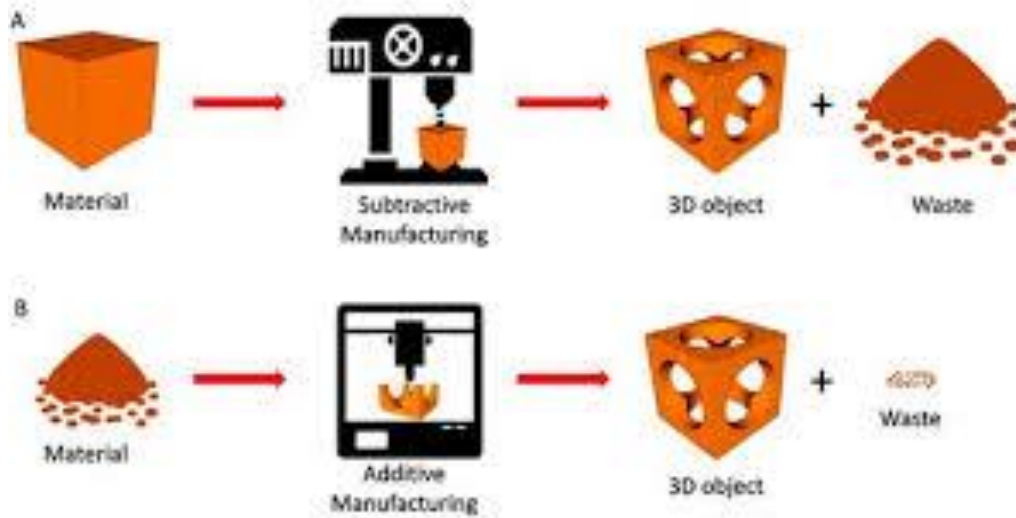


Ilustración 13: Comparación del desperdicio métodos tradicionales (A) vs fabricación aditiva (B)

Sin embargo, existen limitaciones. Una de las principales es la llamada anisotropía que consiste en que las propiedades mecánicas varían según la dirección de las capas, esto se traduce en que la unión entre capas puede ser un punto débil bajo esfuerzo mecánico [9].

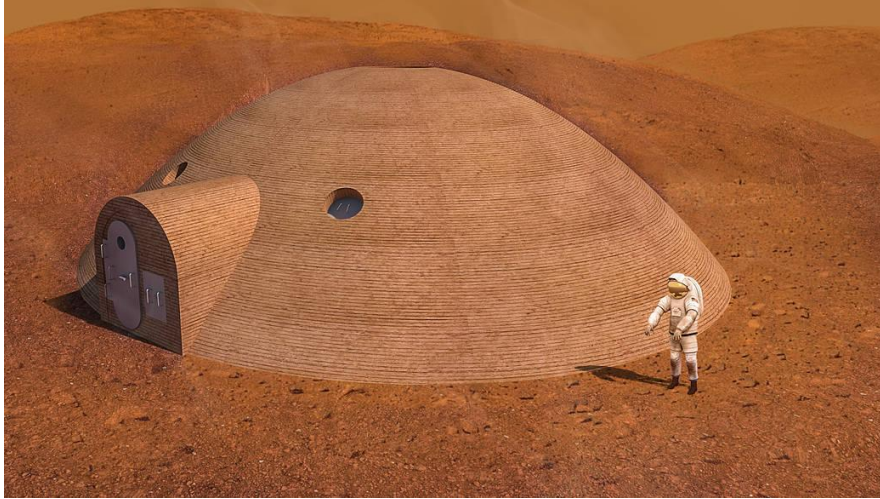
Además, los materiales son limitados y por ello, se hace necesario desarrollar nuevos materiales más resistentes, ligeros y económicos que permitan ampliar su aplicación industrial. Por último, los procesos de fabricación, especialmente en impresión 3D metálica, continúan siendo relativamente lentos para producciones de gran volumen, lo que representa una desventaja frente a los métodos tradicionales de fabricación en masa [14].

### 2.2.5. APLICACIONES Y FUTURO

Entre sus múltiples aplicaciones, la impresión 3D destaca en ámbitos médicos con prótesis personalizadas, implantes dentales o audífonos adaptados a cada paciente [9]. Además, en el sector aeroespacial se fabrican soportes de motor para reducir el consumo de combustible y en el sector de automoción con el prototipado rápido de motores y piezas personalizadas para vehículos de alta gama. Por último, en el ámbito de la arquitectura se fabrican maquetas detalladas de las diferentes estructuras diseñadas.

Como futuro proyectos, la NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) estudia el uso de estructuras optimizadas fabricadas en 3D para futuros hábitats en Marte, donde la reducción de material y la eficiencia estructural son factores fundamentales [9],

[15]. Además, se investigan nuevos materiales biodegradables y metálicos con mejores propiedades térmicas.



*Ilustración 14: Futuros hábitats en Marte de la NASA [12]*

## Capítulo 3: ESTADO DE LA CUESTION

La integración del diseño generativo y la optimización topológica con la fabricación aditiva es un campo en desarrollo y crecimiento en la ingeniería para el desarrollo de estructuras ligeras y de alto rendimiento [16].

Para llevar a cabo estos procesos se utilizan distintas herramientas de software y metodologías clave. Por ejemplo, Altair Inspire, Ansys o SolidWorks, que permiten realizar simulaciones y generar diseños optimizados. Además, existen metodologías específicas, como el método level-set (PareTO) que permite definir fronteras y restricciones de diseño [16]. Por último, no se puede olvidar el escaneo 3D o ingeniería inversa que facilita la recolección de datos, permitiendo una muy buena personalización y un ajuste perfecto entre piezas de acuerdo con la función del componente [17].

Sin embargo, a pesar de los numerosos beneficios que proporciona, esta innovación también se enfrenta a algunos desafíos. En primer lugar, las condiciones de estrés térmico en la que las cargas cambian a medida que avanzamos por el material. Cuando el componente se enfría rápidamente, se pueden originar tensiones internas residuales que deforman la pieza [18]. Por otro lado, cuando los diseños optimizados son grandes, es necesario el uso de estructuras de soporte que aumentan tanto el tiempo como el desperdicio de material y, además requieren procesos de limpieza posteriores. [16]. Por último, la complejidad del software también puede suponer un problema ya que puede no ser muy intuitivo y por ello lento, dificultando una respuesta rápida ante la demanda del mercado [17].

### 3.1. SECTORES Y APLICACIONES

Actualmente la optimización topológica es una técnica fundamental en varios sectores de la industria ya que busca encontrar la mejor configuración estructural posible. En concreto, se utiliza para transformar espacios de diseño máximo (volumen sólido inicial) en estructuras funcionales mínimas, con formas complejas, biónicas u orgánicas que solo se pueden fabricar mediante impresión 3D [19]. Además, la evolución actual apunta hacia la optimización multiobjetivo que integra tanto resistencia mecánica, como factores térmicos y restricciones de fabricación desde el principio del diseño [16].

#### 3.1.1. SECTOR AEROESPACIAL

Es un sector que se beneficia mucho de las reducciones de masa y alta resistencia térmica que ofrecen tanto las tecnologías de diseño generativo como fabricación aditiva. En esta industria, ya se han desarrollado soportes estructurales de carga pesada con reducciones de masa superiores al 18 % [18].

Por su parte, NASA y empresas como SpaceX, son pioneras en aplicar estas tecnologías a la exploración espacial, utilizándolas en satélites o motores de cohetes.

Además, en aviación comercial empresas como Boeing o Airbus utilizan la fabricación aditiva en componentes como partes de turbinas, o boquillas de combustible para motores a reacción aprobadas por la FAA<sup>1</sup> [20].

Estas boquillas son uno de los ejemplos más famosos. En 2015 *GE Aviation* empresa líder en diseño y fabricación de motores para aviones, imprimió una pieza, que anteriormente requerían soldar 20 piezas distintas, en una sola pieza reduciendo así su peso en un 25% y haciéndola 5 veces más duradera [21].



*Ilustración 15: Boquilla de combustible impresa en 3D por GE Aviation*

### **3.1.2. SECTOR AUTOMOTRIZ**

También encontramos aplicaciones en el sector automotriz, especialmente en el ámbito de competición, revolucionándolo gracias a su capacidad para reducir tiempos de desarrollo y fabricar componentes altamente optimizados.

Aquí, se utiliza la fabricación aditiva para prototipado rápido, herramientas de ensamblaje personalizadas y la fabricación de piezas de uso final en vehículos de lujo o de competición [22]. Permite realizar prototipos funcionales en tan solo unas horas y así facilitar las pruebas aerodinámicas, térmicas y estructurales antes de la producción definitiva, reduciendo costes y mejorando la línea de producción.

En concreto, se han desarrollado componentes de suspensión mediante optimización topológica que mejoran la rigidez en un 32%, conductos de refrigeración, soportes de

---

<sup>1</sup> (*Federal Aviation Administration*) Principal agencia del gobierno de Estados Unidos responsable de regular, supervisar y garantizar la seguridad de toda la aviación civil en el país.

sensores, piezas de suspensión y componentes aerodinámicos adaptados específicamente a cada configuración del coche [19].

Otra de las aplicaciones en este sector, es la producción de piezas de repuesto totalmente personalizadas bajo demanda evitando grandes inventarios y facilitando el mantenimiento de modelos exclusivos o antiguos.



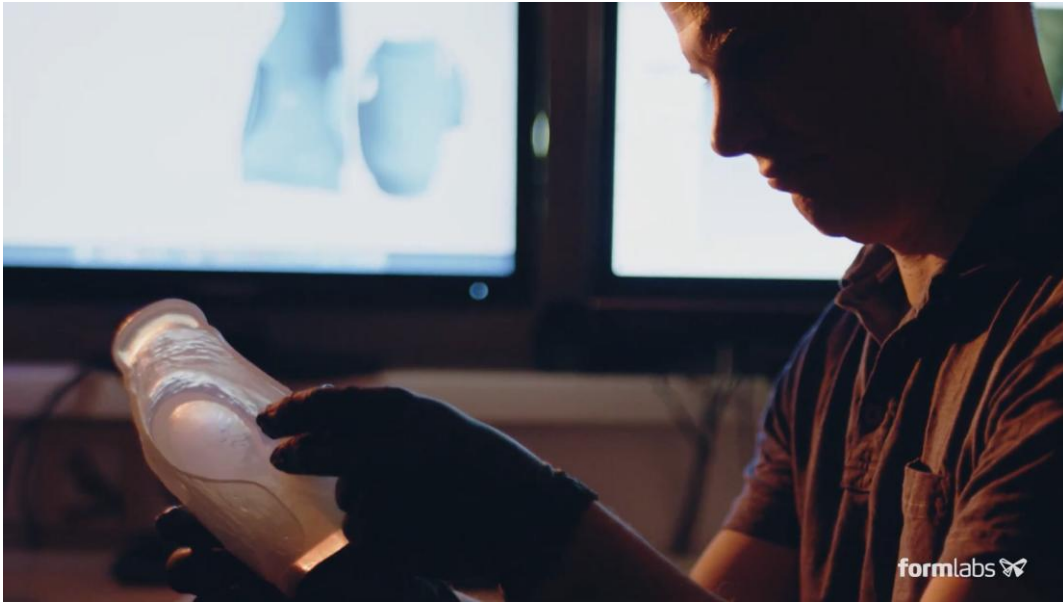
*Ilustración 16: Impresión 3D de piezas de coches clásicos*

### **3.1.3. SECTOR MEDICO**

En medicina, la fabricación aditiva ha supuesto un gran avance en la personalización de tratamientos y dispositivos médicos. Los cirujanos, utilizan réplicas anatómicas de sus pacientes impresos en 3D para planificar y ensayar cirugías complejas con mayor precisión, reduciendo riesgos y hasta un 40% en los tiempos de intervención en el quirófano [23].

En el ámbito de los implantes, la impresión 3D permite crear prótesis e implantes biónicos que se adaptan perfectamente a la anatomía del paciente. Además, los implantes metálicos tienen en su interior estructuras porosas que favorecen el crecimiento óseo y la osteointegración.

Un caso concreto es el de Nik, un niño con parálisis cerebral que pudo dar sus primeros pasos gracias a una órtesis de pie y tobillo diseñada a medida mediante escaneo e impresión 3D [22].



*Ilustración 17: Órtesis de pie y tobillo impresa en 3D para Nik*

Por otro lado, en odontología, esta tecnología es muy utilizada para producir alineadores transparentes, férulas dentales, coronas, puentes y prótesis personalizadas con gran rapidez y precisión.

Actualmente se está trabajando en la creación de tejidos vivos para trasplantes y ensayos clínicos. La bioimpresión y la medicina regenerativa permitirá producir vasos sanguíneos con geometrías complejas y, piel humana de grosor completo [23].

#### **3.1.4. SECTOR DEPORTIVO**

En el ámbito del deporte, cada fracción de segundo y cada gramo de peso contribuyen para alcanzar el primer puesto.

Por eso, una de las mayores aportaciones de la impresión 3D en este área es la capacidad de personalización extrema. Mediante escaneos corporales y simulaciones digitales, los fabricantes pueden diseñar equipamiento específico para cada atleta, ajustando dimensiones, distribución de materiales y propiedades mecánicas.

Un caso destacado del impacto de esta tecnología es el de la medalla de oro paralímpica Emma Wiggs. En los Juegos Paralímpicos de Tokio 2020, utilizó un remo de fibra de carbono optimizado. El resultado fue un mango 50% más ligero, un eje un 254% más rígido y una pala un 154% más rígida [24]. Estas mejoras permitieron una transmisión de fuerza mucho más eficiente durante la remada, reduciendo pérdidas de energía y aumentando el control del movimiento.



*Ilustración 18: Remo de fibra de carbono de Emma Wiggs optimizado e impreso en 3D*

En el equipamiento deportivo, estas tecnologías se utilizan para garantizar la seguridad a través de cascos con revestimientos internos impresos en 3D que actúan como una red flexible capaz de absorber y redistribuir la energía de los impactos de manera mucho más eficiente que las espumas tradicionales [24].

También, grandes marcas de calzado como Nike, Adidas o New Balance producen suelas para calzado de alto rendimiento que, permiten distribuir las cargas de manera más eficiente y adaptar el comportamiento mecánico de la zapatilla a distintos tipos de corredores y disciplinas deportivas [22].

Por último, se pueden emplear estas tecnologías para optimizar y producir componentes de bicicletas de alto rendimiento [17].



*Ilustración 19: Casco SpeedFlex Precision Diamond con forro impreso en 3D*

### 3.1.5. SECTOR DE LA CONTRUCCION

La fabricación aditiva aplicada a la construcción es denominada “3D Constructing” y ha supuesto una evolución muy positiva en la forma de diseñar y fabricar edificios e infraestructuras. Gracias al uso de modelos digitales y sistemas automatizados, es posible crear formas arquitectónicas que, mediante técnicas convencionales, son muy caras e incluso imposibles [25].

La tecnología de impresión 3D, permite la construcción rápida de refugios en zonas afectadas por desastres naturales (como terremotos o inundaciones), eliminando la necesidad de transportar materiales pesados a lugares de difícil acceso [25].

Aplicada a la arquitectura, la fabricación aditiva ha impulsado el desarrollo de nuevos materiales y técnicas de fabricación adaptadas al sector de la construcción:

- 3D Concrete Printing (3DCP): utiliza hormigón extruido por una boquilla, para crear estructuras sin necesidad de moldes o encofrados. Con este método, se reduce drásticamente el desperdicio de material y, se obtienen construcciones más ligeras y eficientes desde el punto de vista energético y económico.
- 3D Claying: usa arcilla o materiales cerámicos naturales disponibles en un entorno cercano. Esto, permite una huella de carbono casi nula, ya que el material puede ser reutilizado infinitamente si no se cuece en horno. Además, otro beneficio es que, al utilizar materiales naturales locales, las construcciones se pueden adaptar a las condiciones climáticas del lugar gracias a sus propiedades térmicas.



*Ilustración 20: Construcción mediante 3D Concrete Printing*

Actualmente, ya existen construcciones fabricadas mediante impresión 3D. Uno de los ejemplos más famosos es el puente MX3D. Este, es un puente peatonal fabricado mediante robots industriales que, en seis meses, imprimieron aproximadamente 4.500

kilogramos de acero inoxidable. Posteriormente, la estructura fue instalada sobre un canal de la ciudad de Ámsterdam



*Ilustración 21: Puente metálico MX3D en Ámsterdam impreso en 3D*

## 3.2. CONSIDERACIONES TECNICAS

La implementación real del diseño generativo y la fabricación aditiva necesita una comprensión profunda de las variables algorítmicas, las limitaciones geométricas y la compatibilidad de los materiales para lograr componentes funcionales de uso final eficientes y rentables.

### 3.2.1. CONSIDERACIONES EN EL DISEÑO GENERATIVO

La primera consideración cuando se diseña mediante diseño generativo, es la definición de geometrías ya que es necesario, establecer las zonas que no deben alterarse para asegurar conexiones funcionales ("*Preserve Geometry*") y los espacios que el algoritmo debe evitar para prevenir interferencias con otros componentes ("*Obstacle Geometry*") [25].

También se deben estudiar las condiciones de carga definiendo aquellos casos realistas, que incluyan las fuerzas mecánicas, momentos de torsión y cargas térmicas que puedan afectar a la pieza.

Además, en muchos casos es necesario aplicar procesos posteriores, refinando y suavizando las superficies de la pieza. Estas, suelen ser formas biónicas u orgánicas complejas que requieren un post-procesado digital, vital para asegurar la continuidad tangencial, eliminar concentradores de tensión y evitar picos de fatiga que podrían causar fallos estructurales [19].

Para ello, se llevan a cabo tratamientos térmicos para reducir las tensiones residuales causadas por los ciclos de enfriamiento rápido, mejorando la dureza y estabilidad de la pieza. O, el mecanizado CNC (Control Numérico Computarizado) que es obligatorio en áreas críticas como agujeros de pernos o superficies de contacto, para obtener superficies de contacto precisas garantizando valores de tolerancias.

Por último, hay que entender la diferencia entre optimización topológica y diseño generativo. Mientras que el primero, se centra en la eficiencia estructural eliminando material innecesario, el diseño generativo integra desde el inicio la selección de materiales y las restricciones de fabricación [25].

### **3.2.2. CONSIDERACIONES EN LA FABRICACION ADITIVA**

Para transformar un modelo digital en una pieza física, se debe tener en cuenta aquellas limitaciones que afectan la precisión y el rendimiento del componente final.

Una de estas limitaciones, son los errores de precisión y calidad de superficies. Estos errores pueden provenir de cuatro fuentes diferentes [9]:

- Triangulación de la geometría a formato STL: cuanto menor es el número de triángulos, menor es la precisión de representación de superficies curvas o detalles. Esto puede generar pequeñas desviaciones geométricas respecto al diseño original.
- Descomposición en capas que hace que las superficies inclinadas o las curvas no se fabriquen de manera continua.
- Efecto de escalonamiento (*stepping effect*), relacionado con el espesor de la capa y especialmente visible en superficies inclinadas donde es fácil ver las transiciones entre capas.
- Errores de relleno interno del modelo producidos por errores en el espesor, la velocidad en la que se deposita el material o la temperatura de este.

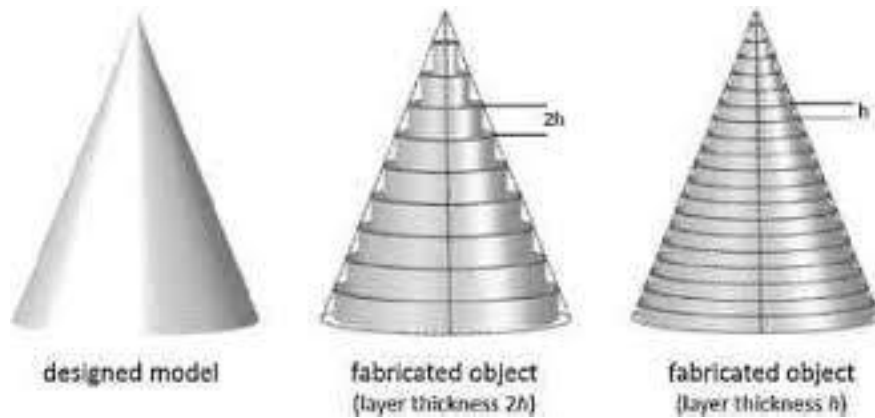


Ilustración 22: Error por el efecto de escalonamiento en impresión 3D

Además, se debe estudiar el ángulo de impresión crítica, es decir, el límite exacto de inclinación en el que la máquina ya no puede sostener el material. Por eso, este ángulo está directamente relacionado con la cantidad de soportes necesarios para evitar colapsos en el proceso. Como regla general, se requieren soportes cuando el ángulo de inclinación de una capa es inferior a  $45^\circ$  respecto al plano horizontal o dicho de otra manera, cuando el ángulo entre la normal de la superficie y la dirección de impresión supera aproximadamente los  $135^\circ$  ( $3\pi/4$  rad) [16].

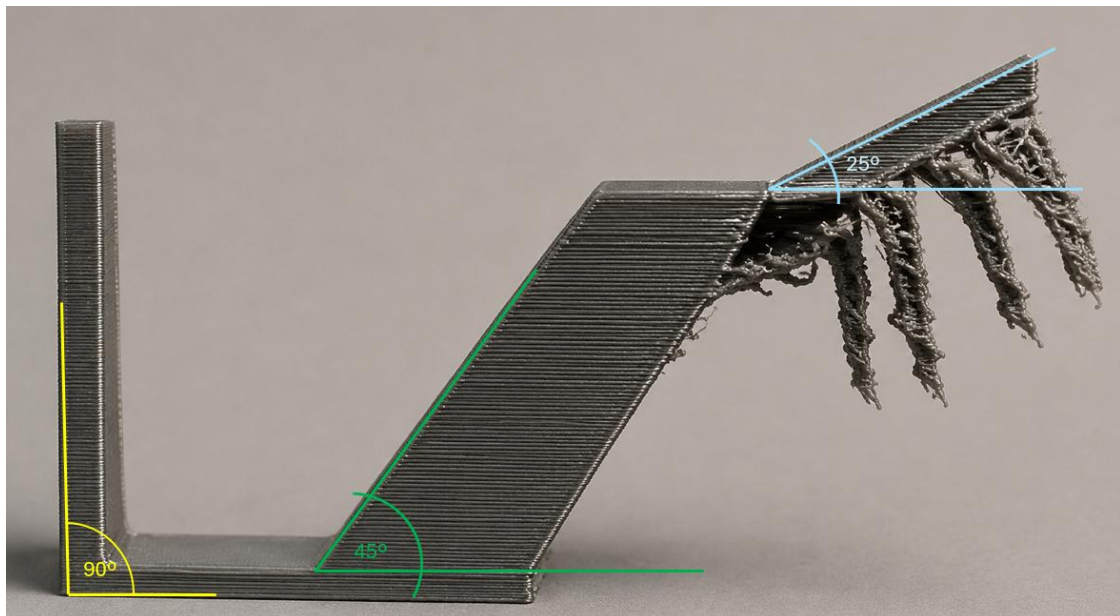
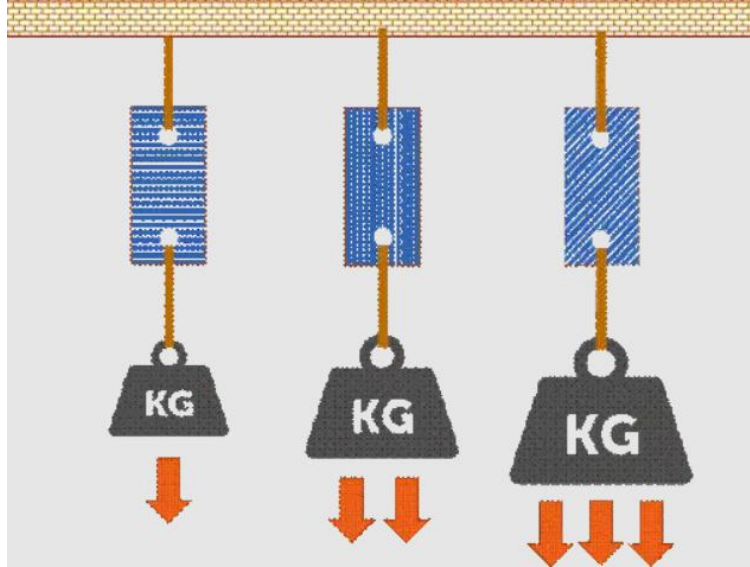


Ilustración 23: Representación ángulo crítico de impresión creada con IA ( ChatGPT)

La planificación de la dirección y orientación de la impresión es otro de los factores que afectan a la hora de imprimir correctamente un componente en 3D. Afecta tanto a la rugosidad superficial como a las propiedades mecánicas direccionales (anisotropía) porque la unión entre capas suele ser menos resistente que el material dentro de una

misma capa, como consecuencia, una pieza puede soportar mayores esfuerzos en determinadas direcciones y presentar debilidades en otras [9]. Por eso, medidas como rotar el modelo puede optimizar el acabado y facilitar la retirada de soportes.



*Ilustración 24: Diferencia de los pesos soportados en función de la dirección de capas*

Por último, es importante la elección del material para imprimir ya que influye directamente en la resistencia, el acabado y la durabilidad de la pieza final [26]. Además, el material elegido debe ser compatible con la tecnología de impresión y se debe estudiar el coste y el tiempo de fabricación ya que los distintos materiales requieren velocidades de impresión diferentes.

Esta decisión depende por un lado de las propiedades físicas necesarias, eligiendo un material que cumpla con [27]:

- Las propiedades mecánicas, analizando el módulo elástico, la resistencia a la rotura, la elongación, el módulo de flexión y la resistencia al impacto.
- Las propiedades térmicas donde el punto de fusión y la temperatura de deflexión bajo carga (temperatura a la cual un material comienza a deformarse bajo una presión específica) son críticos.
- La densidad y el peso necesarios.

Por otro lado, la decisión depende del sector ya que cada industria impone restricciones propias tanto legales como funcionales. Por ejemplo, en el sector medico es fundamental la biocompatibilidad y la certificación bajo normas como la ISO 10993, los materiales deben ser seguros para el contacto con la piel o tejidos y, en muchos casos, resistentes a

los procesos de esterilización [28]. Otro ejemplo, es el sector de la construcción donde se valora la sostenibilidad, la reciclabilidad y el uso de recursos locales para reducir la huella de carbono asociada al transporte [25] o el sector de automoción donde se buscan materiales que permitan la validación funcional y estética.

### **3.3. MATERIALES**

Los materiales actuales se clasifican principalmente en termoplásticos, fotopolímeros, metales y materiales para la construcción:

Los materiales usados actualmente en la fabricación aditiva permiten desde el prototipado rápido hasta la creación de componentes industriales de uso final y, constantemente se buscan nuevas soluciones para ampliar la amplia gama existente y hacerlas más sostenibles y rentables.

#### **3.3.1. TERMOPLASTICOS**

Incluyen filamentos y polvo, son los más comunes, debido a su bajo coste, para prototipado y piezas funcionales, moldeándose con calor combinan resistencia, ligereza y facilidad de procesado [27].

Incluyen el PLA (fácil de usar y biodegradable), ABS (resistente a impactos y calor), PETG (equilibrio entre facilidad y resistencia) y Nylon (PA11/PA12), valorado por su equilibrio entre resistencia mecánica, flexibilidad y bajo peso, lo que lo hace adecuado para piezas funcionales, carcasas y componentes sometidos a esfuerzos moderados [29]. También existen materiales de alto rendimiento como el PEEK y Ultem, conocidos por su resistencia a temperaturas extremas y químicos [30].

#### **3.3.2. RESINAS (FOTOPOLIMEROS)**

Los fotopolímeros son resinas, un material líquido que se endurece con luz UV. Ofrecen la mayor resolución y acabado superficial. Existen distintos tipos [27]:

- Resina estándar: resina básica, de bajo coste y con buen acabado superficial, aunque su resistencia mecánica es limitada.
- Resina flexible: es un material elástico que se utiliza cuando las piezas necesitan cambiar de forma o deformarse, manteniendo su resistencia al impacto y desgaste.
- Resina dental: se utiliza para aplicaciones odontológicas como coronas o implantes gracias a su precisión, biocompatibilidad y, su capacidad de cambiar el color para reproducir el de los dientes.

### **3.3.3. METALES**

En fabricación metálica se emplean materiales de altas prestaciones capaces de trabajar en condiciones severas de temperatura, carga y corrosión.

Destacan el Titanio TC4 (Ti6Al4V) por su ligereza, resistencia a la corrosión y buena biocompatibilidad [30], el Inconel 718 (superaleación de níquel para altas temperaturas) por su elevada resistencia mecánica y térmica, superando en muchos casos los 1000 MPa de resistencia [19], el Acero Inoxidable (316L) y aleaciones de Aluminio (AlSi10Mg/AlSi12) que ofrecen una solución más económica y ligera para aplicaciones industriales generales. Estas aleaciones combinan buena resistencia mecánica, baja densidad y facilidad de fabricación [9].

### **3.3.4. COMPUESTOS**

Incluye materiales por la combinación de una matriz (normalmente plástica o polimérica) y un refuerzo que mejora sus propiedades mecánicas. Destacan la fibra de carbono o la fibra de vidrio, que aportan una gran rigidez y resistencia estructural sin aumentar el peso de la estructura. Además de sus aplicaciones técnicas, también existen mezclas estéticas con materiales como polvo de madera o partículas metálicas, buscando acabados visuales más atractivos o texturizados [29].

### **3.3.5. CONTRUCCION**

Mezclas de hormigón con arcilla u otros componentes naturales, diseñadas para aplicaciones estructurales en la arquitectura. Permiten la creación de estructuras sin necesidad de moldes tradicionales, reduciendo costes, tiempos de obra y, disminuyendo la huella de carbono en comparación con los métodos de construcción convencionales [25].

### **3.3.6. EN DESARROLLO**

De cara al futuro, ya se están estudiando nuevos materiales en tres áreas principales:

En primer lugar, se trabaja en el desarrollo de biotintas compuestas por células vivas y materiales de soporte para imprimir tejidos orgánicos, vasos sanguíneos y piel humana en el sector de la medicina y la bioimpresión [9].

La siguiente área es la sostenibilidad, en la que se investiga el uso de la celulosa como un recurso biodegradable y barato, así como la transformación de redes de pesca recicladas en filamento [31].

Finalmente, se exploran materiales para la electrónica impresa, permitiendo fabricar componentes de circuitos (resistencias, condensadores, diodos) integrados directamente en la pieza y superaleaciones autorreparables y materiales con memoria de forma [9].

Como conclusión y a modo de resumen, en la siguiente tabla, se escribe de manera detallada la relación entre el material y la tecnología de impresión:

| CATEGORIA                    | MATERIAL   | TECNOLOGIA              |
|------------------------------|--|-------------------------|
| <b>Plásticos (Filamento)</b> | PLA, ABS, PETG, TPU, Nylon, ASA, Carbon Fiber, Ultem, PEEK     | FDM / FFF               |
| <b>Plásticos (Polvo)</b>     | Nylon (PA11, PA12), Polipropileno (PP), TPU en polvo           | SLS, MJF, SAF           |
| <b>Resinas (Líquido)</b>     | Estándar, Flexible, BioMed, Dental, Alta Temperatura, Cerámica | SLA, DLP, MSLA, PolyJet |
| <b>Metales (Polvo)</b>       | Titanio, Inconel, Acero 316L, Aluminio, Cromo-Cobalto          | SLM, DMLS, EBM          |
| <b>Construcción</b>          | Hormigón (3DCP), Arcilla, Cemento de cal                       | 3DCP, 3D Claying        |
| <b>Orgánicos</b>             | Biotintas (Células vivas, Hidrogeles)                          | Bioimpresora 3D         |
| <b>Otros</b>                 | Papel, PVC, Cera   | LOM, SDL, Cera Perdida  |

Tabla 2: Tipos de materiales y tecnologías en los que se usan

### 3.4. COSTES Y BENEFICIOS

En relación con los costes y beneficios económicos que presenta el uso del diseño generativo y la optimización topológica.

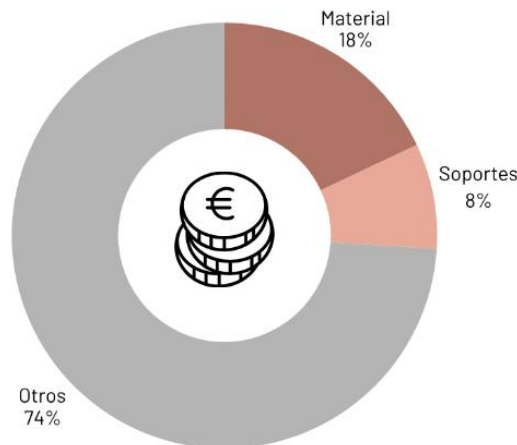
El coste total de un componente fabricado mediante impresión 3D ( $C_p$ ), se puede representar mediante la siguiente ecuación [32]:

$$C_p = C_e + C_m + C_t + C_a$$

- Costes de Producción ( $C_e$ ): amortización de la maquinaria y el mantenimiento anual del equipo.
- Costes de Material ( $C_m$ ): material de la pieza final y material de soporte necesario para voladizos.
- Costes de Procesamiento y Mano de Obra ( $C_t$ ): tiempo dedicado al análisis técnico del modelo 3D, la preparación de la impresión y la operación por personal cualificado.

- Costes de Post-procesado (Ca): limpieza, eliminación de soportes, mecanizado CNC para tolerancias precisas y tratamientos térmicos.

Entre todos estos costes, se destacan dos especialmente relevantes ya que se pueden optimizar desde la fase de diseño. Por un lado, el material utilizado, que suele representar aproximadamente el 18% del coste total [33]. Por otro, la eliminación de estructuras de soporte y limpieza representan el 8% del coste total [33].



*Ilustración 25: Costes de la fabricación aditiva*

Actualmente para minimizar y optimizar los costes, se ha desarrollado un algoritmo de “sensibilidad topológica de soporte” que, durante la fase de diseño permite generar geometrías que requieren menos material auxiliar [16]. Otro método de optimización es la internalización de la producción (*in-sourcing*), producir las piezas en la propia empresa en lugar de externalizar la producción o elegir la orientación óptima para reducir el uso de soportes y por ello, de material desperdiciado.

En cuanto a los beneficios del diseño generativo y la fabricación aditiva, en comparación de los métodos tradicionales, se encuentran:

- Reducción de ciclos de desarrollo y plazos de entrega con el prototipado rápido.
- Eficiencia en el uso de material, reduciendo masa y peso eliminando material innecesario.
- Eliminación de procesos intermedios de ensamblaje o soldadura imprimiendo piezas complejas como un único componente.
- Personalización sin coste adicional ya que, al no haber moldes ni utillajes caros, una pieza tiene prácticamente el mismo coste unitario que una producción en serie.

- Capacidad de imprimir repuestos bajo demanda sin necesidad de almacenes gracias a las bibliotecas virtuales de modelos de piezas.

### 3.5. COMPETICION MOTOSTUDENT

La competición de MotoStudent es una competición universitaria internacional en la que, durante tres semestres, equipos de estudiantes diseñan, fabrican y ponen a prueba una motocicleta de competición.

Esta competición surge gracias a la fundación sin ánimo de lucro *Moto Engineering Foundation*, creada el 21 de Enero de 2008 [34].



#### 100% Electric propulsion system

*Ilustración 26: Logo competición MotoStudent*

Existen dos categorías; Electric con la construcción de una motocicleta eléctrica y eFuel con una motocicleta de combustible 100% renovable.

En la categoría Electric es importante maximizar la fiabilidad de la motocicleta con un motor que funcione sin fallos, una electrónica robusta y una buena gestión de la batería. Por lo tanto, el objetivo de un equipo es conseguir el mejor equilibrio entre velocidad, consumo y tiempo por vuelta.



*Ilustración 27: Equipo ISC Racing Team Comillas 2023*

Dentro de los equipos existen numerosos roles que juntos se encargan de construir una motocicleta funcional para competir en el circuito.

