



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Diseño y desarrollo de utillajes para el pulido
robotizado de piezas de plástico

Design and development of tooling for robotic
polishing of plastic parts

Autor

Jorge Palomera Fernández

Director

Juan José Aguilar Martín

Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2025

Diseño y desarrollo de utillajes para el pulido robotizado de piezas de plástico.

RESUMEN

El Trabajo Fin de Grado descrito a continuación detalla el procedimiento de diseño y desarrollo de utillajes específicos para optimizar el proceso de pulido robotizado de piezas de plástico. El objetivo principal es diseñar cuatro prototipos funcionales y eficientes que faciliten la interacción entre el brazo robótico y las piezas a procesar, garantizando al mismo tiempo la comodidad del operario durante la inserción de dichas piezas.

Para lograr este propósito, se ha seguido una metodología estructurada que comienza con el análisis de las piezas a pulir, evaluando su geometría y propiedades mecánicas. Se han estudiado la herramienta de pulido y los movimientos requeridos por el brazo robótico para asegurar una integración eficiente. Sobre esta base, se ha realizado un diseño CAD en 3D, orientados a minimizar costes y tiempos de fabricación. También se ha analizado la optimización topológica de un módulo de utillaje.

El prototipo ha sido producido mediante tecnología de impresión 3D utilizando material PLA, lo que permite evaluar su calidad dimensional y realizar las pruebas necesarias para ajustar su funcionalidad. Finalmente, se han llevado a cabo pruebas de validación y ajustes, confirmando la adaptabilidad de los utillajes a las piezas de plástico y su idoneidad para el proceso de pulido robotizado.

Este proyecto representa un paso significativo hacia la mejora de procesos de diseño, combinando innovación, precisión y eficiencia en el diseño de soluciones personalizadas.

ABSTRACT

The Final Degree Project described below details the design and development process of specific tooling to optimize the robotic polishing of plastic parts. The main objective is to design four functional and efficient prototypes that facilitate the interaction between the robotic arm and the parts to be processed, while ensuring operator comfort during the insertion of said parts.

To achieve this goal, a structured methodology has been followed, starting with the analysis of the parts to be polished, evaluating their geometry and mechanical properties. The polishing tool and the movements required by the robotic arm have been studied to ensure efficient integration. Based on this analysis, a 3D CAD design has been carried out, aimed at minimizing manufacturing costs and time. Additionally, the topological optimization of a tooling module has been analyzed.

The prototype has been produced using 3D printing technology with PLA material, allowing for the evaluation of its dimensional quality and the necessary testing to fine-tune its functionality. Finally, validation tests and adjustments have been performed, confirming the adaptability of the tooling to the plastic parts and its suitability for the robotic polishing process.

This project represents a significant step towards improving design processes, combining innovation, precision, and efficiency in the creation of customized solution.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen	ii
Abstract.....	iii
1. Introducción	1
1.1 Contexto y justificación.....	1
1.2 objetivo	1
1.3 Metodología	2
2. Estado del arte	3
2.1 Impresión 3D y materiales poliméricos	3
2.2 Ventajas y desventajas de la impresión 3D en la fabricación de prototipos	4
2.3 Pulido robotizado de piezas y los problemas que presentan los utillajes.	6
3. Máquinas y material empleado	6
3.1 Impresora ANET ET5	7
3.2 PLA (Ácido poliláctico)	8
3.2.1 Especificaciones técnicas del PLA.....	8
3.2.2 Ventajas del uso del PLA.....	8
3.2.3 Limitaciones del uso del PLA	9
3.3 Herramientas software	9
4. Análisis requisitos generales de los utillajes	10
5. Justificación de los Medios Utilizados.....	11
6. Diseño de los utillajes.....	12
6.1 Utillaje para pieza 1	14
6.2 Utillaje para pieza 2	19
6.3 Utillaje para pieza 3	24
6.4 Utillaje para pieza 4	29
6.5 Parámetros de impresión	33
7. Costes económicos de los utillajes.....	35
7.1 Costes materiales.....	35
7.2 Costes totales.....	40
8. Análisis y Optimización Topológica	41
9. Descripción de tareas.....	44
9.1 Tarea I: Estudio previo	45
9.2 Tarea II: Análisis de requisitos de los utillajes	45

9.3	Tarea III: Diseño y desarrollo de los utillajes	45
9.4	Tarea IV: Validación de utillajes	46
9.5	Tarea V: Elaboración de documento.....	46
10.	Presupuesto del proyecto.....	48
11.	Conclusiones y líneas de trabajo futuras.....	49
	Bibliografía.....	51
	ANexos.....	52
	Anexo I: Cálculos para la obtención del plano perpendicular al vector normal.	52
	Anexo II: Cálculo del precio de la electricidad en España en octubre 2024	54
	Anexo III: Parámetros y laminado para impresión 3d de los módulos de utillaje.	55
	Anexo IV: Optimización topológica	59
	Anexo V: Utillajes finales.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Banco de ensayos.....	12
Figura 2 Perfil de acople de utillajes.....	13
Figura 3 Geometría de la pieza de trabajo 1.....	14
Figura 4 Medida de longitud máxima de la pieza de trabajo 1.....	14
Figura 5 Superficie de pulido de la pieza 1.....	15
Figura 6 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 1.....	15
Figura 7 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 1.....	16
Figura 8 Módulo 1 del utillaje 1.....	17
Figura 9 Módulo 1 del utillaje 1 con pieza de trabajo incorporada.....	17
Figura 10 Módulo 2 del utillaje 1.....	18
Figura 11 Módulo 2 del utillaje 1 con pieza de trabajo incorporada.....	18
Figura 12 Vista en planta del utillaje para pieza 1.....	19
Figura 13 Vista planta inferior del utillaje para pieza 1.....	19
Figura 14 Geometría de la pieza de trabajo 2.....	20
Figura 15 Medida de longitud máxima de la pieza de trabajo 2.....	20
Figura 16 Superficie de pulido de la pieza 2.....	21
Figura 17 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 2.....	21
Figura 18 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 2.....	22
Figura 19 Módulo 1 del utillaje 2.....	22
Figura 20 Módulo 1 del utillaje 2 con pieza de trabajo incorporada.....	23
Figura 21 Módulo 2 del utillaje 2.....	23
Figura 22 Módulo 2 del utillaje 2 con pieza de trabajo incorporada.....	23
Figura 23 Vista en planta del utillaje para pieza 2.....	24
Figura 24 Vista planta inferior del utillaje para pieza 2.....	24
Figura 25 Geometría de la pieza de trabajo 3.....	25
Figura 26 Medida de longitud máxima de la pieza de trabajo 3.....	25
Figura 27 Superficie de pulido de la pieza 3.....	25
Figura 28 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 3.....	26
Figura 29 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 3.....	26
Figura 30 Módulo 1 del utillaje 3.....	27
Figura 31 Módulo 1 del utillaje 3 con pieza de trabajo incorporada.....	27
Figura 32 Módulo 2 del utillaje 3.....	27
Figura 33 Módulo 2 del utillaje 3 con pieza de trabajo incorporada.....	28
Figura 34 Vista en planta del utillaje para pieza 3.....	28
Figura 35 Vista planta inferior del utillaje para pieza 3.....	28
Figura 36 Geometría de la pieza de trabajo 4.....	29
Figura 37 Medida de longitud máxima de la pieza de trabajo 4.....	29
Figura 38 Superficie de pulido de la pieza 4.....	30
Figura 39 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 4.....	30
Figura 40 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 4.....	30
Figura 41 Módulo 1 del utillaje 4.....	31
Figura 42 Módulo 1 del utillaje 4 con pieza de trabajo incorporada.....	31

Figura 43 Módulo 2 del utillaje 4	32
Figura 44 Módulo 2 del utillaje 4 con pieza de trabajo incorporada	32
Figura 45 Vista en planta del utillaje para pieza 4	32
Figura 46 Vista planta inferior del utillaje para pieza 4	33
Figura 47 Distribución de cargas y restricciones del módulo 1 del utillaje para pieza 1	43
Figura 48 Módulo 1 del utillaje para pieza 1 optimizado	44
Figura 49 Diagrama de Gantt	47

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Cálculo vector normal de la pieza de trabajo 1.....	16
Tabla 2 Principales parámetros de impresión 3D	34
Tabla 3 Unidades de los parámetros de costes	35
Tabla 4 Costes materiales asociados al módulo 1 del utillaje para pieza 1	36
Tabla 5 Costes materiales asociados al módulo 2 del utillaje para pieza 1	36
Tabla 6 Costes materiales totales asociados a utillaje para pieza 1	36
Tabla 7 Costes materiales asociados al módulo 1 del utillaje para pieza 2	37
Tabla 8 Costes materiales asociados al módulo 2 del utillaje para pieza 2	37
Tabla 9 Costes materiales totales asociados a utillaje para pieza 2	37
Tabla 10 Costes materiales asociados al módulo 1 del utillaje para pieza 3	38
Tabla 11 Costes materiales asociados al módulo 2 del utillaje para pieza 3	38
Tabla 12 Costes materiales totales asociados a utillaje para pieza 3	38
Tabla 13 Costes materiales asociados al módulo 1 del utillaje para pieza 4	39
Tabla 14 Costes materiales asociados al módulo 2 del utillaje para pieza 4	39
Tabla 15 Costes materiales totales asociados a utillaje para pieza 4	39
Tabla 16 Costes de amortización de cada módulo de utillaje	40
Tabla 17 Costes totales asociados al diseño y fabricación de los utillajes	41
Tabla 18 Resumen presupuestos del proyecto	48
Tabla 19 Cálculo vector normal de la pieza de trabajo 2.....	52
Tabla 20 Cálculo vector normal de la pieza de trabajo 3.....	52
Tabla 21 Cálculo vector normal de la pieza de trabajo 4.....	53

1. INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Fin de Grado, busca diseñar y desarrollar utillajes específicos para el pulido robotizado de piezas plásticas. Incluye análisis de requisitos técnicos de los utillajes, diseño detallado, fabricación de prototipos en 3D y pruebas experimentales para garantizar funcionalidad, adaptabilidad y fácil integración con sistemas robotizados. Además, se prioriza la sostenibilidad mediante materiales reciclables. También se desarrolla un análisis de optimización topológica sobre uno de los utillajes.

1.1 CONTEXTO Y JUSTIFICACIÓN

El pulido de piezas de plástico es un proceso esencial en industrias como la automoción y los productos de diseño, donde las superficies deben cumplir con estrictos requisitos estéticos y funcionales. Sin embargo, llevar a cabo esta tarea de forma manual implica varias desventajas, como la dependencia de la habilidad del operario, la falta de uniformidad en los acabados y los riesgos que suponen al operario asociados al esfuerzo repetitivo. Ante estos desafíos, la automatización mediante robots industriales ha demostrado ser una alternativa eficiente y sostenible.

Un sistema robotizado requiere utillajes específicos para sujetar las piezas con precisión, estos elementos son clave para garantizar la repetibilidad del proceso y la adaptabilidad del brazo robot a diferentes geometrías de las piezas. Además, deben optimizar el uso del brazo robótico y facilitar una interacción sencilla y segura entre el operario y el robot.

1.2 OBJETIVO

El objetivo de este proyecto es desarrollar utillajes personalizados que optimicen el proceso de pulido robotizado de piezas plásticas. Esto se logrará mediante soluciones que combinen funcionalidad, precisión y adaptabilidad, incorporando principios de sostenibilidad e innovación tecnológica para responder a las necesidades del sector industrial de manera eficiente y responsable. En concreto los objetivos son:

- Diseñar y fabricar utillajes personalizados que faciliten el pulido robotizado de piezas plásticas, así como la ergonomía del operario en su manejo.
- Realizar un análisis de requisitos técnicos para los utillajes, para que cumplan las características requeridas.
- Garantizar la funcionalidad, repetibilidad y adaptabilidad de los utillajes a diferentes geometrías de piezas.
- Incorporar principios de sostenibilidad mediante el uso de materiales reciclables y la optimización de recursos.
- Explorar el uso de tecnologías avanzadas como la impresión 3D y el análisis de optimización topológica para innovar en el diseño de utillajes industriales.

1.3 METODOLOGÍA

Para garantizar el éxito del proyecto, se ha definido una metodología estructurada en etapas que abarcan desde el análisis de los requisitos técnicos hasta la validación y optimización de los utillajes. Este enfoque permite desarrollar soluciones innovadoras, funcionales y replicables. A continuación, se describen las fases del desarrollo:

- **Análisis de Requisitos:** Identificación de las necesidades técnicas de los utillajes, considerando factores como geometría, materiales y compatibilidad con sistemas robotizados.
- **Diseño y Fabricación:** Desarrollo de diseños asistidos por ordenador (CAD) y fabricación de prototipos mediante impresión 3D, optimizando el peso y la funcionalidad de los utillajes.
- **Pruebas Experimentales:** Validación funcional de los prototipos para evaluar su rendimiento, adaptabilidad y facilidad de integración en procesos industriales.
- **Optimización Topológica:** Aplicación de técnicas de optimización en uno de los utillajes para reducir material sin comprometer su funcionalidad, fomentando la sostenibilidad y eficiencia.

La fabricación de utillajes mediante herramientas de diseño asistido por ordenador (CAD) y tecnologías de fabricación aditiva, como la impresión 3D, ofrece soluciones innovadoras. Estas tecnologías permiten diseñar herramientas personalizadas, ligeras y optimizadas, capaces de enfrentar los retos que plantean las piezas más complejas. La fabricación de estos utillajes mediante tecnologías como el diseño asistido por ordenador (CAD) y la impresión 3D ofrece nuevas posibilidades.

El proyecto no solo busca resolver un problema técnico relacionado con el diseño de utillajes para sistemas de pulido robotizado, sino también avanzar en el conocimiento y la aplicación de tecnologías de fabricación avanzada y automatización industrial. En última instancia, este trabajo tiene como objetivo mejorar la eficiencia, la calidad y la sostenibilidad del pulido de piezas de plástico, contribuyendo al desarrollo de procesos industriales más avanzados.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1 IMPRESIÓN 3D Y MATERIALES POLIMÉRICOS

La impresión 3D por FDM (Fused Deposition Modeling) es una tecnología de fabricación aditiva, permite construir objetos tridimensionales mediante la superposición de capas de material, siguiendo un diseño digital previamente modelado [1]. Este enfoque contrasta con los métodos tradicionales de fabricación, donde el material se remueve o se moldea. El uso de esta tecnología permite el diseño y fabricación de piezas con geometrías altamente complejas y personalizadas. Este método ha transformado la manufactura en sectores como la automoción, la aeronáutica, la medicina y la arquitectura, gracias a su capacidad para producir piezas complejas, reducir costos y acelerar el desarrollo de productos.

Existen diversos materiales utilizados en impresión 3D, cada uno con propiedades mecánicas, térmicas y químicas específicas que los hacen aptos para diferentes ramas de la industria como las mencionadas anteriormente. Unos de los materiales más comunes en la impresión 3D son los termoplásticos debido a su facilidad de uso y versatilidad. Se funden a altas temperaturas y se solidifican al enfriarse. Algunos de los termoplásticos más utilizados son[2]:

- **PLA (Ácido Poliláctico):** Biodegradable, fácil de imprimir y económico, aunque con resistencia térmica limitada.
- **ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno):** Resistente al impacto y al calor, adecuado para piezas funcionales.
- **PETG (Polietileno Tereftalato Glicol):** Combina buena resistencia química y mecánica, siendo ideal para piezas sometidas a esfuerzos moderados.
- **TPU (Poliuretano Termoplástico):** Material flexible y elástico, utilizado en componentes que requieren propiedades de deformación.
- **Nylon (Poliamida):** Alta resistencia mecánica y a la fricción, ideal para piezas mecánicas y engranajes.

Otros de los materiales más utilizados son las resinas líquidas que se curan bajo luz ultravioleta (UV). Se usan principalmente en tecnologías como la estereolitografía (SLA) y la digital light processing (DLP). Estas resinas ofrecen un nivel de detalle superior y una superficie mucho más suave que los termoplásticos. Ideales para piezas que requieran acabados más visuales. Las más utilizadas son[2]:

- **Resina estándar:** Ideal para prototipos visuales, con alta resolución y acabados suaves, pero menos resistente.
- **Resina dura:** Mayor resistencia y dureza, adecuada para piezas precisas y funcionales que no soportan grandes tensiones.
- **Resina flexible:** Más elástica, ideal para piezas como sellos o juntas que necesitan doblarse sin romperse.

- **Resina de alta temperatura:** Resistente a altas temperaturas, adecuada para aplicaciones térmicas en automoción e ingeniería.

Los materiales compuestos son sistemas que combinan una matriz, generalmente polimérica, con un refuerzo, como fibras de carbono o vidrio, con el objetivo de mejorar propiedades mecánicas y térmicas, tales como resistencia, rigidez y durabilidad. Las características cambian en proporción al porcentaje de los refuerzos añadidos a la matriz. Los más comunes dentro de este ámbito son[2]:

- **Fibra de carbono:** Material compuesto ligero y de alta resistencia mecánica, ideal para automoción, aeronáutica y deportes de alto rendimiento, donde se busca optimizar el rendimiento con materiales de bajo peso.
- **Fibra de vidrio:** Similar a la fibra de carbono, pero con propiedades mecánicas inferiores. Usada en componentes que requieren resistencia a la tracción y flexibilidad, con un mejor coste-beneficio, especialmente en industria, automoción y construcción.
- **Materiales con partículas metálicas:** Combinan partículas metálicas como cobre o bronce con polímeros, mejorando propiedades mecánicas o estéticas. Utilizados para piezas con mayor resistencia al desgaste y conductividad térmica o propiedades específicas de acabado.

También existen materiales especializados con aplicaciones que amplían las posibilidades de la impresión 3D, desarrollados para diferentes campos más específicos como los siguientes[3]:

- **Materiales biocompatibles:** Son utilizados en aplicaciones médicas, como la impresión de implantes o prótesis, y tienen propiedades que permiten su integración en el cuerpo humano sin causar reacciones adversas, como el PCL o resinas biocompatibles.
- **Materiales fotoluminiscentes:** Empleados para crear piezas que brillan en la oscuridad, muy útiles en aplicaciones de seguridad y diseño visual. Como algún tipo de PLA, ABS o materiales poliméricos fluorescentes basados en nitruro de carbono grafitico (GCN).
- **Materiales conductores:** Son materiales que permiten la impresión de circuitos eléctricos o componentes electrónicos, como el grafeno y ciertas resinas conductoras, y tienen aplicaciones en el desarrollo de prototipos electrónicos.

2.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE LA IMPRESIÓN 3D EN LA FABRICACIÓN DE PROTOTIPOS

La impresión 3D se ha consolidado como una herramienta clave en la fabricación de prototipos debido a su capacidad para agilizar los procesos de diseño y mejorar la eficiencia en la creación de modelos funcionales. A continuación, se detallan las principales ventajas:

- **Rapidez en la producción.** Permite crear prototipos en un corto periodo de tiempo, desde unas pocas horas hasta un par de días, dependiendo de la complejidad de la pieza, el tamaño y el material utilizado. Esto acelera significativamente los tiempos de desarrollo y permite realizar pruebas y modificaciones de manera rápida durante las fases iniciales del diseño de productos.
- **Flexibilidad de diseño.** Una de las grandes ventajas es su capacidad para fabricar geometrías complejas y personalizadas que serían extremadamente difíciles o imposibles de lograr mediante métodos tradicionales. Esto permite a los diseñadores explorar ideas innovadoras y probar múltiples variantes de un diseño sin apenas restricciones.
- **Reducción de costos.** Al eliminar la necesidad de moldes y herramientas costosas, la impresión 3D resulta particularmente útil para producciones de bajo volumen. Esto también reduce los costos asociados a la fabricación de prototipos físicos mediante técnicas tradicionales como el mecanizado o la fundición.
- **Realización de variaciones.** La posibilidad de realizar múltiples versiones de un prototipo en poco tiempo permite a los diseñadores y equipos de ingeniería probar diferentes enfoques y realizar ajustes rápidos, lo que mejora la calidad del producto final y acelera la toma de decisiones.

A continuación, se detallan las principales desventajas:

- **Limitaciones de materiales.** Aunque la variedad de materiales disponibles está en constante crecimiento, aún existen limitaciones en cuanto a sus propiedades. Algunos de los materiales más comunes no tienen las mismas características mecánicas o térmicas que los materiales fabricados mediante métodos tradicionales, como el moldeo por inyección o el mecanizado, lo que puede limitar su aplicabilidad en ciertas industrias.
- **Propiedades mecánicas inferiores.** Las piezas suelen ser más débiles en ciertas direcciones debido a la naturaleza de la fabricación capa por capa, lo que puede generar anisotropía en las propiedades mecánicas. Esto puede afectar en su rendimiento en aplicaciones estructurales o de alta carga.
- **Acabados superficiales y posprocesamiento.** Dependiendo de la tecnología de impresión utilizada, los prototipos pueden presentar acabados superficiales rugosos que requieren un posprocesamiento para alcanzar un nivel adecuado de acabado visual o funcional. El lijado, pulido y recubrimiento son los procesos más comunes para mejorar la estética y el rendimiento de la pieza.
- **Soportes estructurales de impresión.** Estos soportes son generados para poder imprimir estructuras en voladizo, lo que conlleva obtener un acabado superficial rugoso o que supere el rango de tolerancias deseado. Generalmente suelen tener que necesitar un proceso de posprocesamiento como el mencionado anteriormente.

- **Limitaciones en la escala de producción.** Aunque la impresión 3D es muy eficiente para la creación de prototipos, sigue siendo menos competitiva en términos de coste y velocidad cuando se trata de producción en masa, especialmente cuando se requieren grandes volúmenes de piezas. Para producción de grandes cantidades, los métodos tradicionales siguen siendo más rentables.
- **Limitaciones de tamaño y precisión.** Dependiendo de las características de tamaño de la máquina empleada, se pueden encontrar dificultades en la impresión de piezas de tamaños voluminosos. También puede haber errores de precisión en la repetición de una misma pieza, debido a posibles inconsistencias de la máquina.

2.3 PULIDO ROBOTIZADO DE PIEZAS Y LOS PROBLEMAS QUE PRESENTAN LOS UTILLAJES.

El pulido robotizado implica el uso de robots para realizar tareas de lijado y pulido de piezas, ofreciendo ventajas como mayor consistencia en la calidad del acabado y reducción de tiempos de producción.

Sin embargo, la implementación de este método presenta desafíos relacionados con los utillajes:

- **Adaptabilidad.** Los utillajes deben ser capaces de ajustarse a diferentes geometrías y tamaños de piezas, lo que puede requerir diseños complejos y personalizados.
- **Control de fuerza.** Es crucial que el robot ejerza la presión adecuada durante el pulido, una fuerza excesiva puede dañar la pieza o la herramienta, mientras que una insuficiente no logrará el acabado deseado. Por lo que los utillajes deberán resistir fuerzas de presión
- **Desgaste de herramientas.** Las herramientas de pulido están sujetas a desgaste, lo que puede afectar la consistencia del acabado y requiere sistemas de monitoreo y reemplazo eficientes.

En resumen, la impresión 3D y el pulido robotizado representan avances significativos en la manufactura moderna, aportando flexibilidad, eficiencia y precisión en la producción de piezas y prototipos.

3. MÁQUINAS Y MATERIAL EMPLEADO

Para llevar a cabo este proyecto de diseño y fabricación de piezas en 3D, ha sido fundamental contar con la maquinaria, las herramientas y los materiales adecuados. La

impresora 3D y el filamento que se han elegido han tenido un impacto directo en la calidad de las piezas finales y en la facilidad del proceso de fabricación.

En este apartado, se hablará sobre la impresora ANET ET5, impresora de deposición fundida, explicando sus características principales y por qué es adecuada para este tipo de trabajos. También se analizará las propiedades del filamento PLA, el material que se ha utilizado para llevar a cabo el proyecto, destacando sus ventajas y cómo influye en el resultado final.

3.1 IMPRESORA ANET ET5

La impresora ANET ET5 es una máquina de tecnología de deposición de material, diseñada para ofrecer una alta calidad de impresión y un manejo intuitivo[4]. A continuación, se detallan sus principales características técnicas, que han influido en el desarrollo y fabricación de los utillajes:

- **Volumen de impresión.** Cuenta con una capacidad de impresión 300 x 300 x 400 mm. Permitiendo la impresión de piezas grandes, pese a su gran capacidad de impresión se han tenido que dividir los modelos de los utillajes, lo cual se comentará en los apartados de los utillajes
- **Resolución de impresión.** Esta impresora ofrece una capacidad de resolución 0.1-0.4 mm de espesor de capa. La cual ha tenido una gran importancia en el acabado de las piezas.
- **Temperatura de la boquilla.** Puede alcanzar una temperatura máxima de 250°C, lo que la hace compatible con materiales como PLA, PETG, ABS y otros filamentos con puntos de fusión similares. En este caso se utilizará PLA, como se ha comentado al principio de este apartado.
- **Temperatura de la cama caliente.** La plataforma donde van apoyadas las piezas de impresión puede alcanzar temperaturas de hasta 100°C, permitiendo así un mayor agarre a esta misma y evitando posibles movimientos durante el proceso de impresión.
- **Velocidad de impresión ajustable.** La impresora trabaja a velocidades de entre 30 y 150 mm/s, lo que permite realizar un ajuste entre tiempo de impresión y calidad de acabado, siendo una velocidad menor sinónimo de mejor acabado, mientras una mayor velocidad es sinónimo de tiempos de impresión más rápidos.
- **Diametro de filamento.** Admite el estándar básico de la industria, el cual es una medida de hasta 1.75 mm.
- **Compatibilidad de archivos.** La impresora permite cargar archivos G-code, OBJ, STL Y JPG. Lo que ayudará a pasar la información de los archivos diseñados en CAD a la impresora.
- **Potencia.** Es compatible con los enchufes Tipo F (Schuko), el estándar español. Con un voltaje necesario para la impresora de 220 V y 50 Hz. Tiene un consumo de 360 W.

3.2 PLA (ÁCIDO POLILÁCTICO)

El material con el que se han desarrollado los utillajes, citado anteriormente, el filamento PLA (Ácido Poliáctico) es uno de los materiales más populares en la impresión 3D debido a su facilidad de uso, seguridad, propiedades físicas y valor económico [5].

3.2.1 Especificaciones técnicas del PLA

A continuación, se detallan las características físicas y mecánicas más relevantes [6], que han influido en el desarrollo del proyecto:

- **Densidad.** El PLA puro tiene una densidad de $1,24 \text{ g/cm}^3$, aunque puede variar hasta los $1,29 \text{ g/cm}^3$.
- **Límite elástico.** Es de 60 MPa, adecuado para soportar cargas no muy excesivas, puesto que en el proyecto a realizar no se presentan dichas cargas.
- **Resistencia de compresión.** Con un valor de 66 MPa es capaz de soportar cargas moderadas a compresión, lo que le hace útil en esta propuesta.
- **Resistencia a la tracción.** El PLA tiene una resistencia a la tracción de aproximadamente 50-70 MPa, lo que lo convierte en un material rígido y resistente a esfuerzos moderados.
- **Temperatura de deformación.** A temperaturas superiores a 55°C , el PLA pierde rigidez y comienza a deformarse, lo que limita su aplicación en entornos exigentes.
- **Elongación el 3%.** Indica que se deforma hasta un 3% antes de romperse, no es un material muy flexible.
- **Baja resistencia a la humedad.** Es un material higroscópico, lo que significa que absorbe humedad del ambiente. Esto puede afectar la calidad de la impresión, generando burbujas o capas deficientes si no se almacena adecuadamente en un lugar seco o dentro de un recipiente hermético con desecantes.

Las **propiedades térmicas** del PLA son un factor influyente a la hora de su uso, debido a que la impresora tendrá que ser capaz de llegar a las temperaturas requeridas para poder fundirlo correctamente.

- Punto de fusión 145°C .
- Temperatura de transición vítrea de 60°C .
- Mínima temperatura en servicio de 20°C .
- Calor específico $(1,18 \cdot 10^3 - 1,21 \cdot 10^3) \text{ J/Kg}^\circ\text{C}$.
- Conductividad térmica de $0,13 \text{ W/m}^\circ\text{C}$.

3.2.2 Ventajas del uso del PLA

A continuación, se van a presentar las ventajas de este material y limitaciones que este material puede tener a la hora de realizar las piezas en la impresora.

- **Facilidad de impresión.** El PLA, por su baja contracción térmica y rápido cristalizado, permite velocidades de impresión superiores, además de no requerir calor en su atmósfera (Sí que requiere calor en la cama de impresión, pero solo para su adhesión a la misma).
- **Acabado superficial.** Como se ha dicho anteriormente de su velocidad y rápido cristalizado, es capaz de dejar superficies lisas y acabados muy estéticos.
- **Adherencia entre capas.** Debido a que tiene un punto de fusión relativamente bajo, comparado con las temperaturas de la boquilla de la impresora, se pueden realizar capas de deposición caliente creando así una alta adhesión entre capas.
- **Económico.** Es uno de los materiales de impresión más económicos, los precios de dicho material pueden rondar desde los 15 euros por Kilogramo hasta los 30 euros por Kilogramo, dependiendo de factores como calidad, proveedor, envío o aditivos.
- **Origen biológico.** Una de las mayores ventajas frente a otros plásticos que también se utilizan para estas aplicaciones, es que es un derivado de recursos naturales como el maíz. Debido a esto, durante su fundición no desprende ningún gas tóxico. Además, es un biopolímero termoplástico[7], esto también conlleva a que su proceso de reciclaje es más sostenible medioambientalmente.

3.2.3 Limitaciones del uso del PLA

A pesar de ser un material muy polivalente y versátil presenta una serie de limitaciones a tener en cuenta, en cuanto a sus usos.

- **Resistencia al calor.** Como se ha visto anteriormente, a partir de temperaturas entorno a los 55°C puede verse afectado estructuralmente, por lo que en las fases de pulido de las piezas de plástico se evitarán estas temperaturas.
- **Fragilidad.** Aunque tiene buena resistencia a tracción y a compresión carece de tener buenas cualidades frente a impactos, por lo que en las fases del pulido se evitarán dichas acciones.
- **Durabilidad limitada.** Con el tiempo, el PLA puede degradarse, especialmente en condiciones de alta humedad o exposición prolongada a la luz solar, lo que limita su vida útil en aplicaciones exigentes. Si se mantiene en condiciones óptimas, no debería presentar ningún problema en cuanto a su fiabilidad en sus funciones.

En conclusión, el PLA ha sido el material utilizado porque que es perfecto para realizar prototipos de piezas debido a su bajo coste y facilidad de impresión. Esto genera unas condiciones perfectas para ensayos de prueba y error, puesto a que se requieren pruebas rápidas para verificar el encaje de los utillajes con las piezas de plástico a pulir.