- **Diseño y aerodinámica:** diseña la parte mecánica de la motocicleta (chasis, basculante, carenados, ergonomía y aerodinámica). Busca reducir peso, mejorar la estabilidad y optimizar el comportamiento dinámico.
- **Powertrain:** desarrolla el sistema de propulsión eléctrica (motor, batería, inversor, transmisión y refrigeración). Su objetivo es obtener la mejor combinación de potencia, eficiencia y fiabilidad.
- **Electrónica:** diseña e integra todos los sistemas eléctricos y electrónicos de la moto. Incluye el cableado, sensores, sistema de gestión de la batería, sistemas de seguridad y comunicaciones entre dispositivos.
- **Telemetría:** adquiere, almacena y analiza los datos de la moto. Diseña el sistema que recoge información de sensores (temperaturas, voltajes, corrientes, velocidad, inclinación, etc.) para optimizar el rendimiento y detectar problemas.
- **MS1:** prepara toda la documentación técnica y empresarial que se evalúa en la primera fase de MotoStudent. Redacta informes de ingeniería, justifica las decisiones de diseño, prepara la defensa ante el jurado y desarrolla el plan de negocio y la gestión del proyecto.
- **Innovación:** crea soluciones tecnológicas novedosas que diferencien al equipo. Investiga nuevas ideas, prototipos o tecnologías que aporten una ventaja competitiva al equipo.

### 3.5.1. FASES

Al finalizar los aproximadamente 18 meses de preparación, se lleva a cabo la competición en la que se reúnen más de 80 equipos procedentes de más de 20 países alrededor de todo el mundo y, que se desarrolla en dos grandes fases de unos cinco días de duración.

En primer lugar, en la fase **MS1**, no se realizan pruebas en el circuito, sino que evalúan todo el trabajo de ingeniería realizado durante los meses de proyecto. Los jueces revisan la documentación entregada por el equipo y realizan preguntas durante la defensa oral [1].

- 1- **Evaluación técnica:** el equipo entrega una memoria donde explica la metodología de diseño, definición de objetivos, justificación técnica de las decisiones y planificación inicial del proyecto.

Además, se revisa la calidad de fabricación, los materiales empleados, la seguridad y los ensayos realizados en los prototipos junto con los datos obtenidos y mejoras introducidas.

- 2- **Plan de negocios:** se presenta un plan de negocio donde explica cómo produciría y comercializaría el prototipo, incluyendo costes, fabricación, mercado objetivo y estrategia empresarial.
- 3- **Innovación:** cada equipo presenta una innovación propia incorporada a la motocicleta o al proceso de desarrollo. Se evalúa la originalidad, impacto técnico y aplicabilidad de la solución desarrollada.

En segundo lugar, la fase **MS2**, que consiste en pruebas dinámicas en circuito una vez se han aprobado las inspecciones técnica [1].

- 4- **Inspección técnica:** se comprueban dimensiones, peso, seguridad, sistema eléctrico, batería, frenos y dirección. Es decir, se evalúa el cumplimiento del reglamento, seguridad eléctrica y mecánica y, el correcto funcionamiento de los sistemas.
- 5- **Frenada:** la moto acelera hasta alcanzar al menos 80 km/h en una recta de aceleración y, al llegar a la zona de frenado, el piloto debe detenerla completamente lo antes posible. Se mide la distancia de frenado y se registra la velocidad alcanzada al final de la recta
- 6- **Gymkhana:** prueba cronometrada donde el piloto recorre un circuito corto delimitado por conos, con curvas cerradas y cambios de dirección. Se evalúa la agilidad, maniobrabilidad y comportamiento del chasis.
- 7- **Aceleración:** Se mide el tiempo que tarda la motocicleta en recorrer 150 metros en línea recta desde parado teniendo en cuenta, entrega de potencia y tracción.
- 8- **Velocidad máxima:** se mide la velocidad punta y optimización de la aerodinámica en un punto elegido del circuito.
- 9- **Regularidad:** consiste en realizar varias vueltas intentando repetir el mismo ritmo en carrera y evaluando el comportamiento predecible de la motocicleta.
- 10- **Eficiencia energética:** mediante un recorrido en pista, se obtienen la relación entre rendimiento y consumo de energía, gestión de la batería y eficiencia del sistema de propulsión.

- 11- **Carrera:** varias vueltas por el circuito de MotorLand Aragon que comprueban la fiabilidad, ritmo de carrera, gestión energética, estrategia y velocidad global.

### 3.5.2. CIRCUITO

Como se ha expuesto anteriormente, la fase final de esta competición se celebra en el circuito de velocidad MotorLand Aragon en Teruel (España). Este, es un circuito homologado por la FIM<sup>2</sup> en el que se celebran competiciones profesionales como el gran premio de MotoGP desde 2010 o el Campeonato del Mundo de Superbikes (WorldSBK).

El circuito tiene una longitud total de 5.077km con una recta principal de casi 1km, grandes cambios de elevación y 17 curvas rápidas y lentas que exigen buena aceleración, frenada y estabilidad. Su plano, se adjunta en el ANEXO III.



*Ilustración 28: Circuito Motorland Aragón*

---

<sup>2</sup> Federación Internacional de Motociclismo, organismo que regula el motociclismo a nivel mundial.

## **Capítulo 4: DEFINICION DEL TRABAJO**

### **4.1. METODOLOGIA**

Con el objetivo de optimizar y fabricar la araña de una motocicleta de competición, se establece una metodología que permita garantizar que cada objetivo propuesto anteriormente se complete con éxito.

Una vez seleccionada la pieza, se diseña y optimiza con herramientas de CAD como SolidEdge. Posteriormente, se realiza un análisis mediante el Método de Elementos Finitos (FEM), para ver cómo reacciona la estructura ante fuerzas, calor o vibraciones. A continuación, se rediseña suavizando bordes y obteniendo la geometría definitiva con Altair Inspire (software). Para finalmente fabricar el componente mediante impresión 3D en el laboratorio de fabricación aditiva de ICAI y, realizar un análisis económico comparando estos procesos con métodos tradicionales de fabricación y evaluar su viabilidad.

De manera visual, las fases del proyecto son:

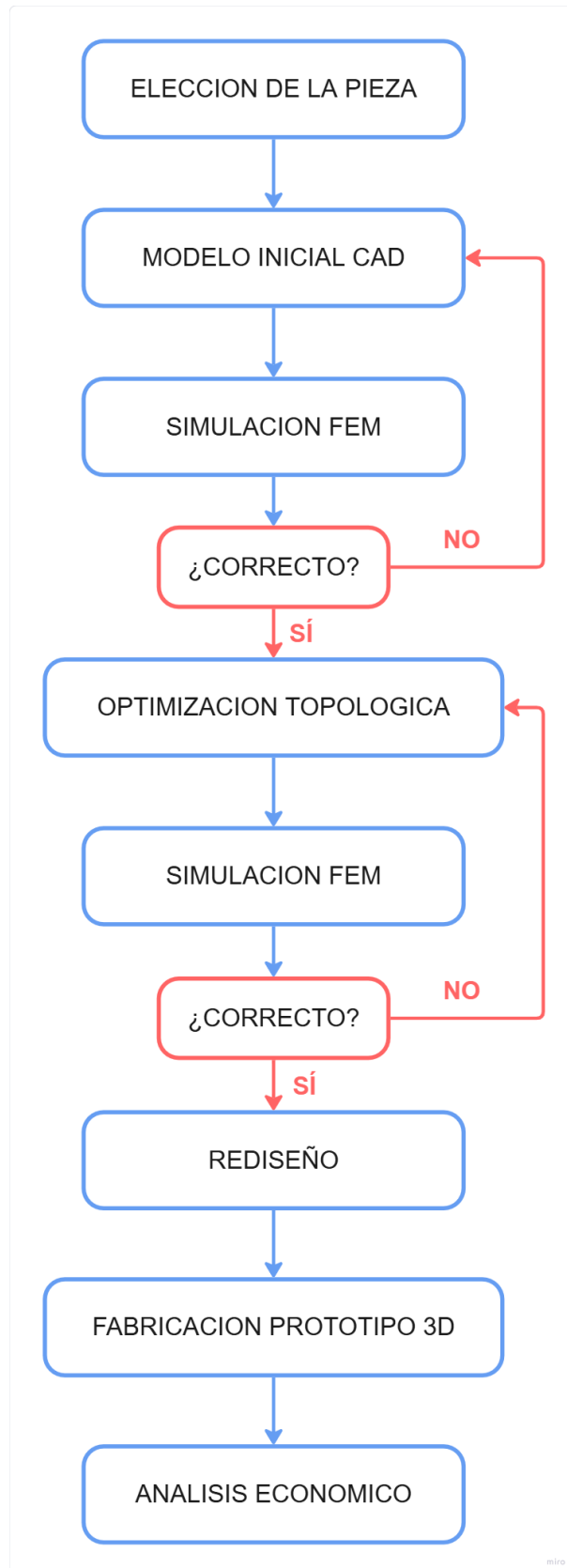


Ilustración 29: Etapas del trabajo

## 4.2. PIEZA A DISEÑAR

La pieza de estudio en este Trabajo de Fin de Grado es la araña de una motocicleta.

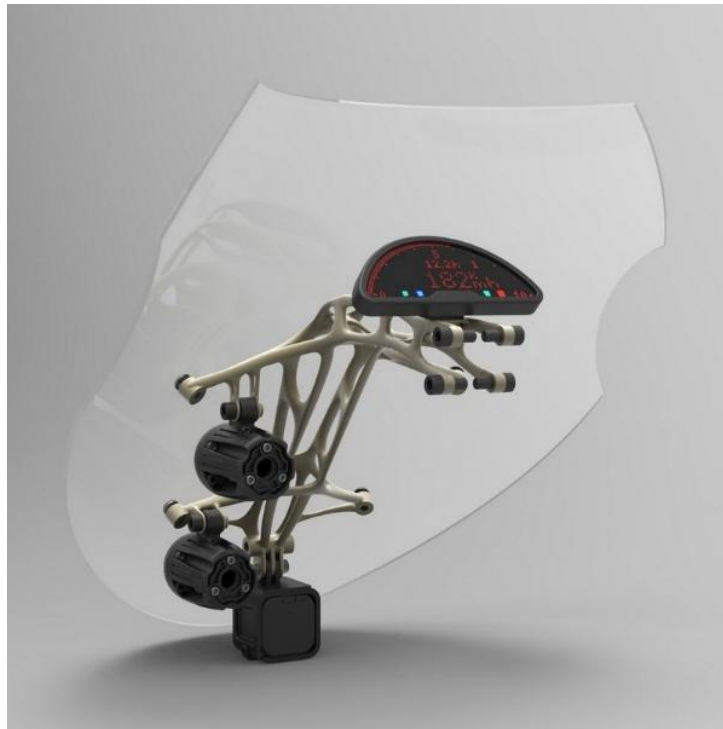


*Ilustración 30: Araña y cristal frontal de la motocicleta creada con IA (ChatGPT)*

Esta pieza es el soporte que va anclado directamente al chasis de la dirección de la motocicleta, encargado de sujetar el cristal delantero y otros elementos del frontal de la moto.

Se trata de una pieza interesante para el estudio y optimización, porque debe cumplir varios requisitos estructurales, y al mismo tiempo es un componente donde la reducción de peso puede ayudar de cara a la competición. Además, con la impresión 3D se puede fabricar en una sola pieza sin necesidad de unir tubos, reduciendo así los puntos críticos de rotura.

Asimismo, se han analizado diferentes soluciones existentes. Como por ejemplo el diseño desarrollado por Bottpower (una empresa española especializada en motos de competición), donde enseñan como optimizar este tipo de soportes.



*Ilustración 31: Araña optimizada realizada por Bottpower [35]*

#### **4.2.1. TIPOS DE ARAÑAS**

En función del material y su método de fabricación, existen varios tipos de arañas:

- De serie/OEM (*Original Equipment Manufacturer*): piezas oficiales de la marca.
  - Inyección de aluminio/magnesio: ligeras pero frágiles ante impactos usadas en motos actuales de competición.
  - Acero tubular: pesadas pero muy resistentes y reparables usadas en motos antiguas o de turismo.
  - Polímeros: usado en *scooters* o motos de baja cilindrada para reducir costes de producción.
- De competición/*Aftermarket*: piezas compatibles fabricadas por terceros.
  - Aluminio mecanizado (CNC) o tubular ligero: para carreras, priorizan la ligereza y el desmontaje rápido.
  - Fibra de carbono: máxima relación rigidez-peso en alta competición, pero su coste es muy elevado.

#### 4.2.2. EXIGENCIAS

Al ser un componente de soporte en una zona expuesta a fuerzas dinámicas, debe cumplir con exigencias estrictas como, por ejemplo:

- Rigidez estructural: mantener el carenado y los faros alineados firmemente, soportando la fuerza del viento a altas velocidades sin oscilaciones.
- Ligereza: colocándose en la parte alta y delantera de la moto, cualquier exceso de peso afecta negativamente al centro de gravedad y a la agilidad de la dirección.
- Resistencia a las vibraciones continuas: producidas por el motor y las irregularidades del asfalto, debe resistir la fatiga de los materiales para no romperse.
- Precisión geométrica: los puntos de anclaje deben ser exactos para que el carenado encaje sin tensiones superficiales que puedan romper el plástico o la fibra.
- Fusibilidad: en una competición, a menudo se prefiere que la araña se doble o rompa de forma controlada en una caída, para absorber energía y proteger componentes más costosos como el chasis o la horquilla.

#### 4.2.3. COMPETICION

En relación con la competición, la araña influye directamente en su rendimiento.

Por un lado, influye en la dinámica ya que, al reducir el peso de la parte delantera y estar en una posición elevada disminuye el momento de inercia, permitiendo cambios de dirección más rápidos.

También, modifica la aerodinámica, si la araña se dobla debido a la alta velocidad, la cúpula y el carenado cambian de posición, aumentando la resistencia al avance (*drag*) y restando velocidad punta en las rectas.

Y finalmente, está relacionada con la eficiencia en el *box*<sup>3</sup> porque deben ser diseñadas para que los mecánicos puedan retirar el carenado y la instrumentación en cuestión de segundos para reparar la motocicleta en competición.

---

<sup>3</sup> Garaje o taller asignado a cada equipo en un circuito para reparar los vehículos, ajustar la estrategia y realizar las paradas técnicas durante la carrera.

## 4.3. ESTUDIO DE LA GEOMETRÍA

### 4.3.1. *NORMATIVA MOTOSTUDENT*

Como este proyecto, es una idea de diseño para la araña de la motocicleta del equipo ISC Formula Student Racing Team de la Universidad Pontificia Comillas, debe cumplir con la normativa técnica y general de la competición MotoStudent [1].



*Ilustración 32: Motocicleta ISC Comillas en competición MotoStudent*

#### - **Método de Fabricación y Materiales**

El reglamento permite explícitamente el uso de fabricación aditiva (impresión 3D) como método de unión de elementos estructurales o fabricación, siempre que la estructura resultante asegure la resistencia e integridad estructural adecuada.

Además, a diferencia de componentes como los ejes o el manillar, no existen restricciones específicas de materiales para el subchasis o soportes auxiliares, siempre que cumplan con la integridad estructural.

La araña debe ser un prototipo de diseño propio, ya que el uso de componentes comerciales de chasis (incluyendo subchasis modificados) no está permitido

#### - **Requisitos de Diseño y Seguridad**

Todas las aristas y acabados expuestos de los componentes (especialmente si forman parte del carenado o sus soportes) deben estar redondeados con un radio externo mínimo de 1mm.

La araña no debe interferir con el ángulo de giro mínimo requerido, que es de 15° a cada lado del eje longitudinal y, debe mantenerse una zona de seguridad de al menos 30mm

alrededor de las manos del piloto y las áreas de control en todo el rango de giro para evitar atrapamientos en caso de caída.

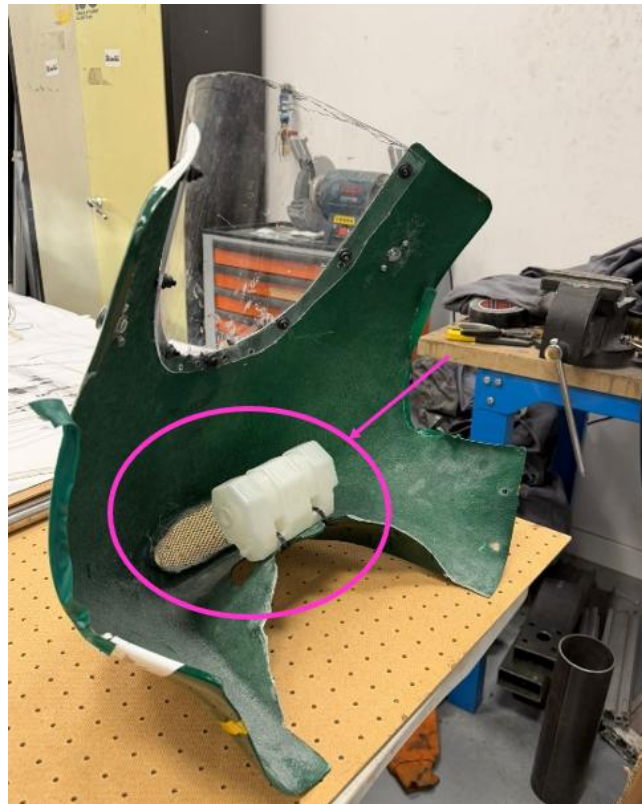
#### - Restricciones Dimensionales

Ningún elemento de la motocicleta, incluyendo la araña o el carenado que soporta, puede sobresalir más allá del plano vertical tangencial a la circunferencia externa del neumático delantero. El conjunto no debe exceder los límites de anchura del carenado máximo 600mm.

#### 4.3.2. PUNTOS DE ANCLAJE Y ACCESORIOS

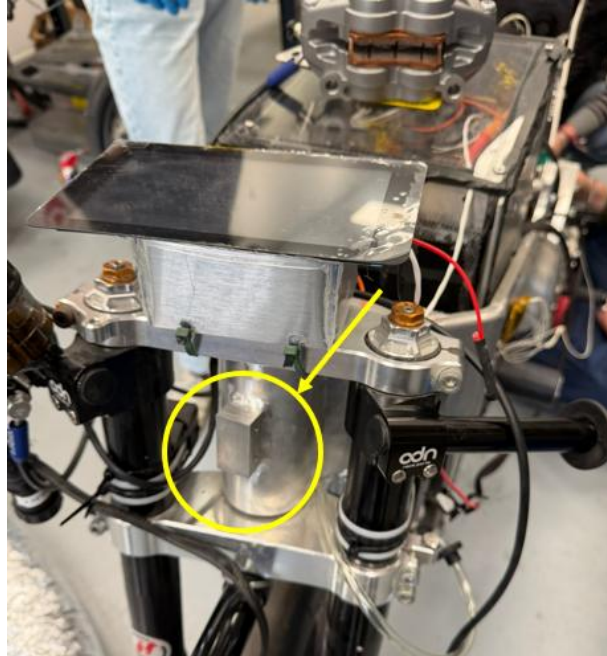
Este componente, tiene dos puntos de unión principales. Uno en la pipa de dirección que es la parte delantera del chasis o tubo por donde pasa el eje del manillar de la motocicleta. Y, otro en el carenado frontal que incluye la cúpula (cristal) que desvía el viento por encima del casco del piloto mejorando la aerodinámica y, los conductos de conductos de aire que canalizan el aire frontal rodeados en la imagen.

El aire canalizado se puede dirigir por un lado a la carcasa protectora del filtro de aire que almacena y lleva aire limpio y fresco hacia el motor. O, se puede dirigir a zonas calientes como la culata para evitar el sobrecalentamiento.



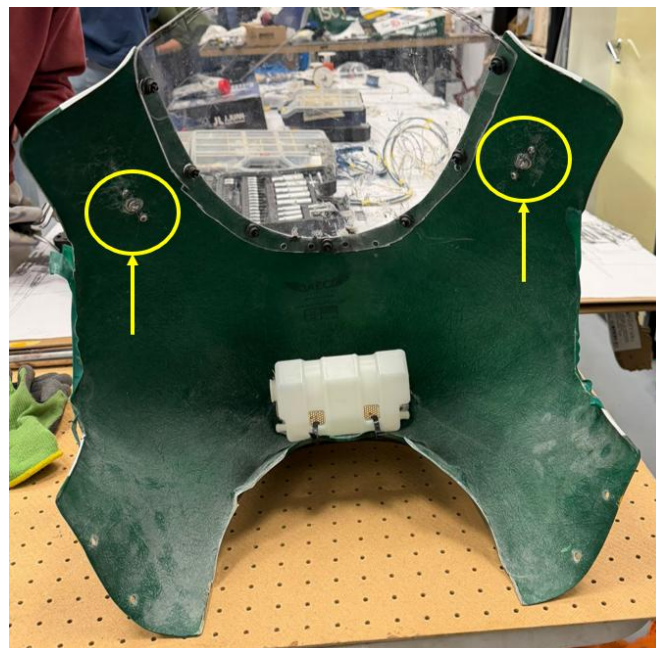
*Ilustración 33: Carenado frontal y conductos de aire motocicleta ISC Comillas*

Por lo tanto, tal y como se ha expresado, la araña se ancla a la pipa de dirección mediante el rectángulo metálico y, un par de tornillos a los laterales, indicados en la siguiente imagen.



*Ilustración 34: Punto de anclaje a chasis motocicleta equipo ISC Comillas*

Desde ese punto central, la araña se extiende hacia adelante para unir el carenado frontal mediante dos puntos de anclaje en la parte superior. Como se ve en la imagen esta operación se hace a través de los tornillos indicados en amarillo.



*Ilustración 35: Puntos de anclaje a carenado frontal motocicleta equipo ISC Comillas*

Además, deberá sostener el *dash* o pantalla de AiM<sup>4</sup> diseñado para mostrar datos procedentes de la ECU, el acelerómetro y el giroscopio interno, así como canales analógicos / digitales y canales de matemáticos predefinidos [36].



Ilustración 36: AiM MXS 1.3 Strada

Para facilitar el diseño de la araña esta pantalla se unirá a la araña mediante sujeciones externas, no quedará integrado en el propio diseño.

#### 4.3.3. MEDIDAS MAXIMAS

Analizando las dimensiones del cristal delantero, la pipa de dirección, la pantalla o *dash*, y los posibles anclajes de la motocicleta del equipo ISC Comillas, se establecen las dimensiones máximas de la araña a diseñar.

Estas medidas, deberán respetarse para cumplir con la geometría de la motocicleta y con las especificaciones y normativa de la competición MotoStudent.

Por lo tanto, en las siguientes tablas se exponen todas estas medidas:

| CRISTAL DELANTERO                    | MEDIDA |
|--------------------------------------|--------|
| Altura máxima cristal delantero      | 550mm  |
| Anchura máxima cristal delantero     | 470mm  |
| Profundidad máxima cristal delantero | 270mm  |
| Separación puntos de anclaje         | 320mm  |

Tabla 3: Medidas máximas de diseño del cristal delantero

<sup>4</sup> Empresa italiana líder mundial en la fabricación de sistemas de adquisición de datos, telemetría y dashboards (pantallas).

| PIPA DE DIRECCION       | MEDIDA |
|-------------------------|--------|
| Altura máxima           | 70mm   |
| Anchura máxima          | 60mm   |
| Altura del anclaje      | 50mm   |
| Anchura del anclaje     | 22mm   |
| Profundidad del anclaje | 22mm   |

Tabla 4: Medidas máximas de diseño de la pipa de dirección

#### 4.4. ESTUDIO DE CARGAS

Con el objetivo de entender cómo se comporta la araña en una competición, se deben analizar las fuerzas y factores que influyen en su estabilidad estructural. Para ello, se estudian las cargas calculando las fuerzas que actúan de manera teórica y, se simula mediante el software de simulación proporcionado por SolidEdge.

En el ANEXO I se muestran los resultados de la competición MotoStudent 2023 de la que se rescatarán algunos datos para el cálculo de fuerzas.

##### 4.4.1. FUERZA DEBIDA AL PESO

Esta es la fuerza que siente la araña debida al peso del carenado frontal y el *dashboard* junto con su soporte de unión que no forma parte de la estructura de la araña.

La araña sentirá estas fuerzas de manera directa a través de los tornillos de unión con el cristal delantero ( $F_{p1}$ ) sintiendo cada uno de ellos un cuarto de la fuerza total y, la parte superior central que sujeta de forma directa el *dashboard* ( $F_{p2}$ ).

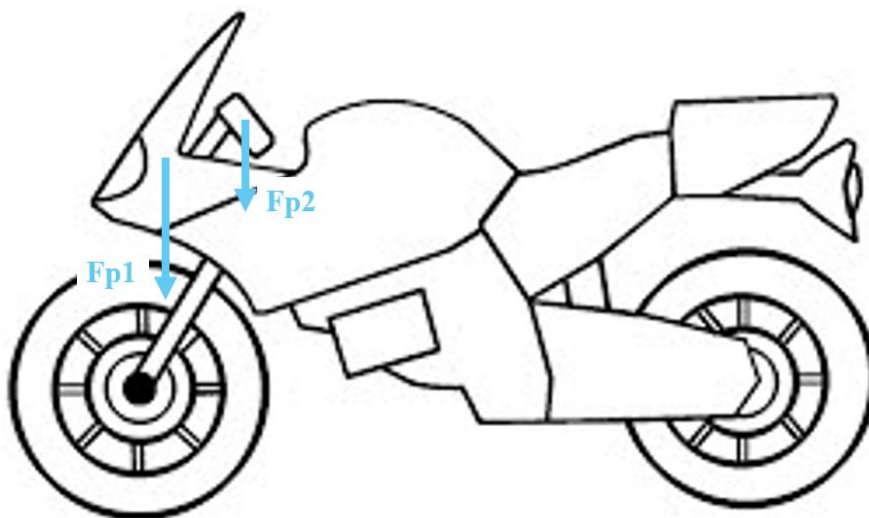


Ilustración 37: Representación de las fuerzas debidas al peso

El valor de estas fuerzas queda de la siguiente forma:

$$F_{P1} = m1 * g = 50N$$

$$F_{P2} = m2 * g = 8N$$

- Masa (m):
  - Masa de la cúpula y carenado frontal (m1)  $\approx 5000g = 5kg$
  - Masa del *dashboard* elegido (m2)  $\approx 800g = 0,8kg$
- Gravedad (g)  $\approx 10m/s$

#### 4.4.2. FUERZA DEBIDA AL VIENTO

Esta es la fuerza que se genera por impacto del aire o, resistencia aerodinámica (fuerza de arrastre o drag) a alta velocidad.

La araña sentirá esta fuerza en los tornillos de unión con la cúpula que es la que siente esta fuerza directamente.

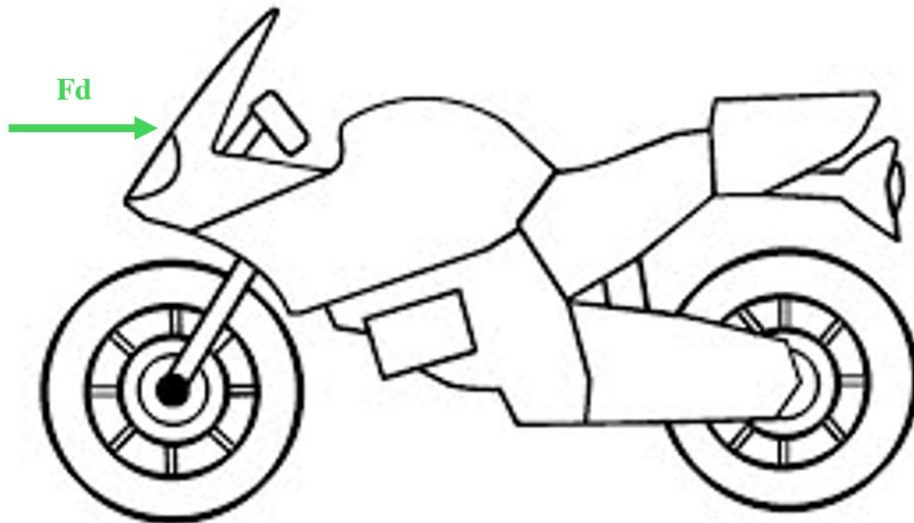


Ilustración 38: Representación de las fuerzas debidas al viento

El valor de dicha fuerza, se calcula utilizando la física de la dinámica de fluidos basada en los conceptos de presión dinámica y coeficientes de forma [37]:

$$F_D = \frac{\rho * C_d * A * v^2}{2} \approx 585,043 N$$

Lo que significa que cada uno de los tornillos sufre una fuerza aproximada de 146,261N.

- Densidad del aire ( $\rho$ )  $\approx 1,225kg/m^3$

- Coeficiente de arrastre ( $C_d$ ) = 0,9

Es un número adimensional que depende de la forma geométrica de la cúpula y su inclinación. Con el objetivo de desviar el aire y mejorar la aerodinámica de la estructura, la cúpula tiene una forma curvada parabólica. Por ello, eligiendo el criterio más conservador y crítico se elige un valor de coeficiente cercano a 1 que sería el equivalente a una pared totalmente vertical.

- Area frontal expuesta ( $A$ ) =  $550\text{mm} * 470\text{mm} = 258.500\text{mm}^2 \approx 0,26\text{m}^2$

Para la obtención de esta área, se ha aproximado la cúpula o cristal delantero (que es el área que recibe directamente la acción del aire) a un rectángulo de medidas 550mm de alto 470mm de ancho.

- Velocidad máxima alcanzada por la motocicleta ( $v$ )  $\approx 230 \text{ km/h} \approx 63,89\text{m/s}$

Con el objetivo de evaluar el caso crítico, se ha elegido el valor de velocidad máxima alcanzada por una motocicleta eléctrica en la competición MotoStudent.

#### **4.4.3. FUERZA DE INERCIA POR ACELERACIÓN**

Esta fuerza es la resistencia natural que tienen todos los cuerpos a cambiar su estado actual. En el caso de la aceleración de la motocicleta es la resistencia al cambio de velocidad desde parado. La inercia empuja los componentes hacia atrás, llevando la araña contra el chasis.

En la pieza estudiada, se transmite esta fuerza a través de los tornillos de la unión con el cristal que depende simplemente de la masa del frontal ( $m_1$ ) donde cada unión sentirá una cuarta parte de la fuerza de inercia total. Y, a través de la superficie recta superior en la que se colocará el *dashboard* y su soporte ( $m_2$ ).

Cabe destacar que esta fuerza va en la misma dirección que la fuerza debida al viento y, por lo tanto, en la simulación se sumarán entre ellas.

Para obtener los datos, se ha elegido el valor de aceleración máxima alcanzada en la competición de MotoStudent en la prueba de aceleración que mide el tiempo que tarda la motocicleta en recorrer 150m desde el reposo.

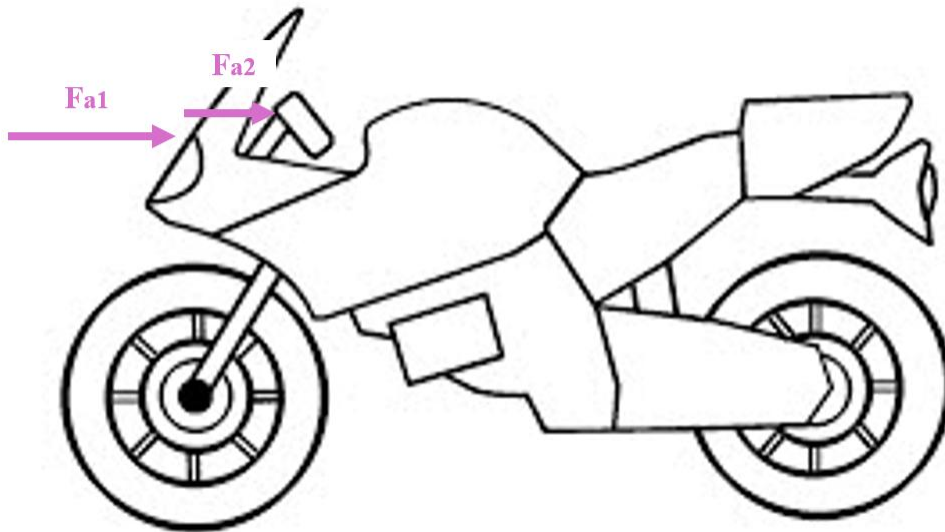


Ilustración 39: Representación de las fuerzas debidas a la aceleración

Mediante la Segunda Ley de Newton, se obtienen las siguientes fuerzas:

$$Fa1 = m1 * a = 42,75N$$

$$Fa2 = m2 * a = 6,84N$$

- Masa (m):
  - Masa de la cúpula y carenado frontal ( $m1$ )  $\approx 5000g = 5kg$
  - Masa del *dashboard* elegido ( $m2$ )  $\approx 800g = 0,8kg$
- Aceleración máxima (a):

$$X(t) = Xo + Vo * t + \frac{a * t^2}{2} \rightarrow a = \frac{2 * X}{t^2} = 8,55m/s^2$$

- Espacio final (X) = 150m
- Espacio inicial (Xo) = 0m
- Velocidad Inicial (Vo) = 0m/s
- Tiempo empleado (t) = 5,924s

#### 4.4.4. FUERZAS DE INERCIA POR FRENADO

Ocurre cuando la motocicleta, reduce drásticamente su velocidad y la inercia empuja los componentes hacia adelante. Al ser el caso contrario que la fuerza de inercia por aceleración máxima, se producen en instantes diferentes y por eso, no han de superponer.

Al igual que la anterior fuerza por inercia, la araña sufrirá esta fuerza transmitida por los cuatro tornillos y el lugar donde se coloca el *dashboard*.

Para obtener los datos necesarios, se han utilizado los valores máximos de frenada alcanzados en la competición MotoStudent Electric. La prueba de frenado se encarga de medir la distancia que recorre la moto desde una velocidad inicial de 80km/h hasta el reposo.

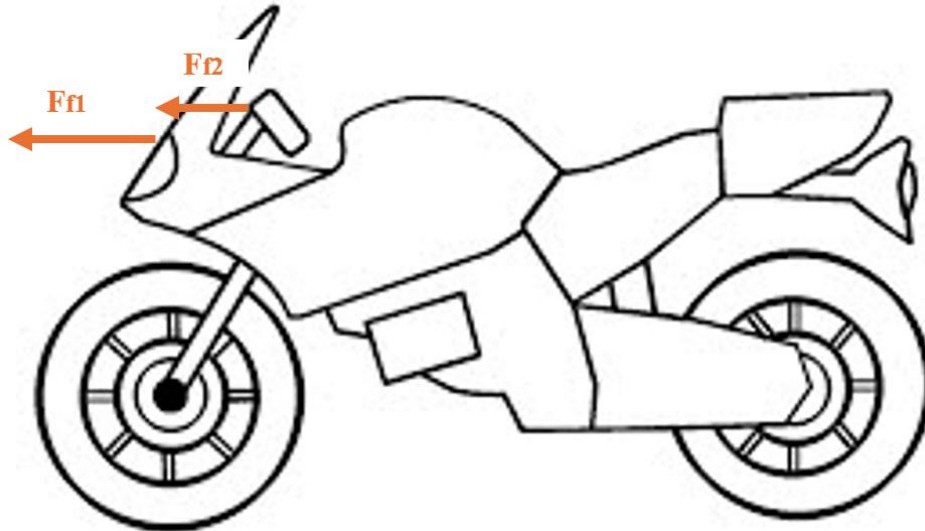


Ilustración 40: Representación de las fuerzas debidas a la frenada

De nuevo, utilizando la Segunda Ley de Newton:

$$F_{f1} = m1 * a = 42,85N$$

$$F_{f2} = m2 * a = 6,86N$$

- Masa (m):
  - Masa de la cúpula y carenado frontal (m1)  $\approx 5000g = 5kg$
  - Masa del *dashboard* elegido (m2)  $\approx 800g = 0,8kg$

- Aceleración de frenada (a):

$$V^2 = V_o^2 + 2 * a * X(t) \rightarrow a = \frac{-V_o^2}{2 * X} \approx -8,57m/s^2$$

- Distancia recorrida (X) = 28,8m
- Velocidad final (V) = 0m/s
- Velocidad inicial (Vo) = 80km/h  $\approx 22,22m/s$

Por lo tanto, y a modo de resumen, en la siguiente tabla se expresan todas las fuerzas que actúan medidas en Newtons, así como la dirección de los ejes y a través de qué puntos se transmite a la araña.

| EJE                 | FUERZA                  | POSICION             | VALOR (N) |
|---------------------|-------------------------|----------------------|-----------|
| Z                   | Peso                    | Tornillos superiores | -50       |
|                     |                         | Sujeción dash        | -8        |
| X                   | Viento                  | Tornillos superiores | 585,043   |
|                     |                         | Sujeción dash        | 6,84      |
|                     | Inercia por aceleración | Tornillos superiores | 42,85     |
|                     |                         | Sujeción dash        | 6,84      |
| Inercia por frenado | Tornillos superiores    | 42,85                |           |
|                     | Sujeción dash           | 6,86                 |           |

Tabla 5: Resumen de las fuerzas

#### 4.5. MATERIAL DE FABRICACION

El material elegido para la fabricación de la araña es el Aluminio 6061-T6.