3.3 HERRAMIENTAS SOFTWARE

En el desarrollo de los utillajes se han empleado diversas herramientas de software de diseño y optimización que permiten transformar ideas conceptuales en modelos tangibles y funcionales. Estas herramientas son esenciales para garantizar la precisión y

eficiencia del proceso de fabricación. A continuación, se describen las principales herramientas de software utilizadas en el proyecto:

- **SolidEdge.** Para el diseño de los utillajes, se ha utilizado SolidEdge, un software de modelado 3D avanzado utilizado ampliamente en la ingeniería para la creación de piezas complejas. Permite trabajar en un entorno paramétrico, lo que facilita la modificación de los diseños con alta precisión y flexibilidad. Esta herramienta proporciona una amplia gama de funciones, como el diseño de piezas, ensamblajes y el análisis de estructuras, lo que resulta en un proceso de diseño más eficiente y efectivo.
- **Archivos 3MF.** Una vez que el diseño de los utillajes ha sido completado en SolidEdge, los archivos fueron exportados en formato 3MF (3D Manufacturing Format). Este formato se utiliza para almacenar toda la información relevante del modelo, incluidas las propiedades geométricas, texturas y materiales, de manera más precisa y eficiente que otros formatos más comunes como STL.
- **Ultimaker Cura.** El siguiente paso en el proceso de fabricación de los utillajes es la preparación del modelo 3D para la impresión, y para esto se utilizó Ultimaker Cura, uno de los programas más utilizados en la impresión 3D. Éste es un software que convierte los modelos 3D en instrucciones detalladas para la impresora 3D, en este caso para la impresora ANET ET5, generando el código G necesario para realizar la impresión.

4. ANÁLISIS REQUISITOS GENERALES DE LOS UTILLAJES

Los utillajes tienen que cumplir una serie de requisitos para garantizar un correcto funcionamiento. Los cuales vienen dados por restricciones de maquinaria, ergonomía tanto del operario como del brazo robot y tipos de acoplamientos. A continuación, se exponen más detalladamente los factores a tener en cuenta:

- **Ajuste en las Zonas de Clip.** Los utillajes deben garantizar un ajuste preciso en las zonas que contienen clip, asegurando que la pieza de plástico quede firmemente sujeta sin riesgo de deformarse. Esto implica realizar un diseño con tolerancias adecuadas que permitan una sujeción efectiva y además una fácil liberación por parte del operario.
- **Limitación del Volumen de Impresión.** Las geometrías de los utillajes deben ajustarse a las limitaciones del espacio de impresión de la impresora 3D, con un volumen máximo de 300x300x400 mm, como se ha visto anteriormente en las características técnicas de la impresora.
- **Compatibilidad de los Bordos para una Buena Impresión y Acabados.** Los bordes de las geometrías de los utillajes deben ser diseñados para evitar problemas durante la impresión, como deformaciones o fallos de adherencia. Se intentarán diseñar bordes redondeados y suaves para garantizar una salida limpia de los clips y acabados de buena calidad en las piezas impresas.

- **Ergonomía para el Operario.** El diseño debe permitir una manipulación relativamente cómoda y segura de las piezas de plástico. Se debe considerar el acceso fácil a las zonas de clip para que se facilite la inserción y extracción de las piezas.
- **Compatibilidad con el Brazo Robot:** Los utillajes deben ser diseñados para permitir que el brazo robot realice movimientos en un plano reducido, evitando rangos de movimiento amplios. El diseño debe optimizar la accesibilidad y la estabilidad de las piezas para asegurar un trabajo eficiente del robot.
- **Acoplamiento al Perfil de la Bancada:** Los utillajes deben estar diseñados para acoplarse de manera adecuada y estable al perfil de la bancada, garantizando que queden firmemente posicionados durante todo el proceso de manipulación y pulido, evitando movimientos de las piezas. También deben respetar las dimensiones de la bancada para evitar voladizos en la medida de lo posible.

En los apartados siguientes se detallarán las soluciones y cálculos que se han realizado para solventar estos problemas, así como alguna dificultad de diseño de cada pieza en específico.

5. JUSTIFICACIÓN DE LOS MEDIOS UTILIZADOS

En el presente proyecto, se han seleccionado cuidadosamente las herramientas y materiales empleados con el objetivo de garantizar un proceso eficiente y adaptado a las necesidades específicas del diseño y fabricación de utillajes para piezas de plástico. Anteriormente se han mencionado características sobre las herramientas y materiales utilizado, en este apartado se muestra el porqué de dichos métodos. A continuación, se exponen los principales medios utilizados justificando la razón de su utilización y su contribución al cumplimiento de los objetivos del proyecto.

PLA: Este material ha sido elegido por ser una solución accesible, confiable y adecuada para la fabricación de prototipos. Su facilidad de uso, combinada con buenos acabados superficiales, permite obtener piezas de alta calidad de manera rápida y económica. Además, sus propiedades mecánicas y resistencia en condiciones controladas garantizan su funcionalidad en el contexto del proyecto.

Impresora 3D ANET ET5: La tecnología de impresión 3D es determinante para el diseño de prototipos debido a su capacidad para materializar geometrías complejas en tiempos reducidos y con costos bajos. La posibilidad de realizar modificaciones rápidas facilita la experimentación y el perfeccionamiento del diseño, un factor esencial en el desarrollo de este proyecto. Además, esta impresora ofrece un amplio espacio rango de impresión frente a otros modelos.

SolidEdge: Este software CAD permite abordar el diseño con un alto nivel de precisión y flexibilidad en los diseños. Su capacidad para modelar piezas y ensamblajes complejos asegura que los prototipos cumplan con las especificaciones requeridas, mientras que su compatibilidad con otras herramientas citadas agiliza el flujo de trabajo.

Ultimaker Cura: Como interfaz para la preparación de impresiones, este software proporciona un control detallado sobre los diferentes parámetros de impresión, permitiendo optimizar el proceso según las necesidades específicas de cada pieza. La posibilidad de previsualizar el resultado antes de imprimir minimiza errores, pudiéndolos corregir antes de la fase de fabricación, y también permite evitar desperdicios de material.

La combinación del equipo citado permite representar una solución eficiente para el diseño y fabricación de prototipos. Cada elemento cumple una tarea específica en el proceso, desde el modelado inicial hasta la materialización de las piezas, permitiendo modificaciones rápidas y económicas sin comprometer la calidad del producto final. Esta metodología no solo optimiza recursos y tiempo, sino que también fomenta la innovación y el desarrollo de soluciones funcionales del proyecto.

6. DISEÑO DE LOS UTILLAJES

En este apartado se analizarán los cuatro utillajes, así como el tipo de pieza al cual se tienen que adaptar. También se incluirán algunas consideraciones de diseño y especificaciones de impresión. Los cuatro utillajes se han diseñado con una placa base de un espesor de 5 mm, para obtener una buena rigidez y consistencia a la hora de anclarlos al banco de ensayos, que se puede apreciar en la figura 1.

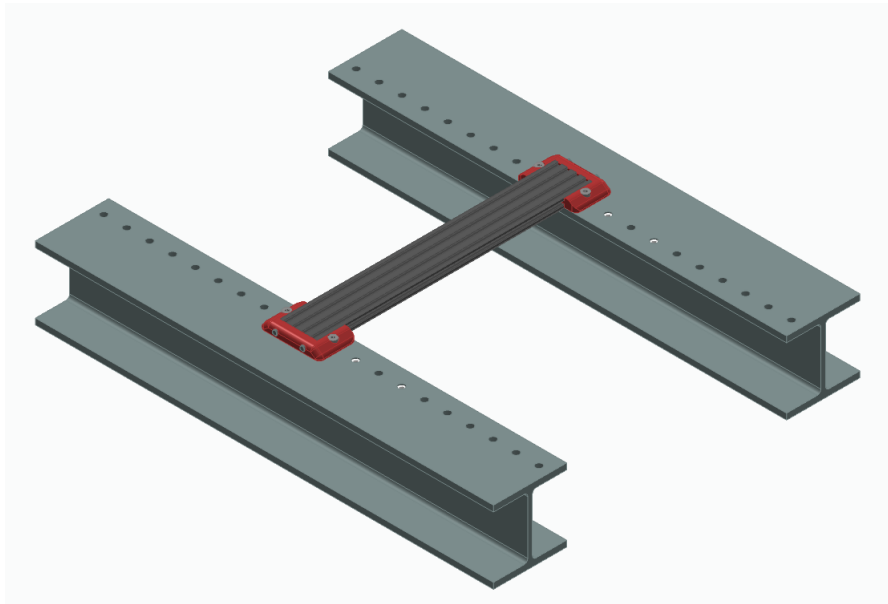


Figura 1 Banco de ensayos

Todos los utillajes deberán ir anclados al perfil del banco de ensayos, por lo que la unión que se efectúe deberá respetar la geometría de dicho perfil, en la figura 2 se muestra la geometría de dicho perfil. Esta unión se realizará con tuercas en T M5 DIN 508, tornillos

de métrica M5x16 DIN 912 y arandelas planas M5 DIN 125 para distribuir la presión del tornillo, esto asegurará un anclaje fijo al perfil de la bancada.

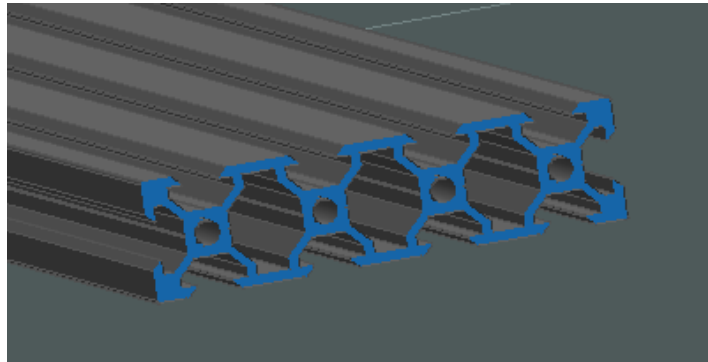


Figura 2 Perfil de acople de utillajes

Todos los utillajes se han dividido en 2 módulos de sujeción debido a que no se podían diseñar en un solo módulo, porque todos sobrepasan las dimensiones del volumen de impresión de la impresora utilizada. Todos los módulos de utillaje se han realizado bajo el mismo método, el cual consta de varias fases:

- **Fase previa de análisis de la pieza de trabajo:** en esta fase se realiza un análisis visual y tangible de la pieza para obtener un concepto previo. También se llevan a cabo los cálculos asociados a la obtención del plano normal como se detalla más adelante.
- **Fase inicial diseño del módulo de utillaje:** Creación de un módulo preliminar, en el que se diseñan los enganches a los clips y a las guías si se disponen de éstas.
- **Fase secundaria del diseño del módulo de utillaje:** Esta fase se centra en adaptar lo mejor posible los enganches al plano normal. También se realizan los apoyos donde se asentará la pieza de trabajo.
- **Fase final de diseño del módulo de utillaje:** Finalmente, se optimiza el diseño del utillaje, reduciendo peso, mejorando bordes, ajustando al máximo las dimensiones del módulo al perfil del banco de ensayos y se añaden los agujeros de los tornillos en zonas estratégicas. Ya se tiene finalizado el módulo del utillaje y es factible la impresión 3D
- **Fase de validación:** Tras realizar la impresión del módulo se realizan varias comprobaciones:
 - Ajustes de los clips a la pieza, se comprueba que los clips realizan su función correctamente y la pieza no se mueve.
 - Comprobación del correcto funcionamiento de los apoyos de la pieza de trabajo
 - Ajuste en perfil de banco de ensayos, se comprueba que todos los huecos encajen perfectamente en el perfil

En los siguientes subapartados se detallan y muestran las piezas de trabajo, asociadas a los utillajes. También se muestran algunas especificaciones de diseño y cálculos realizados. De ahora en adelante, cada utillaje será designado con el nombre de 'Utillaje

para pieza X' siendo X una numeración del 1 al 4, correspondiente a las piezas de trabajo, esto facilitará la designación de estos mismos.

Un punto muy importante de la fase de diseño de los utillajes es que han sido diseñados de tal forma que, en el proceso de impresión, ninguna superficie tenga la necesidad de ser impresa utilizando soportes, mejorando así la calidad de impresión y las tolerancias.

6.1 UTILLAJE PARA PIEZA 1

Para realizar el utillaje hay que conocer la geometría de la pieza de trabajo número. En la figura 3 se muestra la geometría de la pieza de trabajo. Se pueden identificar 5 enganches de clip y 3 guías, estos serán los elementos principales de anclaje de la pieza al utillaje. Como se muestra en la figura 4, la pieza tiene una medida de 400,39 mm en su mayor longitud.

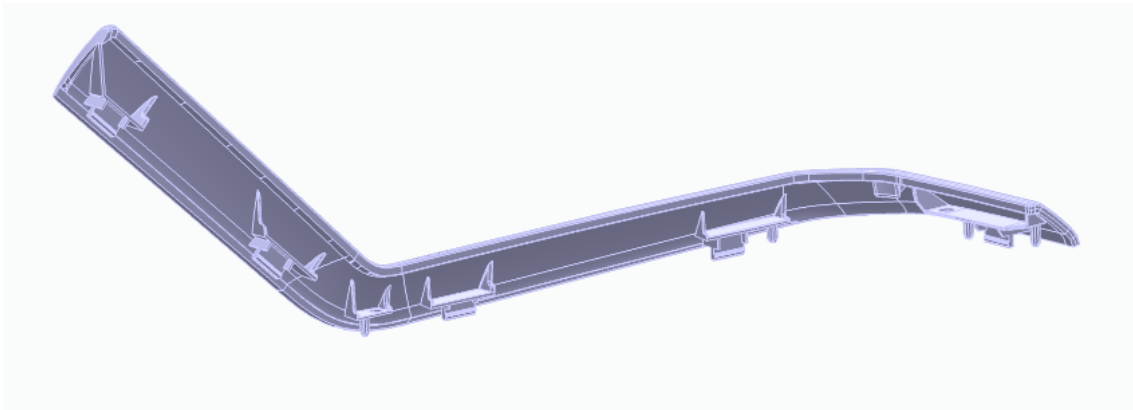


Figura 3 Geometría de la pieza de trabajo 1

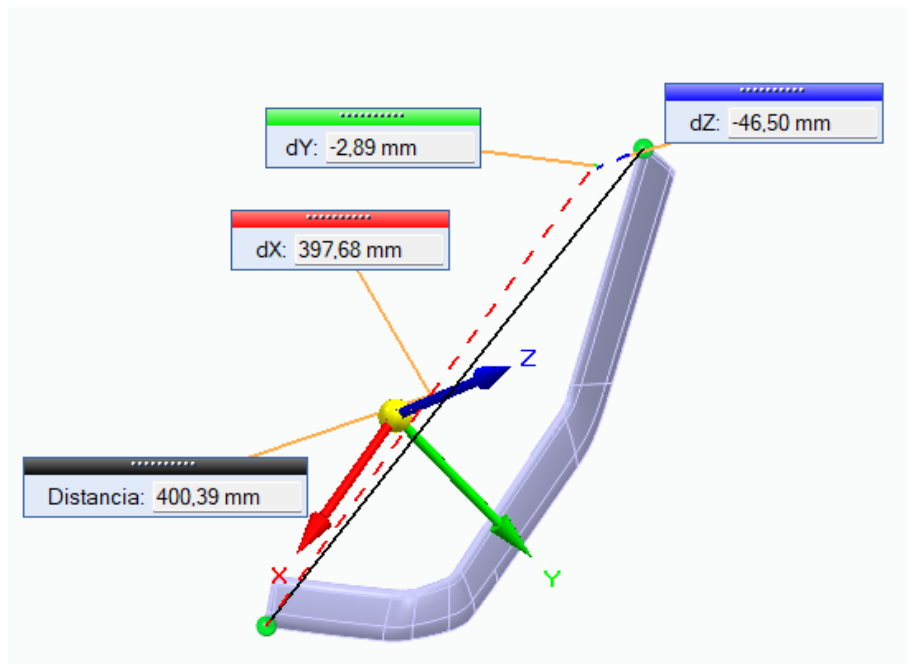


Figura 4 Medida de longitud máxima de la pieza de trabajo 1

Para realizar una buena fase de pulido hay que identificar la superficie en la que se va realizar dicho procedimiento, la cual está asociada a la parte lisa en la que no hay ningún clip o elemento estructural de la pieza como se ve en la figura 5. También se puede observar que la parte que se va pulir está compuesta por múltiples planos.

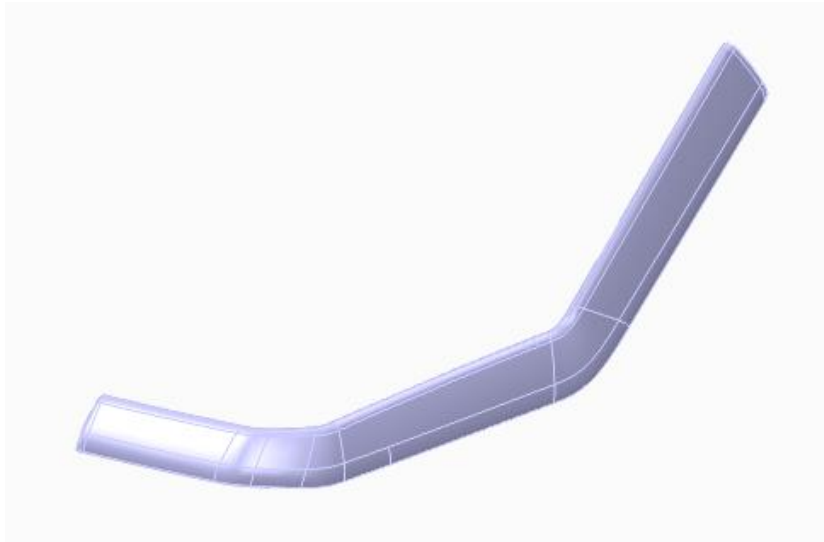


Figura 5 Superficie de pulido de la pieza 1

Se han realizado cálculos, para obtener el plano normal más favorable para que el brazo robot desempeñe su función de la manera más óptima, evitando rangos de movimiento amplios. Dichos cálculos, se han fundado en la obtención de la media de las coordenadas del vector normal, de los principales planos de la pieza a pulir como se muestran algunos de ellos en las figuras 6 y 7.

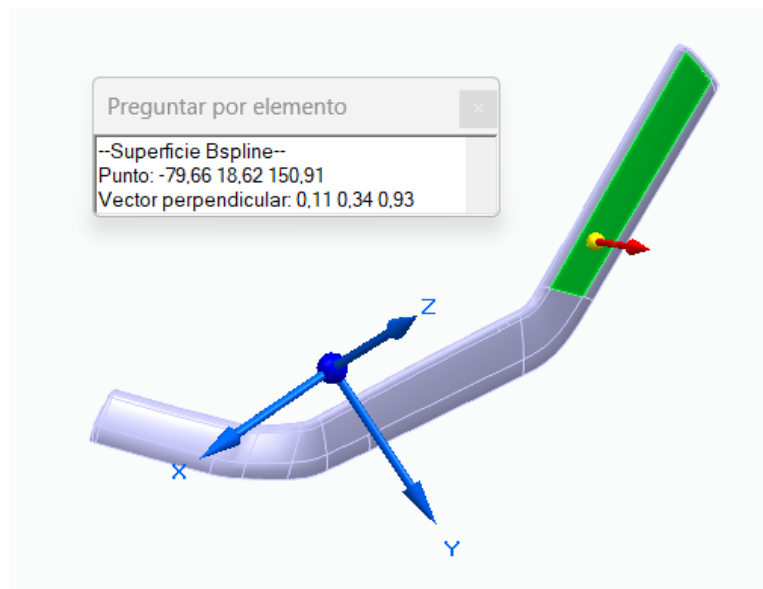


Figura 6 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 1

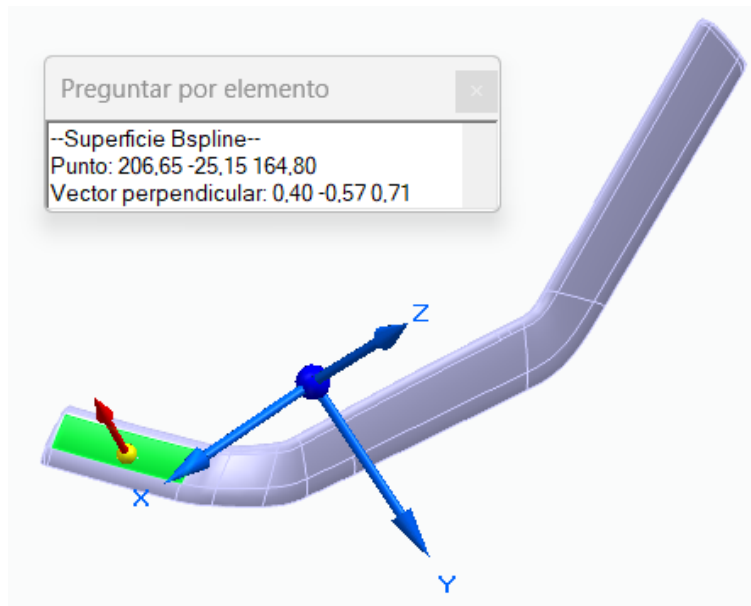


Figura 7 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 1

En la Tabla 1 se muestra el número de planos escogido para dicha pieza, también se muestran las coordenadas de cada vector normal asociado al plano, con todos ellos se ha realizado la media total.

Pieza 1	X	Y	Z
1	0,53	0,82	0,19
2	0,37	0,86	0,34
3	0,21	0,86	0,46
4	0,49	0,71	0,51
5	0,69	0,5	0,53
6	0,81	0,19	0,55
7	0,84	0,01	0,55
MEDIA	0,53	0,71	0,51

Tabla 1 Cálculo vector normal de la pieza de trabajo 1

El vector normal resultante calculado en el sistema de coordenadas de la pieza de trabajo ha sido, (0,53 0,71 0,51). Con dicho vector se ha realizado un plano perpendicular, el cual será vinculado al perfil del banco de ensayos y con el mismo sobre el que se basará el diseño del utilaje, sirviendo de base para este.

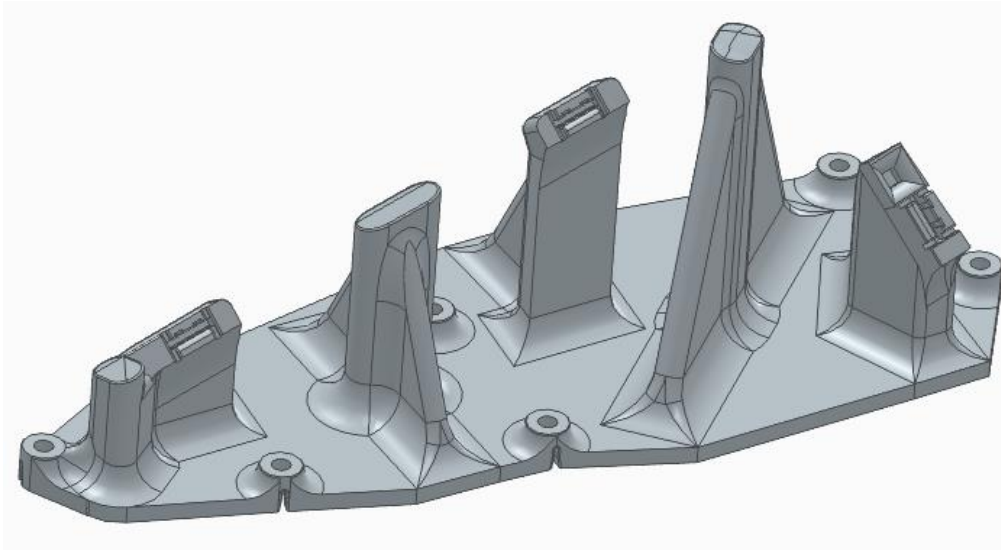


Figura 8 Módulo 1 del utillaje 1

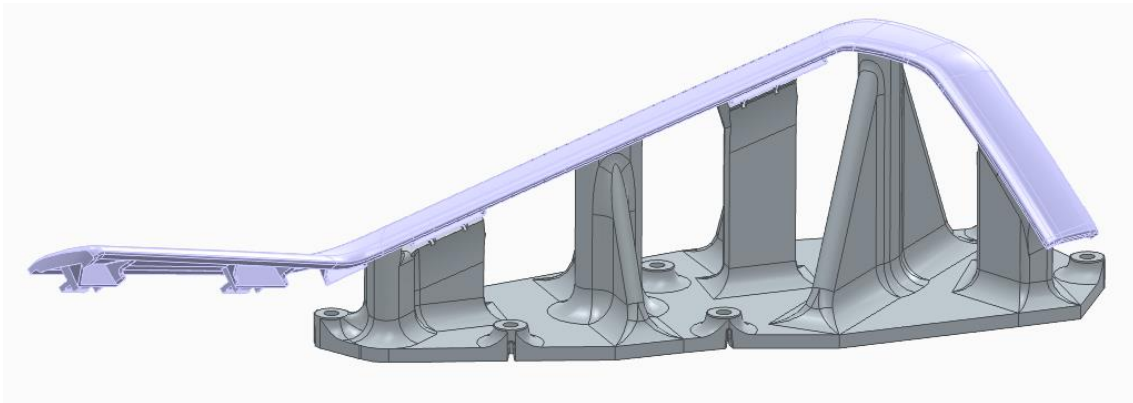


Figura 9 Módulo 1 del utillaje 1 con pieza de trabajo incorporada

En las figuras 8 y 9 se puede apreciar el diseño final del módulo 1 del utillaje 1, con unas medidas máximas de 289x118 mm en la base y con una altura máxima de 98 mm. Se han elegido 3 clips como punto de anclaje, y una guía paralela, para un cómodo anclaje por parte del operario. También se pueden apreciar 6 orificios en la base para insertar los tornillos correspondientes, se han diseñado de tal forma que se adapten a los huecos del perfil de la figura 2, vista al principio de este apartado. Cabe destacar que se han realizado unas aberturas en el plano tangente a estos orificios para una mayor comodidad por parte del operario, de cara al ajuste de los tornillos a las tuercas del perfil de la bancada. En cuanto a la geometría de apoyo de la pieza de trabajo al utillaje se han añadido 2 puntos de apoyo, incluyendo también los propios enganches. Este grupo de apoyos generan la superficie necesaria para que la pieza de trabajo no se flexione y se mantenga en una posición fija mientras se lleva a cabo el proceso de pulido.

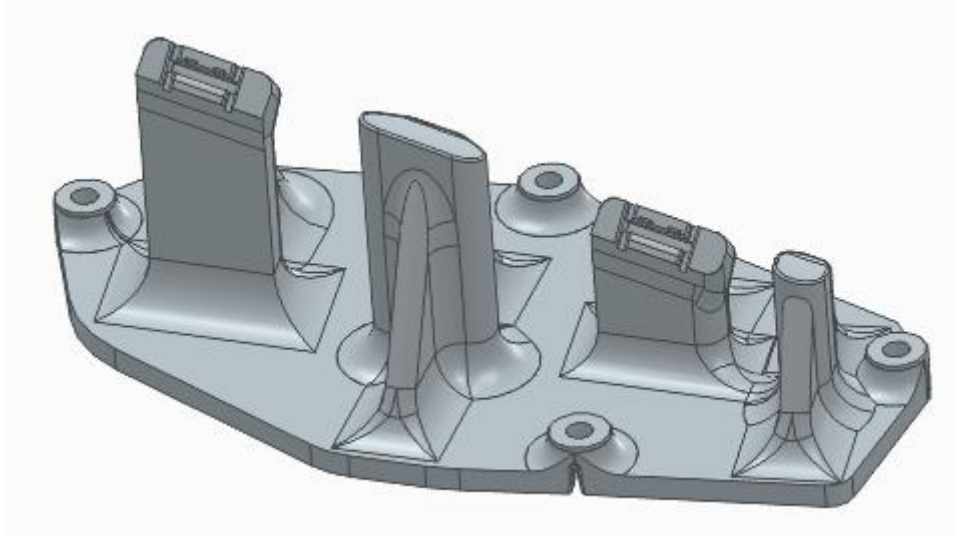


Figura 10 Módulo 2 del utillaje 1

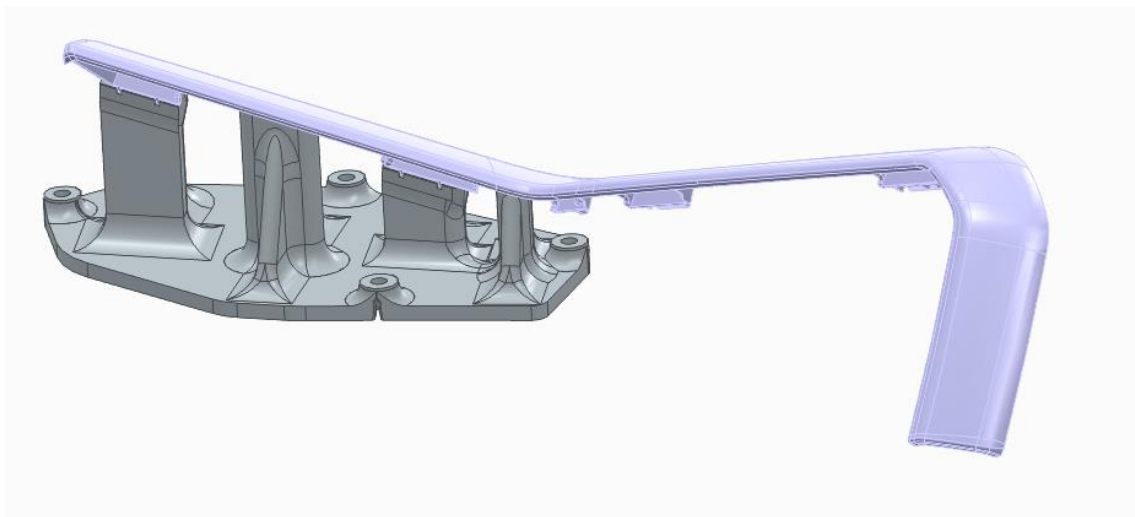


Figura 11 Módulo 2 del utillaje 1 con pieza de trabajo incorporada

Las figuras 10 y 11 muestran el diseño final del módulo 2 del Utillaje 1, que cuenta con unas medidas máximas de 185x100 mm y una altura máxima de 68 mm. Se han elegido 2 clips como punto de anclaje. En este caso, al ser un módulo más pequeño que el anterior, se ha optado por realizar 4 orificios, para los mismos tornillos citados anteriormente, para que tenga un mejor anclaje al perfil del banco de ensayos. Se ha elegido 2 puntos de apoyo, además de los 2 enganches, los cuales son suficientes para evitar flexiones de la pieza, así como para asegurar su limitación de movimiento.