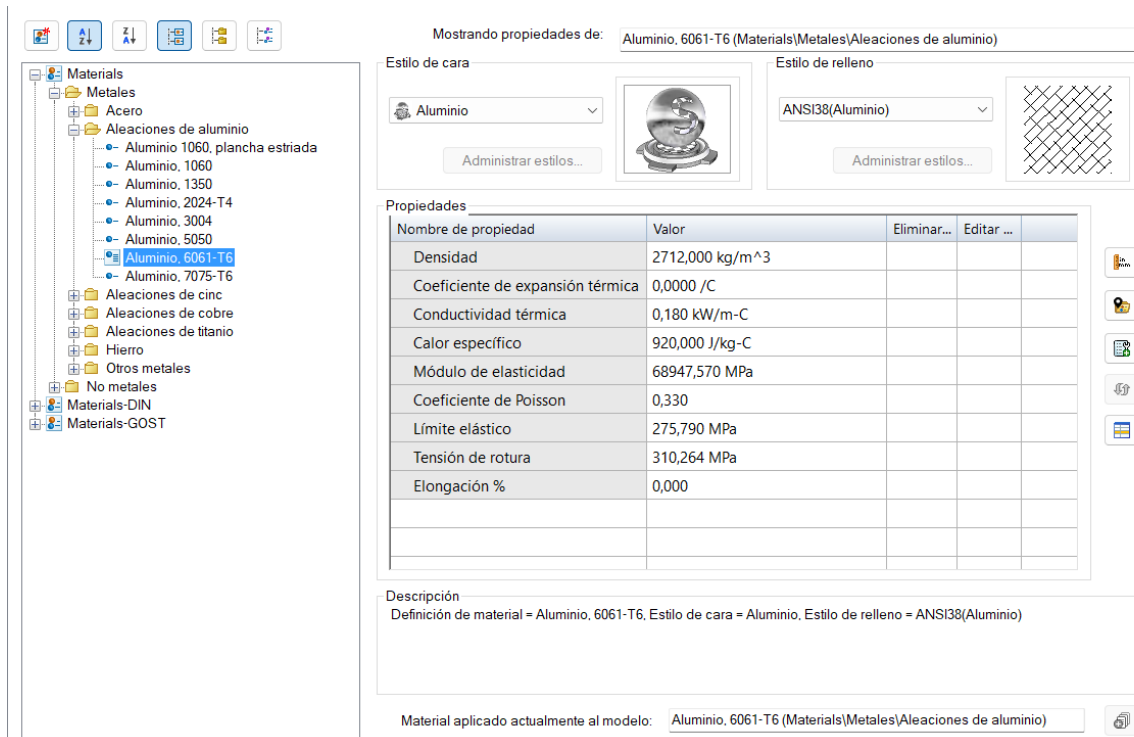
Analizando esta aleación, los números 6061 identifican la serie de la aleación cuyos componentes principales son el magnesio y el silicio. Estos dos componentes proporcionan una buena resistencia a corrosión, soldabilidad y mecanizado CNC<sup>5</sup>.

Con relación al término T6, este indica el tipo de templado aplicado al material. En este caso, representa un material sometido a un tratamiento térmico de solución seguido de un envejecimiento artificial. La aleación se calienta a gran temperatura, entre 450°C y 550°C, para que los elementos de aleación se disuelvan homogéneamente en la matriz de aluminio. Después, se enfría bruscamente y se vuelve a calentar a una temperatura más baja, entre 160°C y 180°C durante varias horas lo que hace que se formen pequeñas partículas endurecedoras dentro del material que dificultan el movimiento de las dislocaciones. Por lo tanto, este tipo de tratamiento incrementa la resistencia mecánica y la dureza de la aleación.

La araña es un componente que soporta el peso del carenado frontal de la motocicleta, vibraciones y las fuerzas aerodinámicas. Por ello, es necesario que sea ligera pero resistente a estos esfuerzos.

Con estas especificaciones, la elección del aluminio 6061-T6 se justifica por su excelente relación resistencia-peso. Con una resistencia a tracción de 310MPa (capacidad global de un material para soportar fuerzas sin romperse), un límite elástico de 276MPa (punto donde el material pasa a deformación plástica permanente) y, una densidad reducida en comparación con otros materiales estructurales permite obtener una pieza ligera sin comprometer su capacidad resistente. Asimismo, presenta una buena resistencia a la fatiga, fundamental en un componente sometido a cargas continuas durante frenadas, aceleraciones y paso por curva.

<sup>5</sup> (Control Numérico por Computadora) proceso de fabricación en el que máquinas controladas por ordenador eliminan material de una pieza.



Mostrando propiedades de: Aluminio, 6061-T6 (Materials\Metales\Aleaciones de aluminio)

Estilo de cara: Aluminio

Estilo de relleno: ANSI38(Aluminio)

| Nombre de propiedad               | Valor                      | Eliminar... | Editar ... |
|-----------------------------------|----------------------------|-------------|------------|
| Densidad                          | 2712,000 kg/m <sup>3</sup> |             |            |
| Coefficiente de expansión térmica | 0,0000 /C                  |             |            |
| Conductividad térmica             | 0,180 kW/m-C               |             |            |
| Calor específico                  | 920,000 J/kg-C             |             |            |
| Módulo de elasticidad             | 68947,570 MPa              |             |            |
| Coefficiente de Poisson           | 0,330                      |             |            |
| Límite elástico                   | 275,790 MPa                |             |            |
| Tensión de rotura                 | 310,264 MPa                |             |            |
| Elongación %                      | 0,000                      |             |            |

Descripción  
 Definición de material = Aluminio, 6061-T6, Estilo de cara = Aluminio, Estilo de relleno = ANSI38(Aluminio)

Material aplicado actualmente al modelo: Aluminio, 6061-T6 (Materials\Metales\Aleaciones de aluminio)

Tabla 6: Propiedades del Aluminio 6061-T6

Aunque existen otros materiales como la fibra de carbono, el titanio o el Nylon que, pueden ofrecer ventajas en determinados aspectos, su elevado coste y mayor complejidad de fabricación los convierten en opciones menos adecuadas para un proyecto como MotoStudent.

| MATERIAL         | DENSIDAD<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | LIMITE ELASTICO<br>(MPa) | FACILIDAD FABRICACION | COSTE MATERIA PRIMA (€/Kg) | COSTE COMERCIAL (€/Kg) |
|------------------|----------------------------------|--------------------------|-----------------------|----------------------------|------------------------|
| Aluminio 6061-T6 | 2,70                             | 276                      | Alta                  | 2,50 - 3,50                | 8 - 20                 |
| Titanio          | 4,43                             | 880                      | Baja                  | 6,00 - 10,00               | 70 - 150               |
| Fibra de Carbono | 1,50 - 1,60                      | 600 - 1200               | Baja                  | 15,00 - 25,00              | 40 - 90                |
| Nylon            | 1,10 - 1,40                      | 100 - 150                | Alta                  | 10,00 - 15,00              | 45 - 100               |

Tabla 7: Comparativa de materiales para una araña de MotoStudent

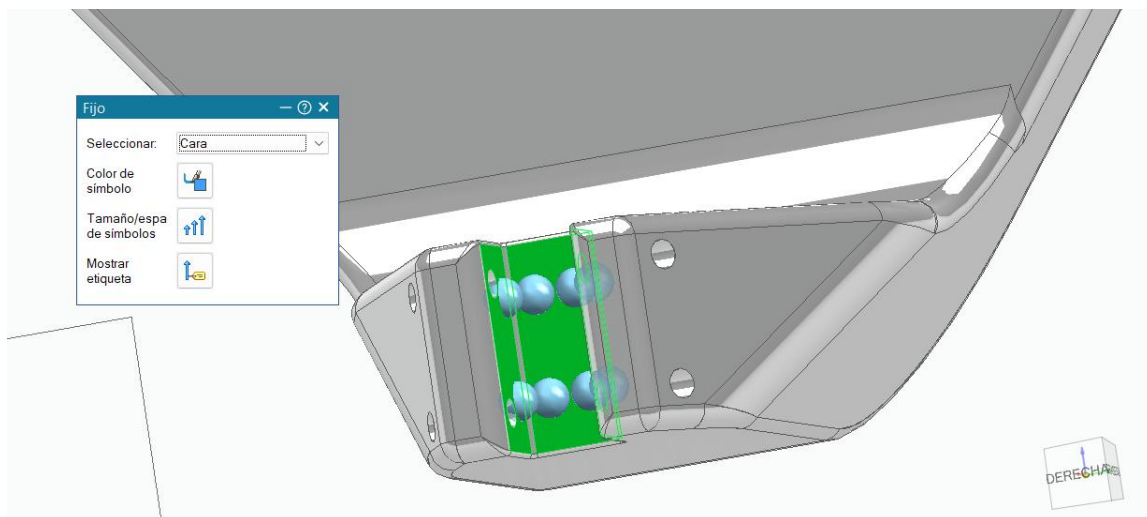
Por ello, el aluminio 6061-T6 es un material que equilibra rendimiento, facilidad de fabricación y coste, utilizada en un 90% de las motocicletas de competición desde campeonatos regionales hasta muchos equipos de nivel nacional.

#### 4.6. PARAMETROS PARA LA SIMULACION FEM

Una vez expuestas las fuerzas que actuarán, se deben definir las condiciones de contorno de la pieza o restricciones para posteriormente, mallar la araña y resolver la simulación mediante el software elegido, SolidEdge. Así, se observa la manera en la que la pieza sufre bajo las condiciones elegidas, analizando su resistencia mecánica.

Como restricción, se establece la sujeción fija que permite que las fuerzas analizadas en el estudio de cargas generen estrés interno en la pieza. En este caso, se ha definido en la superficie de la base de la araña, que es la zona trasera con los agujeros donde pasarán los tornillos que se anclan a la pipa de dirección.

Al hacer esto, esa zona se convierte en el anclaje al suelo y al aplicar, por ejemplo, la fuerza del viento en la parte delantera se calculará cómo viaja esa fuerza a lo largo de los brazos y cómo se acumula toda la tensión justo en la frontera donde empieza la sujeción fija.



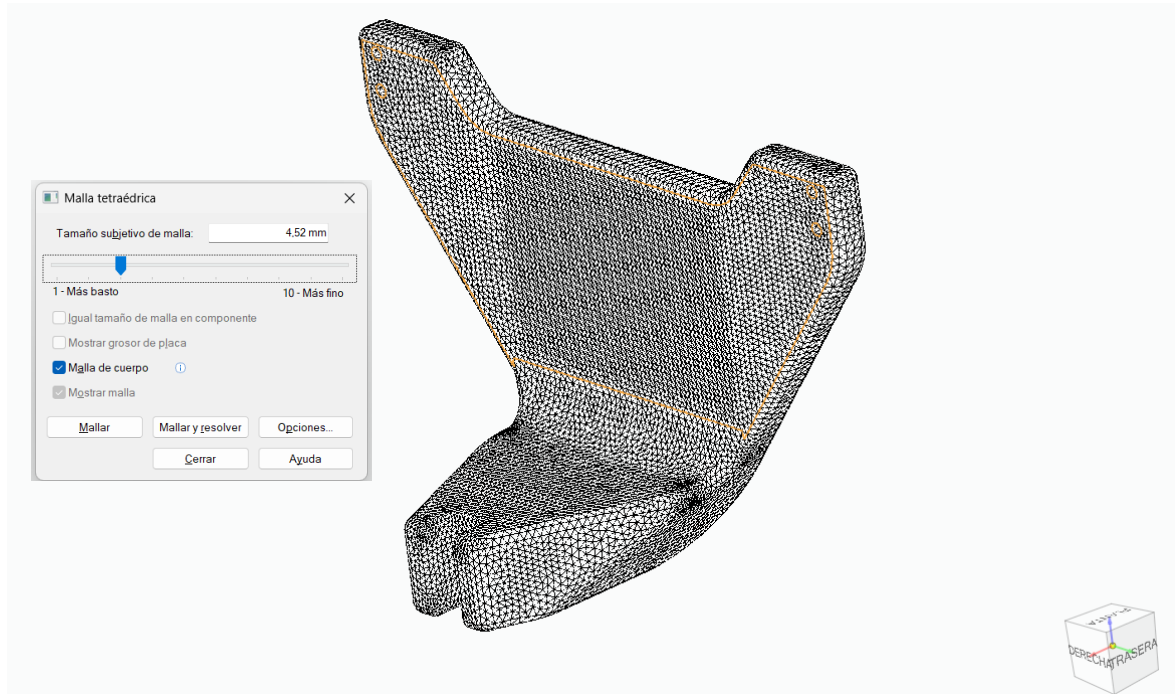
*Ilustración 41: Definición de la restricción fija*

Posteriormente, se procede al mallado que consiste en dividir la geometría en pequeños elementos finitos. La simulación FEM necesita transformar las geometrías complejas en partes más pequeñas para calcular desplazamientos, tensiones y deformaciones en cada elemento y posteriormente obtener el comportamiento global de la pieza.

Una malla más fina, formada por un mayor número de elementos, proporciona resultados más precisos al representar mejor la distribución de tensiones y deformaciones, aunque incrementa el tiempo de cálculo. Por el contrario, una malla más gruesa reduce el coste computacional a cambio de una menor precisión en los resultados.

Por ello, se ha elegido para el desarrollo de este trabajo un rango de tamaño de malla entre 3mm y 5mm tanto para el modelo inicial como para la pieza optimizada, decidiendo así un equilibrio entre precisión y tiempo de cálculo. Considerando las dimensiones globales

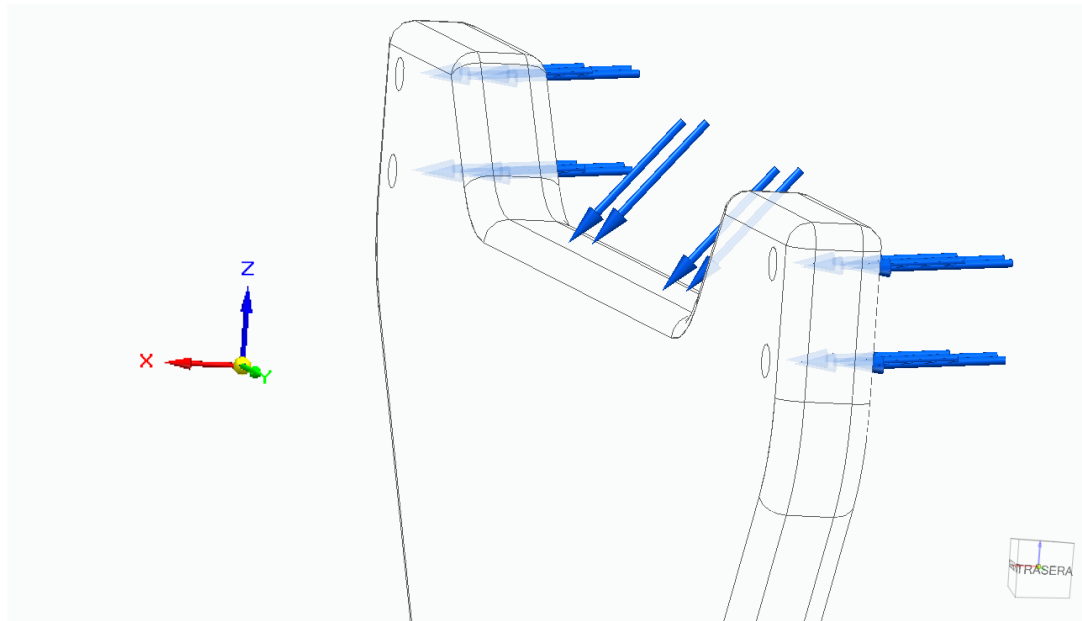
de la pieza, este tamaño de malla proporciona una división suficientemente detallada para representar con precisión la distribución de tensiones y deformaciones, especialmente en las zonas donde se concentran los esfuerzos.



*Ilustración 42: Cuerpo Prototipo 1 mallado*

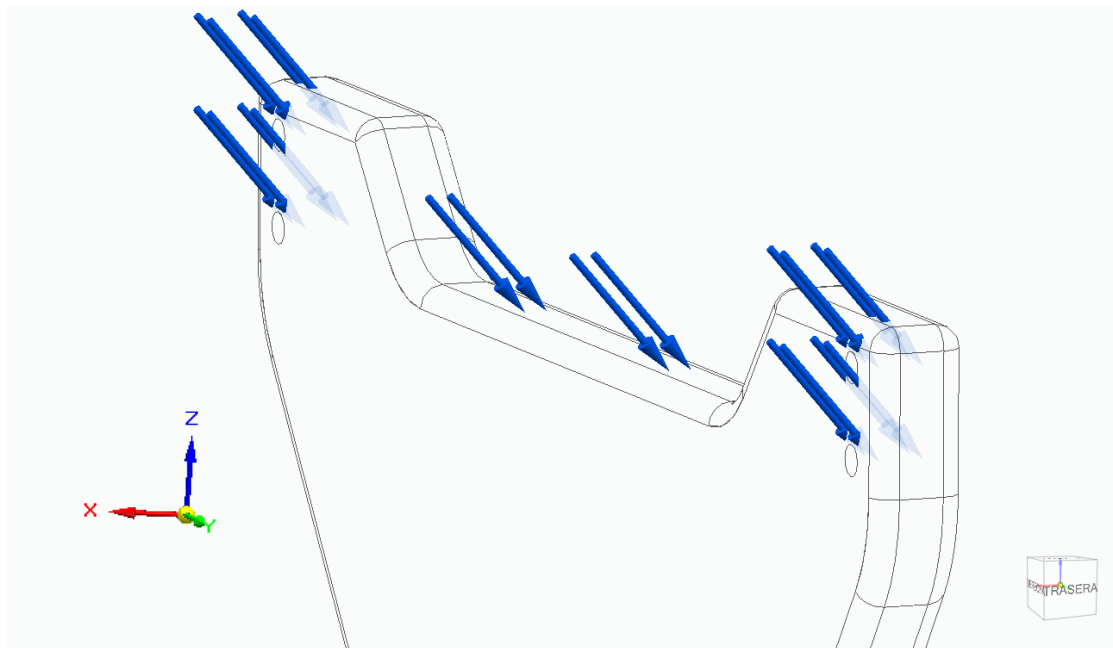
Además, con el objetivo de simular la realidad de la mejor manera posible, se han realizado dos simulaciones iniciales de cargas para dos situaciones diferentes y en las que, por tanto, actuarán fuerzas distintas.

En primer lugar, el caso de compresión máxima de la araña. Aquí, actúa la fuerza debida al peso y todas las fuerzas contrarias al movimiento de la motocicleta en la que se incluyen fuerzas de inercia por aceleración máxima y la acción del viento.



*Ilustración 43: Representación de las fuerzas para el caso de compresión*

En segundo lugar, el caso de tracción máxima de la araña. En esta simulación se incluirán las fuerzas debidas al peso y la frenada, anulando la fuerza debida al viento. La acción del viento es contraria al movimiento mientras que la de frenada aparece a favor de este. Por lo tanto, para estudiar el caso crítico en el que la fuerza de frenada actúa con todo su valor, se simula la motocicleta como si estuviese en reposo con el objetivo de que no le afecte la fuerza del viento.



*Ilustración 44: Representación de las fuerzas para el caso de tracción*

## Capítulo 5: DESARROLLO DEL TRABAJO

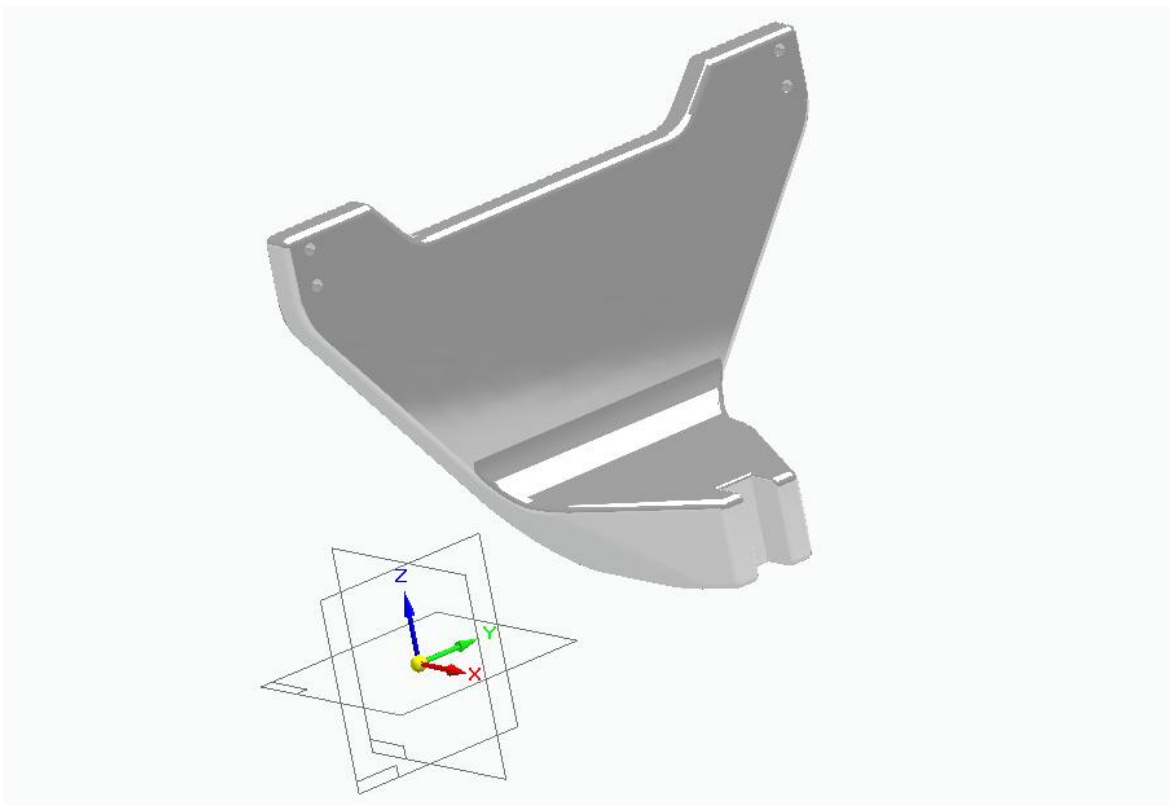
A continuación, se detallan los pasos seguidos según la metodología expuesta, para la creación de un modelo inicial, optimizaciones y simulaciones por Elementos Finitos con el objetivo de obtener un modelo listo para la impresión.

Todas las iteraciones y decisiones de diseño junto con los desplazamientos y las zonas restringidas de cada prototipo se exponen en forma de tablas en el ANEXO II.

### 5.1. PROTOTIPO 1

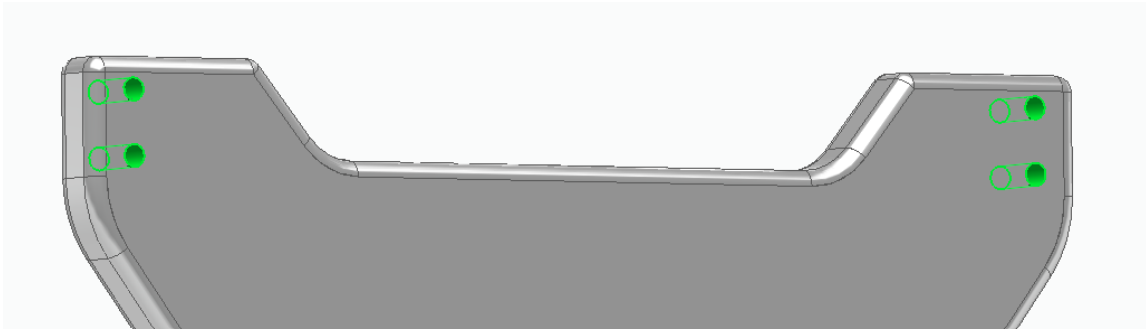
Mediante las herramientas de diseño del software SolidEdge, se diseña un primer modelo de la pieza a estudiar. Este modelo inicial respeta las medidas máximas y los puntos de anclaje anteriormente mencionados considerando la geometría de la motocicleta y los requerimientos técnicos de la competición MotoStudent.

Realizada con Aluminio 6061-T6 la araña tiene un peso inicial de 4,224kg.



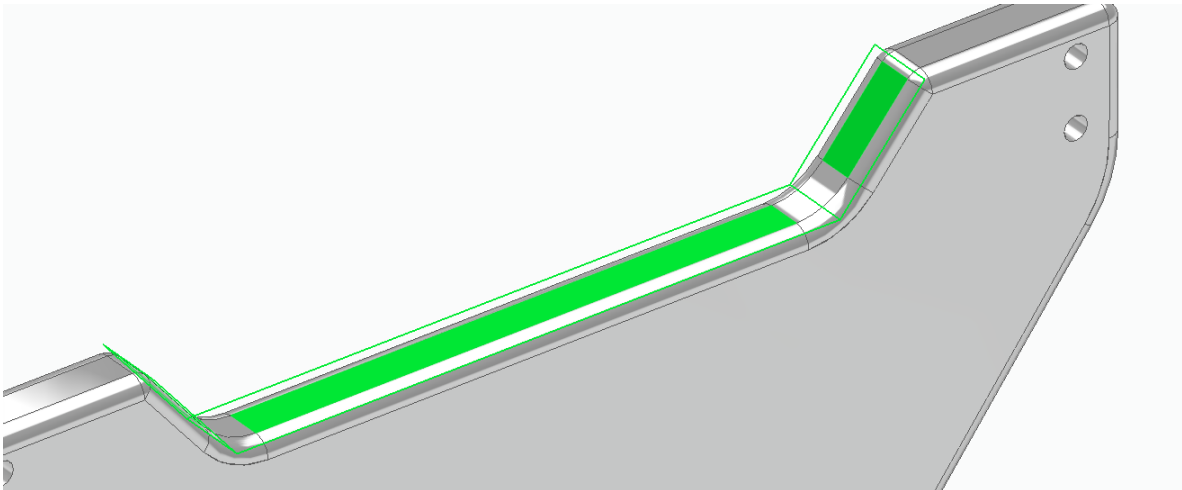
*Ilustración 45: Prototipo 1*

Como se puede observar, esta pieza tiene dos brazos con dos agujeros para tornillos en la parte superior, estos son los tornillos que unirán la araña al carenado frontal y por donde se transmitirán las fuerzas debidas a este frontal de la motocicleta.



*Ilustración 46: Tornillos superiores de unión al carenado*

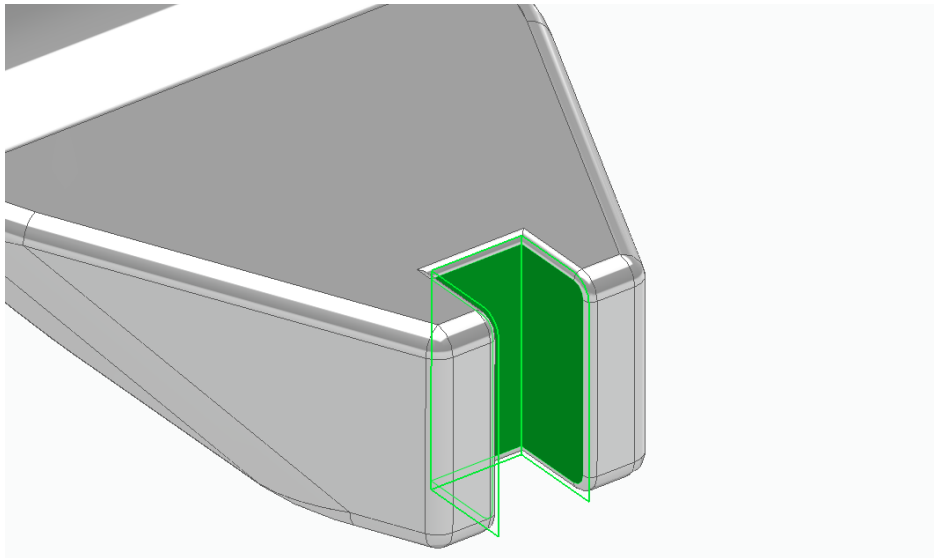
En la parte central superior, se distingue una zona plana en la que irá sujeto el *dashboard* o pantalla elegida junto a su soporte externo y por ello la zona donde se colocaran las fuerzas que sienta la araña debidas a este componente.



*Ilustración 47: Zona de soporte del dashboard*

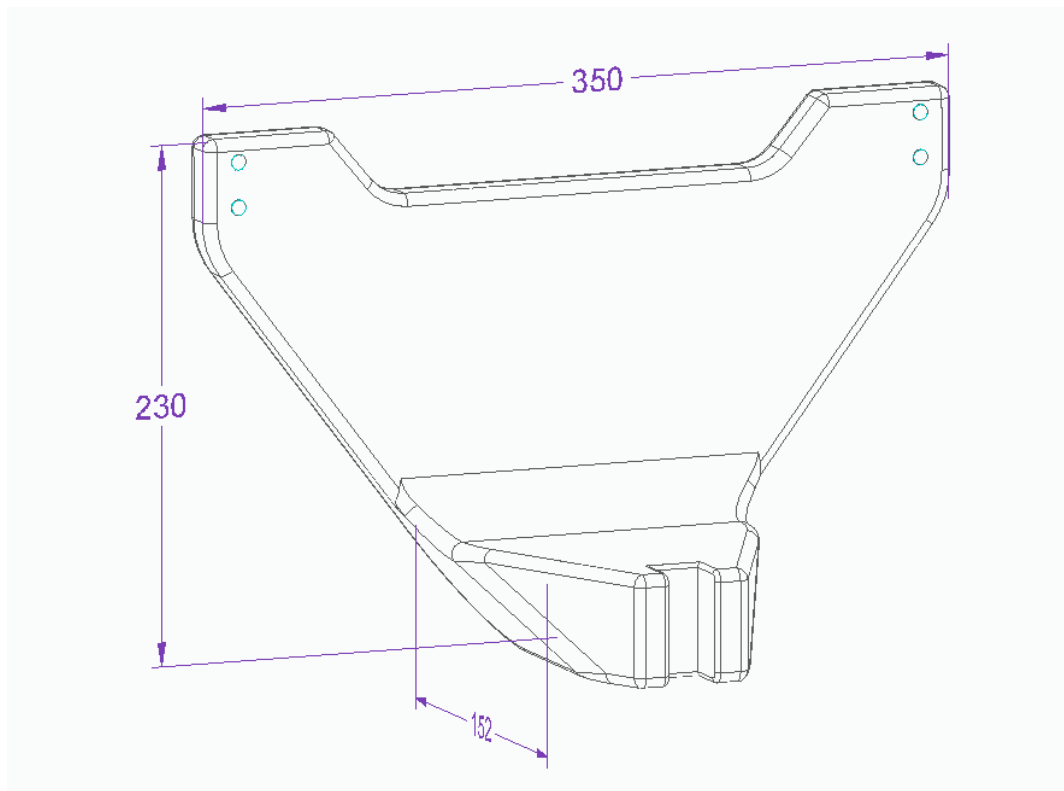
Por último, el anclaje a la pipa de dirección consta de agujero rectangular central por el que se unirá a la estructura de la motocicleta mediante dos tornillos perpendiculares al movimiento de la motocicleta.

Además, se han eliminado todos los detalles innecesarios como los tornillos del anclaje rectangular a la pipa de dirección ya que, al no soportar fuerzas de manera directa (a diferencia de los tornillos superiores), no influyen en la simulación de fuerzas y se pueden realizar mediante mecanizado posterior.



*Ilustración 48: Anclaje a pipa de dirección*

Las medidas máximas del modelo inicial quedan: 350mm de ancho, 230mm de alto y 152mm de profundidad respetando las medidas máximas del carneado frontal de la motocicleta. Además, en el ANEXO IV la pieza queda acotada, indicando tolerancias y material y otros detalles.



*Ilustración 49: Medidas máximas modelo inicial*

### 5.1.1. VALIDACION POR SIMULACION FEM

Una vez realizado el modelo inicial, se deberá simular mediante el método de elementos finitos. Y, como se ha indicado anteriormente se estudian dos casos de cargas distintas para compresión y para tracción de la araña.

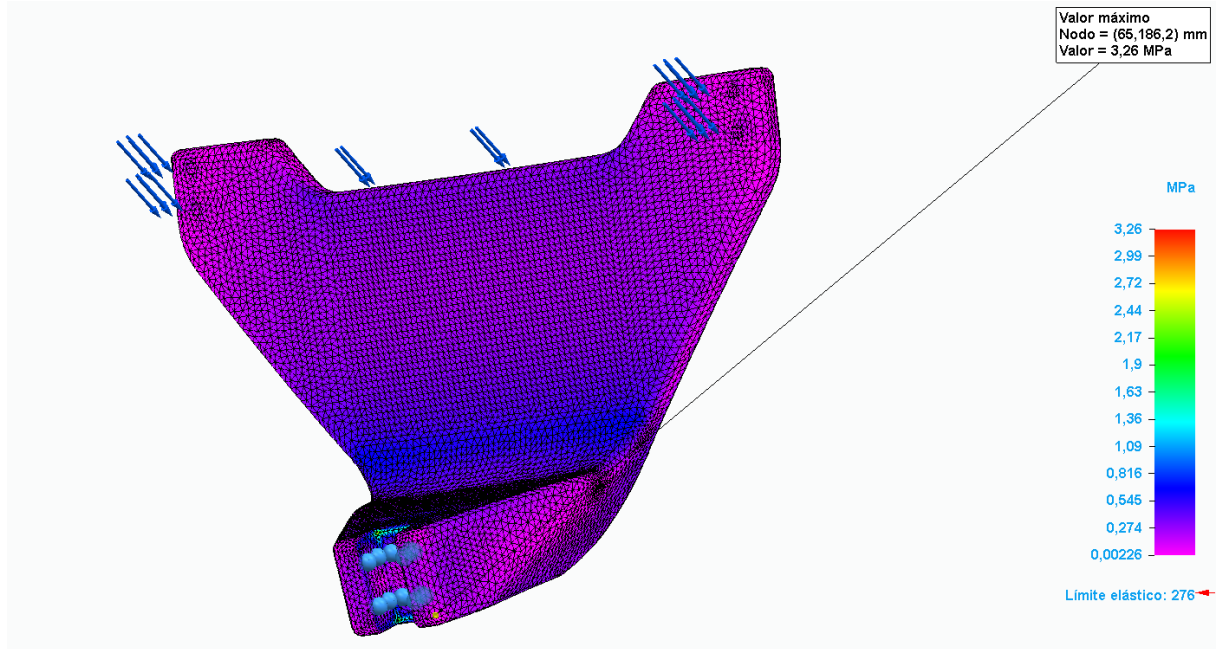


Ilustración 50: Simulación Prototipo 1 para el caso de compresión

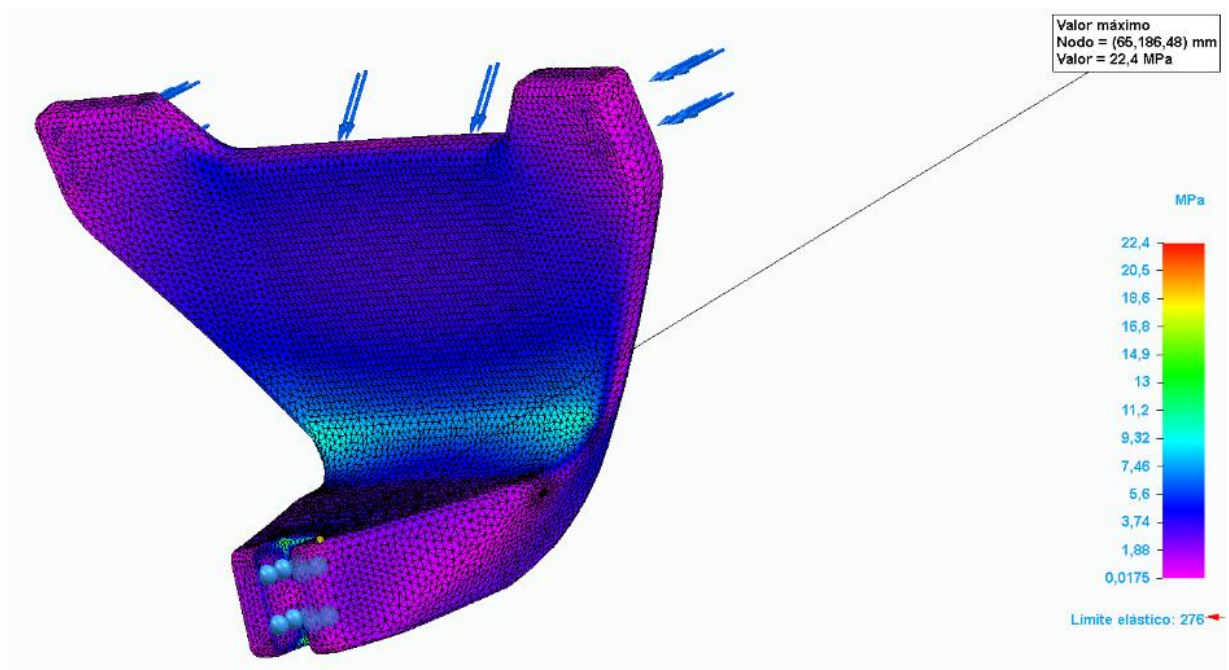


Ilustración 51: Simulación Prototipo 1 para el caso de tracción

Tras estas simulaciones realizadas, se puede observar como la simulación 1, correspondiente al caso de carga a compresión que incluye, entre otras, la acción del viento es la más crítica con una tensión máxima de Von Mises de 22,4MPa.