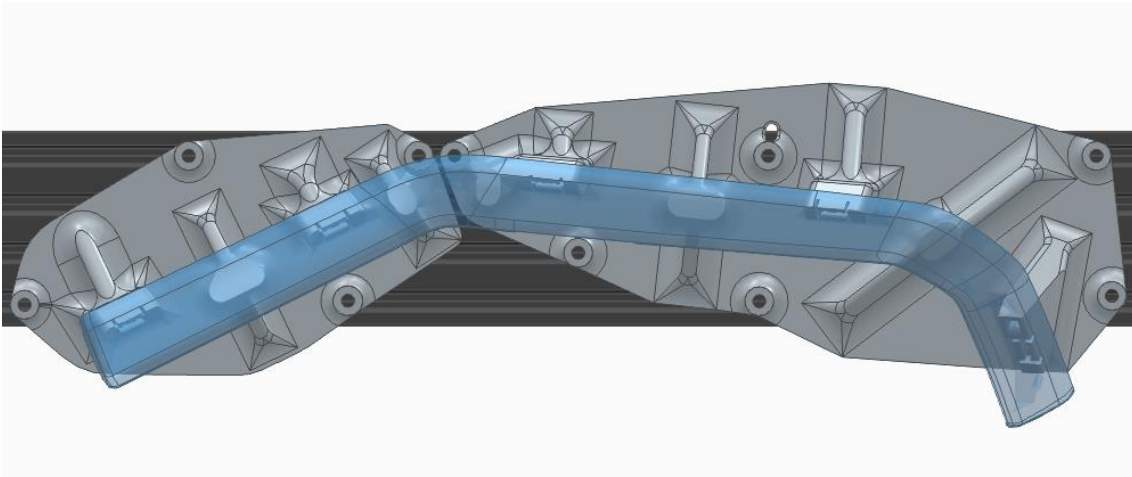


Figura 12 Vista en planta del utillaje para pieza 1

Como se ve en la figura 12, una vista en planta de los utillajes, en la cual se aprecia que se ha intentado reducir al máximo las estructuras salientes de los utillajes, para obtener así una mayor optimización del espacio de trabajo del brazo robot, para no limitar o entorpecer sus movimientos. También se han evitado al máximo de lo posible tener voladizos de los utillajes para no comprometer la rigidez estructural del utillaje. Aunque algunas zonas han quedado fuera, respecto a la vista en planta de la pieza de trabajo, la distancia máxima del voladizo es de 21 mm, a pesar de tener estos salientes, su funcionalidad no se ve afectada.

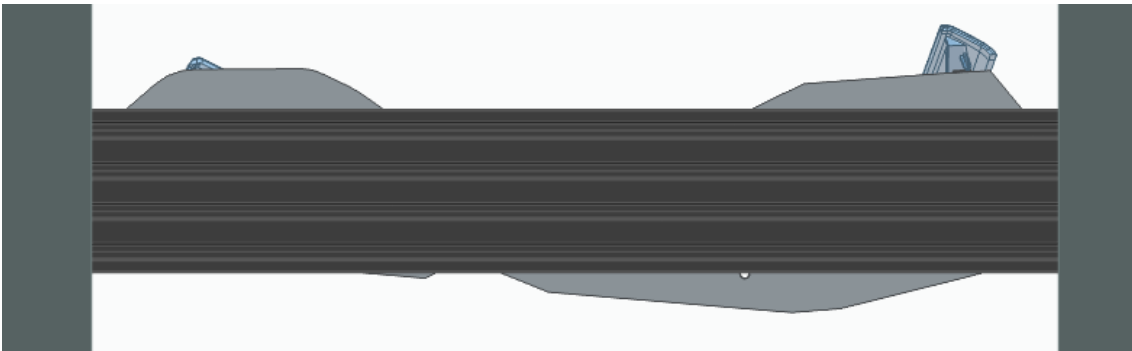


Figura 13 Vista planta inferior del utillaje para pieza 1

6.2 UTILLAJE PARA PIEZA 2

Para realizar el utillaje hay que conocer la geometría de la pieza de trabajo número 2. En la figura 14 se muestra la geometría de la pieza de trabajo. Se pueden identificar 4 enganches de clip y 2 guías, estos serán los elementos principales de anclaje de la pieza al utillaje. Como se muestra en la figura 15, la pieza de trabajo consta con una medida de 328,35 mm en su mayor longitud.

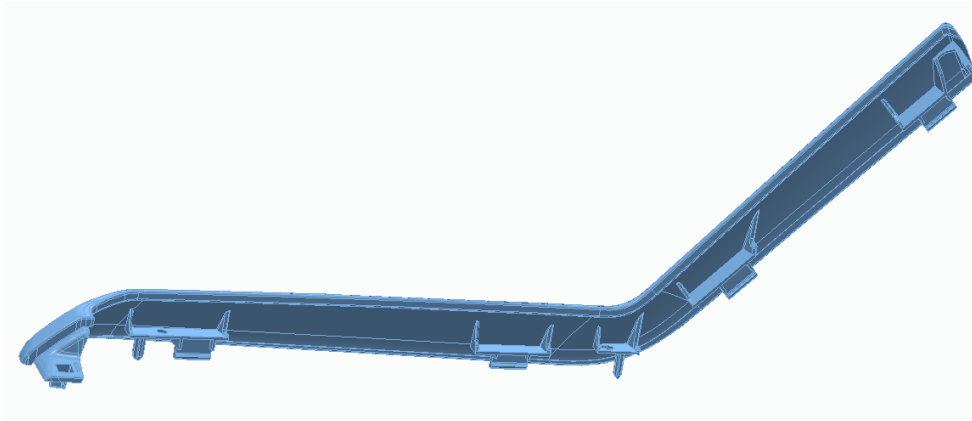


Figura 14 Geometría de la pieza de trabajo 2

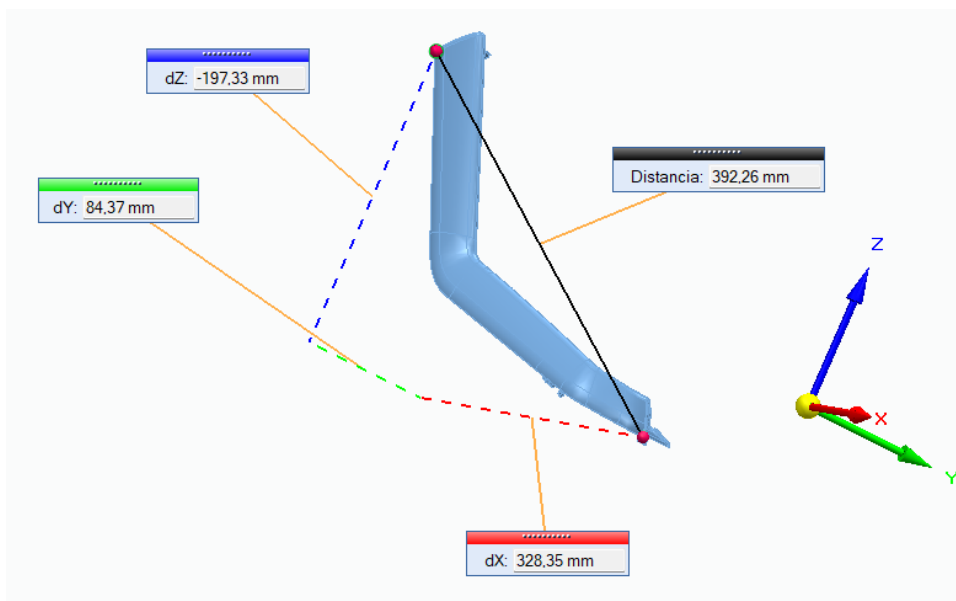


Figura 15 Medida de longitud máxima de la pieza de trabajo 2

En la figura 16 se puede apreciar la parte lisa de la pieza, en la que se realizará el pulido, en la cual también se observa que no hay ningún clip o elemento estructural de la pieza.

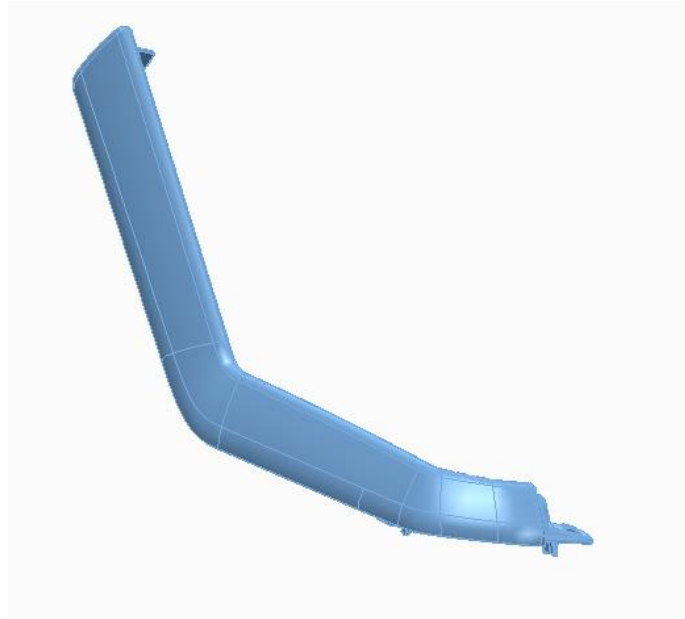


Figura 16 Superficie de pulido de la pieza 2

Se han realizado los cálculos, como se han citado anteriormente, para obtener el plano normal. A continuación, en las figuras 17 y 18 se pueden observar alguno de esos planos y el vector normal asociado.

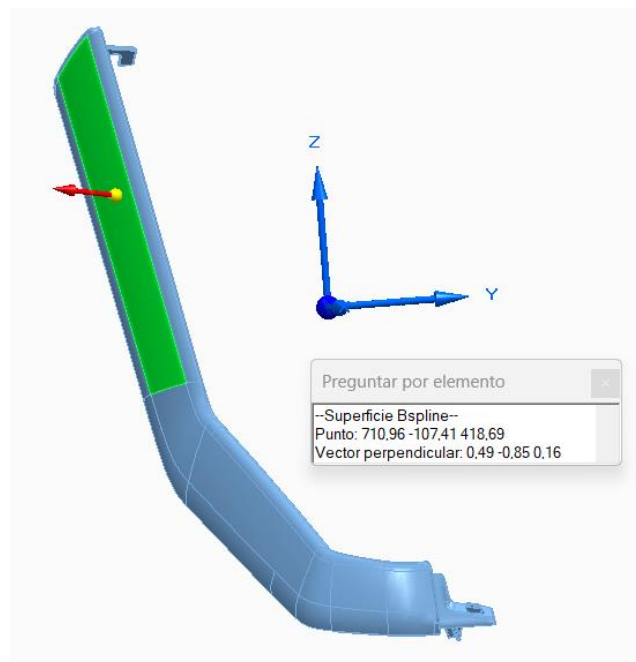


Figura 17 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 2

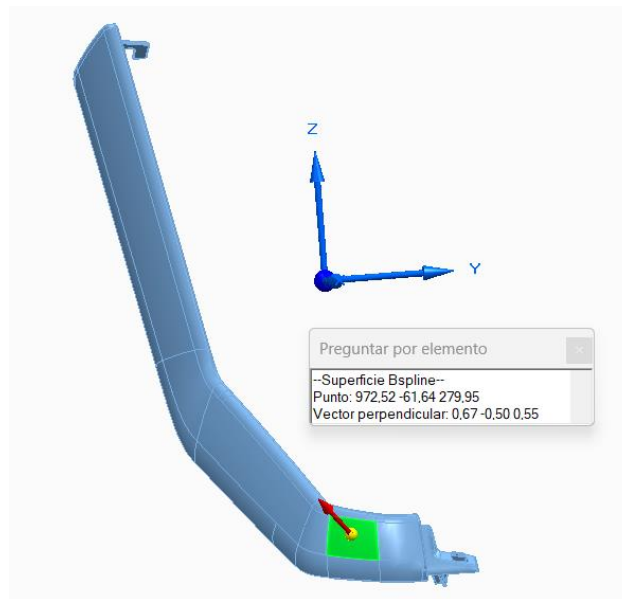


Figura 18 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 2

El vector normal resultante calculado en el sistema de coordenadas de la pieza de trabajo ha sido, $(0,495 -0,765 0,465)$. Con dicho vector se ha realizado un plano perpendicular, el cual será vinculado al perfil del banco de ensayos y con el mismo sobre el que se basará el diseño del utillaje.

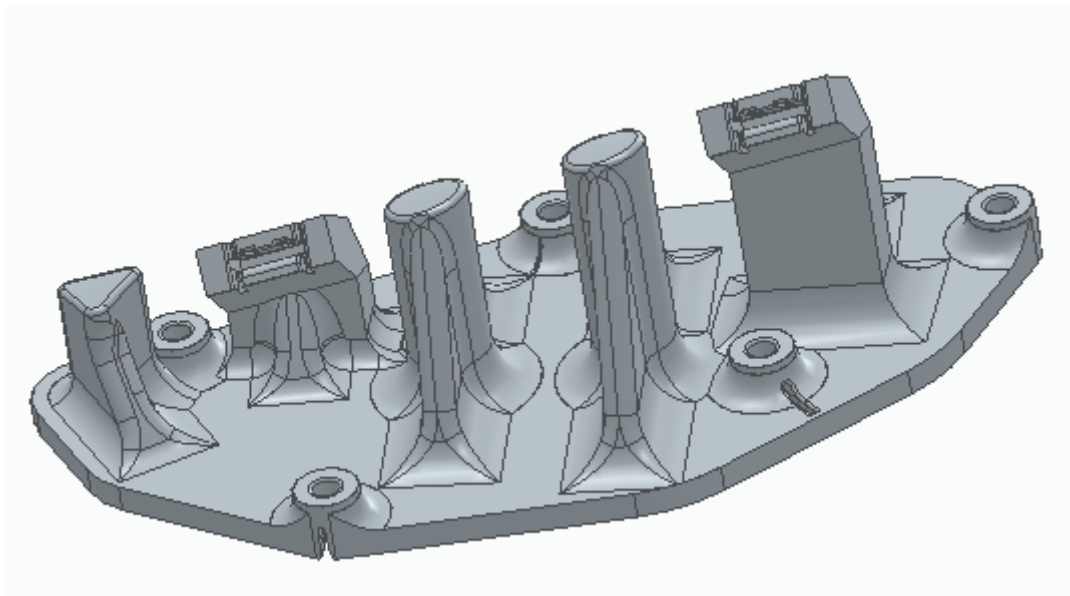


Figura 19 Módulo 1 del utillaje 2

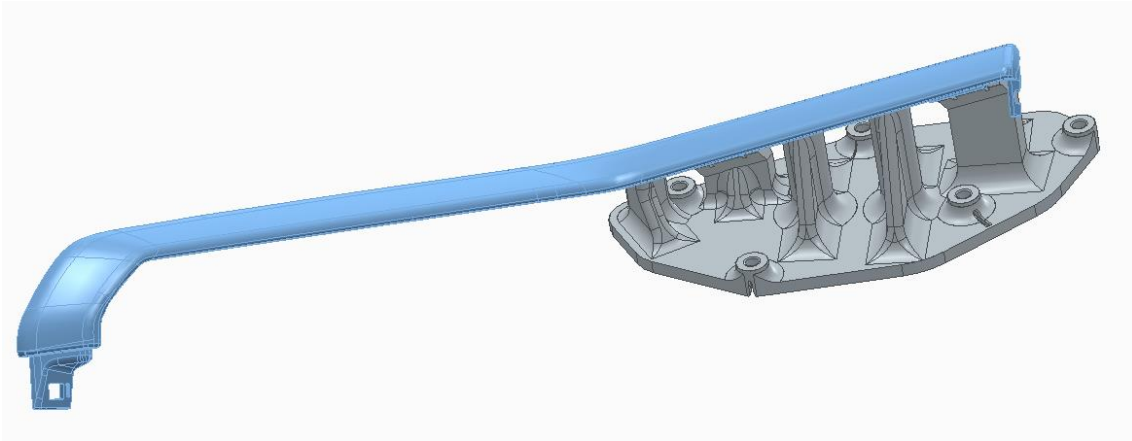


Figura 20 Módulo 1 del utillaje 2 con pieza de trabajo incorporada

En la figura 20 se puede apreciar el diseño final del módulo 1 del Utillaje 2, con unas medidas máximas de 180x90 mm y una altura máxima de 60 mm. Se han elegido 2 clips como punto de anclaje. También se pueden apreciar 5 orificios en la base para insertar los tornillos. Se han elegido 3 puntos de apoyo, de los cuales 2 se encuentran más juntos debido a que la pieza de trabajo presenta cierta debilidad en esa zona, estos puntos de apoyo aseguran una posición fija mientras se lleva a cabo el proceso de pulido.