Por otro lado, debido al poco peso de la cúpula frontal (directamente relacionado con el valor de la fuerza), las cargas inerciales generadas durante la frenada son significativamente inferiores a las producidas por la acción del viento. Por ello, el caso de frenada no supone un riesgo para la estabilidad de la pieza y de cara a análisis posteriores se ha decidido descartar esta simulación de cargas.

La tensión máxima se obtiene mediante la primera simulación en una de las esquinas interiores del anclaje a la pipa de dirección. Esto se debe a la necesidad de que las paredes de este anclaje sean perfectamente rectas y perpendiculares entre ellas para la correcta unión entre piezas. El cambio brusco de geometría sin redondear favorece la concentración de tensiones críticas porque el flujo de cargas dentro del material deja de distribuirse de forma uniforme.

Sin embargo, comparando este valor de 22,4MPa con el valor de límite elástico del material elegido (276Mpa) existe suficiente margen para afirmar que no existe riesgo de deformación permanente en la pieza. Se está trabajando un coeficiente de seguridad muy elevado lo que significa que, bajo las condiciones de carga analizadas, las tensiones permanecen muy por debajo del límite admisible del material y la probabilidad de fallo estructural es reducida.

Cálculo del coeficiente de seguridad (n):

$$n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_x} = \frac{276MPa}{22,4MPa} = 12,32$$

Ambas simulaciones, muestran una capacidad resistente superior a la estrictamente necesaria para las condiciones de carga consideradas. Por lo tanto, se podrá llevar a cabo una gran reducción de masa gracias a la optimización topológica, manteniendo la resistencia y rigidez estructural.

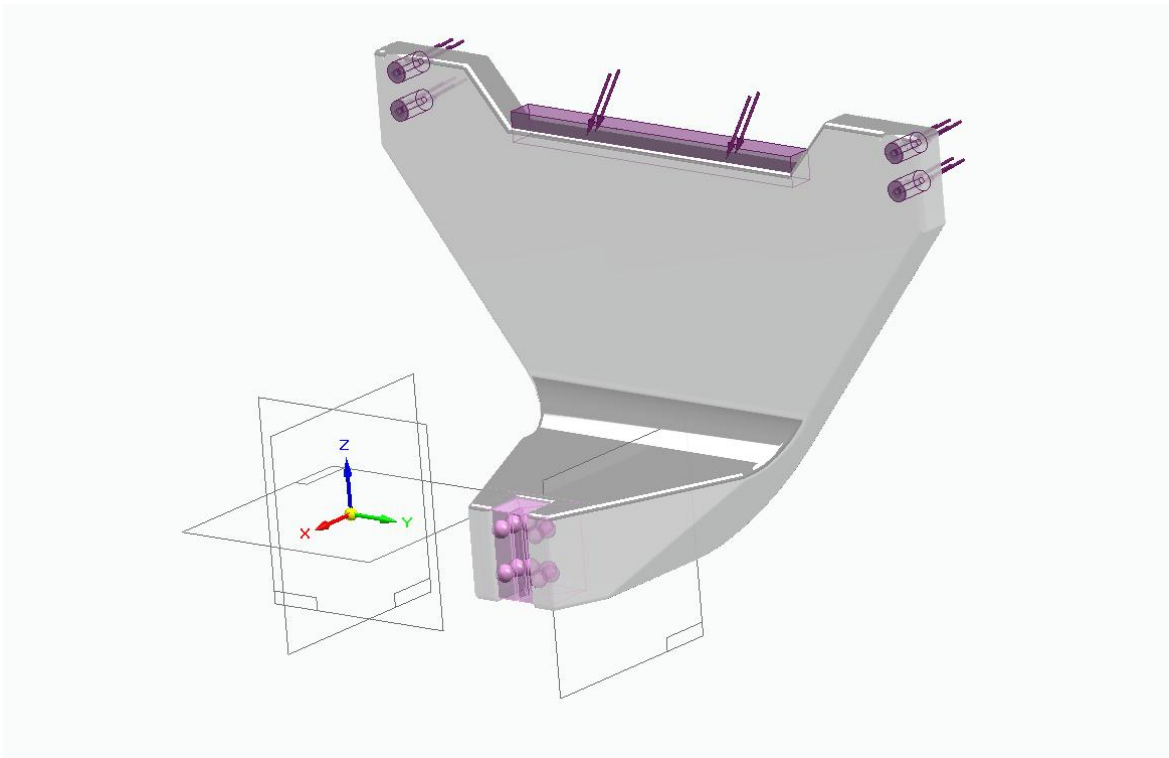
### **5.1.2. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA**

Una vez realizado el diseño y una primera simulación de cargas, se realiza una primera optimización topológica.

Para ello, se deben establecer las fuerzas en los mismos puntos y con la misma dirección que la simulación descrita anteriormente, pero, añadiendo un valor de desplazamiento máximo permitido. Este valor representa la distancia que se mueve un punto de la pieza respecto a su posición original debido a la acción de las fuerzas aplicadas. A mayor desplazamiento permitido, se eliminará mayor material obteniendo una pieza más ligera,

mientras que, si se exige un desplazamiento pequeño, la geometría resultante será más robusta y pesada.

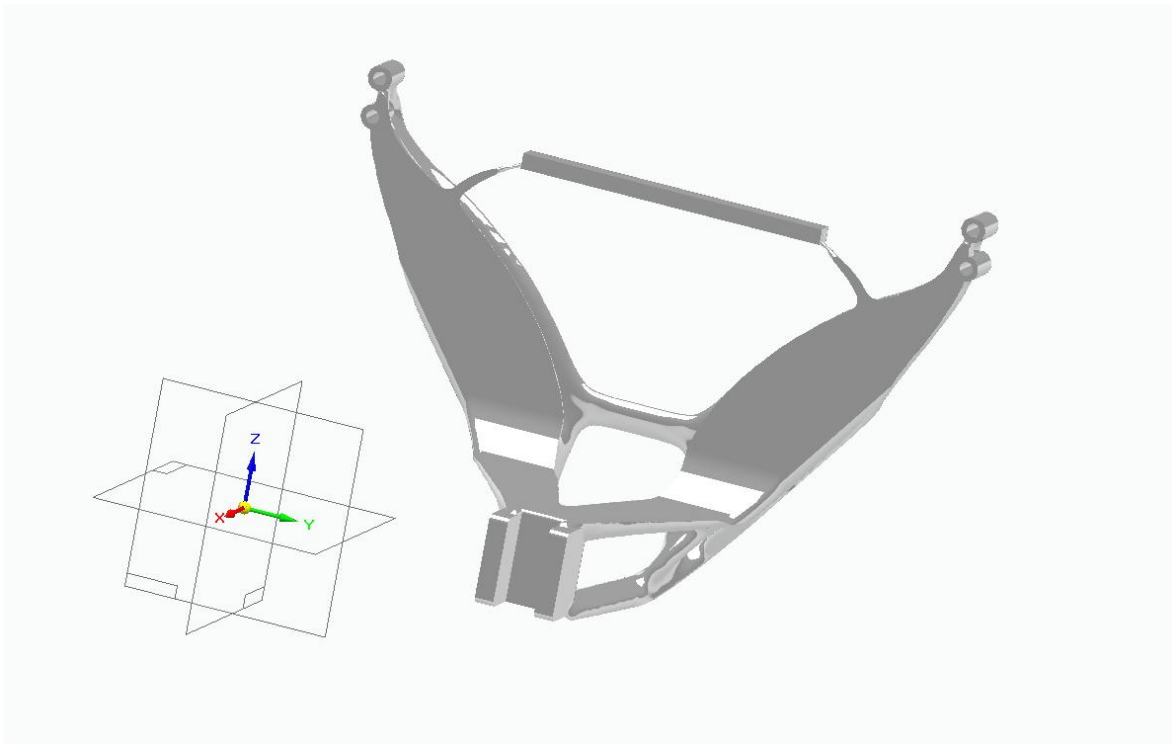
Para esta optimización, se establecen una serie de condiciones de contorno que se mantendrán para el resto de las optimizaciones. La zona fija en el anclaje a la pipa de dirección que es necesario conservar tal y como está en el modelo inicial. Y, la simetría plana en la optimización respecto al plano vertical de simetría de la araña que debe haber sido creado previamente. Al aplicar esta restricción, se obliga al software a generar una solución que sea idéntica a ambos lados de dicho plano. Evitando un diseño asimétrico, se evita una araña difícil de fabricar y un mejor reparto de los esfuerzos.



*Ilustración 52: Condiciones de contorno optimización Prototipo 1*

Se procede a la optimización al 70% con un tamaño de vóxel elegido de 1,79mm o calidad 80 que permanecerá constante para todas las optimizaciones posteriores que se realicen.

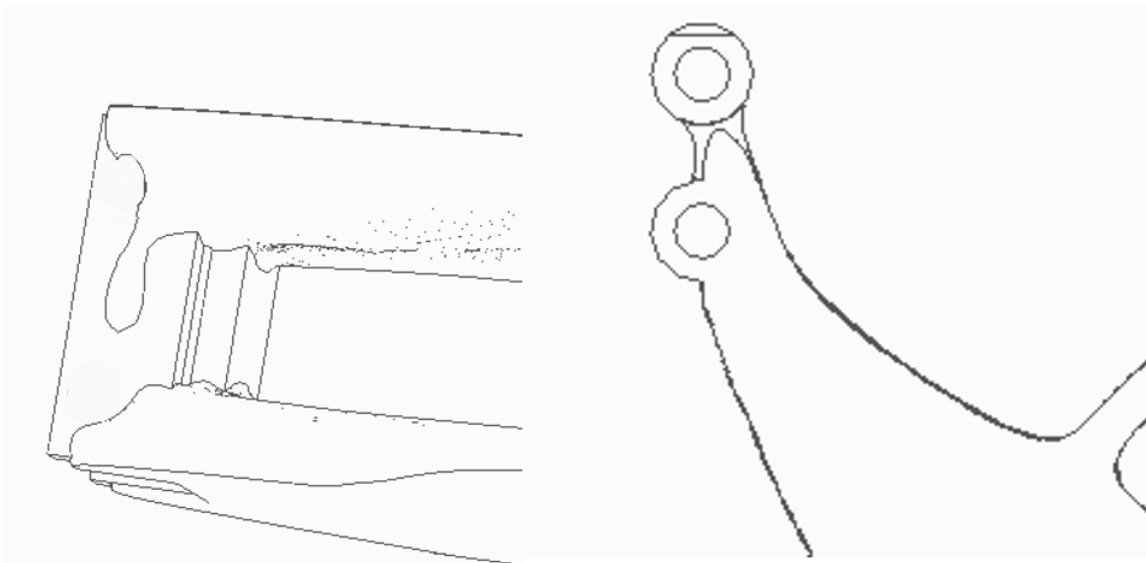
El tamaño de vóxel, o calidad de la malla voxelizada es el parámetro que define la resolución con la que el software rellena el volumen de diseño para calcular y optimizar la pieza. Un valor reducido incrementa la precisión del análisis permitiendo una mejor representación de la geometría y distribución de tensiones, aunque requiere más tiempo de cálculo. En cambio, un tamaño mayor reduce el coste computacional, pero genera geometrías más simplificadas.



*Ilustración 53: Optimización al 70% del Prototipo 1*

Tras obtener los resultados de esta se descubren a primera vista fallos a corregir. Por lo tanto, se decide corregir el modelo inicial añadiendo las correcciones sin la necesidad de simular este modelo optimizado.

Los tornillos superiores que unen el cristal delantero quedan demasiado desprotegidos teniendo en cuenta que son los que transmiten las fuerzas y la parte posterior del anclaje a la dirección de la motocicleta queda demasiado estrecha tras la reducción de masa.



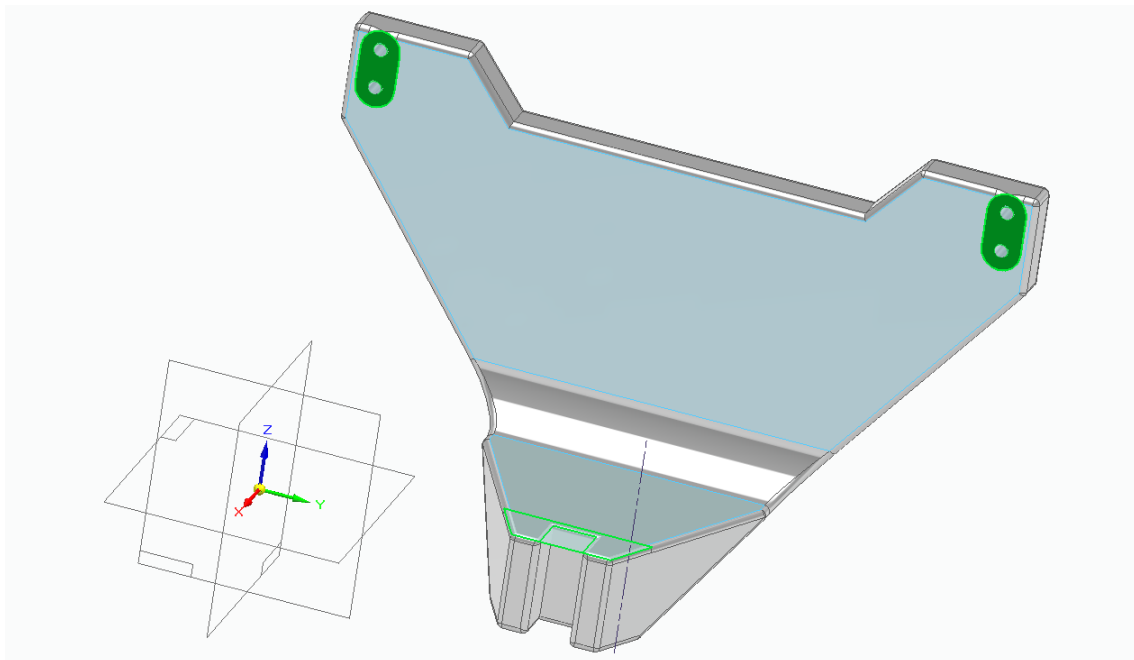
*Ilustración 54: Errores en la optimización del Prototipo 1*

## 5.2. PROTOTIPO 2

Como se ha indicado, identificados los problemas de la optimización del Prototipo 1, se diseña un segundo prototipo añadiendo zonas restringidas.

Estas, son regiones que el algoritmo está obligando a conservar manteniendo el material de dichas áreas para garantizar la funcionalidad y el montaje de la araña. De este modo, la optimización se realiza únicamente en las zonas donde es posible reducir material.

Para añadir estas secciones, es necesario crear un boceto en el modelo inicial y añadir un pequeño espesor para que a la hora de optimizar el software detecte esa zona. Por ello, al tener que modificar el diseño del Prototipo 1, se crea un nuevo modelo, el Prototipo 2.



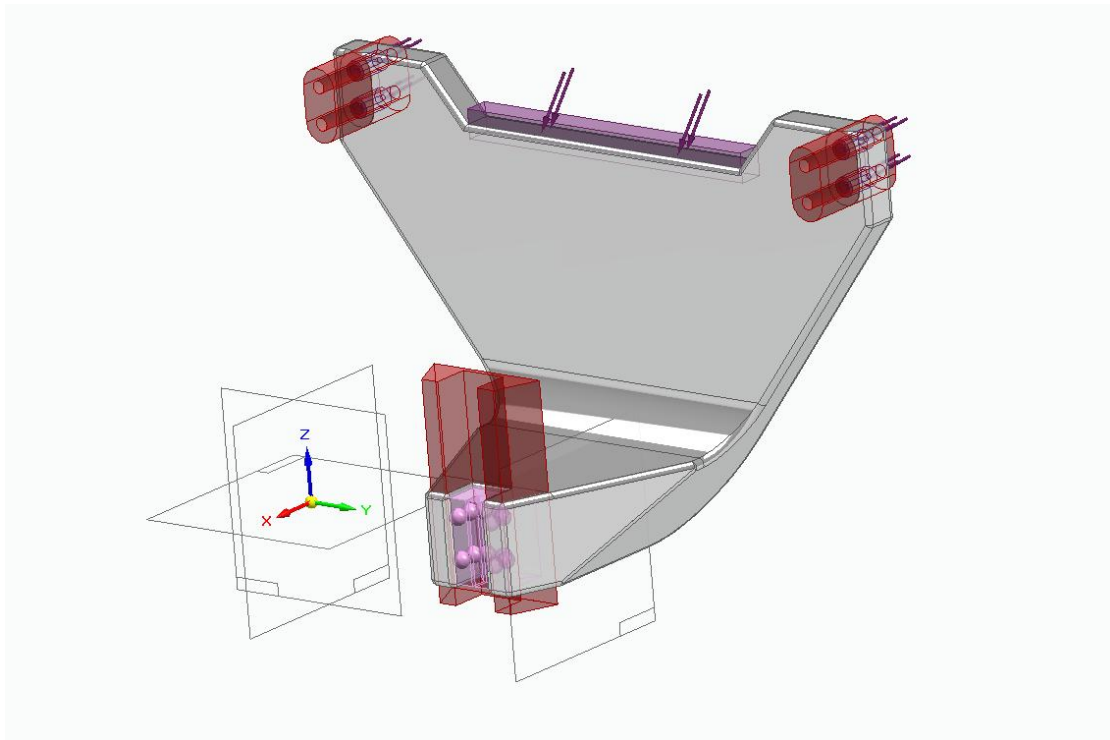
*Ilustración 55: Prototipo 2*

Al añadirse un espesor de tan solo 0,1mm en las zonas seleccionadas, se ha decidido no volver a simular ya que este incremento representa una variación muy pequeña respecto a las dimensiones globales de la araña con un aumento de peso prácticamente despreciable.

### 5.2.1. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

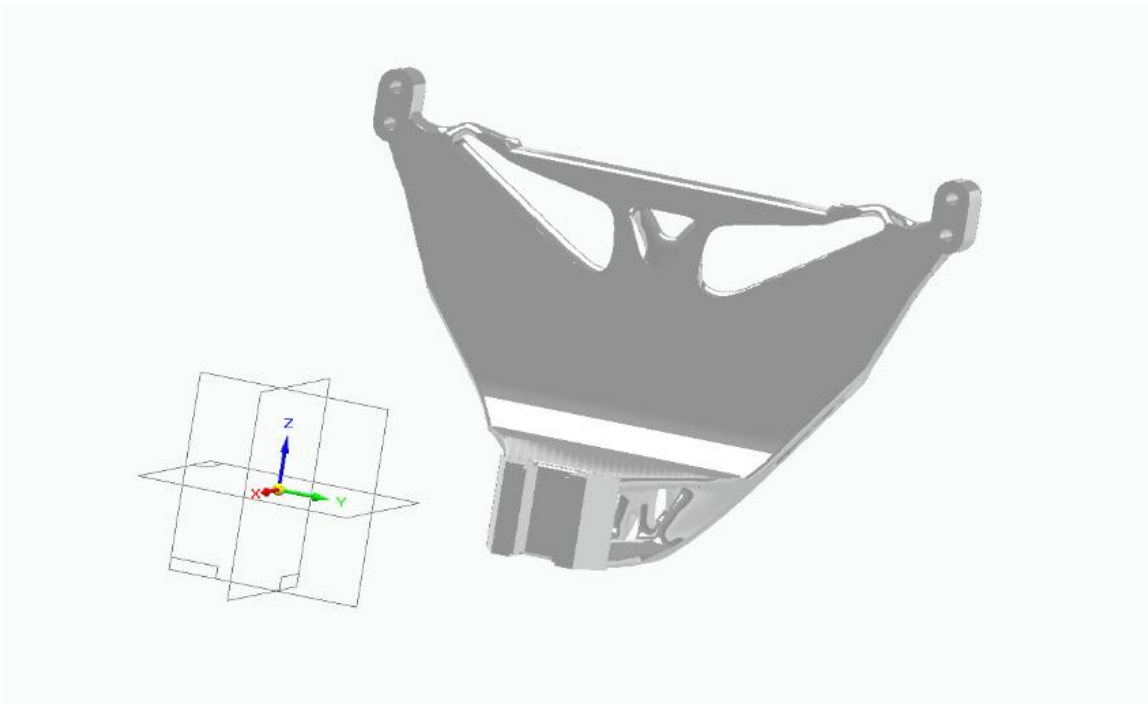
Se procede de nuevo a la optimización topológica. Gracias a la simulación inicial, se conoce la gran capacidad de reducción de masa que tiene esta pieza y, por lo tanto, se decide empezar con una primera optimización del 50% de reducción de masa.

Para ello, es necesario tener en cuenta que en este caso se deben preservar las secciones establecidas además de las condiciones de fuerzas, soporte fijo y simetría.



*Ilustración 56: Condiciones de contorno optimización Prototipo 2*

### **Iteración 1 – 50%**



*Ilustración 57: Optimización al 50% del Prototipo 2*

De acuerdo con la metodología, se simula la pieza optimizada para comprobar su validez.

Pero antes, se deben realizar una serie de pasos que se repetirán para simulaciones de optimizaciones futuras. En primer lugar, convertir la optimización en un cuerpo de malla con una tolerancia de conversión de 0,5mm y un ángulo plano de superficie de 1°. Estos dos números se eligen pequeños para que no se distorsione demasiado el modelo original y el optimizado que se va a estudiar. A continuación, se establece la optimización como cuerpo de diseño (geometría a estudiar) y el modelo original como cuerpo de construcción (geometría de referencia).

Una vez simulado, y al no superarse el límite elástico (24,9MPa < 276MPa), se pueden seguir iterando reducciones de masa.

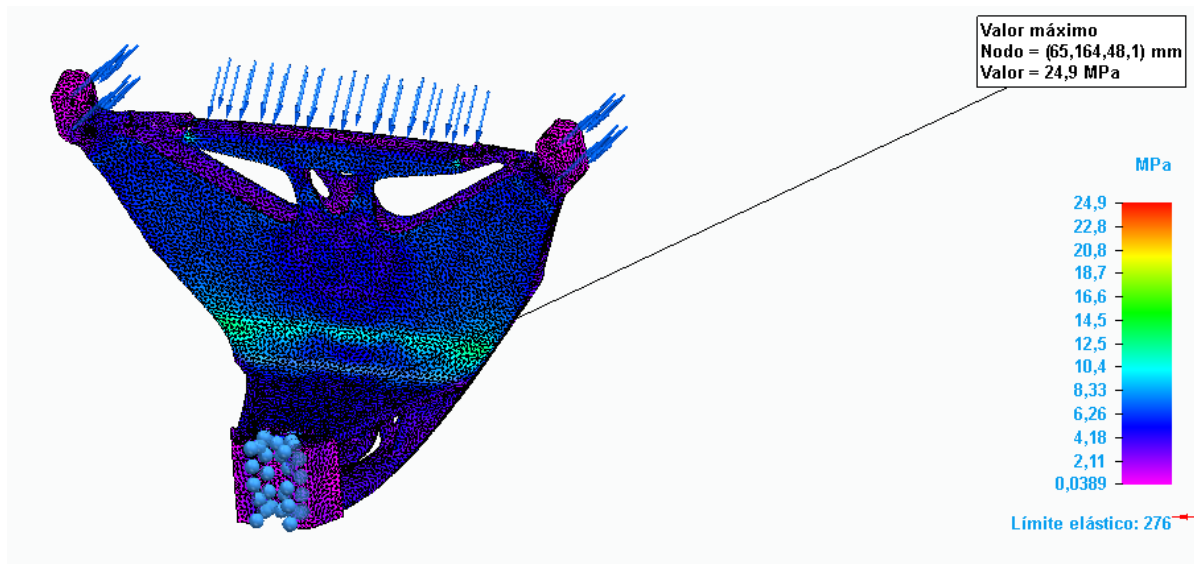
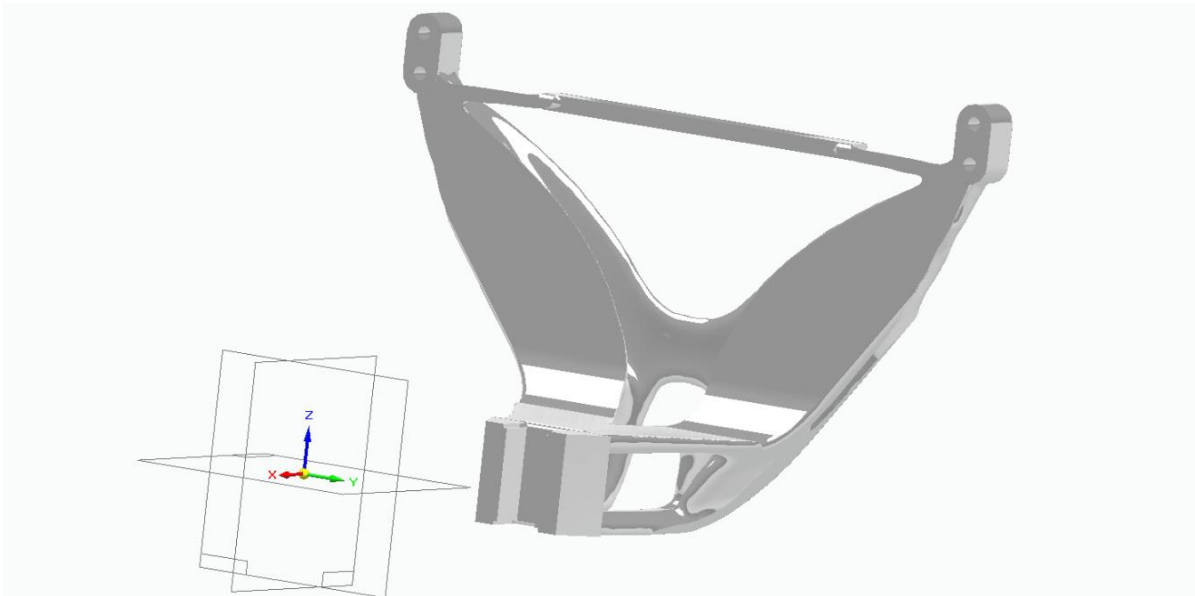


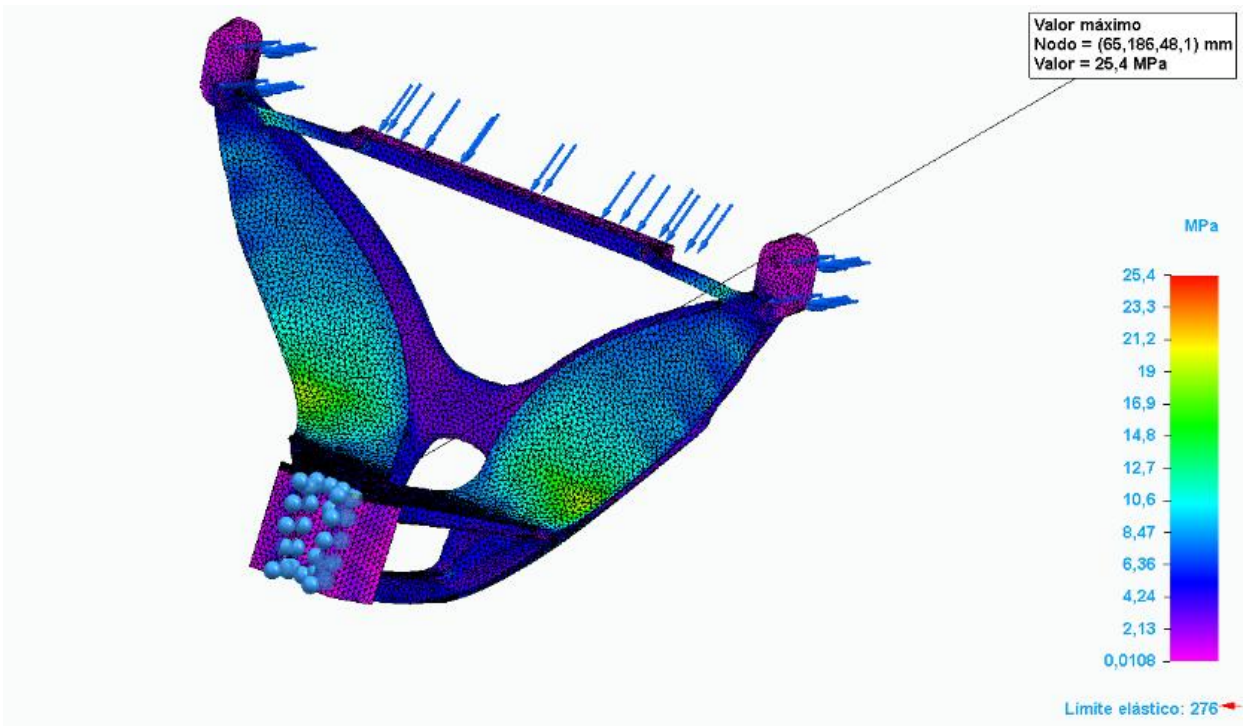
Ilustración 58: Simulación optimización al 50% del Prototipo 2

**Iteración 2 – 60%**



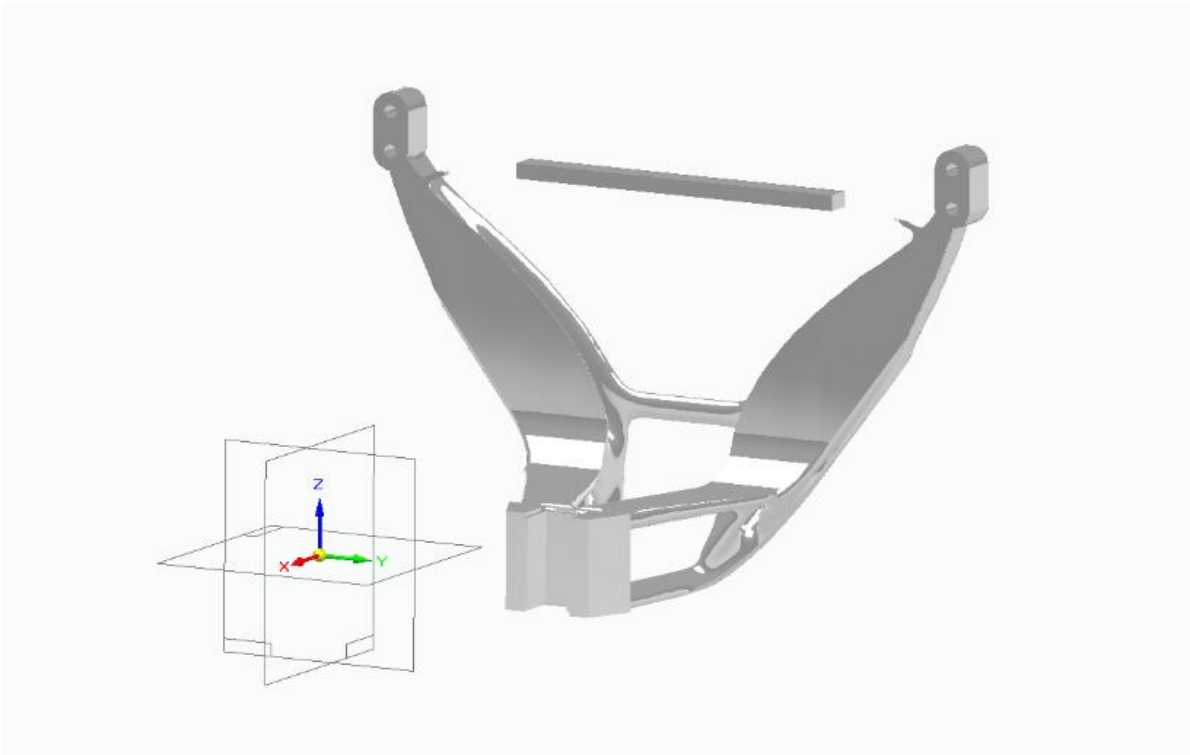
*Ilustración 59: Optimización al 60% del Prototipo 2*

Con respecto a la simulación, no se supera la tensión límite ( $25,4\text{MPa} < 276\text{MPa}$ ), se puede seguir iterando.



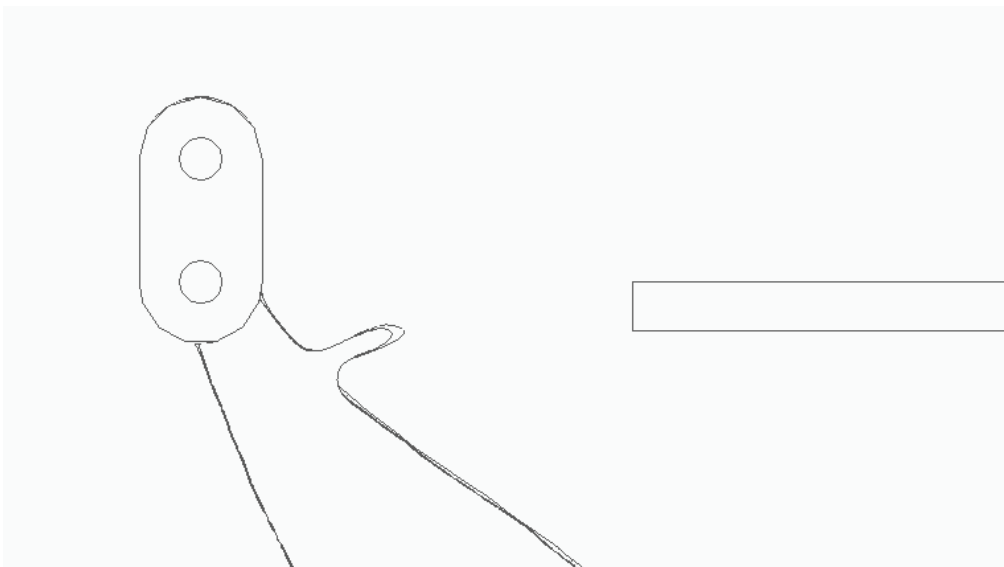
*Ilustración 60: Simulación optimización al 60% del Prototipo 2*

### Iteración 3 – 70%



*Ilustración 61: Optimización al 70% del Prototipo 2*

En este caso, no es necesario simular ya que se obtiene un error en la optimización. La zona superior de la araña que sujetará el *dashboard*, queda al aire. La reducción de masa ha eliminado la unión entre la araña y el soporte.



*Ilustración 62: Error en la optimización del Prototipo 2*

### 5.3. Prototipo 3

Debido al error con la optimización al 70% se hace necesaria la edición del Prototipo 2 añadiendo otra zona restringida a través de la extrusión de un boceto con la geometría requerida. Este tercer prototipo al igual que el segundo se decide no simular debido al pequeño incremento de masa.

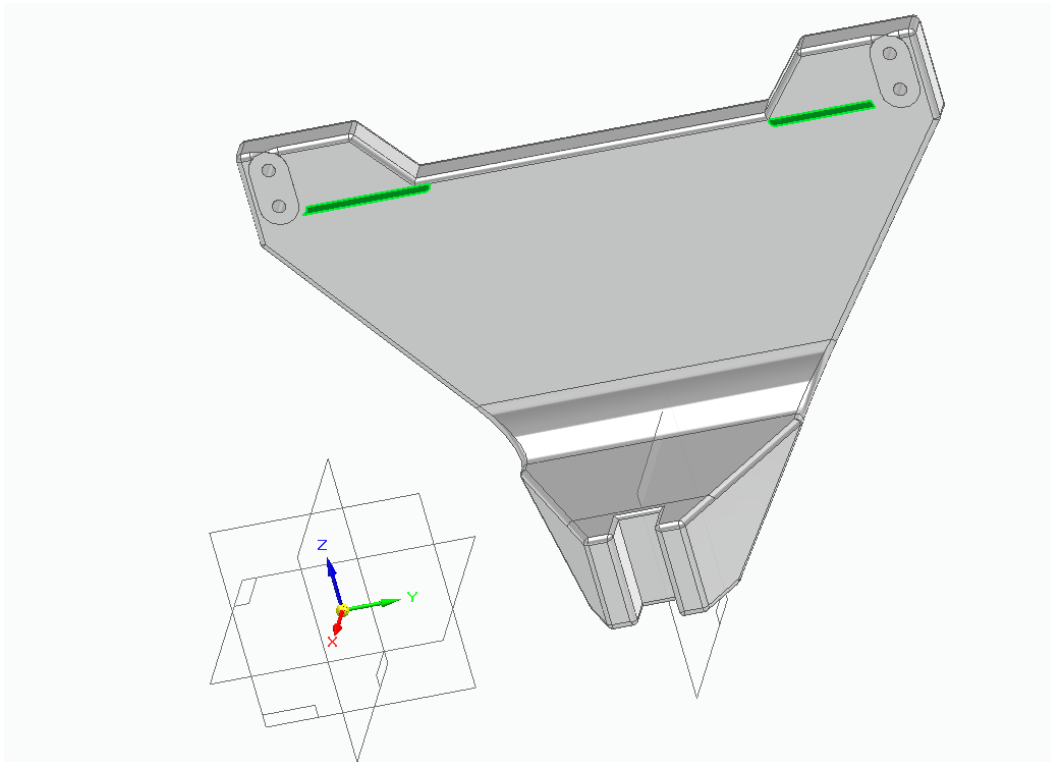
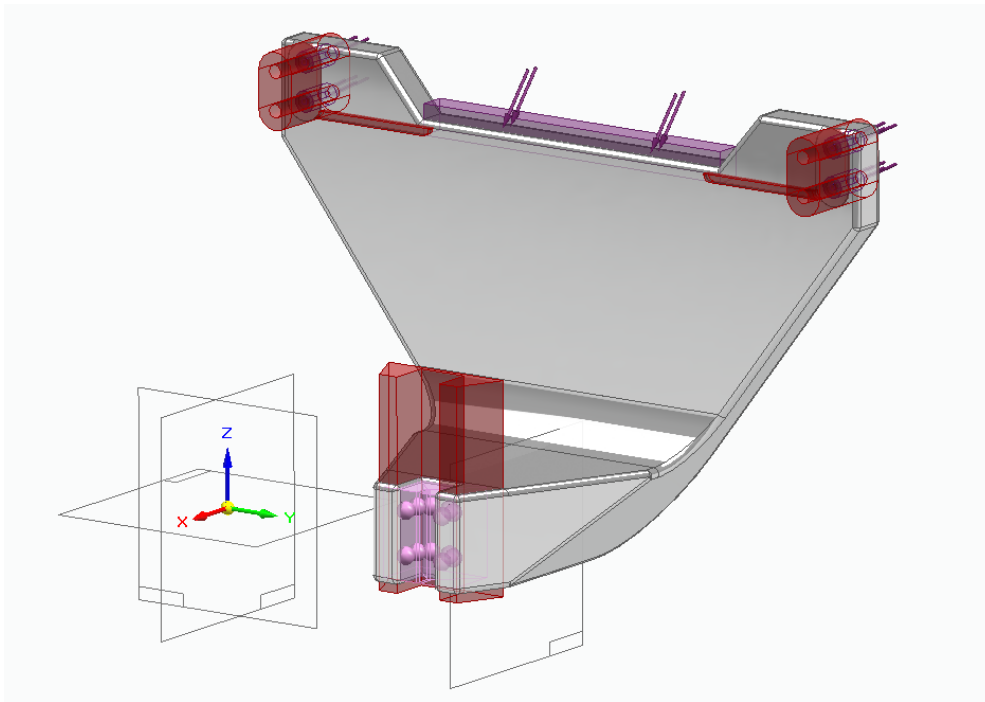


Ilustración 63: Prototipo 3

#### 5.3.1. OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

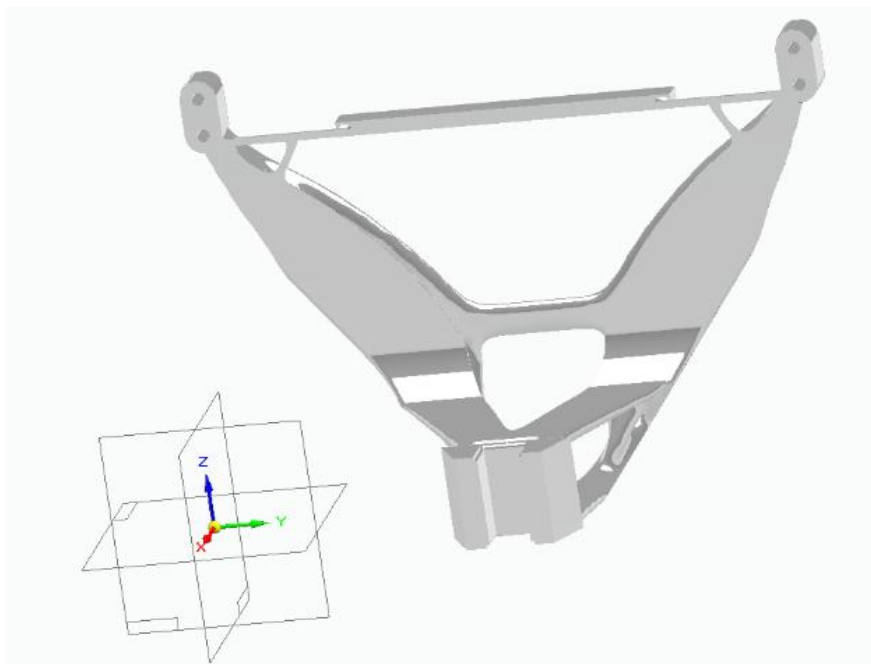
Conservando las condiciones de contorno de los prototipos anteriores, ahora se añade una nueva zona preservada.



*Ilustración 64: Condiciones de contorno optimización Prototipo 3*

### **Iteración 1 – 70%**

Partiendo de la situación anterior en la que se produce el fallo con el Prototipo 2, se realiza la reducción de masa al 70%.



*Ilustración 65: Optimización al 70% del Prototipo 3*

Siguiendo con la metodología y los parámetros establecidos se continua con la simulación de esta optimización. Al no superarse la tensión límite ( $31,6\text{MPa} < 276\text{MPa}$ ), se puede continuar.

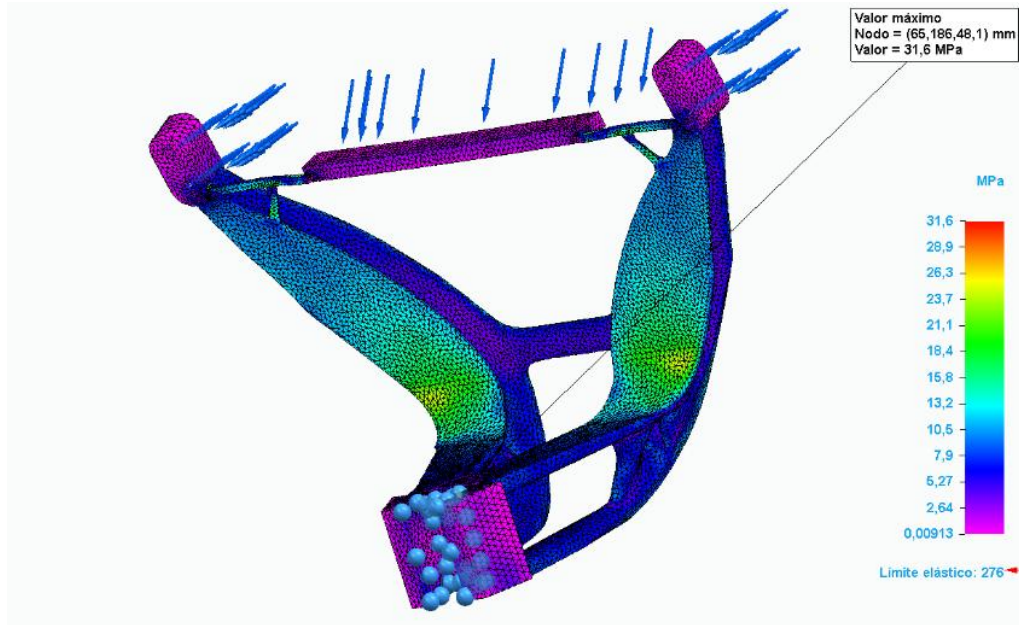


Ilustración 66: Simulación optimización al 70% del Prototipo 3

**Iteración 2 – 85%**

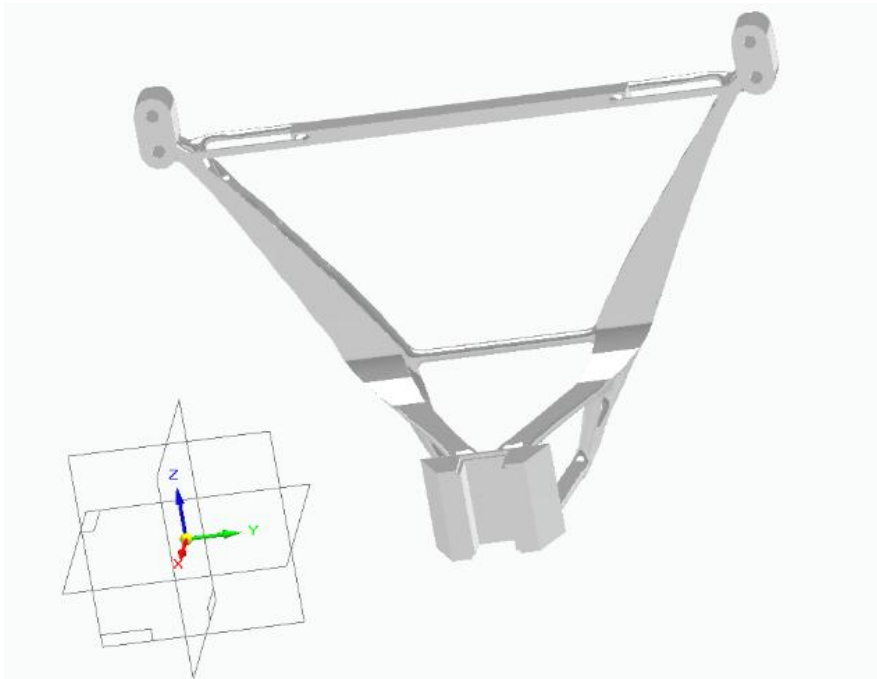
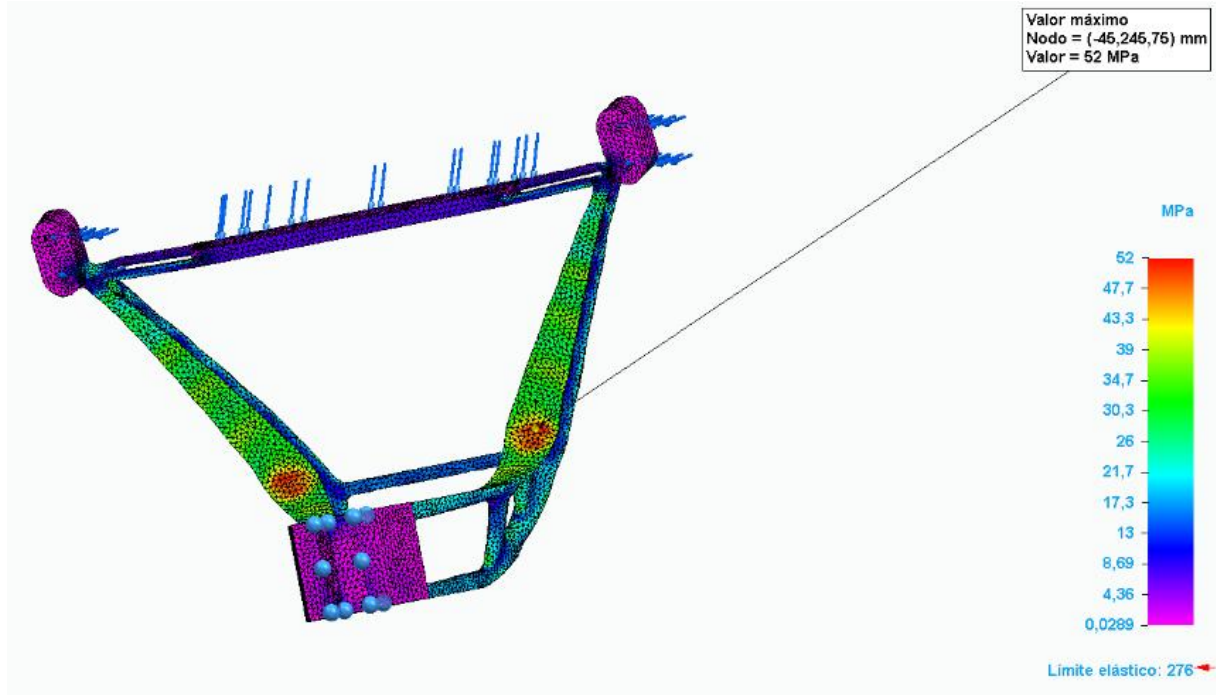


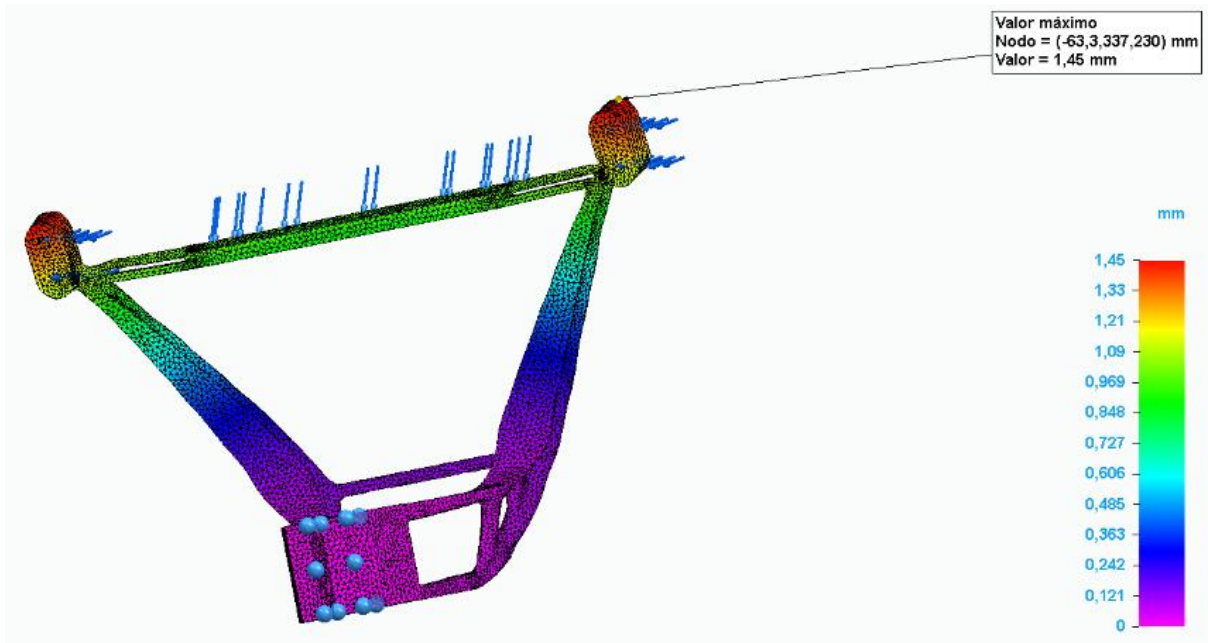
Ilustración 67: Optimización al 85% del Prototipo 3

En esta simulación de tensiones, el valor de la tensión máxima aumenta considerablemente respecto a los casos anteriores, pero, aun así, existe un gran margen con respecto a la tensión límite ( $52\text{MPa} < 276\text{MPa}$ ). Además, el punto donde se alcanza el valor máximo de tensión ya no es una esquina del anclaje inferior rectangular, sino un punto del brazo optimizado.



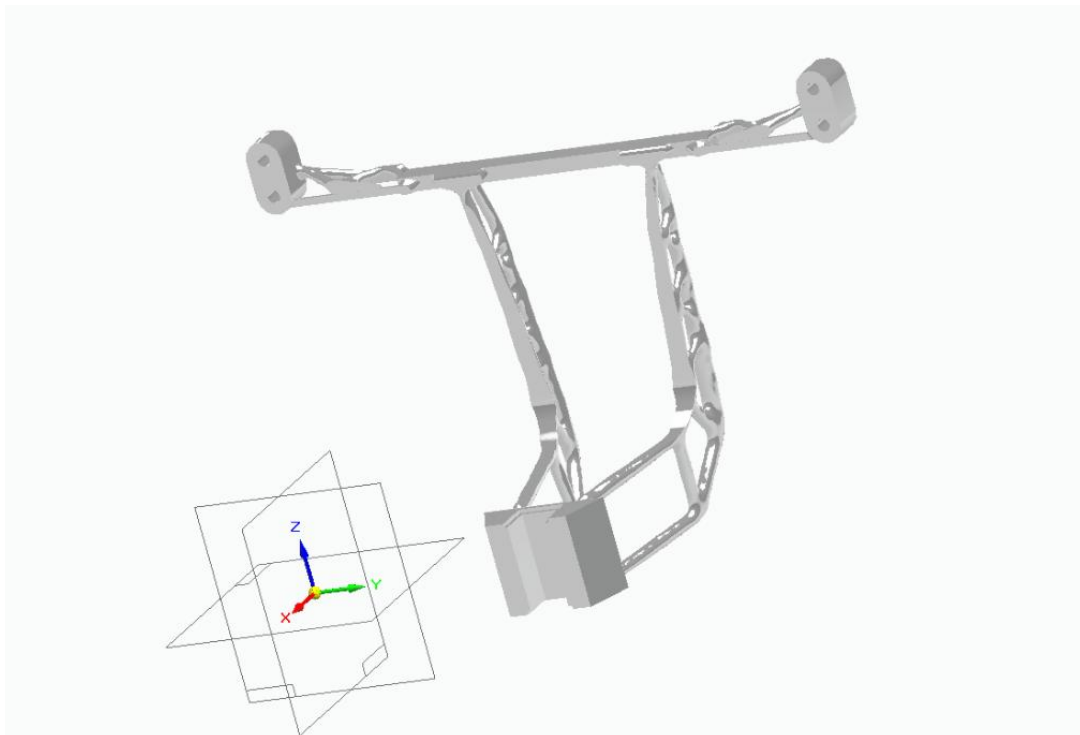
*Ilustración 68: Simulación optimización al 85% del Prototipo 3*

Para esta optimización, además de la simulación de tensiones de Von Mises, se realiza la simulación del desplazamiento. Gracias a esta simulación como se mueve la pieza debido a las fuerzas, el punto de desplazamiento máximo se alcanza en la zona de los tornillos superiores de unión con un valor de 1,45mm.



*Ilustración 69: Simulación desplazamiento optimización al 85% del Prototipo 3*

**Iteración 3 – 90%**



*Ilustración 70: Optimización al 90% del Prototipo 3*

Una vez simulado, esta optimización no es válida ya que se supera el límite elástico del material ( $329\text{MPa} < 276\text{MPa}$ ) pasando de deformación elástica en la que el componente recupera su forma a deformación plástica permanente.

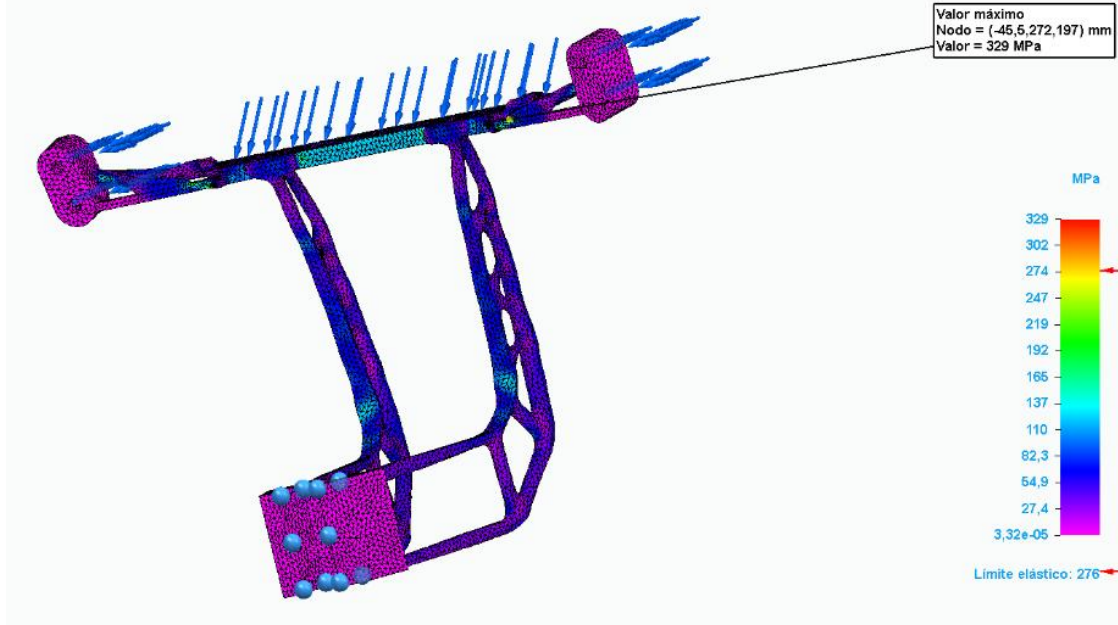


Ilustración 71: Simulación optimización al 90% del Prototipo 3

Tras finalizar las reducciones de masa y comprobar su validez, se elige la iteración 2 del Prototipo 3 para continuar con la metodología del proyecto. En esta, se consigue reducir la masa del modelo inicial de  $4,224\text{kg}$  a  $0,634\text{kg}$ , es decir, se optimiza la pieza en un 85%.

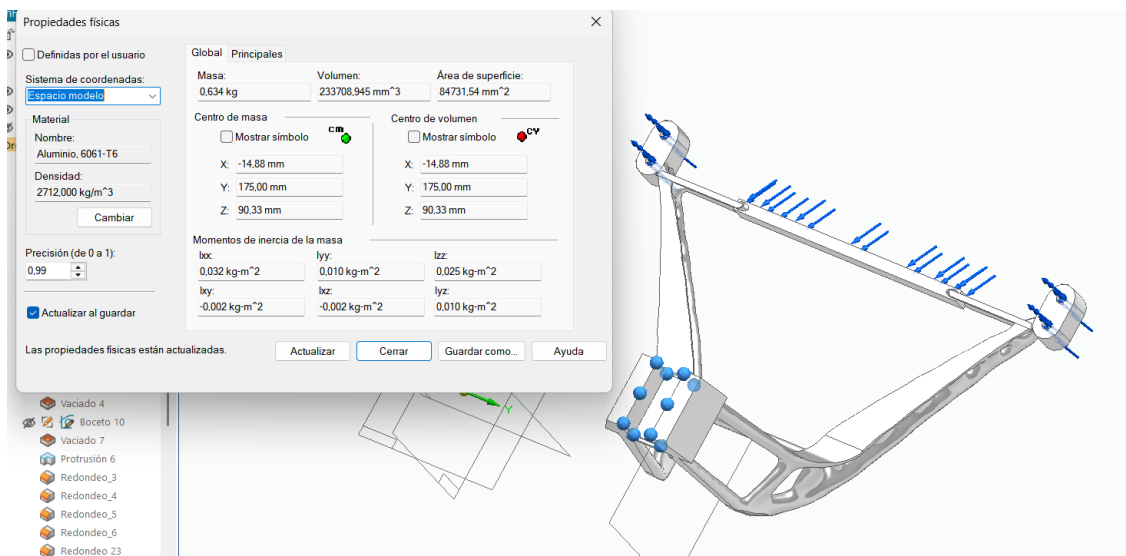
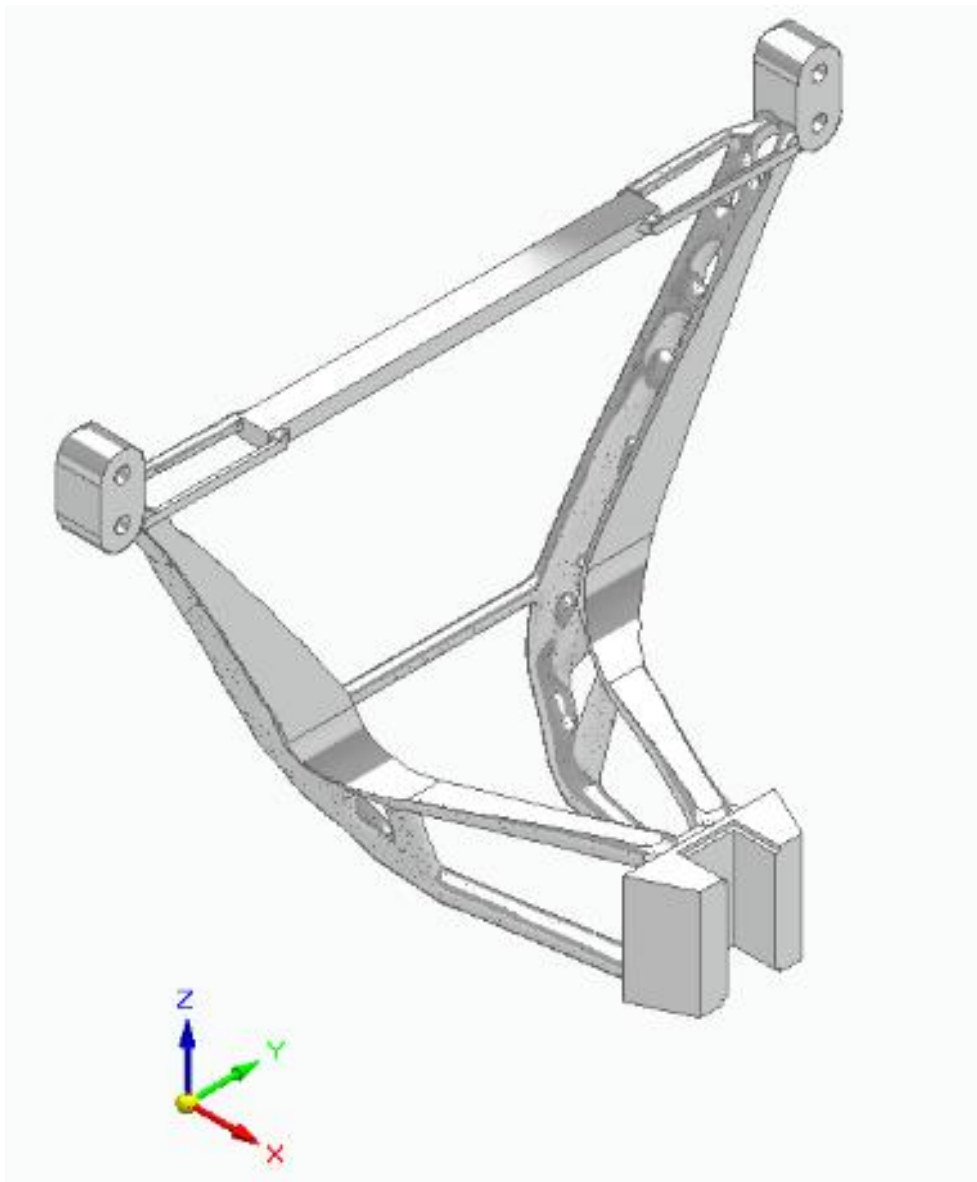


Ilustración 72: Masa final prototipo elegido

Esta vez, la pieza trabaja con un coeficiente de seguridad de 5,31 comparado al 12,32 del modelo inicial. Inicialmente con un coeficiente de seguridad tan grande, la pieza estaba sobredimensionada, conteniendo más material del necesario y por lo tanto más peso, perjudicial de cara a la competición. De esta manera, un coeficiente de 5 es más razonable para este tipo de componente.

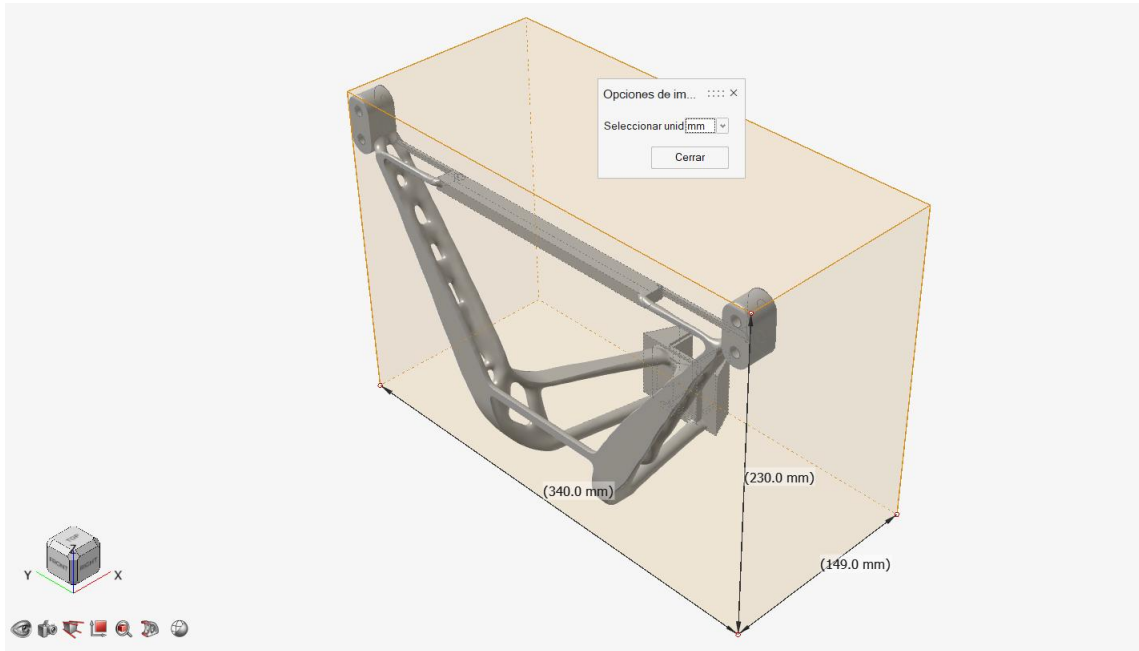
$$n = \frac{\sigma_{adm}}{\sigma_x} = \frac{276MPa}{52MPa} = 5,31$$



*Ilustración 73: Prototipo con reducción de masa al 85%*

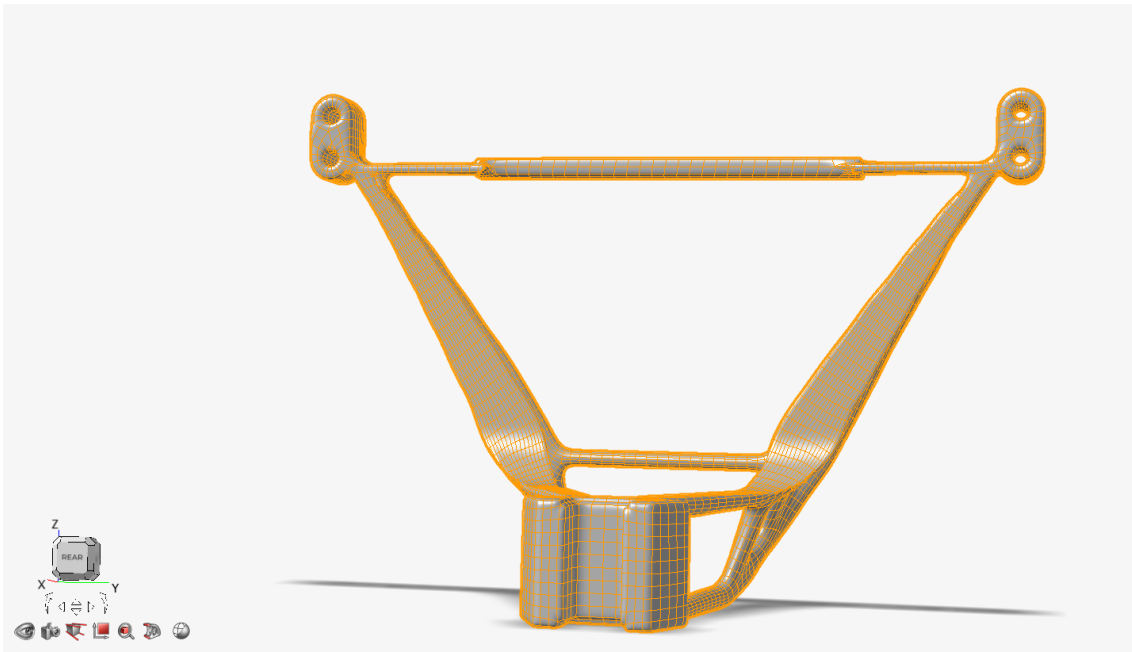
## 5.4. REDISEÑO

Obtenida una geometría válida y de acuerdo con la metodología descrita, se procede a suavizar y convertir las superficies de la pieza para obtener la geometría definitiva mediante el software Altair Inspire. Para ello, se exporta el fichero de SolidEdge .par como fichero .stl con una tolerancia de conversión de 0,01, un ángulo plano de superficie de 3° y con las medidas en milímetros.



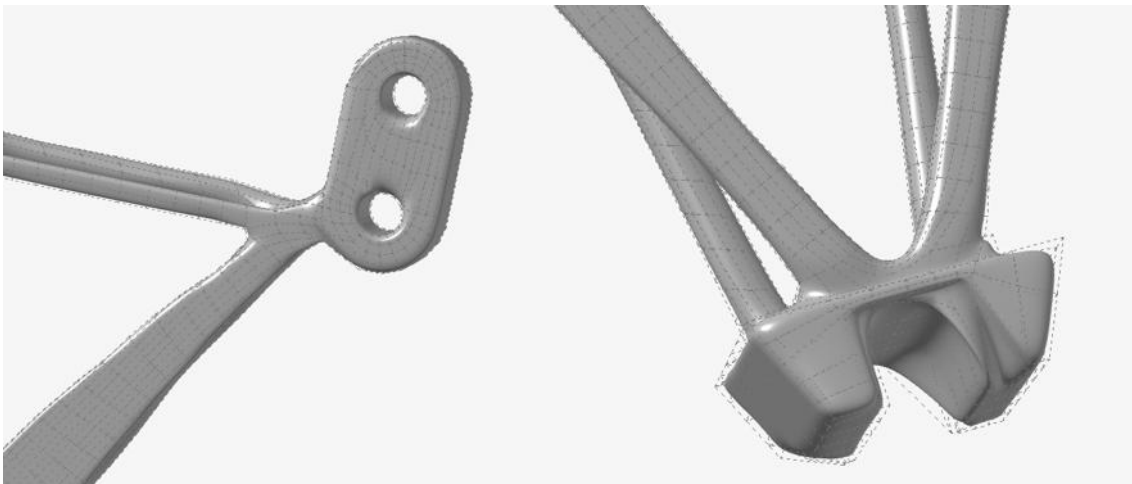
*Ilustración 74: Araña en Altair Inspire*

A continuación, se convierte el diseño a un modelo PolyNURBS mediante el comando Ajustar. Esta, es una tecnología que transforma una geometría optimizada, formada por superficies orgánicas y complejas, en un modelo con superficies continuas y suavizadas que se pueden editar. Eligiendo un valor de caras de PolyNURB de 2500 y una curvatura de 50% que determinan el nivel de detalle de la geometría y un equilibrio entre fidelidad geométrica y suavidad de las superficies.



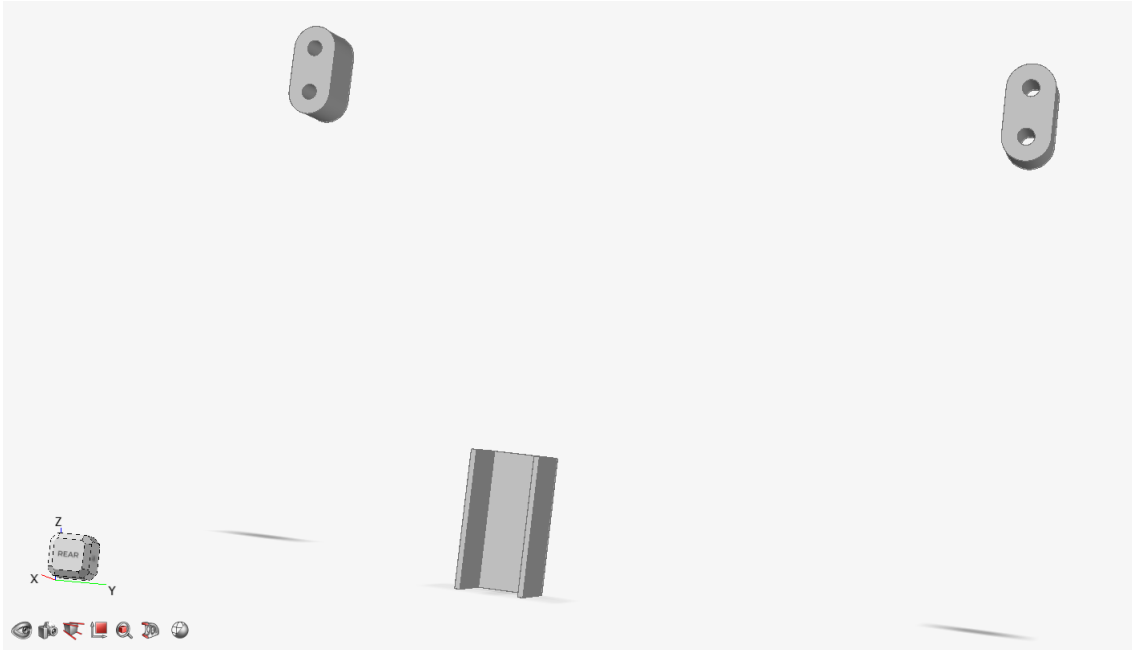
*Ilustración 75: Prototipo convertido a PolyNURBS*

Con la pieza convertida a PolyNURBS, se observan una serie de problemas que se deben corregir. La unión superior al carenado no se puede suavizar ya que se pierden los tornillos originales. Además, el anclaje inferior que se une a la dirección ha dejado de ser un rectángulo de lados perpendiculares lo que imposibilita la unión entre partes.