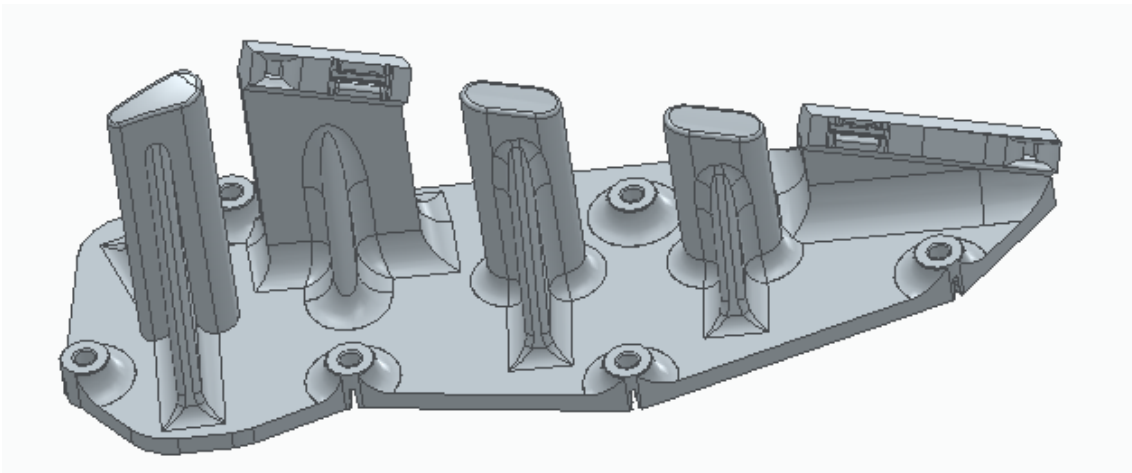


Figura 21 Módulo 2 del utillaje 2

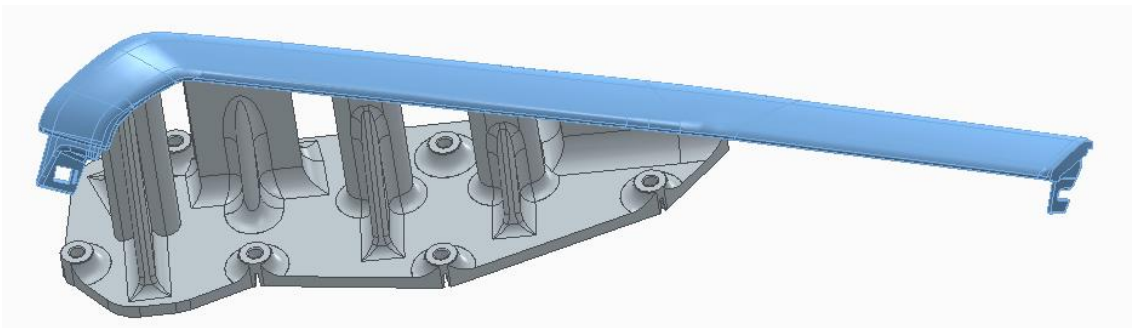


Figura 22 Módulo 2 del utillaje 2 con pieza de trabajo incorporada

Las figuras 21 y 22 muestra el diseño final del módulo 2 del Utillaje 2 con unas medidas máximas de 252x90 y una altura máxima de 85 mm. Se han elegido 2 clips como punto

de anclaje y 2 guías, paralelas a estos clips. Se ha optado por realizar 4 orificios, para los mismos tornillos citados anteriormente. Se han realizado 3 puntos de apoyo, 2 de los cuales se encuentran más juntos por el mismo motivo que el módulo 1, dando así más estabilidad.

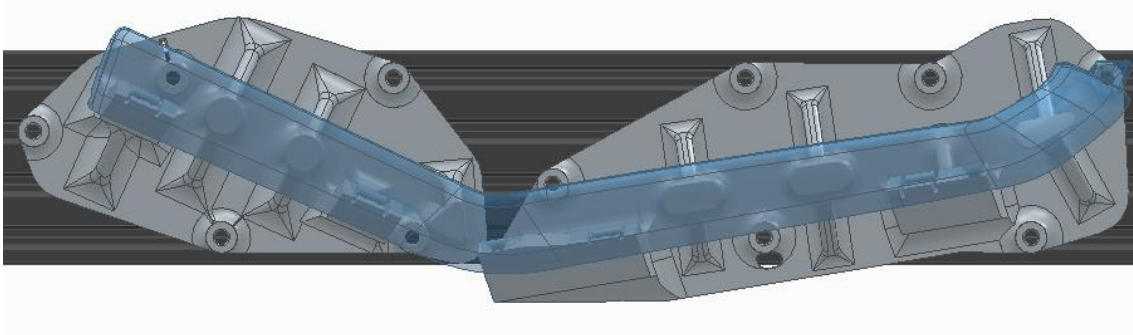


Figura 23 Vista en planta del utillaje para pieza 2

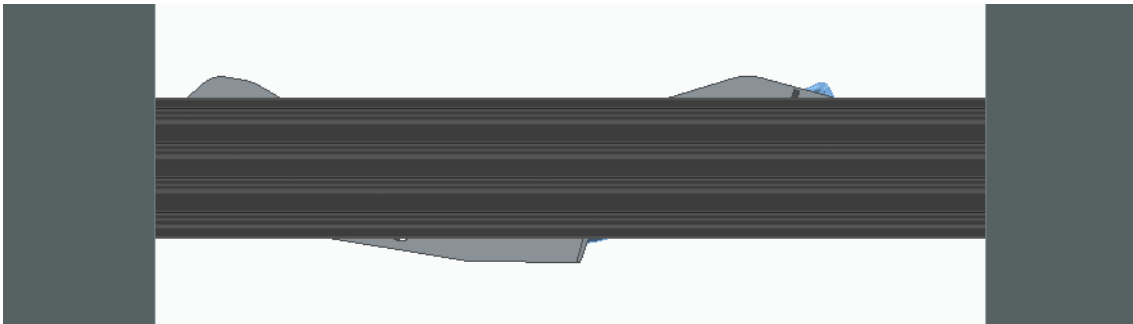


Figura 24 Vista planta inferior del utillaje para pieza 2

Como se ve en la figura 23, una vista en planta de los utillajes. Se aprecia que se ha intentado reducir al máximo las estructuras salientes de los utillajes, a pesar de ello no se ha conseguido en algunas zonas, en la que la longitud máxima de los salientes es de 14 mm, lo que no conlleva inconvenientes en su función.

6.3 UTILLAJE PARA PIEZA 3

Para realizar el utillaje hay que conocer la geometría de la pieza de trabajo número 3. En la figura 25 se pueden identificar 3 enganches de clip y 2 guías, estos serán los elementos principales de anclaje de la pieza al utillaje. Como se muestra en la figura 26, la pieza tiene una medida de 368,19 mm en su mayor longitud.

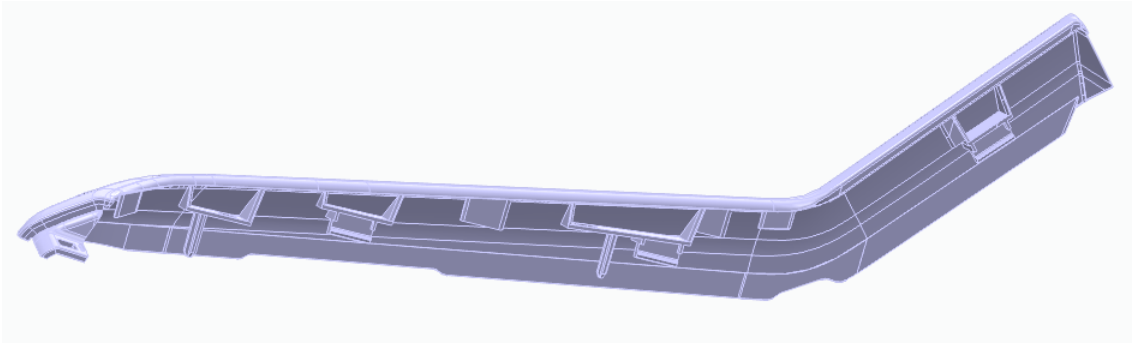


Figura 25 Geometría de la pieza de trabajo 3

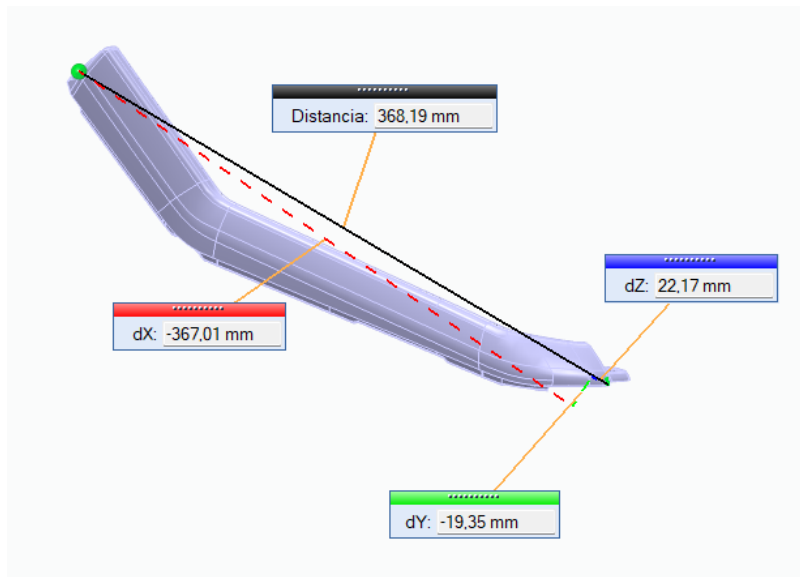


Figura 26 Medida de longitud máxima de la pieza de trabajo 3

En la figura 27 se puede apreciar la parte lisa de la pieza, en la que se realizará el pulido, en la cual también se observa que no hay ningún clip o elemento estructural de la pieza.

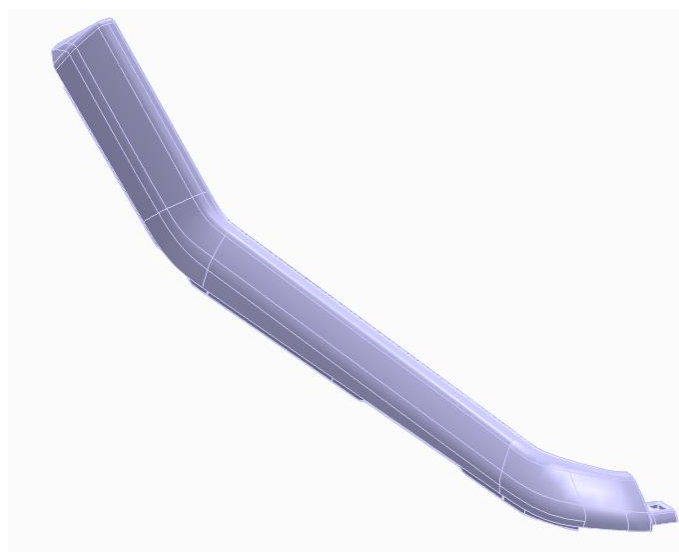


Figura 27 Superficie de pulido de la pieza 3

Se han realizado los cálculos citados anteriormente, para obtener el plano normal más favorable para que el brazo robot. En las figuras 28 y 29 se pueden apreciar alguno de estos planos con sus respectivos vectores normales.

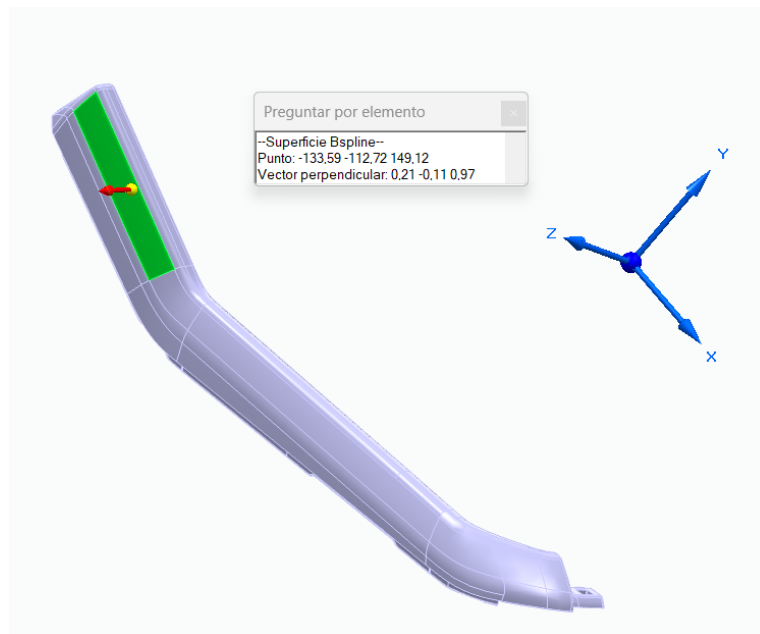


Figura 28 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 3

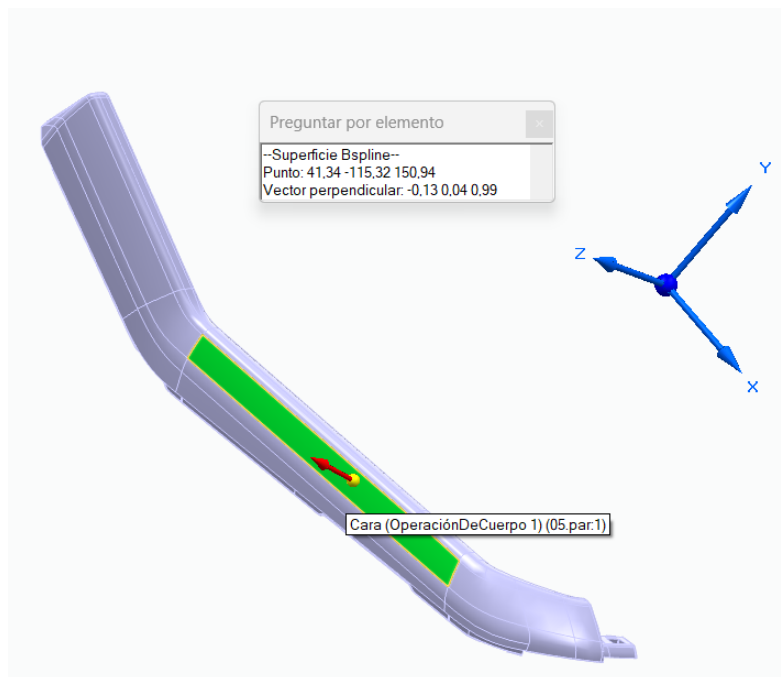


Figura 29 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 3

El vector normal resultante calculado en el sistema de coordenadas de la pieza de trabajo ha sido, $(0,405 \ -0,885 \ 0,21)$. Con dicho vector se ha realizado un plano, el cual será vinculado al perfil del banco de ensayos y con el mismo sobre el que se basará el diseño del utilaje.