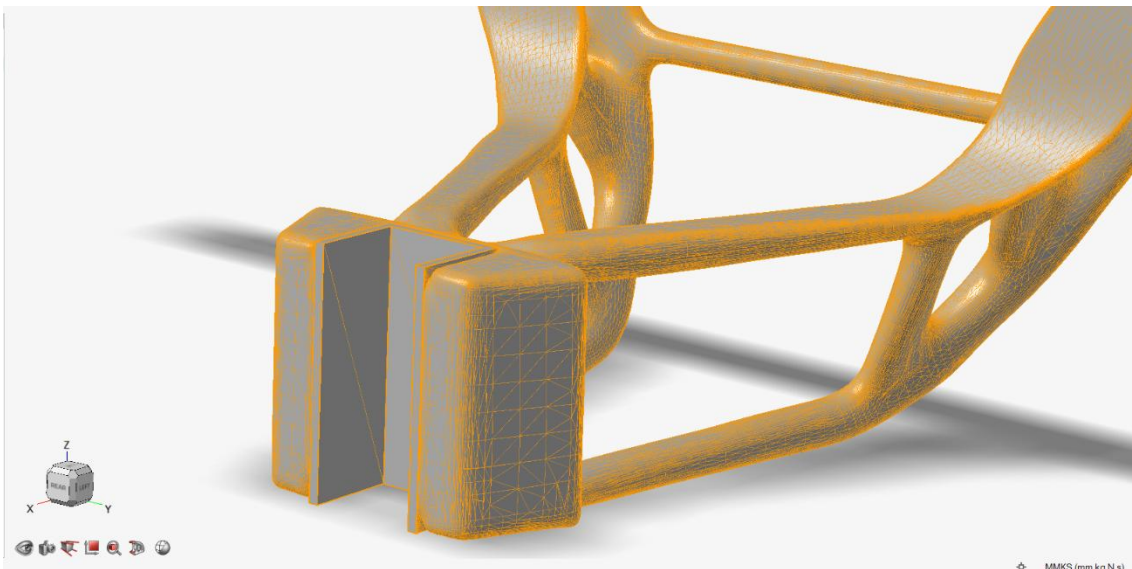


*Ilustración 76: Errores del prototipo suavizado*

Por consiguiente, se deben crear estos componentes a conservar mediante la herramienta bosquejo y la extrusión de estos para eliminar de la pieza suavizada dichas partes mediante la herramienta booleano sustraer y unir las extrusiones a la pieza mediante booleano combinar eligiendo como objetivo la PolyNURB y como herramienta la extrusión.

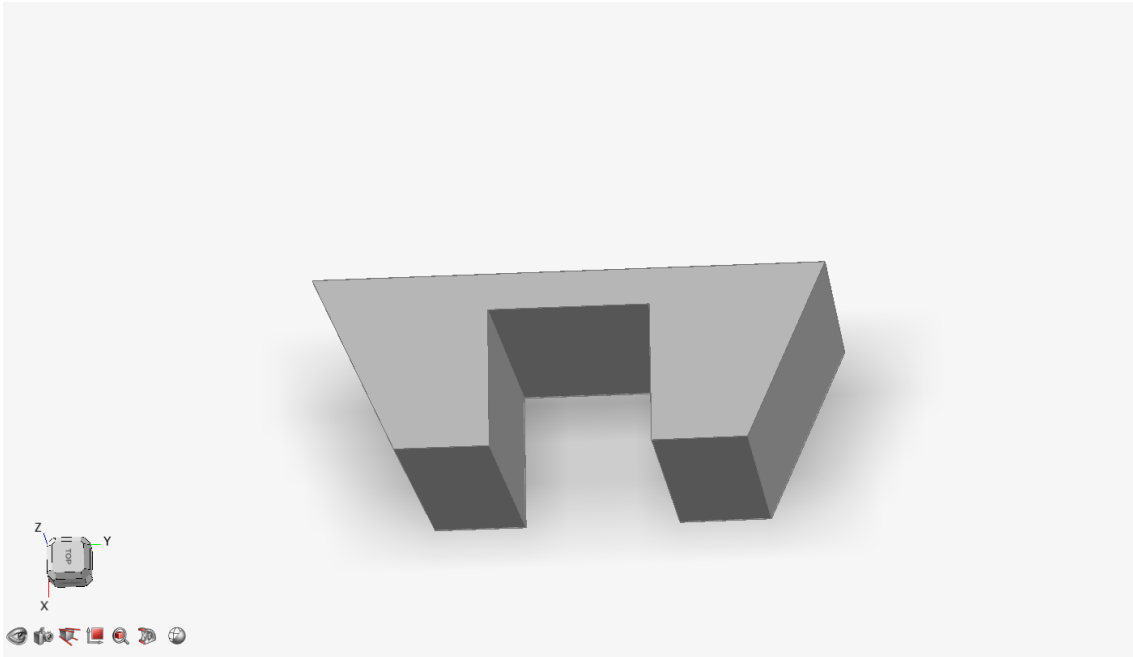


*Ilustración 77: Extrusiones para conservación*

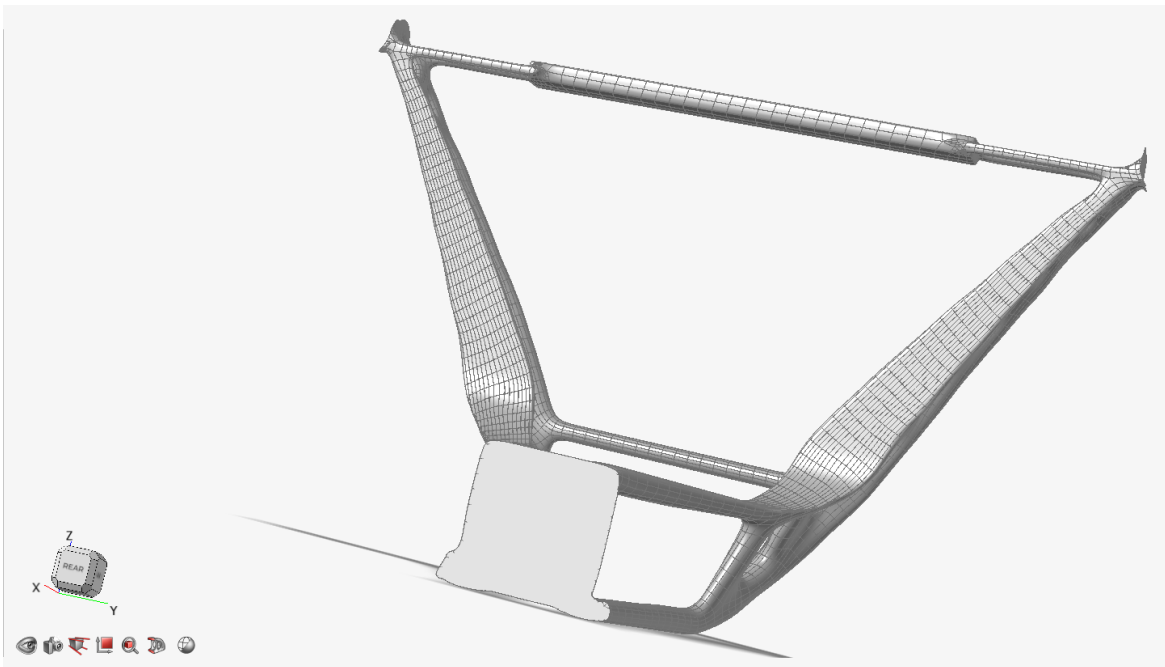


*Ilustración 78: Aparición de esquinas por la conservación de paredes inferiores*

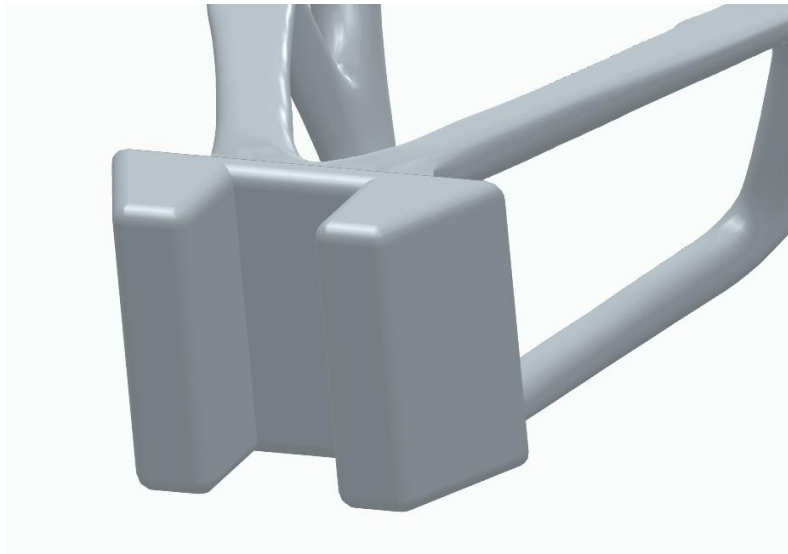
Conservando solo las paredes perpendiculares interiores del anclaje rectangular, aparecen esquinas que crean una geometría problemática donde se concentran grandes tensiones. Por eso, se decide conservar todo el anclaje inferior suavizando posteriormente las esquinas de manera manual.



*Ilustración 79: Extrusión para mantener anclaje inferior completo*



*Ilustración 80: Eliminación de partes a conservar en la PolyNURB*



*Ilustración 81: Extrusión suavizada anclaje inferior*

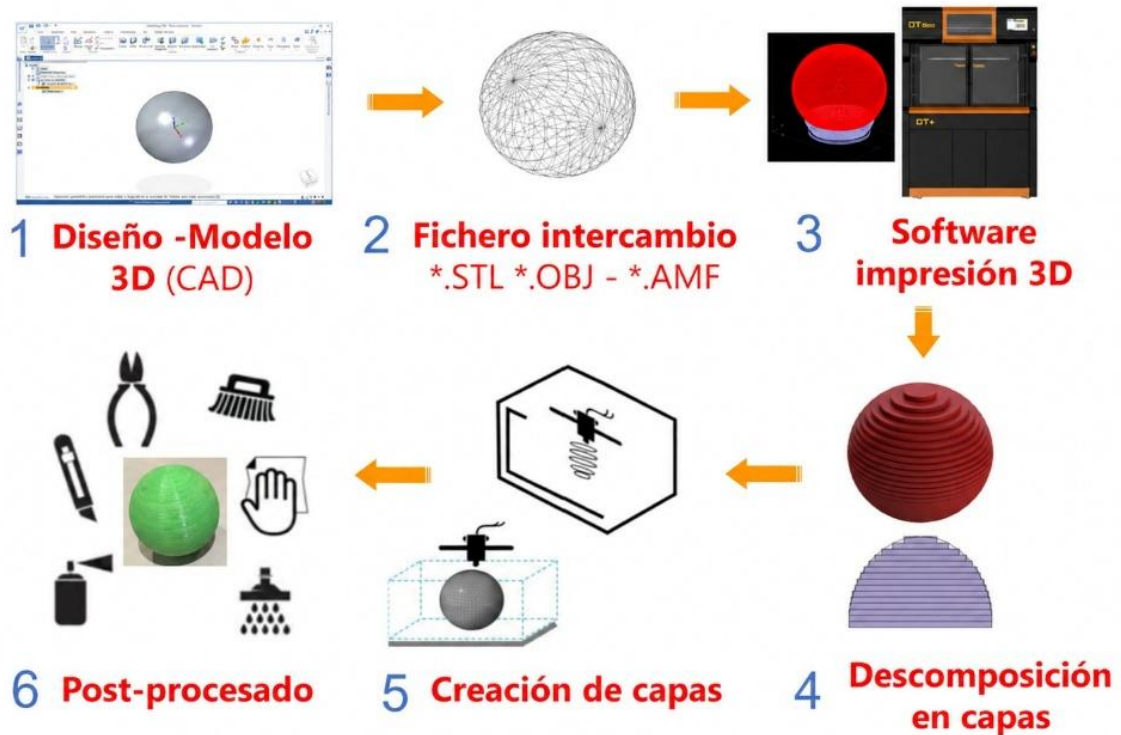
Una vez suavizado se obtiene el siguiente prototipo:



*Ilustración 82: Resultado final del prototipo*

## 5.5. FABRICACION

Para realizar la fabricación de componentes mediante impresión 3D, se establece una metodología basada en una serie de pasos para garantizar el éxito del proceso.



*Ilustración 83: Metodología para la fabricación 3D*

Es importante distinguir dos tipos de prototipos cuando se realizan componentes por fabricación aditiva.

Por un lado, el Prototipo de prueba que puede realizarse con fines estéticos o para comprobar el correcto montaje de la pieza. Este tipo de prototipo permite validar dimensiones, interferencias y encaje entre componentes, sin que sea necesario usar el material final normalmente más costosos ya que no se comprueban sus propiedades mecánicas. Su objetivo principal es detectar errores de diseño antes de pasar a las siguientes fases.

Y, por otro lado, el Prototipo funcional o final que, se fabrica con la intención de ser utilizado en condiciones reales de servicio. En este caso, además de la geometría correcta, se busca que el material y el proceso de fabricación garanticen resistencia mecánica, estabilidad dimensional y durabilidad. Por ello, se seleccionan materiales más técnicos y parámetros de impresión más precisos.

Como ya se ha explicado antes, existen numerosos tipos de impresión 3D en función del proceso de fabricación y del material utilizado. En concreto, para la fabricación de la araña, se tendrán en cuenta tres de ellos:

- **FDM** (*Fused Deposition Modeling* o Modelado por Deposición Fundida)
- **SLA** (*Stereolithography* o Estereolitografía)
- **SLS / DMLS** (*Selective Laser Sintering* o Sinterizado Selectivo por Láser) / (*Direct Metal Laser Sintering* o Sinterizado Directo de Metal por Láser)

### 5.5.1. TECNOLOGIAS DE IMPRESION

El siguiente paso, es determinar para cada una de las tecnologías de impresión, la orientación de la pieza y el uso de soportes ya que, estos factores influyen directamente en la calidad final, el acabado superficial y la resistencia de la pieza.

En el caso de FDM se elige la cara más plana y amplia como base de impresión para mejorar la estabilidad durante el proceso y reducir deformaciones. Se hace necesario el uso de soportes para la impresión de geometrías salientes.

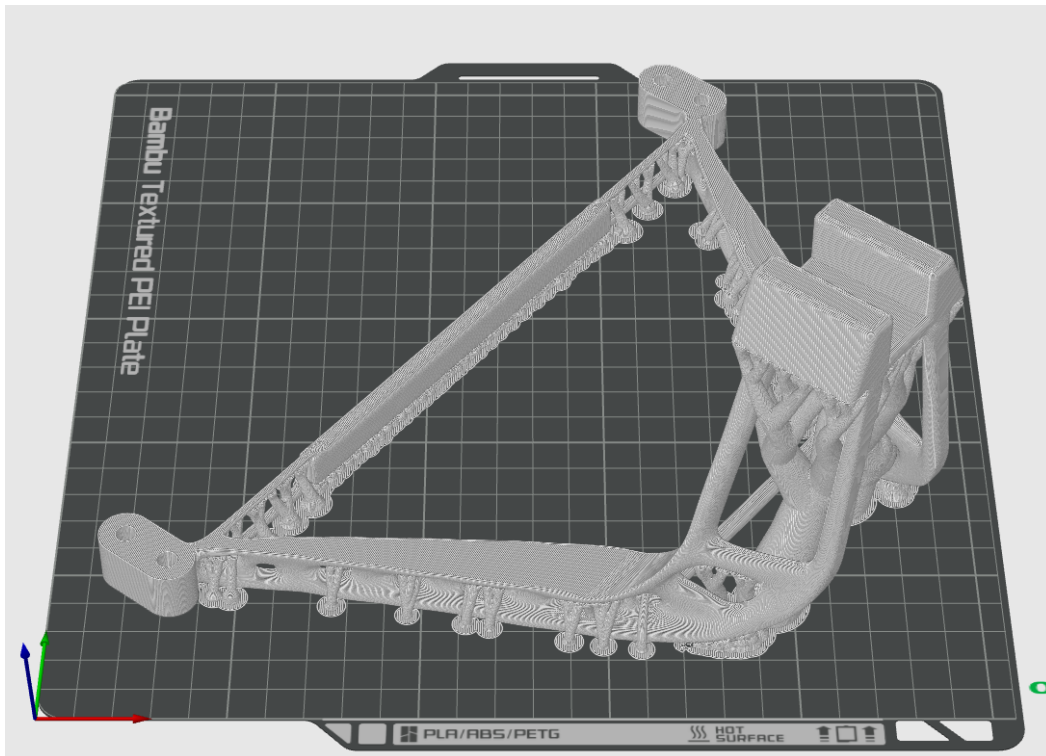
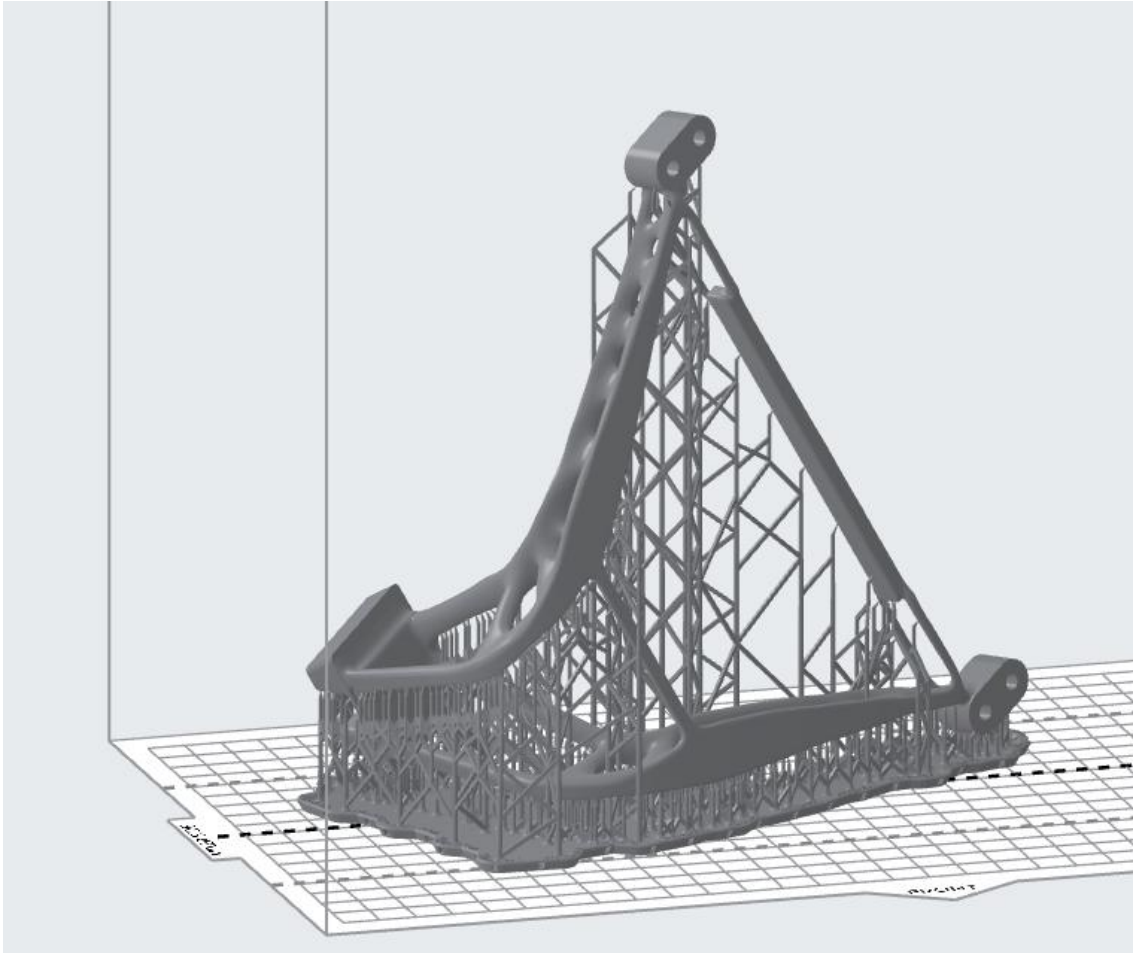


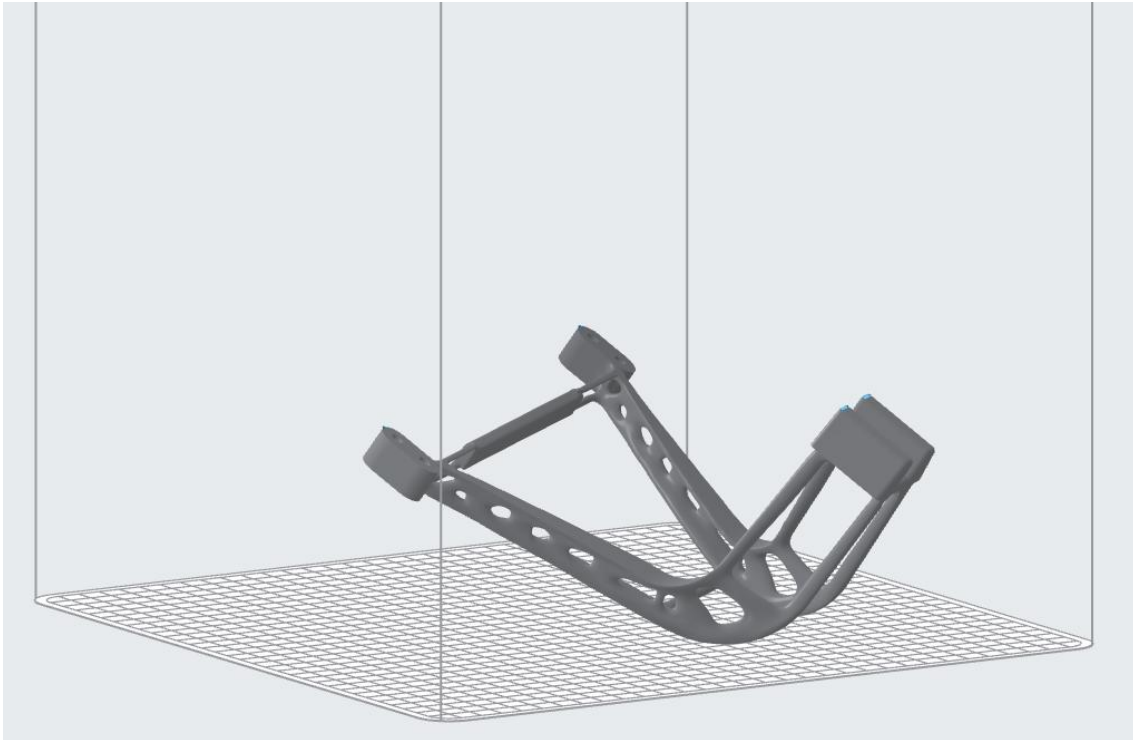
Ilustración 84: Orientación y soportes araña FDM, Bambu Studio

Para SLA, la pieza debe estar ligeramente inclinada respecto a la base de la impresora. Esto favorece la reducción de las fuerzas de succión durante el curado de la resina y mejora el acabado superficial, minimizando líneas visibles en la pieza. En este caso también se requieren soportes, ya que la resina líquida necesita estructuras auxiliares para sostener voladizos y zonas suspendidas durante el proceso de fotopolimerización.



*Ilustración 85: Orientación y soportes araña SLA, PreForm*

Por último, en SLS el polvo sinterizado actúa como soporte, por lo que no son necesarios soportes adicionales. La orientación de la pieza es menos crítica que en FDM o SLA, aunque puede influir en la densidad y en la calidad superficial. La araña, se orienta de forma inclinada para mejorar la evacuación del polvo no sintetizado y distribuir de manera más homogénea las tensiones térmicas durante el sintetizado.



*Ilustración 86: Orientación y soportes araña SLS, PreForm*

### **5.5.2. PIEZA IMPRESA**

Se ha decidido imprimir el prototipo en dos tecnologías, FDM y SLA quedando de la siguiente manera:

Para FDM, debido a las medidas de la araña es necesario reducir la escala a un 60% del tamaño original para la impresión en la máquina Flashforge de filamento sólido PLA (FDM) disponible en el laboratorio de ICAI con un tiempo de impresión de 4h.

Una vez impresa, se deben retirar los soportes. Además, aparece defectología; el filamento de la impresora se ha obstruido y el anclaje rectangular de la araña no se ha podido imprimir. Para solucionarlo, se decide imprimir la parte que falta para posteriormente pegar las dos partes con un pegamento resistente. Para ello, usando el software de preparación de la pieza y la herramienta de corte, se selecciona solo la parte imprimir tras medir qué es lo que falta por imprimir.



Ilustración 87: Error de impresión

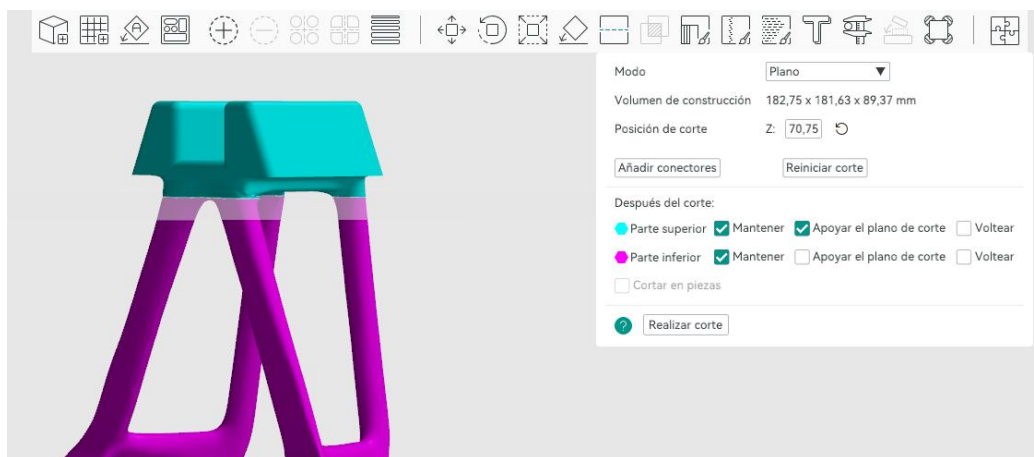


Ilustración 88: Herramienta de corte software

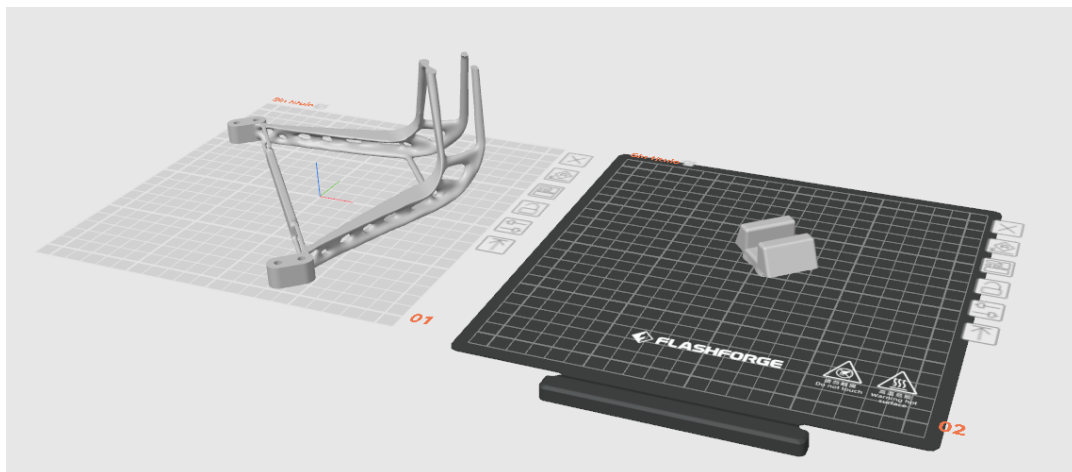


Ilustración 89: Preparación de la pieza



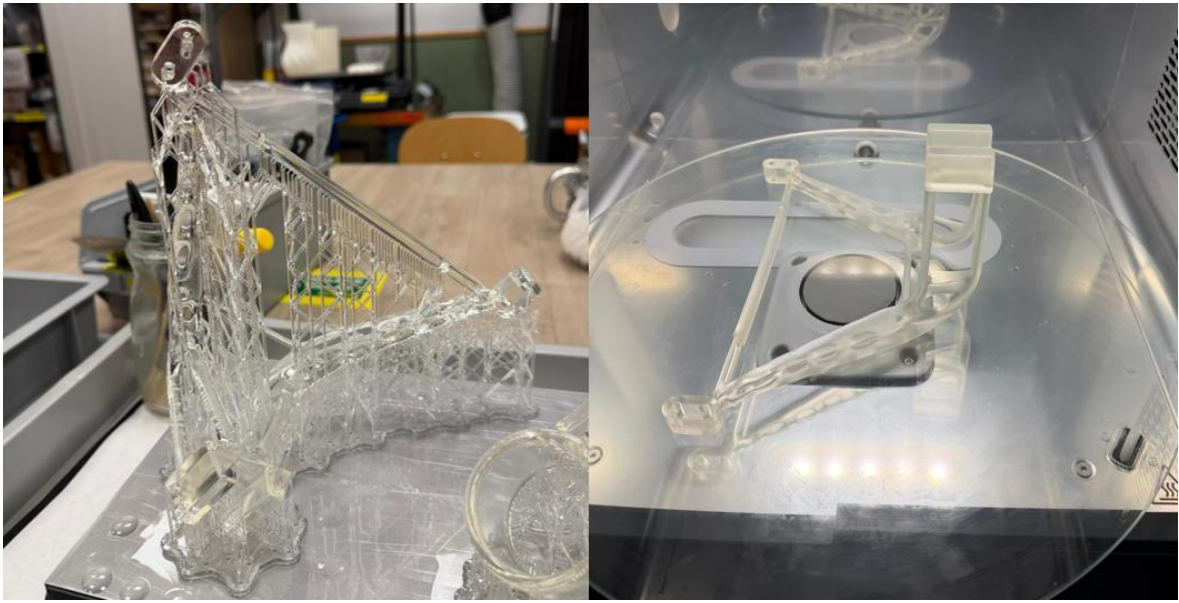
*Ilustración 90: Partes impresas*



*Ilustración 91: Araña impresa en FDM final*

Para SLA, de nuevo, el gran tamaño de la araña original hace necesario escalar la pieza al 65% para la impresión con resina de tipo Clear en la impresora Form 3L.

De nuevo, es necesario post-procesado en la pieza, se deben retirar los soportes, limpiar con alcohol para eliminar los restos de resina y dejar secar en un horno durante aproximadamente 20 minutos.



*Ilustración 92: Post-procesado impresión SLA, soportes y horno*



*Ilustración 93: Araña impresa en SLA con soportes*

## Capítulo 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 6.1. METODOLOGÍA PARA EL ESTUDIO ECONOMICO

Para realizar el estudio económico de la fabricación de la araña, se sigue la siguiente metodología para cada tipo de prototipo, tecnología de impresión e impresora disponible en el laboratorio de impresión 3D de ICAI.

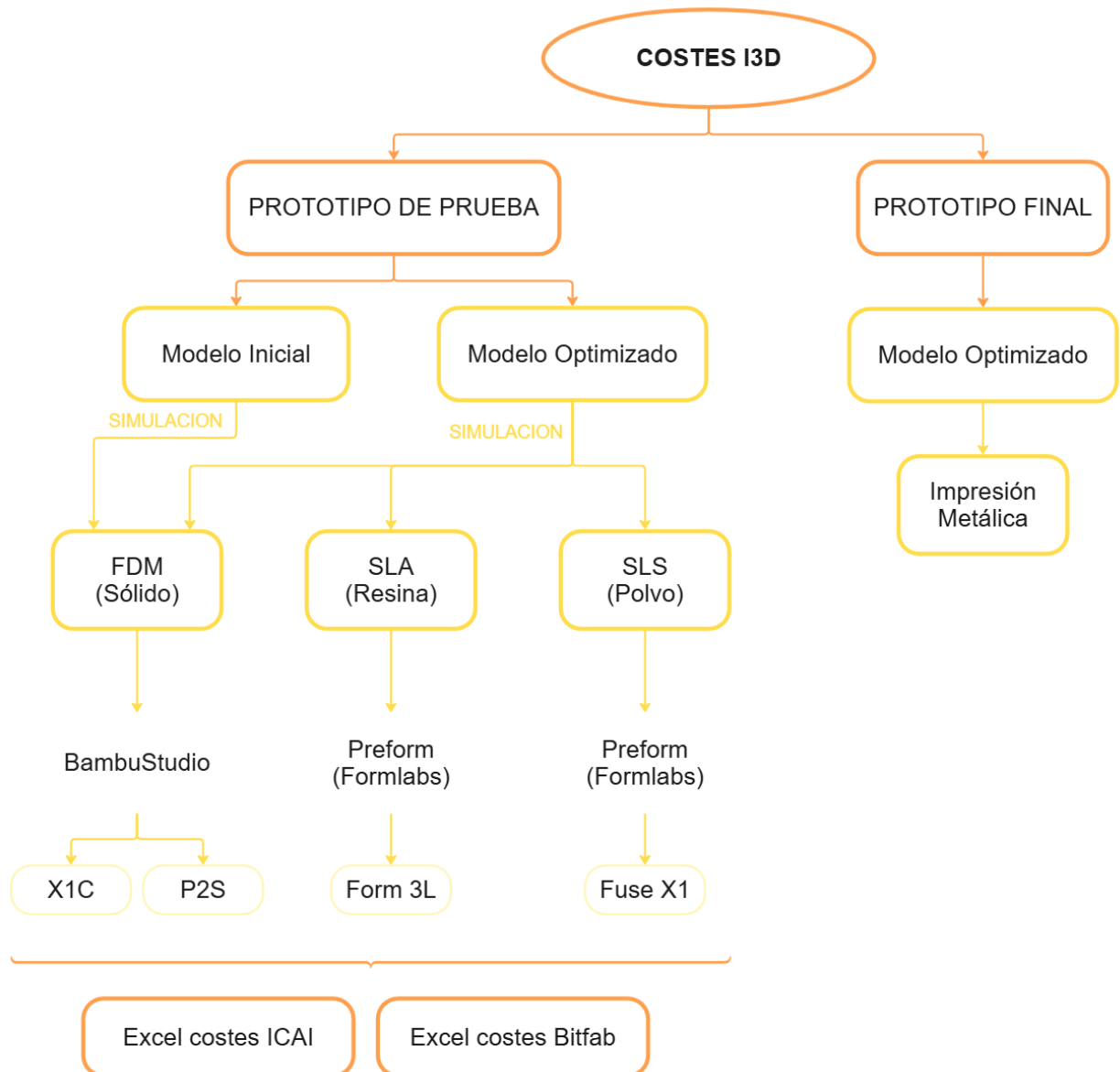


Ilustración 94: Diagrama de flujo de los costes de impresión 3D

## 6.2. COSTES I3D

La fabricación aditiva supone un ahorro respecto a los métodos tradicionales de producción. Se reducen los residuos o desperdicio de material, se permite la fabricación de mecanismos ya integrados en las piezas, sin necesidad de montajes o ensamblajes posteriores. Y, se simplifica la logística permitiendo la fabricación distribuida o bajo demanda costes inventario y reduciendo costes de envío y el consumo energético.

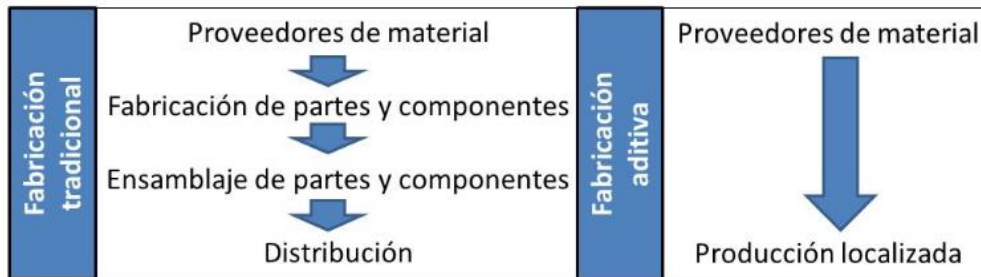


Ilustración 95: Comparativa de la cadena logística [38]

Respecto a la economía de escala y a la complejidad geométrica, La fabricación aditiva introduce un modelo de costes muy distinto al de la fabricación convencional.

Mediante métodos tradicionales, se requiere una producción en masa para equilibrar los altos costes de las herramientas, moldes y ensamblajes [39]. Sin embargo, en la impresión 3D el coste de cada unidad adicional que se mande fabricar es prácticamente el mismo sin importar si se piden muchas o pocas piezas. Por lo tanto, imprimir una sola pieza es más barato que, por ejemplo, realizarla a través de moldes específicos, eliminando inversiones en herramientas, matrices o moldes.

En la siguiente gráfica se ve representada la comparativa entre cómo afecta una unidad adicional al coste de producción, para la fabricación aditiva y para los métodos de fabricación tradicionales:

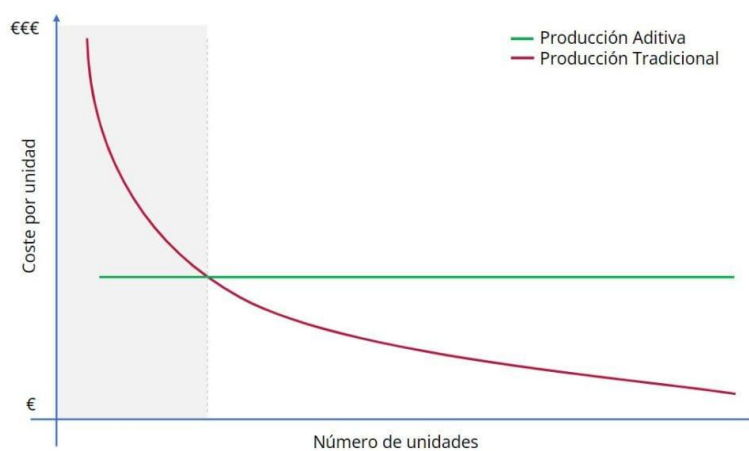
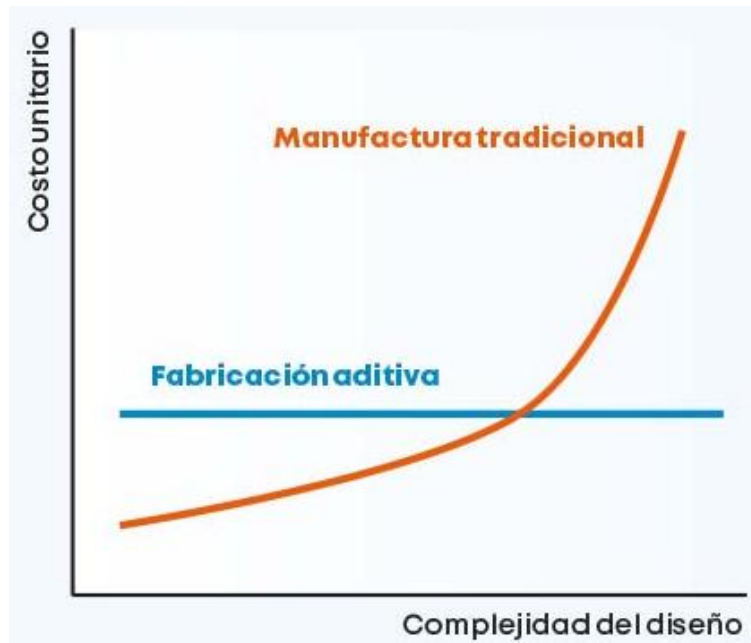


Ilustración 96: Comparativa de costes por unidad producida

También es importante conocer la relación del coste con la complejidad. De manera convencional, el precio aumenta a medida que aumenta la dificultad para fabricar las piezas, componentes con estructuras complejas o que requieran mayor precisión serán consecuentemente más caras.

En cambio, la impresión 3D no incrementa los gastos por complejidad. El material se deposita capa a capa pudiendo crear elementos con canales internos, formas complicadas o con diferentes grados de espesor y porosidad [38].



*Ilustración 97: Comparativa de costes por complejidad*

## 6.3. ANÁLISIS DE COSTES PROTOTIPO DE PRUEBA

### 6.3.1. ARAÑA EN BRUTO EN FDM

En primer lugar, se calculan los costes de fabricación del modelo inicial mediante impresión con filamento PLA Basic y la impresora Bambu Lab P2S.



*Ilustración 98: Bambu Lab P2S*

Utilizando el software de código abierto BambuStudio, desarrollado por Bambu Lab (empresa de tecnología especializada en impresión 3D de consumo y profesional), se simula la laminación del modelo calculando la cantidad de material utilizado y el tiempo de impresión.

La impresora seleccionada tiene un tamaño máximo de impresión de 256x256x256mm mientras que el modelo inicial tiene unas dimensiones de 350x230x152mm. Por lo tanto, para realizar la simulación de costes, se escala la pieza al 75% y los datos elegidos se interpolarán de acuerdo con esta reducción para representar el coste de la pieza total.

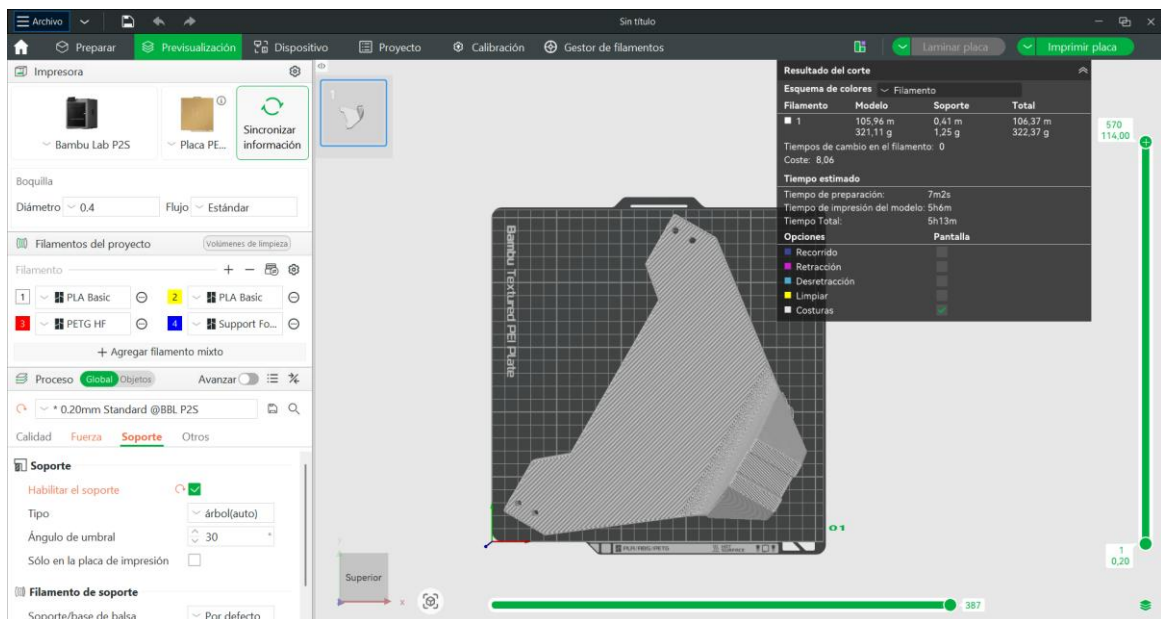


Ilustración 99: Simulación de laminado modelo inicial FDM

| Resultado del corte                         |                      |                                     |                      |
|---|----------------------|-------------------------------------|----------------------|
| Esquema de colores <span>▼</span> Filamento |                      |                                     |                      |
| Filamento                                   | Modelo               | Soporte                             | Total                |
| ■ 1   | 105,96 m<br>321,11 g | 0,41 m<br>1,25 g                    | 106,37 m<br>322,37 g |
| Tiempos de cambio en el filamento: 0        |                      |                                     |                      |
| Coste: 8,06                                 |                      |                                     |                      |
| Tiempo estimado                             |                      |                                     |                      |
| Tiempo de preparación:                      |                      | 7m2s                                |                      |
| Tiempo de impresión del modelo:             |                      | 5h6m                                |                      |
| Tiempo Total:                               |                      | 5h13m                               |                      |
| Opciones                                    |                      | Pantalla                            |                      |
| <input checked="" type="checkbox"/>         | Recorrido            | <input type="checkbox"/>            |                      |
| <input type="checkbox"/>                    | Retracción           | <input type="checkbox"/>            |                      |
| <input type="checkbox"/>                    | Desretracción        | <input type="checkbox"/>            |                      |
| <input type="checkbox"/>                    | Limpiar              | <input type="checkbox"/>            |                      |
| <input checked="" type="checkbox"/>         | Costuras             | <input checked="" type="checkbox"/> |                      |

Ilustración 100: Datos de simulación en bruto FDM

Con los datos obtenidos, se rellena la tabla de costes proporcionada por ICAI calculando el coste de la fabricación de la pieza en los laboratorios de impresión 3D de ICAI.



| ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D - FDM |                     |                         |
|---|---------------------|-------------------------|
| <b>DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA</b>                                   |                     |                         |
| Precio máquina (€)  |                     | 750                     |
| Coste mantenimiento anual (€)                                       |                     | 75                      |
| Años de amortización  |                     | 4                       |
| Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día                  |                     | 1784                    |
| Precio Hora máquina-amortización (€/h)                              |                     | <b>0,14</b>             |
| Precio Hora venta-público (€/h)                                     |                     | <b>0,20</b>             |
| <b>DATOS COSTE MATERIAL</b>   |                     |                         |
| Coste material modelo: (€/kg)                                       |                     | 22,99                   |
| Coste material soporte: (€/kg)                                      |                     | 22,99                   |
| <b>DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA</b>                                 |                     |                         |
| Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)            |                     | 20                      |
| <b>PIEZA</b>  |                     |                         |
| <b>CONCEPTOS PRESUPUESTADOS</b>                                     | <b>Opción Malla</b> | <b>Costes parciales</b> |
| Material modelo (g)   | 401,39              | 9,23 €/ud               |
| Soporte modelo (g)  | 1,56                | 0,04 €/ud               |
| Tiempo modelo (h)   | 6,52                | 1,34 €/ud               |
| Tiempo técnico-analista (h)   | 0,50                | 10,00 €                 |
| Cantidad de piezas  | 1,00                |                         |
| <b>Coste unitario (€) en ICAI + IVA</b>                             | <b>20,60 €/Ud</b>   |                         |
| <b>Coste total (€) en ICAI + IVA</b>                                | <b>20,60 €</b>      |                         |

Tabla 8: Costes modelo inicial FDM ICAI

### 6.3.2. ARAÑA OPTIMIZADA EN FDM

Para la pieza optimizada impresa con filamento sólido se sigue el mismo procedimiento con la misma impresora Bambu Lab P2S se utiliza PLA Basic como material del modelo y de soportes.

Además, se establece una densidad de relleno del 30% y una escala del 75% ya que las medidas de la pieza optimizada (340x230x149mm) son superiores a las medidas de impresión máxima de la impresora.

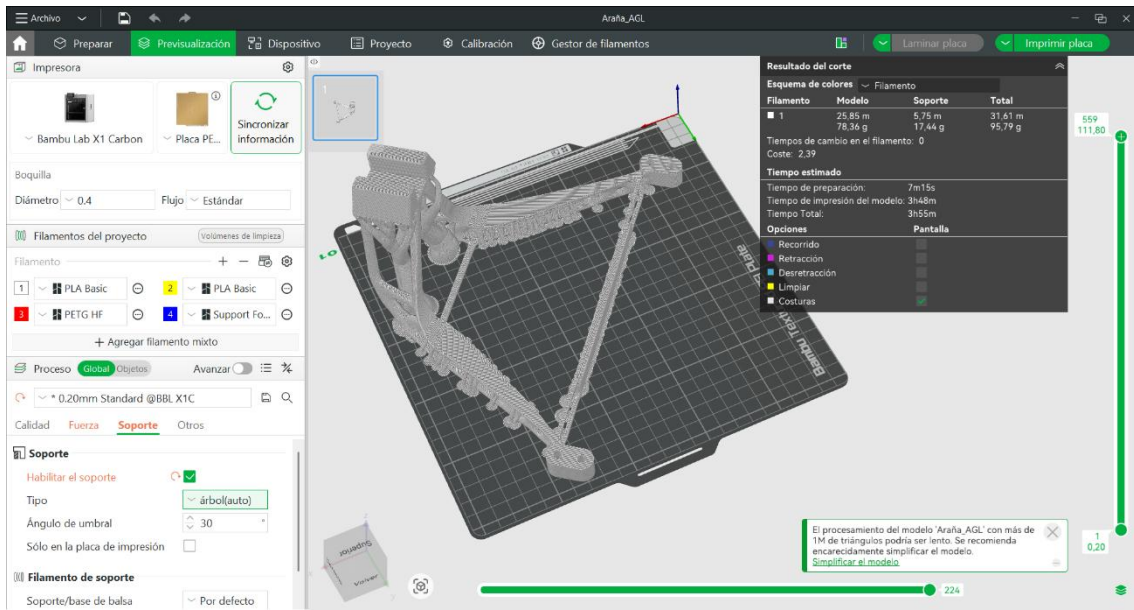


Ilustración 101: Simulación de laminado modelo optimizado FDM

| Resultado del corte                           |                          |                                     |                          |
|---|--------------------------|-------------------------------------|--------------------------|
| Esquema de colores <span>▼</span> Filamento   |                          |                                     |                          |
| Filamento                                     | Modelo                   | Soporte                             | Total                    |
| ■ 1   | 25,85 m<br>78,36 g       | 5,75 m<br>17,44 g                   | 31,61 m<br>95,79 g       |
| Tiempos de cambio en el filamento: 0          |                          |                                     |                          |
| Coste: 2,39                                   |                          |                                     |                          |
| Tiempo estimado                               |                          |                                     |                          |
| Tiempo de preparación:                        |                          | 7m15s                               |                          |
| Tiempo de impresión del modelo:               |                          | 3h48m                               |                          |
| Tiempo Total:                                 |                          | 3h55m                               |                          |
| Opciones                                      |                          | Pantalla                            |                          |
| <input checked="" type="checkbox"/> Recorrido | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> Retracción           | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> Desretracción        | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> Limpiar              | <input type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/>            | <input type="checkbox"/> |
| <input type="checkbox"/> Costuras             | <input type="checkbox"/> | <input checked="" type="checkbox"/> | <input type="checkbox"/> |

Ilustración 102: Datos de simulación FDM

Con los datos obtenidos, se rellena la tabla de costes de impresión en ICAI.

**ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D - FDM**

| DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA                               |             |
|--|-------------|
| Precio máquina (€)                                       | 750         |
| Coste mantenimiento anual (€)                            | 75          |
| Años de amortización                                     | 4           |
| Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día       | 1784        |
| Precio Hora máquina-amortización (€/h)                   | <b>0,14</b> |
| Precio Hora venta-público (€/h)                          | <b>0,20</b> |
| DATOS COSTE MATERIAL                                     |             |
| Coste material modelo: (€/kg)                            | 22,99       |
| Coste material soporte: (€/kg)                           | 22,99       |
| DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA                             |             |
| Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h) | 20          |

| PIEZA                                   |                  |                  |
|---|------------------|------------------|
| CONCEPTOS PRESUPUESTADOS                | Opción Malla     | Costes parciales |
| Material modelo (g)                     | 97,53            | 2,24 €/ud        |
| Soporte modelo (g)                      | 21,79            | 0,50 €/ud        |
| Tiempo modelo (h)                       | 4,83             | 0,99 €/ud        |
| Tiempo técnico-analista (h)             | 0,25             | 5,00 €           |
| Cantidad de piezas                      | 1,00             |                  |
| <b>Coste unitario (€) en ICAI + IVA</b> | <b>8,73 €/Ud</b> |                  |
| <b>Coste total (€) en ICAI + IVA</b>    | <b>8,73 €</b>    |                  |

Tabla 9: Costes modelo optimizado FDM ICAI

Además, se calculan los costes siguiendo un estilo de negocio gracias a las tablas proporcionadas por Bitfab (empresa y servicio de impresión 3D online bajo demanda).



| Datos del servicio                             |              |
|--|--------------|
| Coste de la impresora                          | 750 [€]      |
| Periodo de amortización                        | 4 [años]     |
| Horas de uso por día laborable de la impresora | 12 [h]       |
| Coste luz                                      | 0,2 [€/kWh]  |
| Potencia media de la impresora                 | 0,15 [kW]    |
| Coste de material                              | 22,99 [€/kg] |
| Coste por hora de personal                     | 20 [€/h]     |
| Cálculo de los costes del servicio             |              |
| Costes pedido                                  |              |
| Coste por hora preparación/postprocesado       | 20 [€]       |
| Costes por hora de impresión                   |              |
| Coste de amortización de la impresora          | 0,06 [€/h]   |
| Coste de la electricidad                       | 0,03 [€/h]   |
| Coste por hora total                           | 0,09 [€/h]   |
| Costes de consumibles                          |              |
| Coste de material                              | 22,99 [€/kg] |

Tabla 10: Costes de servicio modelo optimizado FDM Bitfab

| Datos del pedido                     |            |
|--------------------------------------|------------|
| Tiempo de preparación/postprocesado  | 1,133 [h]  |
| Datos de la pieza                    |            |
| Tiempo de impresión                  | 3,8 [h]    |
| Masa                                 | 0,119 [kg] |
| Cantidad                             | 1,00 [u]   |
| Coste de pedido                      |            |
| Costes de pedido                     |            |
| Preparación/postprocesado del pedido | 22,667 [€] |
| Coste de la pieza                    |            |
| Material                             | 2,74 [€/u] |
| Horas de impresión                   | 0,35 [€/u] |
| Coste por pieza                      | 3,09 [€/u] |
| Coste de todas las piezas            | 3,09 [€]   |
| Costes totales del pedido            |            |
| Coste total del pedido               | 25,76 [€]  |
| Cada unidad adicional                | 3,09 [€]   |

Tabla 11: Costes de pedido modelo optimizado FDM Bitfab

### 6.3.3. ARAÑA OPTIMIZADA EN SLA

La fabricación con resina se realiza con la impresora Form 3L de la empresa Formlabs. Eligiendo el material Tough 2000, una resina técnica de ingeniería con buena resistencia mecánica y rigidez.



Ilustración 103: Form 3L

Se simulan los tiempos y la cantidad de material necesarios mediante el software de laminado PreForm. Dado que las medidas de volumen de impresión de la impresora elegida (335x200x320mm) son inferiores al tamaño de la pieza optimizada, se escala la pieza al 80%. Y, se establece un grosor de capa 0,1mm rápido y económico y prácticamente igual de resistente que un grosor más pequeño de 0,05mm disponible en esta impresora.

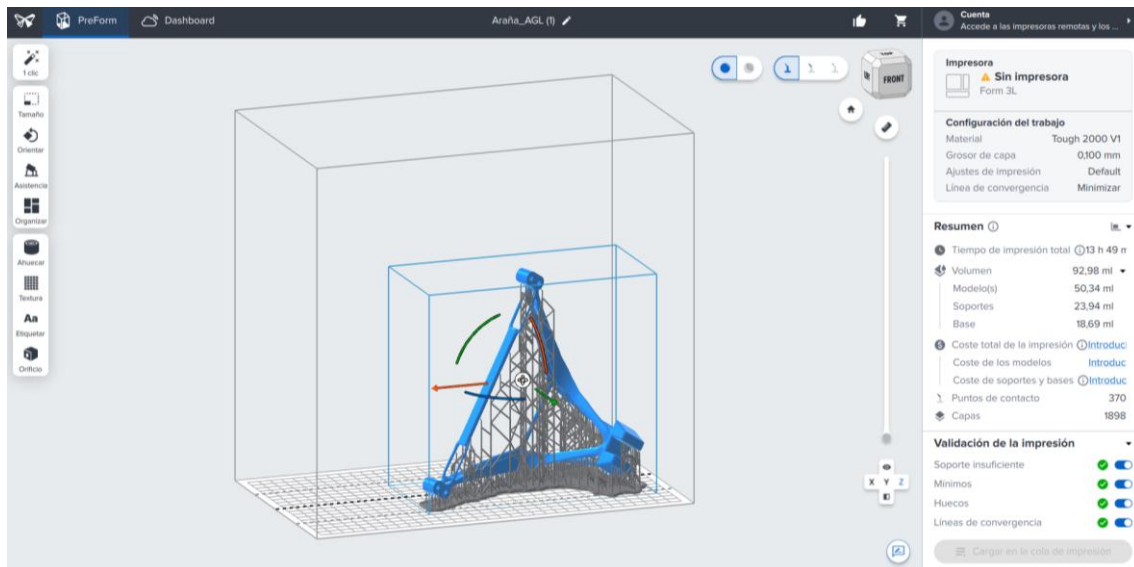


Ilustración 104: Simulación de impresión modelo optimizado SLA

| Resumen ⓘ |   |
|-----------|---|
| 🕒         | Tiempo de impresión total ⓘ 13 h 49 m                   |
| 📦         | Volumen 92,98 ml ▾                                      |
|           | Modelo(s) 50,34 ml                                      |
|           | Soportes 23,94 ml                                       |
|           | Base 18,69 ml   |
| 💰         | Coste total de la impresión ⓘ <a href="#">Introduci</a> |
|           | Coste de los modelos <a href="#">Introduc</a>           |
|           | Coste de soportes y bases ⓘ <a href="#">Introduc</a>    |
| 📍         | Puntos de contacto 370                                  |
| 📄         | Capas 1898  |

Ilustración 105: Datos de simulación SLA

Con los datos obtenidos, se rellena la tabla de costes de impresión en ICAI. Además, se calculan los costes con las tablas de Bitfab de una manera más realista de cara al mercado.

| ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D - SLA |                    |                  |
|---|--------------------|------------------|
| <b>DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA</b>                                   |                    |                  |
| 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               |                  |
| <b>DATOS COSTE MATERIAL</b>   |                    |                  |
| Coste material modelo (€/cc)  | 0,22               |                  |
| Coste material soportes y base (€/cc)                               | 0,22               |                  |
| Coste bandeja (€/h)   | 0,50               |                  |
| <b>DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA</b>                                 |                    |                  |
| Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)            | 20                 |                  |
| <b>DATOS TÉCNICOS DE DEPOSICIÓN</b>                                 |                    |                  |
| Tipo de modelo  | <b>Malla</b>       | <b>Sólido</b>    |
| Tasa de deposición (cc/h)   | 22,4               | 16               |
| Precio hora máquina-deposición (€/h)                                | 4,74               |                  |
| <b>PIEZA</b>  |                    |                  |
| CONCEPTOS PRESUPUESTADOS  | Opción Sólido      | Costes parciales |
| Material modelo (cc)  | 60,41              | 13,52 €/ud       |
| Soporte modelo (cc)   | 51,01              | 11,42 €/ud       |
| Tiempo modelo (h)   | 16,58              | 72,49 €/ud       |
| Piezas por bandeja (ud)   | 1,00               | 8,29 €/ud        |
| Tiempo técnico-analista (h)   | 0,50               | 10,00 €          |
| Cantidad de piezas  | 1,00               |                  |
| <b>Coste unitario (€) en ICAI + IVA</b>                             | <b>115,72 €/Ud</b> |                  |
| <b>Coste total (€) en ICAI + IVA</b>                                | <b>115,72 €</b>    |                  |

Tabla 12: Costes modelo optimizado SLA ICAI




|  |               |
|---|---------------|
| <b>Datos del servicio</b>   |               |
| Coste de la impresora   | 20.000 [€]    |
| Periodo de amortización   | 5 [años]      |
| Horas de uso por día laborable de la impresora                                    | 12 [h]        |
| Coste luz   | 0,2 [€/kWh]   |
| Potencia media de la impresora  | 0,12 [kW]     |
| Coste de material   | 201,67 [€/kg] |
| Coste por hora de personal  | 20 [€/h]      |
| <b>Cálculo de los costes del servicio</b>   |               |
| <b>Costes pedido</b>  |               |
| Coste por hora preparación/postprocesado  | 20 [€]        |
| <b>Costes por hora de impresión</b>   |               |
| Coste de amortización de la impresora   | 1,33 [€/h]    |
| Coste de la electricidad  | 0,02 [€/h]    |
| Coste por hora total  | 1,36 [€/h]    |
| <b>Costes de consumibles</b>  |               |
| Coste de material   | 20 [€/kg]     |

Tabla 13: Costes de servicio modelo optimizado SLA Bitfab


|  |             |
|---|-------------|
| <b>Datos del pedido</b>   |             |
| Tiempo de preparación/postprocesado   | 2,50 [h]    |
| <b>Datos de la pieza</b>  |             |
| Tiempo de impresión   | 16,58 [h]   |
| Masa  | 0,124 [kg]  |
| Cantidad  | 1,00 [u]    |
| <b>Coste de pedido</b>  |             |
| <b>Costes de pedido</b>   |             |
| Preparación/postprocesado del pedido  | 50 [€]      |
| <b>Coste de la pieza</b>  |             |
| Material  | 2,47 [€/u]  |
| Horas de impresión  | 22,50 [€/u] |
| Coste por pieza   | 24,98 [€/u] |
| Coste de todas las piezas   | 24,98 [€]   |
| <b>Costes totales del pedido</b>  |             |
| Coste total del pedido  | 74,98 [€]   |
| Cada unidad adicional   | 24,98 [€]   |

Tabla 14: Costes de pedido modelo optimizado SLA Bitfab

### 6.3.4. ARAÑA OPTIMIZADA EN SLS

Para la impresión 3D mediante polvo de poliamida se vuelve a utilizar una impresora de Formlabs en concreto, la Fuse X1. Utilizando Nylon 12 como material, un polímero termoplástico de ingeniería.



Ilustración 106: Fuse X1

De nuevo, se simulan tiempos y cantidad de polvo mediante el software de laminado PreForm. Dado que las medidas de volumen de impresión de la impresora son 330x330x565mm, el modelo optimizado se puede imprimir a escala real 1:1. Además, se establece un grosor de capa 0,1mm.

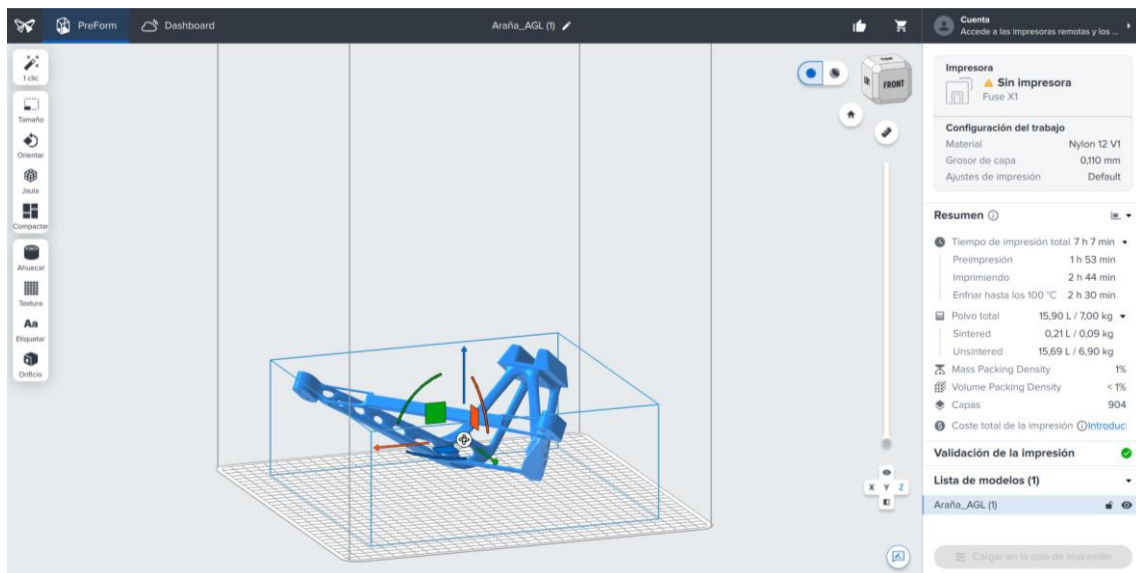


Ilustración 107: Simulación de impresión modelo optimizado SLS

**Resumen** ⓘ

- 🕒 Tiempo de impresión total 7 h 7 min ▾
  - Preimpresión 1 h 53 min
  - Imprimiendo 2 h 44 min
  - Enfriar hasta los 100 °C 2 h 30 min
- 📦 Polvo total 15,90 L / 7,00 kg ▾
  - Sintered 0,21 L / 0,09 kg
  - Unsintered 15,69 L / 6,90 kg
- ⚖️ Mass Packing Density 1%
- 📦 Volume Packing Density < 1%
- 📦 Capas 904
- 💰 Coste total de la impresión ⓘ [Introduci](#)

Ilustración 108: Datos de simulación SLS

Con los datos obtenidos, se rellena la tabla de costes de impresión en ICAI.

| ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D - SLS |                    |                  |
|---|--------------------|------------------|
| DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA  |                    |                  |
| Precio máquina (€)  |                    | 80.000           |
| Coste mantenimiento anual (€)                                       |                    | 8.000            |
| Años de amortización  |                    | 5                |
| Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día                  |                    | 1784             |
| Precio Hora máquina-amortización (€/h)                              |                    | 11,66            |
| Precio Hora venta-público (€/h)                                     |                    | 17,49            |
| DATOS COSTE MATERIAL  |                    |                  |
| Coste material modelo (€/kg)  |                    | 100,00           |
| DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA  |                    |                  |
| Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)            |                    | 20               |
| PIEZA   |                    |                  |
| CONCEPTOS PRESUPUESTADOS  | Opción Solido      | Costes parciales |
| Material modelo (kg)  | 7,00               | 700,00 €/ud      |
| Tiempo modelo (h)   | 7,12               | 124,46 €/ud      |
| Tiempo técnico-analista (h)   | 0,50               | 10,00 €          |
| Cantidad de piezas  | 1,00               |                  |
| <b>Coste unitario (€) en ICAI + IVA</b>                             | <b>834,46 €/Ud</b> |                  |
| <b>Coste total (€) en ICAI + IVA</b>                                | <b>834,46 €</b>    |                  |

Tabla 15: Costes modelo optimizado SLS ICAI

Además, se calculan los costes con las tablas de Bitfab.


|  |               |
|---|---------------|
| Datos del servicio  |               |
| Coste de la impresora   | 80.000 [€]    |
| Periodo de amortización   | 5 [años]      |
| Horas de uso por día laborable de la impresora                                    | 12 [h]        |
| Coste luz   | 0,2 [€/kWh]   |
| Potencia media de la impresora  | 2,5 [kW]      |
| Coste de material   | 100,00 [€/kg] |
| Coste por hora de personal  | 20 [€/h]      |
| Cálculo de los costes del servicio  |               |
| <b>Costes pedido</b>  |               |
| Coste por hora preparación/postprocesado  | 20 [€]        |
| <b>Costes por hora de impresión</b>   |               |
| Coste de amortización de la impresora   | 5,33 [€/h]    |
| Coste de la electricidad  | 0,50 [€/h]    |
| Coste por hora total  | 5,83 [€/h]    |
| <b>Costes de consumibles</b>  |               |
| Coste de material   | 20 [€/kg]     |

Tabla 16: Costes de servicio modelo optimizado SLS Bitfab


|  |                |
|---|----------------|
| Datos del pedido  |                |
| Tiempo de preparación/postprocesado   | 4,383 [h]      |
| Datos de la pieza   |                |
| Tiempo de impresión   | 2,733 [h]      |
| Masa  | 7,00 [kg]      |
| Cantidad  | 1,00 [u]       |
| Coste de pedido   |                |
| <b>Costes de pedido</b>   |                |
| Preparación/postprocesado del pedido  | 87,6666667 [€] |
| <b>Coste de la pieza</b>  |                |
| Material  | 140,00 [€/u]   |
| Horas de impresión  | 15,94 [€/u]    |
| Coste por pieza   | 155,94 [€/u]   |
| Coste de todas las piezas   | 155,94 [€]     |
| <b>Costes totales del pedido</b>  |                |
| Coste total del pedido  | 243,61 [€]     |
| Cada unidad adicional   | 155,94 [€]     |

Tabla 17: Costes de pedido modelo optimizado SLS Bitfab

Finalmente, comparando las tres tecnologías, FDM resulta la alternativa más económica debido al bajo coste del material, la disponibilidad de equipos y la rapidez del proceso de fabricación. SLA presenta un incremento de coste, pero ofrece un mejor acabado superficial y mayor precisión dimensional. El coste de la impresión SLS es bastante más elevado, sin embargo, ofrece ventajas importantes desde el punto de vista técnico, como la ausencia de soportes durante la impresión y la posibilidad de fabricar geometrías complejas con mejores propiedades mecánicas.

#### 6.4. ANÁLISIS DE COSTES PROTOTIPO FINAL

Para la fabricación del prototipo final funcional de la araña, se ha elegido la impresora EOS M400, una máquina de fabricación aditiva metálica basada en la tecnología Laser Powder Bed Fusion (LPBF).

Presenta un precio de compra estimado de entre 450.000€ y 550.000€ dependiendo de los sistemas auxiliares incluidos y tiene una amortización de 5 años. Este precio se justifica con su gran volumen de impresión.

Dado que el volumen de la pieza es bastante elevado (340x230x152), se hace necesaria una impresora donde el volumen sea superior. En el caso de la EOS M400, el volumen máximo de impresión es de 400x400x400mm y, por lo tanto, la pieza optimizada se puede imprimir sin problemas a escala real.




*Ilustración 109: Impresora EOS M400*

El material elegido es polvo de AlSi10Mg, una aleación de aluminio con un buen equilibrio entre resistencia mecánica, peso y resistencia a la corrosión. El precio de este material se encunetar entre los 65€ y los 110€ por kg.

Por último, para estimar el tiempo de fabricación de la pieza y la cantidad de material utilizado, se toma el valor de la simulación para polvo de plástico calculado con el software Preforms, es decir, 7 horas y 7 minutos utilizando 7kg de polvo. A pesar, de que estos valores no representan la realidad de la impresión con polvo metálico se toman por la similitud en el proceso con polvos plásticos.

La simulación de la fabricación de la pieza comprando la impresora y el material necesario quedaría de la siguiente forma:



| ANÁLISIS DE COSTES PARA PROTOTIPADO DE PIEZAS EN IMPRESORA 3D - DLMS |                      |                         |
|--|----------------------|-------------------------|
| <b>DATOS AMORTIZACIÓN MÁQUINA</b>                                    |                      |                         |
| Precio máquina (€)   | 550.000              |                         |
| Coste mantenimiento anual (€)  | 55.000               |                         |
| Años de amortización   | 5                    |                         |
| Amortización (h/año) - 223 días-año / 12 horas-día                   | 1784                 |                         |
| Precio Hora máquina-amortización (€/h)                               | <b>80,16</b>         |                         |
| Precio Hora venta-público (€/h)                                      | <b>120,24</b>        |                         |
| <b>DATOS COSTE MATERIAL</b>  |                      |                         |
| Coste material modelo (€/kg)   | 110,00               |                         |
| <b>DATOS COSTE TÉCNICO ANALISTA</b>                                  |                      |                         |
| Coste técnico analista del modelo - inc. desmoldeo (€/h)             | 20                   |                         |
| <b>PIEZA</b>   |                      |                         |
| <b>CONCEPTOS PRESUPUESTADOS</b>                                      | <b>Opción Solido</b> | <b>Costes parciales</b> |
| Material modelo (kg)   | 7,00                 | 770,00 €/ud             |
| Tiempo modelo (h)  | 7,12                 | 855,68 €/ud             |
| Tiempo técnico-analista (h)  | 0,50                 | 10,00 €                 |
| Cantidad de piezas   | 1,00                 |                         |
| <b>Coste unitario (€) en ICAI + IVA</b>                              | <b>1635,68 €/Ud</b>  |                         |
| <b>Coste total (€) en ICAI + IVA</b>                                 | <b>1635,68 €</b>     |                         |

Tabla 18: Costes prototipo final DMLS ICAI

Aunque esta opción presenta una inversión inicial muy elevada debido al coste de la maquinaria y del material, permite fabricar directamente una pieza funcional con propiedades mecánicas adecuadas para su utilización. Por lo tanto, a largo plazo con la amortización y su uso, esta es una buena solución para la fabricación de componentes de uso final .