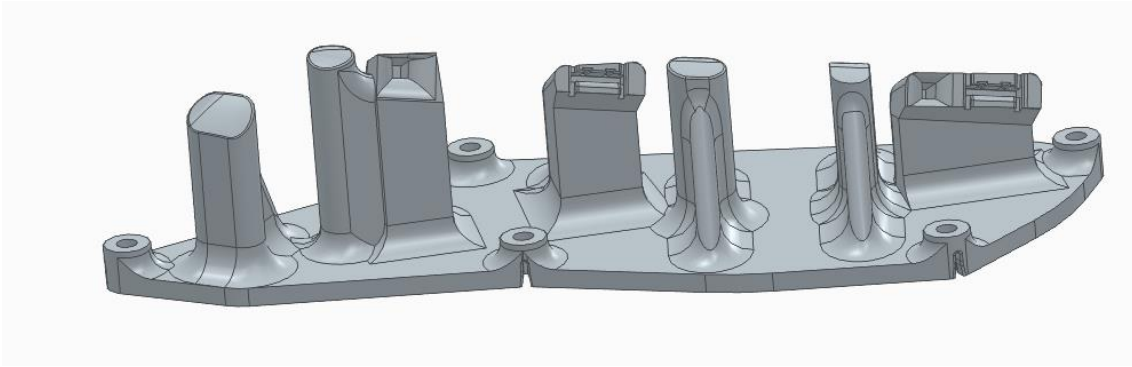


Figura 30 Módulo 1 del utillaje 3

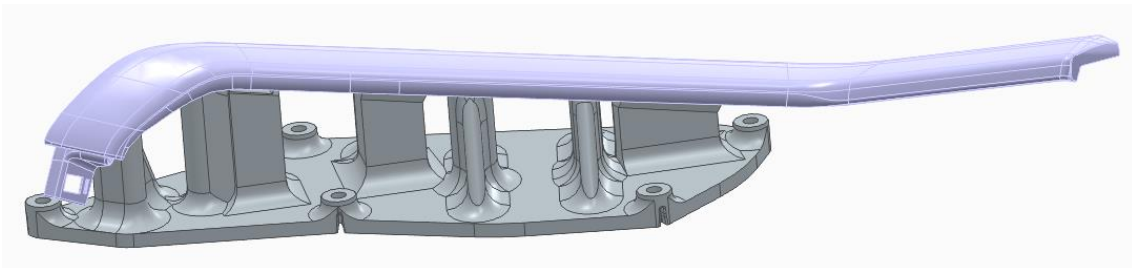


Figura 31 Módulo 1 del utillaje 3 con pieza de trabajo incorporada

En las figuras 30 y 31 se puede apreciar el diseño final del módulo 1 del Utillaje 3, con unas medidas máximas de 260x85 mm y una altura máxima de 59 mm. Se han elegido 2 clips como punto de anclaje, y las 2 guías. También se pueden apreciar 5 orificios en la base para insertar los tornillos. En cuanto a la geometría de apoyo de la pieza de trabajo al utillaje se han elegido 3 puntos de apoyo, además de los propios enganches, los que generan la superficie necesaria para que la pieza de trabajo no se flexione y se mantenga en una posición fija mientras se lleva a cabo el proceso de pulido.

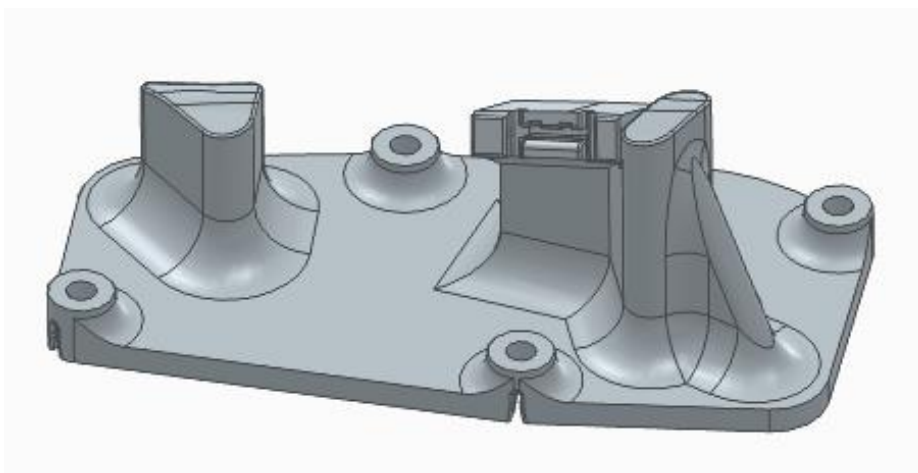


Figura 32 Módulo 2 del utillaje 3

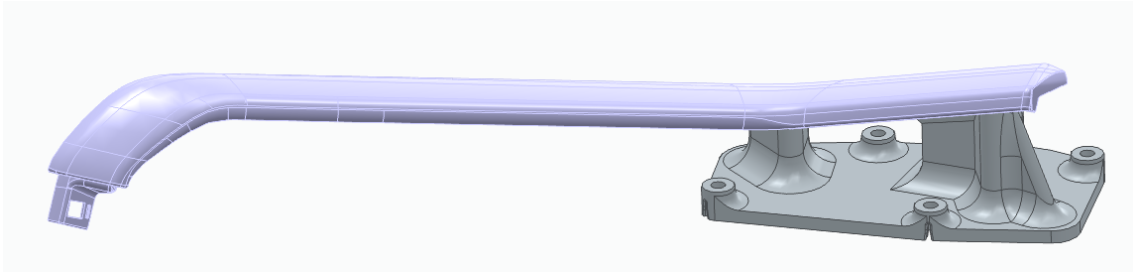


Figura 33 Módulo 2 del utillaje 3 con pieza de trabajo incorporada

Las figuras 32 y 33 muestra el diseño final del módulo 2 del Utillaje 3, con unas medidas máximas de 150x72 mm y una altura máxima de 55 mm. Se ha elegido 1 clip como punto de anclaje, suficiente debido a que es un módulo pequeño. Se ha optado por realizar 4 orificios, para los mismos tornillos citados anteriormente, para un buen anclaje al perfil del banco de ensayos. Se ha elegido 2 puntos de apoyo, además del enganche, los cuales son suficientes para evitar flexiones de la pieza.

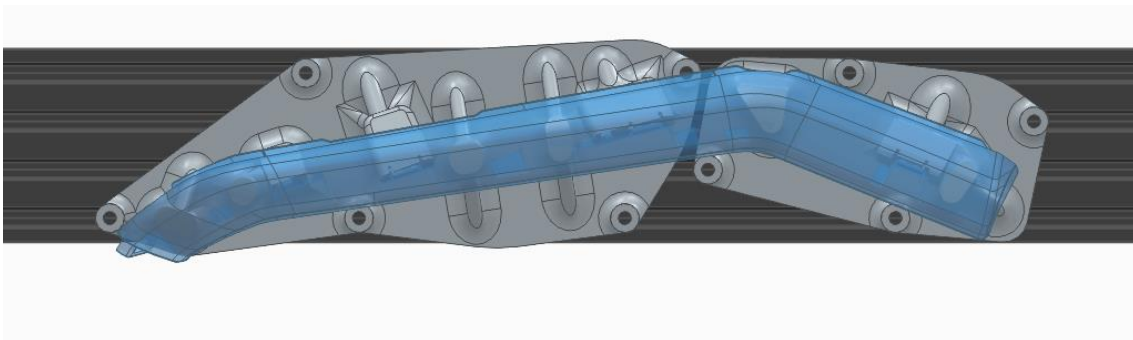


Figura 34 Vista en planta del utillaje para pieza 3

En la figura 34 se pueden observar perfectamente los apoyos a lo largo de la pieza sobre los utillajes. Como se ve en la figura XXX, se han evitado al máximo de lo posible tener voladizos de los utillajes, fuera del perfil del banco de ensayos, a pesar de ello se han quedado ligeramente fuera algunas zonas con un saliente máximo de 6,5 mm. Dichas zonas no comprometen la funcionalidad del utillaje



Figura 35 Vista planta inferior del utillaje para pieza 3

6.4 UTILLAJE PARA PIEZA 4

Para realizar el utillaje hay que conocer la geometría de la pieza de trabajo número 4. En la figura 36 se muestra la geometría de la pieza de trabajo. Se pueden identificar 4 enganches de clip y 4 guías, estos serán los elementos principales de anclaje de la pieza al utillaje. Como se muestra en la figura 37, la pieza tiene una medida de 408,53 mm en su mayor longitud.

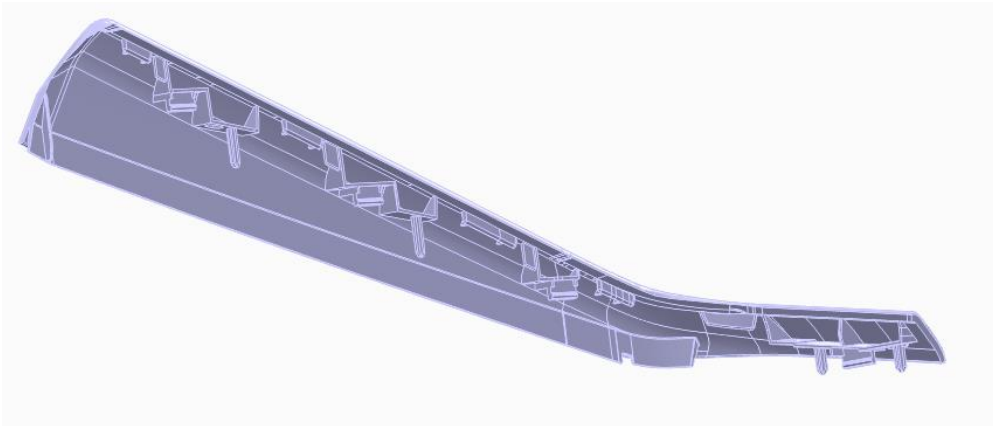


Figura 36 Geometría de la pieza de trabajo 4

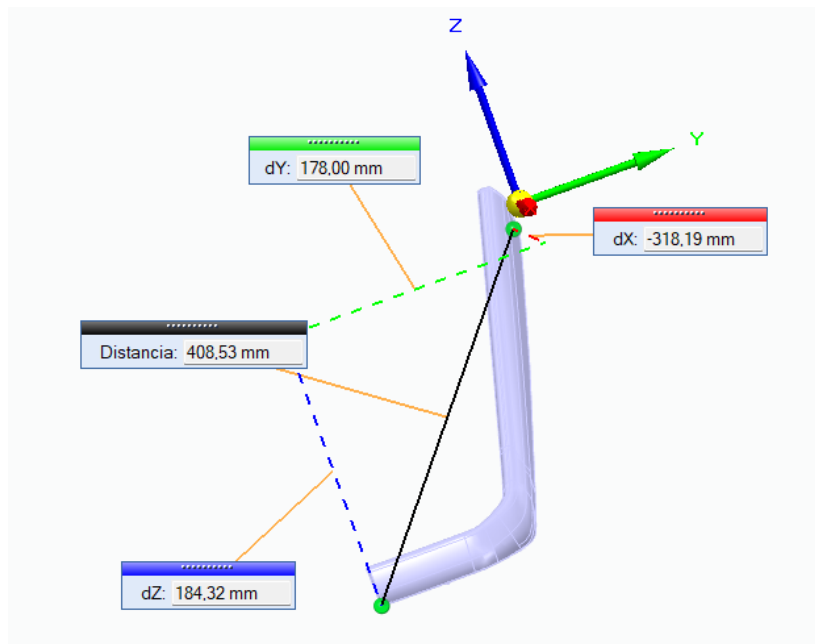


Figura 37 Medida de longitud máxima de la pieza de trabajo 4

En la figura 38 se puede apreciar la parte lisa de la pieza, en la que se realizará el pulido, en la cual también se observa que no hay ningún clip o elemento estructural de la pieza.

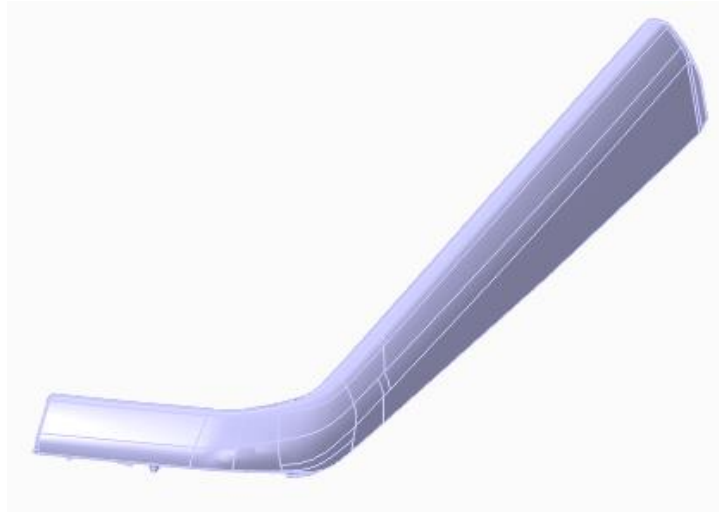


Figura 38 Superficie de pulido de la pieza 4

Se han realizado los cálculos, para obtener el plano normal más favorable para que el brazo robot desempeñe su función de la manera más óptima. En las figuras 39 y 40 se pueden observar algunos de esos planos.

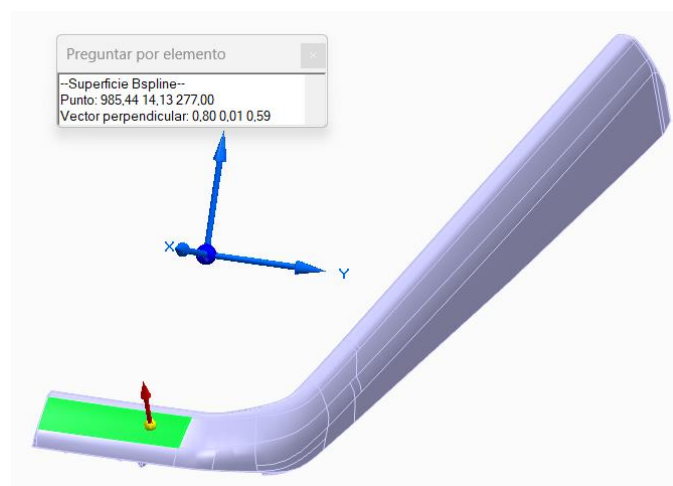


Figura 39 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 4

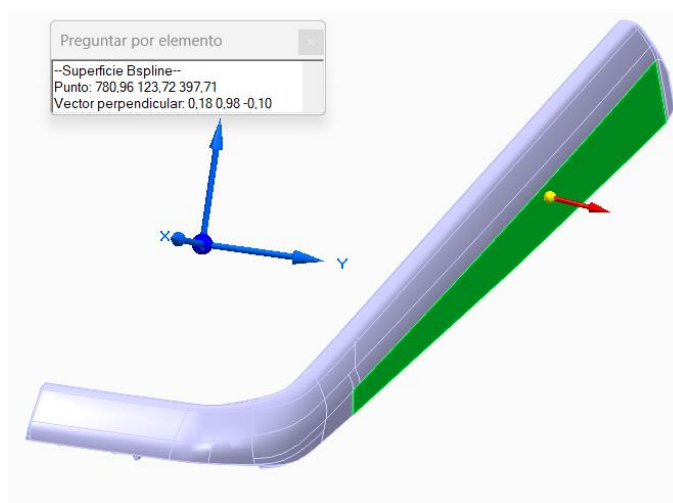


Figura 40 Vector normal de un plano de la pieza de trabajo 4

El vector normal resultante calculado en el sistema de coordenadas de la pieza de trabajo ha sido, (0,58 0,62 0,49). Con dicho vector se ha realizado un plano perpendicular, el cual será la base del diseño del utillaje.