## 6.5. VIABILIDAD AMBIENTAL

Además de los aspectos técnicos y económicos, también es interesante analizar el impacto ambiental asociado al empleo del diseño generativo y la fabricación aditiva.

La fabricación aditiva presenta diversas ventajas desde el punto de vista ambiental frente a los procesos convencionales. Usa solo el material necesario para la construcción de la pieza, reduciendo la generación de residuos y, fabricando bajo demanda, reduce el

almacenamiento y parte del impacto asociado al transporte de piezas. No obstante, también se debe analizar el consumo energético que presentan las tecnologías, especialmente las de fabricación metálica.

La siguiente tabla compara la fabricación aditiva y los métodos tradicionales, exponiendo ventajas y desventajas.

Por ello, la sostenibilidad de la fabricación aditiva depende tanto de la tecnología empleada como del volumen de producción, del origen de la energía utilizada y del ciclo de vida completo del componente.

|                          | <b>IMPRESIÓN 3D</b>  | <b>METODO TRADICIONAL</b>              |
|--------------------------|----------------------|--|
| Aprovechamiento material | 90 - 98 %            | 30 - 70 % (dependiendo del mecanizado) |
| Residuos generados       | Bajos (soportes)     | Elevados (viruta)                      |
| Consumo energético       | Bajo (excepto polvo) | Bajo (solo en producción masiva)       |

Tabla 19: Comparación energética y ambiental tecnologías fabricación

### 6.5.1. ESTIMACIÓN DE LA HUELLA DE CARBONO

Con el objetivo de cuantificar el impacto ambiental de la optimización de la araña, se ha realizado una estimación simplificada considerando únicamente la fabricación del material empleado en la pieza.

Para realizar el cálculo de emisiones ( $CO_2$ ) de gases de efecto invernadero asociadas a la producción del aluminio empleado en la pieza, se ha considerado un factor de emisión intermedio entre 6,6 y 10,1kgCO<sub>2</sub>e/kg de factores de emisión para aluminio producido y consumido en Europa [40].

$$CO_2 = m1 * FE = 36,3kg CO_2e$$

$$CO_2 = m2 * FE = 5,45kg CO_2e$$

- Masa de aluminio modelo inicial (m1) = 4,224kg
- Masa de aluminio modelo optimizado (m2) = 0,634kg
- Factor de emisión (FE) = 8,6 kg CO<sub>2</sub>e/kg

Además, para el cálculo de la energía incorporada (E), que es la cantidad total de energía necesaria para producir un material antes de que llegue a la fábrica. Se ha tomado un valor típico utilizado en estudios de Análisis de Ciclo de Vida del aluminio [41].

$$E = \frac{m1 * EI}{3,6} = 222,93kWh$$

$$E = \frac{m2 * EI}{3,6} = 33,46kWh$$

- Masa de aluminio modelo inicial (m1) = 4,224kg
- Masa de aluminio modelo optimizado (m2) = 0,634kg
- Energía incorporada del aluminio (EI) = 190 MJ/kg

Todos estos resultados se representan en la siguiente tabla:

|                                 | <b>MODELO INICIAL</b> | <b>MODELO OPTIMIZADO</b> | <b>REDUCCION</b> |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------------|------------------|
| Masa aluminio (kg)              | 4,224                 | 0,634                    | 3,59             |
| Emisiones (kgCO <sub>2</sub> e) | 36,3                  | 5,45                     | 30,85            |
| Energía (kWh)                   | 222,93                | 33,46                    | 189,47           |

*Tabla 20: Comparación ambiental entre el diseño inicial y el diseño optimizado*

En otras palabras, las emisiones disminuyen y por fabricar menos aluminio se ahorran aproximadamente 190kWh. Eso equivale aproximadamente al consumo eléctrico de una vivienda española durante unas 2 o 3 semanas, dependiendo del consumo del hogar.

## Capítulo 7: CONCLUSIONES

Durante el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado, se ha diseñado, optimizado mediante diseño generativo y fabricado mediante fabricación aditiva la araña de una motocicleta de competición.

Se ha logrado el propósito principal del proyecto, obteniendo un diseño que cumple con las regulaciones del reglamento de la competición de estudiantes MotoStudent categoría Electric a la que se pertenece. Y que, además, puede servir como base de diseño para futuras motocicletas del equipo ISC Comillas.

A lo largo del desarrollo del trabajo, se encontraron algunos problemas como la preservación de zonas en el software de optimización y las simulaciones en cuerpos optimizados con geometrías complicadas imposibles de mallar, que se resolvieron con nuevas iteraciones.

En cuanto a las optimizaciones, se ha conseguido una reducción de masa del 85% respecto al diseño original. Se ha partido de una masa inicial de 4,224kg y se ha obtenido una masa final de 0,634kg utilizando Aluminio 6061-T6 para el diseño del prototipo.

Tras las simulaciones, se determina que la araña optimizada cumple con el valor de tensión límite de la aleación de aluminio (276MPa), cumpliendo con un coeficiente de seguridad de 5. Lo que significa que, la pieza puede soportar las cargas y condiciones de trabajo previstas sin riesgo de fallo estructural.

El análisis de costes revela una reducción del coste de fabricación respecto al modelo inicial. Mediante la tecnología FDM que permite imprimir filamento sólido y, gracias a la reducción de masa, se consigue bajar de un precio inicial de fabricación de 20,19€ a 8,43€. Con esto, se determina que el diseño generativo es ideal para el prototipado rápido.

La fabricación aditiva es efectiva en componentes complejos y series de producción reducidas, donde desaparecen los costes de diseño, moldes o utillajes. Por el contrario, cuando el volumen de producción aumenta, los procesos convencionales continúan siendo económicamente más competitivos, ya que el coste inicial de herramientas queda amortizado.

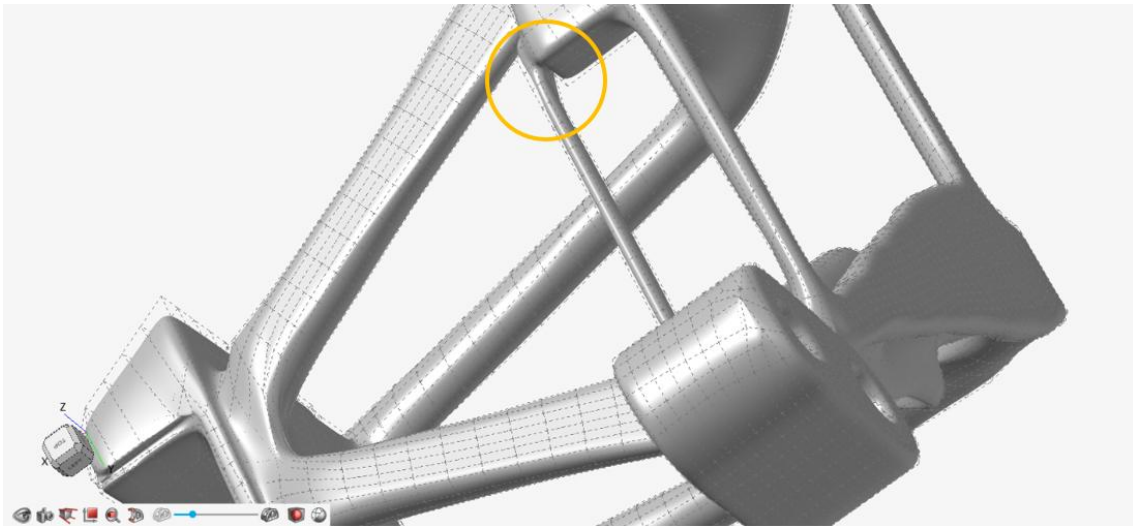
En el caso concreto de la araña y participando en una competición de estudiantes, se fabrican una o unas pocas unidades y se requiere flexibilidad para realizar mejoras en el diseño. Por lo tanto, la impresión 3D, es una alternativa muy adecuada frente a métodos convencionales.

En resumen, la combinación de tecnologías de diseño generativo y fabricación aditiva presenta numerosas ventajas y avances en la fabricación de componentes de uso final. A pesar de que aún existen retos que superar, estos métodos de fabricación ya facilitan el desarrollo de geometrías complejas, reducen el desperdicio de recursos y ofrecen soluciones más sostenibles y adaptadas a las necesidades actuales de la industria.

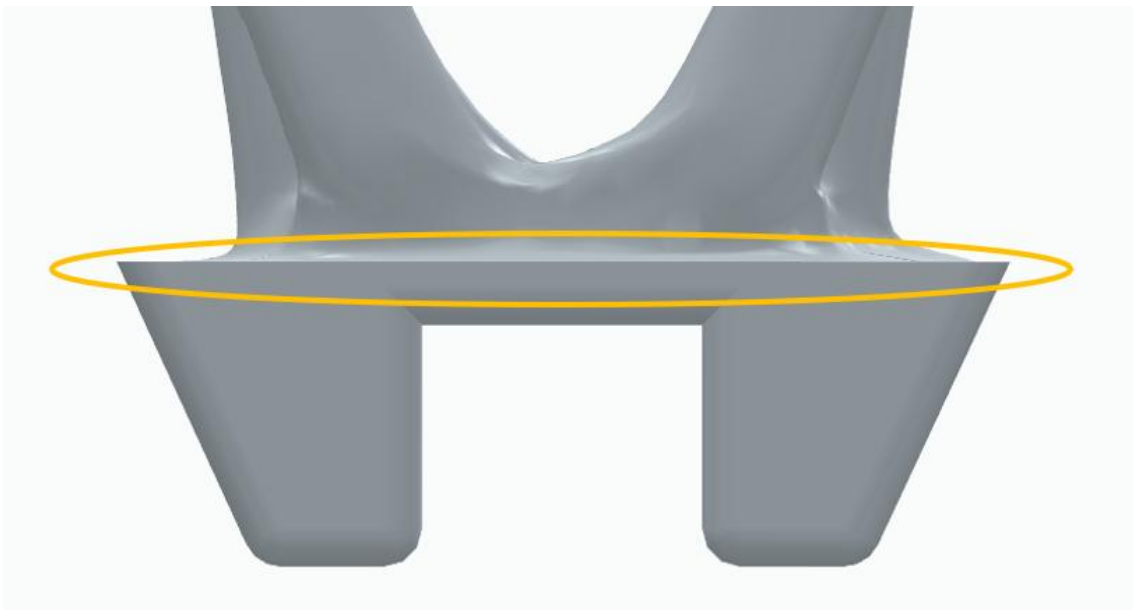
Respecto a trabajos futuros o posibles líneas de investigación, se podrían realizar, además de las simulaciones, ensayos experimentales para comprobar de manera real como se comporta la pieza ante las fuerzas y vibraciones sufridas durante el circuito.

Además, aunque el coeficiente disminuye respecto al modelo inicial, en el futuro, podría disminuirse aún más, un coeficiente de seguridad entre 2 y 3 podría ser suficiente para este tipo de componente.

Asimismo, sería interesante mejorar el acabado de la pieza unificando espesores y suavizando las transiciones entre elementos estructurales. En definitiva, eliminar cambios bruscos de sección y aristas pronunciadas donde se pueden concentrar tensiones al no estar totalmente redondeadas e integradas.



*Ilustración 110: Mejora de suavizado 1*



*Ilustración 111: Mejora de suavizado 2*

## Capítulo 8: BIBLIOGRAFIA

- [1] «MS2627\_MotoStudent Regulations».
- [2] D. Sánchez, «BOTT 1000 Morlaco: step by step | Bottpower». Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.bottpower.com/bott-1000-morlaco-step-by-step/>
- [3] Miluska.Jara, «Objetivos y metas de desarrollo sostenible», Desarrollo Sostenible. Accedido: 29 de enero de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/sustainable-development-goals/>
- [4] 10 Minutos De Lectura, «Nociones básicas de optimización topológica: Cómo usar modelos algorítmicos para crear un diseño ligero», Formlabs. Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/optimizacion-topologica/>
- [5] A. M, «Optimización topológica VS Diseño generativo: ¿qué herramienta de modelado elegir?», 3Dnatives. Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/optimizacion-topologica-vs-diseno-generativo-190920242/>
- [6] «Todo lo que necesita saber sobre la optimización topológica | SOLIDWORKS». Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.solidworks.com/es/media/everything-you-need-know-about-topology-optimization>
- [7] «Software de optimización topológica | Altair», Default. Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://altair.com.es/topology-optimization>
- [8] debem, «Análisis FEM - Método de elementos finitos - Debem». Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.debem.com/es/analisis-fem/>
- [9] M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. D. M. Espinosa, y M. Domínguez, «Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects», *Complexity*, vol. 2019, n.º 1, p. 9656938, ene. 2019, doi: 10.1155/2019/9656938.
- [10] «Fabricación aditiva», Proyecto Rural 3D. Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://rural3d.csic.es/proyecto-rural-3d/fabricacion-aditiva/>
- [11] «Fabricacion aditiva: Definición, procesos y beneficios – Electrónica Edimar». Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.edimar.com/fabricacion-aditiva-que-es/>
- [12] I. G. Navarrete, «Implantes ortopédicos personalizados y bioabsorbibles, investigación del TEC contribuye a la medicina», Hoy en el TEC. Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.tec.ac.cr/hoyeneltec/2025/12/08/implantes-ortopedicos-personalizados-bioabsorbibles-investigacion-tec-contribuye-medicina>
- [13] «Our Story | 3D Systems». Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dsystems.com/our-story>
- [14] impresoras3d.com, «Fabricacion aditiva: Qué es, tipos y ejemplos», impresoras3d.com. Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.impresoras3d.com/fabricacion-aditiva/>
- [15] «3D-Printed Habitat Challenge - NASA». Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.nasa.gov/prizes-challenges-and-crowdsourcing/centennial-challenges/3d-printed-habitat-challenge/>

- [16] A. M. Mirzendehtdel y K. Suresh, «Support structure constrained topology optimization for additive manufacturing», *Computer-Aided Design*, vol. 81, pp. 1-13, dic. 2016, doi: 10.1016/j.cad.2016.08.006.
- [17] P. Wang, J. Yang, Y. Hu, J. Huo, y X. Feng, «Innovative design of a helmet based on reverse engineering and 3D printing», *Alexandria Engineering Journal*, vol. 60, n.º 3, pp. 3445-3453, jun. 2021, doi: 10.1016/j.aej.2021.02.006.
- [18] G. Shi, C. Guan, D. Quan, D. Wu, L. Tang, y T. Gao, «An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing», *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 33, n.º 4, pp. 1252-1259, abr. 2020, doi: 10.1016/j.cja.2019.09.006.
- [19] J. Mesicek, M. Pagac, J. Petru, P. Novak, J. Hajnys, y K. Kutiova, «TOPOLOGICAL OPTIMIZATION OF THE FORMULA STUDENT BELL CRANK», *MM Science Journal*, vol. 2019, pp. 2964-2968, oct. 2019, doi: 10.17973/MMSJ.2019\_10\_201893.
- [20] 17 Nov 202215 Minutos De Lectura, «9 aplicaciones de la impresión 3D en el sector aeroespacial», Formlabs. Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/additive-manufacturing-3d-printing-in-aerospace/>
- [21] «Manufacturing Milestone: 30,000 Additive Fuel Nozzles | GE Aerospace News». Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.geaerospace.com/news/articles/manufacturing/manufacturing-milestone-30000-additive-fuel-nozzles>
- [22] 29 Minutos De Lectura, «25 ejemplos de uso de la impresión 3D (que te sorprenderán)», Formlabs. Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/latam/blog/25-unexpected-3d-printing-use-cases/>
- [23] 16 Feb 202428 Minutos De Lectura, «Introducción a la impresión 3D en medicina y las impresoras 3D para el sector sanitario», Formlabs. Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://formlabs.com/es/blog/3d-printing-in-medicine-healthcare/>
- [24] «La impresión 3D en el deporte», Dassault Systèmes. Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/industries/3d-printing-sports>
- [25] J. Alonso Madrid, G. Sotorrio, N. Olsson, y J. A. Tenorio, «3D constructing: Exploring the potential of 3D concrete and clay printing with generative design for architectural innovation», *Inf. constr.*, vol. 76, n.º 574, p. 6627, oct. 2024, doi: 10.3989/ic.6627.
- [26] L. Cohen, «Tipos de filamentos para impresión 3D y cómo elegir el adecuado», Elitel Design. Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://eliteldesign.com/tipos-de-filamentos-para-impresion-3d/>
- [27] «¿Cuáles son los materiales para impresión 3d más utilizados?» Accedido: 25 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://tecnobro3d.com/materiales-para-impresion-3d/>
- [28] two.zero.ext, «Impresión 3d en el sector sanitario o médico: calidad, regulación y oportunidades para España», Excelencia Tech Group. Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://excelencia-tech.com/blog/impresion-3d-sector-medico/>

- [29] Víctor, «Materiales para Impresoras 3D: Guía de Filamentos», Creación3d. Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://creacion3d.es/materiales-impresoras-3d/>
- [30] «Impresión 3D y Aeroespacial: Aplicaciones, Materiales y Ventajas». Accedido: 27 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.weerg.com/es/guias/impresion-3d-industria-aeroespacial>
- [31] D. web, «La impresión 3D cuida el mar: de redes recicladas a filamento», 3D Market. Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dmarket.mx/tipos-de-impresion-3d/la-impresion-3d-cuida-el-mar-de-redes-recicladas-a-filamento/>
- [32] «La fabricación aditiva. La evidencia de una necesidad», Interempresas. Accedido: 28 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/116342-La-fabricacion-aditiva-La-evidencia-de-una-necesidad.html>
- [33] D. S. Thomas y S. W. Gilbert, «Costs and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing», National Institute of Standards and Technology, NIST SP 1176, dic. 2014. doi: 10.6028/NIST.SP.1176.
- [34] «Moto Engineering Foundation | Fundación MEF». Accedido: 18 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://fundacionmef.org/fundacionmef.html>
- [35] D. Sánchez, «Morlaco stay bracket design and fab process | Bottpower». Accedido: 26 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.bottpower.com/morlaco-stay-bracket-design-and-fabrication-process/>
- [36] «Tienda Oficial AIM España», AIM Racing Store. Accedido: 29 de mayo de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://www.aim-racingstore.com/>
- [37] S. F. Hoerner, «Fluid-Dynamic Drag».
- [38] S. V. Oliva, «LA IMPRESIÓN 3D COMO TECNOLOGÍA DE USO GENERAL EN EL FUTURO», n.º 3.
- [39] «Comparación de costos entre impresión 3D y fabricación tradicional», Layers Blog. Accedido: 25 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://layers.app/blog/es/comparacion-de-costos-entre-impresion-3d-y-fabricacion-tradicional/>
- [40] G. Hammond y C. Jones, «INVENTORY OF CARBON & ENERGY (ICE)».
- [41] «Our Environmental Profile Reports», European Aluminium. Accedido: 30 de junio de 2026. [En línea]. Disponible en: <https://european-aluminium.eu/blog/environmental-profile-reports/>

## ANEXO I: Resultados MotoStudent

Registros de la competición MotoStudent publicados en 2023.



VII MotoStudent International Competition



Official Standings

### Final results – Acceleration tests

| POSITION | Bike number | Team name                 | Final Time (mm:ss,sss) | Score |
|----------|-------------|---------------------------|------------------------|-------|
| 1        | 32          | UPM MOTOSTUDENT ELECTRIC  | 00:05,924              | 80    |
| 2        | 88          | UniBo Motorsport          | 00:06,047              | 75    |
| 3        | 80          | Polimi Motorcycle Factory | 00:06,317              | 70    |
| 4        | 65          | Impulse Unimore           | 00:06,371              | 65    |
| 5        | 5           | UMA Racing Team           | 00:06,395              | 61    |
| 6        | 71          | LEM Wroclaw               | 00:06,426              | 57    |
| 7        | 97          | UBU Racing                | 00:06,881              | 53    |
| 8        | 54          | 2WheelsPOLITO             | 00:06,932              | 50    |
| 9        | 72          | QUARTODILITRO UNIPD       | 00:07,059              | 47    |
| 10       | 96          | CTU Lions Electric        | 00:07,080              | 44    |
| 11       | 22          | eGIPIUZKOA GIE-UPV/EHU    | 00:07,082              | 42    |
| 12       | 10          | EEBE ePowered RACING      | 00:07,354              | 40    |
| 13       | 31          | UJI Electric Racing Team  | 00:07,512              | 38    |
| 14       | 16          | Bizkaia ESI Bilbao        | 00:07,830              | 37    |
| 15       | 28          | REM IHU                   | 00:07,994              | 36    |
| 16       | 9           | MS Unizar Electric        | 00:08,000              | 35    |
| 17       | 17          | eLaketric UAS Constance   | 00:08,268              | 34    |
| 18       | 12          | EMUS                      | 00:08,570              | 33    |
| 19       | 6           | UCO ELECTRIC RACING       | 00:09,619              | 32    |
| 20       | 33          | UPC VILANOVA E3 TEAM      | 00:09,798              | 31    |
| 21       | 34          | USRacing                  | 00:10,017              | 30    |
| 22       | 7           | ISC Racing Team UPC       | 00:10,846              | 29    |
| 23       | 4           | E-Moto AGH                | 00:12,413              | 28    |
| 24       | 11          | Wofast UniOvi             | 00:12,714              | 27    |
| 25       | 76          | COMETS                    | 00:13,525              | 26    |
| 26       | 8           | MotoSpirit ESEIAAT - UPC  | 00:15,927              | 25    |
| 27       | 14          | UPV EPSA Moto-E           | 00:20,575              | 24    |
| NP       | 99          | MotoUPCT                  | NP                     | NP    |
| NP       | 53          | eRacing ETSEIB            | NP                     | NP    |
| NP       | 18          | MST Miner Motorcycle      | NP                     | NP    |
| NP       | 69          | SKAP WUT Racing           | NP                     | NP    |
| NP       | 24          | MOTOMANIPAL               | NP                     | NP    |
| NP       | 73          | UPV/EHU Araba MotorSport  | NP                     | NP    |
| NP       | 25          | URVoltage Racing (URV)    | NP                     | NP    |
| NP       | 87          | ETSIT UPNa Racing         | NP                     | NP    |
| NP       | 44          | TLMoto                    | NP                     | NP    |
| NP       | 70          | Tadarida MotoRacing UFU   | NP                     | NP    |
| NP       | 77          | Kenji Racing Team         | NP                     | NP    |
| NP       | 93          | MotoETSIUHU Electric      | NP                     | NP    |
| NP       | 26          | UPPström Racing           | NP                     | NP    |
| NP       | 15          | EPS-Jaen eRacing          | NP                     | NP    |
| NP       | 94          | R-8 ISLAND ULL            | NP                     | NP    |
| NP       | 29          | MOTO SPARK UNAM           | NP                     | NP    |

Date of publication: Saturday, 14 October 2023

Time of publication: 5:15:29 PM



Comitee President



Comitee Secretary





VII MotoStudent International Competition

Official Standings



Final results – Brake tests

| POSITION | Bike number | Team name                 | Final distance (m) | Score |
|----------|-------------|---------------------------|--------------------|-------|
| 1        | 97          | UBU Racing                | 27,4               | 80    |
| 2        | 72          | QUARTODILITRO UNIPD       | 27,9               | 75    |
| 3        | 10          | EEBE ePowered RACING      | 31,1               | 70    |
| 4        | 88          | UniBo Motorsport          | 31,5               | 65    |
| 5        | 71          | LEM Wroclaw               | 32,6               | 61    |
| 6        | 80          | Polimi Motorcycle Factory | 33,5               | 57    |
| 7        | 28          | REM IHU                   | 33,9               | 53    |
| 8        | 5           | UMA Racing Team           | 34                 | 50    |
| 9        | 17          | eLaketric UAS Constance   | 34,8               | 47    |
| 10       | 32          | UPM MOTOSTUDENT ELECTRIC  | 34,9               | 44    |
| 11       | 54          | 2WheelsPolito             | 35,3               | 42    |
| 12       | 12          | EMUS                      | 36,2               | 40    |
| 13       | 65          | Impulse Unimore           | 36,8               | 38    |
| 14       | 22          | eGIPIZKOA GIE-UPV/EHU     | 37,1               | 37    |
| 15       | 96          | CTU Lions Electric        | 38,3               | 36    |
| 16       | 33          | UPC VILANOVA E3 TEAM      | 40,2               | 35    |
| 17       | 9           | MS Unizar Electric        | 42,4               | 34    |
| 18       | 6           | UCO ELECTRIC RACING       | 42,7               | 33    |
| 19       | 4           | E-Moto AGH                | 43,4               | 32    |
| 20       | 7           | JSC Racing Team UPC       | 44,1               | 31    |
| 21       | 16          | Bizkaia ESI Bilbao        | 45,6               | 30    |
| 22       | 31          | UIJ Electric Racing Team  | 48,1               | 29    |
| 23       | 76          | COMETS                    | 51                 | 28    |
| NULL     | 8           | MotoSpirit ESEIAAT - UPC  | NULL               | NULL  |
| NULL     | 11          | Wolfast UniOvi            | NULL               | NULL  |
| NULL     | 34          | USRacing                  | NULL               | NULL  |
| NULL     | 14          | UPV EPSA Moto-E           | NULL               | NULL  |
| NP       | 99          | MotoUPCT                  | NP                 | NP    |
| NP       | 53          | eRacing ETSEIB            | NP                 | NP    |
| NP       | 18          | MST Miner Motorcycle      | NP                 | NP    |
| NP       | 69          | SKAP WUT Racing           | NP                 | NP    |
| NP       | 24          | MOTOMANIPAL               | NP                 | NP    |
| NP       | 73          | UPV/EHU Araba MotorSport  | NP                 | NP    |
| NP       | 25          | URVoltage Racing (URV)    | NP                 | NP    |
| NP       | 87          | ETSII UPNa Racing         | NP                 | NP    |
| NP       | 44          | TLMoto                    | NP                 | NP    |
| NP       | 70          | Tadarida MotoRacing UFU   | NP                 | NP    |
| NP       | 77          | Kenji Racing Team         | NP                 | NP    |
| NP       | 93          | MotoETSIIHU Electric      | NP                 | NP    |
| NP       | 26          | UPPström Racing           | NP                 | NP    |
| NP       | 15          | EPS-Jaen eRacing          | NP                 | NP    |
| NP       | 94          | R-8 ISLAND ULL            | NP                 | NP    |
| NP       | 29          | MOTO SPARK UNAM           | NP                 | NP    |

Date of publication: Saturday, 14 October 2023

Time of publication: 5:14:36 PM



Comitee President



Comitee Secretary





VII MotoStudent International Competition

Official Standings



Test 4 - V<sub>max</sub>

| POSITION | Bike number | Team name                 | Speed (km/h) | Score           |
|----------|-------------|---------------------------|--------------|-----------------|
| 1        | 80          | Polimi Motorcycle Factory | 202,6        | 30              |
| 2        | 5           | UMA Racing Team           | 201,9        | 28              |
| 3        | 88          | UniBo Motorsport          | 197,4        | 26              |
| 4        | 65          | Impulse Unimore           | 189,1        | 24              |
| 5        | 54          | 2WheelsPolito             | 185,2        | 22              |
| 6        | 9           | MS Unizar Electric        | 179,7        | 20              |
| 6        | 10          | EEBE ePowered RACING      | 179,7        | 20              |
| 8        | 71          | LEM Wroclaw               | 179,1        | 18              |
| 9        | 97          | UBU Racing                | 169          | 17              |
| 10       | 28          | REM IHU                   | 165,9        | 16              |
| 11       | 22          | eGIPIZKOA GIE-UPV/EHU     | 156,5        | 15              |
| 12       | 31          | UII Electric Racing Team  | 153          | 14              |
| 13       | 17          | eLaketric UAS Constance   | 150,8        | 13              |
| 14       | 11          | Wolfast UniOvi            | 150,2        | 12              |
| 15       | 72          | QUARTODILITRO UNIPD       | 147,1        | 11              |
| 16       | 16          | Bizkaia ESI Bilbao        | 144,4        | 10              |
| 17       | 76          | COMETS                    | 140,1        | 10              |
| 18       | 96          | CTU Lions Electric        | 139,9        | 10              |
| 19       | 12          | EMUS                      | 139,5        | 10              |
| 20       | 14          | UPV EPSA Moto-E           | 127,8        | 10              |
| 21       | 33          | UPC VILANOVA E3 TEAM      | 115,3        | 9               |
| 22       | 4           | E-Moto AGH                | 112,3        | 9               |
| NC       | 32          | UPM MOTOSTUDENT ELECTRIC  |              | NC <sup>1</sup> |
| NP       | 99          | MotoUPCT                  |              | NP              |
| NP       | 8           | MotoSpirit ESEIAAT - UPC  |              | NP              |
| NP       | 7           | ISC Racing Team UPC       |              | NP              |
| NP       | 53          | eRacing ETSEIB            |              | NP              |
| NP       | 18          | MST Miner Motorcycle      |              | NP              |
| NP       | 69          | SKAP WUT Racing           |              | NP              |
| NP       | 24          | MOTOMANIPAL               |              | NP              |
| NP       | 34          | USRacing                  |              | NP              |
| NP       | 73          | UPV/EHU Araba MotorSport  |              | NP              |
| NP       | 25          | URVoltage Racing (URV)    |              | NP              |
| NP       | 87          | ETSIT UPNa Racing         |              | NP              |
| NP       | 44          | TLMoto                    |              | NP              |
| NP       | 70          | Tadarida MotoRacing UFU   |              | NP              |
| NP       | 77          | Kenji Racing Team         |              | NP              |
| NP       | 93          | MotoETSIUHU Electric      |              | NP              |
| NP       | 26          | UPPström Racing           |              | NP              |
| NP       | 15          | EPS-Jaen eRacing          |              | NP              |
| NP       | 94          | R-8 ISLAND ULL            |              | NP              |
| NP       | 29          | MOTO SPARK UNAM           |              | NP              |
| NP       | 6           | UCO ELECTRIC RACING       |              | NC <sup>1</sup> |

Date of publication: Sunday, 15 October 2023

Time of publication: 8:08:19 AM

  
 Comitee President

  
 Comitee Secretary

<sup>1</sup> Not complies with the MotoStudent Rules & Regulations VII (V\_3) article D.1.1.1



## ANEXO II: Iteraciones y Condiciones de Contorno

| PROTOTIPO | % OPTIMIZACION | TAMAÑO VOXEL (mm) | 4,197                | SIMULACION | TAMAÑO MALLA (mm) | 276                  |
|-----------|----------------|-------------------|----------------------|------------|-------------------|----------------------|
|           |                |                   | MASA RESULTANTE (Kg) |            |                   | TENSION MAXIMA (MPa) |
| 1         | 70             | 1,79              | 1,146                | 1          | 4,52              | 22,4                 |
|           |                |                   |                      | 2          | 4,52              | 3,26                 |
|           |                |                   |                      |            |                   |                      |
| 2         | 50             | 1,79              | 1,954                | 1          | 3,73              | 24,9                 |
|           | 60             | 1,79              | 1,598                | 1          | 3,53              | 25,4                 |
|           | 70             | 1,79              | 1,185                |            |                   |                      |
| 3         | 70             | 1,79              | 1,195                | 1          | 3,21              | 31,6                 |
|           | 85             | 1,79              | 0,634                | 1          | 3,41              | 52                   |
|           | 90             | 1,79              | 0,44                 | 1          | 3,1               | 329                  |

Tabla 21: Excel de iteraciones

| PROTOTIPO | DETALLES                           | DECISION   |
|-----------|------------------------------------|--|
| 1         | Simulación a compresión            |  |
|           | Simulación a tracción              | Eliminar caso por no ser el más crítico                            |
|           | Anclajes muy optimizados           | Añadir seccion restringida para conservar más masa en los anclajes |
| 2         |                                    |  |
|           | Elimina union del soporte del dash | Añadir seccion restringida para conservar unión                    |
| 3         |                                    |  |
|           | Supera max                         | Elegir la optimizacion anterior                                    |

Tabla 22: Excel de decisiones

| PARTES                | DESPLAZAMIENTO (mm) |    |    |
|-----------------------|---------------------|----|----|
|                       | P1                  | P2 | P3 |
| Tornillos superiores  | 3                   | 2  | 2  |
| Sujección dash        | 8                   | 8  | 8  |
| Fijo                  | 10                  | 10 | 10 |
| Restringida Tornillos |                     | 30 | 25 |
| Restringida Anclaje   |                     | 60 | 55 |

Tabla 23: Excel valores de desplazamiento para simulaciones

### ANEXO III: Plano del circuito

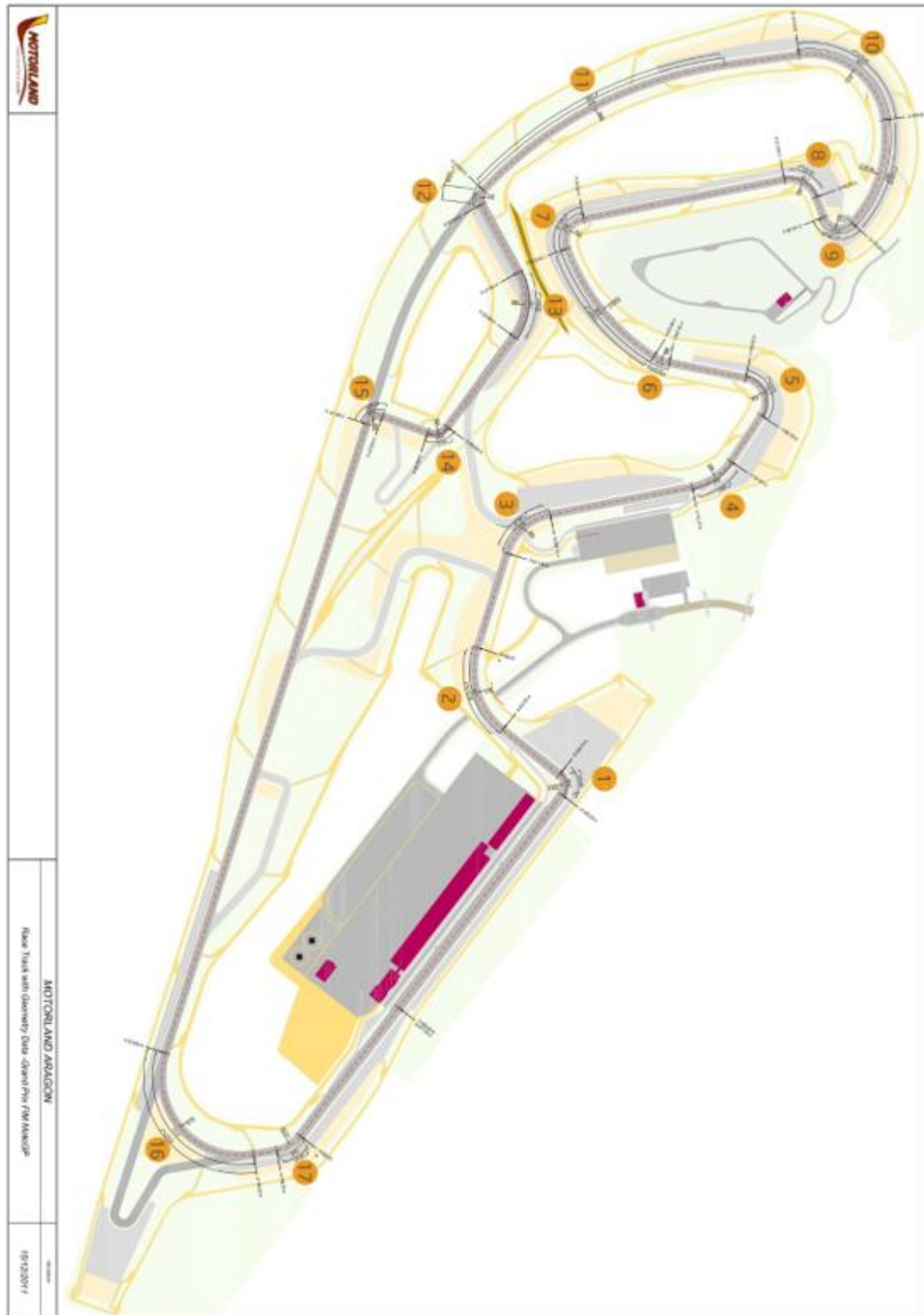


Ilustración 112: Plano circuito Motorland Aragón



**ANEXO IV: Plano del modelo inicial**