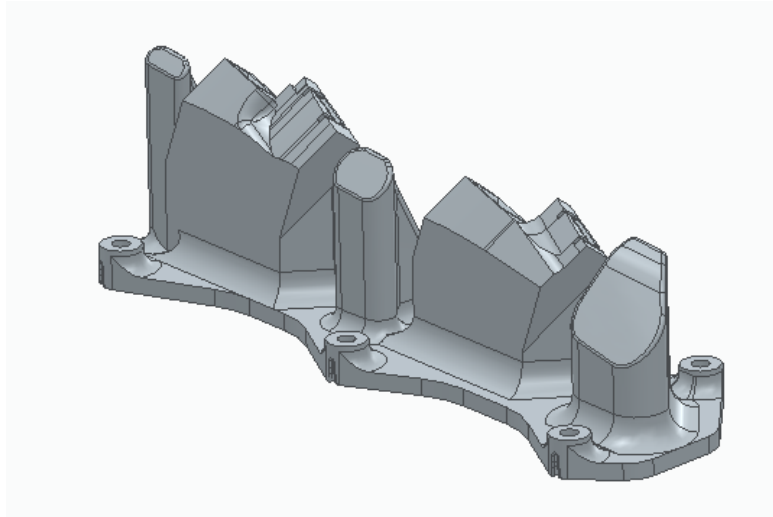


Figura 41 Módulo 1 del utillaje 4

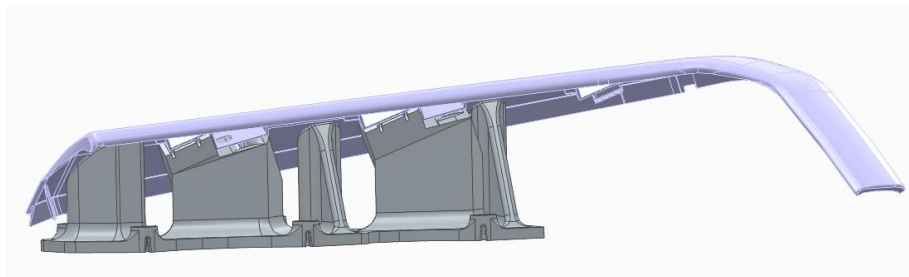


Figura 42 Módulo 1 del utillaje 4 con pieza de trabajo incorporada

En las figuras 41 y 42 se puede apreciar el diseño final del módulo 1 del Utillaje 1, con unas medidas máximas de 229x72 mm y una altura máxima de 65 mm. Se han elegido 2 clips como punto de anclaje, y las 2 guías paralelas, para un cómodo anclaje por parte del operario. También se pueden apreciar 6 orificios en la base para insertar los tornillos. En cuanto a la geometría de apoyo de la pieza de trabajo al utillaje se han elegido 3 puntos de apoyo, uno de ellos ligeramente más grande debido a que la pieza de trabajo presentaba una superficie más amplia que en esa zona. Estos apoyos junto con los enganches, generarán una buena superficie de apoyo para evitar movimientos.

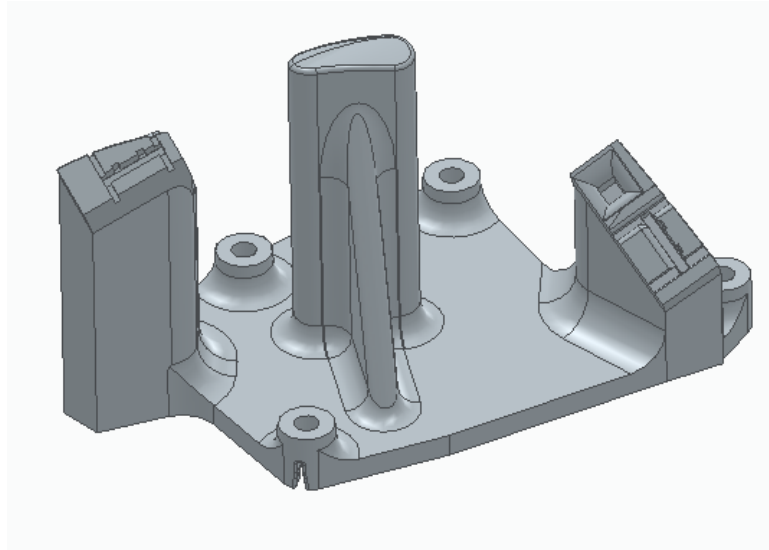


Figura 43 Módulo 2 del utillaje 4

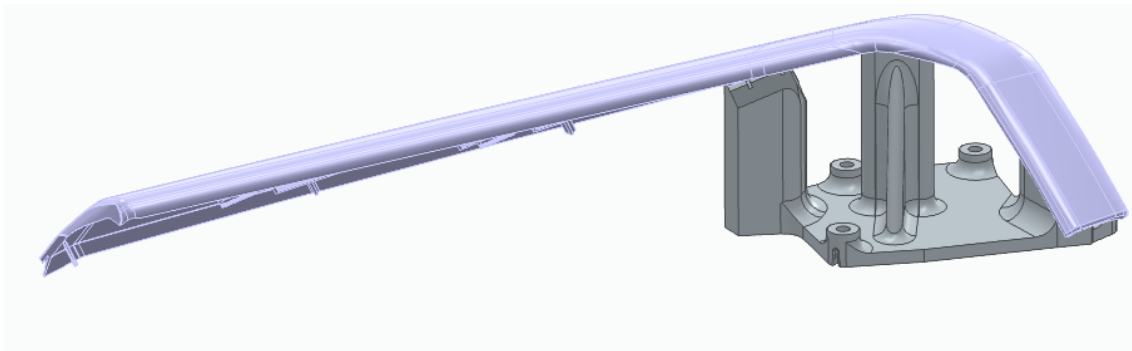


Figura 44 Módulo 2 del utillaje 4 con pieza de trabajo incorporada

Las figuras 43 y 44 muestran el diseño final del módulo 2 del Utillaje 1, con unas medidas máximas de 149x90 y una altura máxima de 76 mm. Se han elegido 2 clips como punto de anclaje y una guía de anclaje, paralela a uno de estos clips. Se ha optado por realizar 4 orificios, para los mismos tornillos citados anteriormente. Se ha elegido un único punto de apoyo, el cual es suficiente para evitar flexiones de la pieza, así como para asegurar su limitación de movimiento.

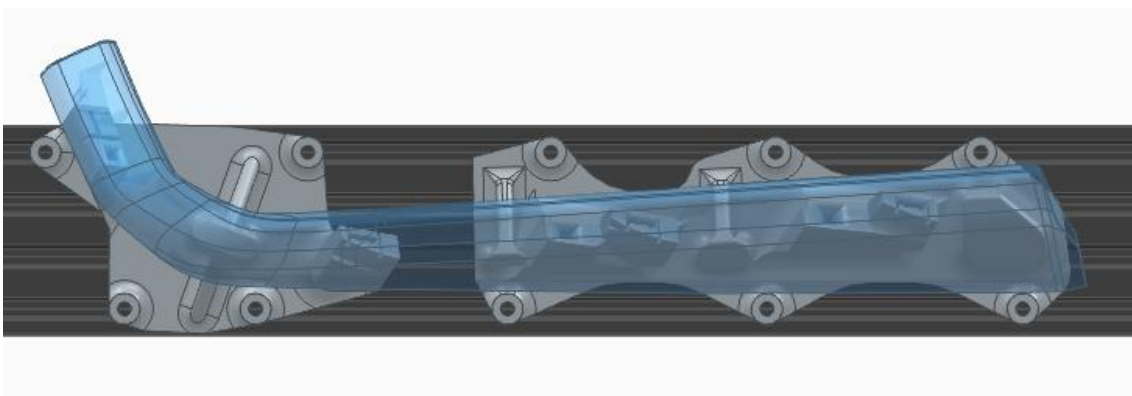


Figura 45 Vista en planta del utillaje para pieza 4

Como se ve en la figura 45, se han evitado al máximo los voladizos, concretamente no hay ninguna superficie saliente. En la figura 46 se puede apreciar una zona gris, la cual no es perteneciente a la base.



Figura 46 Vista planta inferior del utillaje para pieza 4

6.5 PARÁMETROS DE IMPRESIÓN

Una vez finalizada la fase de diseño, los archivos CAD se exportan al formato 3mf para ser procesados en el software de impresión 3D Ultimaker Cura. Este programa permite configurar una amplia variedad de parámetros que influyen directamente en la calidad, la resistencia y los tiempos de impresión de las piezas. Ajustar estos parámetros correctamente es fundamental para optimizar tanto el rendimiento de la impresora como el resultado final del modelo, así como los tiempos de impresión. Los parámetros de impresión, son generales en todos los utillajes, manteniendo una uniformidad constante entre ellos. Los principales parámetros de impresión son:

- **Tamaño de boquilla 0,4 mm:** Corresponde al diámetro del orificio por donde se extruye el filamento. Esta boquilla ofrece un buen equilibrio entre velocidad de impresión y detalle. Permite imprimir piezas con buena precisión y tiempos relativamente rápidos.
- **Altura capa 0,2 mm:** Es el grosor de cada capa depositada. Una altura de 0,2 mm proporciona una resolución suficiente para este proyecto. Se podría haber utilizado una altura de capa de 0,1 mm, pero aumentaría al doble los tiempos de extrusión y coste eléctrico.
- **Líneas de pared 8:** Indica el número de líneas de filamento que forman las paredes de la pieza. Este parámetro trabaja junto al grosor de pared para ajustar la resistencia estructural.
- **Grosor de pared 3,2 mm:** Es el espesor de las paredes exteriores de la pieza. Este valor, se extrae del parámetro anterior (0,4 mm x 8 líneas de pared), asegura paredes resistentes y con buena adhesión entre capas.

- **Capas superiores e inferiores 6:** Determina cuántas capas se imprimen en la parte superior e inferior de la pieza.
- **Densidad de relleno 60%:** Este valor define cuánto material se utiliza para rellenar el interior de la pieza. Se ha elegido este valor del parámetro, debido a que proporciona gran resistencia mecánica, a pesar de que aumenta ligeramente el tiempo y el costo de impresión, frente a valores más pequeños.
- **Patrón de relleno triángulos:** El diseño del relleno afecta la distribución de las fuerzas internas de la pieza. El patrón de triángulos es eficiente y ofrece una buena combinación de resistencia y rigidez en todas las direcciones.
- **Temperatura de impresión 220 grados:** Es la temperatura del extrusor, que es adecuada para la fundición del PLA, como se ha visto en el apartado de máquinas y material empleado, asegurando una buena fusión y adhesión entre capas.
- **Temperatura de placa 60 grados:** Esta temperatura es ideal, ya que la pieza a fabricar se mantiene adherida a la placa evitando errores durante el proceso de impresión y además no afecta estructuralmente a la pieza.
- **Velocidad de impresión 50 mm/s:** Controla la rapidez con la que la boquilla se mueve mientras imprime. Este valor de velocidad ofrece un equilibrio razonable entre calidad de detalle y tiempo de impresión. Se ha tomado un valor relativamente bajo debido a los detalles que tienen los utilajes, especialmente en las zonas de los clips.

Parámetro	Valor
Tamaño de boquilla	0,4 mm
Altura de capa	0,2 mm
Líneas de pared	8
Grosor de pared	3,2 mm
Capas superiores e inferiores	6
Densidad de relleno	60%
Patrón de relleno	triángulos
Temperatura de impresión	220°C
Temperatura de placa	60°C
Velocidad de impresión	50 mm/s

Tabla 2 Principales parámetros de impresión 3D

En la Tabla 2 se muestra de manera resumida los valores de los parámetros generales de impresión.

7. COSTES ECONÓMICOS DE LOS UTILLAJES

En este proyecto se han analizado los costes económicos asociados al proceso de fabricación de los utillajes, centrándose exclusivamente en los gastos relacionados con los materiales utilizados y la maquinaria seleccionada. Este enfoque permite obtener una visión clara y específica del impacto económico de la fabricación de los modelos 3D, excluyendo factores como mano de obra u otros costes indirectos. Los parámetros seleccionados para estimar el coste para el cálculo económico son:

- **Tiempo total de impresión.** Es el tiempo que tarda la impresora en realizar la pieza, además se tiene en cuenta los tiempos de preparación, como el calentamiento de la boquilla extrusora y de la cama caliente.
- **Masa consumida de PLA.** Obtenido de la longitud utilizada del filamento y la densidad del mismo.
- **Consumo eléctrico de la impresora.** La impresora tiene una potencia de 360 W.

7.1 COSTES MATERIALES

Tanto el tiempo total de impresión como la más consumida de PLA, son datos que proporciona directamente el software Ultimaker Cura, que ayudará a realizar el cálculo económico asociado al material. El coste del material PLA es de 25 €/kg. No obstante, para saber el coste económico asociado al consumo eléctrico se ha calculado el precio medio de la electricidad en España en el mes de octubre de 2024, ya que los utillajes se realizaron en dicho mes. Este cálculo se ha hecho de acuerdo a los datos obtenidos de la web esios red eléctrica[8], dando un precio de 0,06797 €/kWh [3]. Para el cálculo de los costes materiales se utilizarán los siguientes pasos:

1. Coste del material

$$\text{Coste material} = \text{Masa consumida} \times \text{Precio del filamento}$$

2. Coste eléctrico

$$\text{Coste eléctrico} = \text{Potencia} \times \text{Tiempo impresión} \times \text{Precio electricidad}$$

3. Coste total por pieza

$$\text{Coste total} = \text{Coste material} + \text{Coste electricidad}$$

Las unidades de cada parámetro son:

Parámetro	Unidades
Masa consumida	Kg
Precio del filamento	€/Kg
Potencia	kW
Tiempo de impresión	horas
Precio de la electricidad	€/kWh
Coste material	€
Coste eléctrico	€
Coste total	€

Tabla 3 Unidades de los parámetros de costes

Tras especificar los cálculos de los costes totales se va proceder al cálculo total de cada utillaje. Analizando el precio por cada módulo del utillaje, así como el precio en conjunto.

Costes de utillaje para pieza 1:

Módulo 1	Valores
Tiempo total de impresión	21,9 horas
Masa consumida	0,254 kg
Coste material	6,35 €
Coste eléctrico	0,54 €
Coste total	6,89 €

Tabla 4 Costes materiales asociados al módulo 1 del utillaje para pieza 1

Módulo 2	Valores
Tiempo total de impresión	13,87 horas
Masa consumida	0,155 kg
Coste material	3,88
Coste eléctrico	0,34 €
Coste total	4,22 €

Tabla 5 Costes materiales asociados al módulo 2 del utillaje para pieza 1

Utillaje para pieza 1	Valores
Coste material total	10,23 €
Coste eléctrico total	0,88 €
Coste total	11,11 €

Tabla 6 Costes materiales totales asociados a utillaje para pieza 1

Costes de utillaje para pieza 2:

Módulo 1	Valores
Tiempo total de impresión	14,75 horas
Masa consumida	0,165 kg
Coste material	4,13 €
Coste eléctrico	0,36 €
Coste total	4,49 €

Tabla 7 Costes materiales asociados al módulo 1 del utillaje para pieza 2

Módulo 2	Valores
Tiempo total de impresión	25,93 horas
Masa consumida	0,269 kg
Coste material	6,73 €
Coste eléctrico	0,64 €
Coste total	7,37

Tabla 8 Costes materiales asociados al módulo 2 del utillaje para pieza 2

Utillaje para pieza 2	Valores
Coste material total	10,86 €
Coste eléctrico total	1 €
Coste total	11,86 €

Tabla 9 Costes materiales totales asociados a utillaje para pieza 2

Costes de utillaje para pieza 3:

Módulo 1	Valores
Tiempo total de impresión	20,77 horas
Masa consumida	0,244 kg
Coste material	6,1 €
Coste eléctrico	0,51 €
Coste total	6,61 €

Tabla 10 Costes materiales asociados al módulo 1 del utillaje para pieza 3

Módulo 1	Valores
Tiempo total de impresión	9,65 horas
Masa consumida	0,115 Kg
Coste material	2,88 €
Coste eléctrico	0,24 €
Coste total	3,12 €

Tabla 11 Costes materiales asociados al módulo 2 del utillaje para pieza 3

Utillaje para pieza 3	Valores
Coste material total	8,98 €
Coste eléctrico total	0,75 €
Coste total	9,73 €

Tabla 12 Costes materiales totales asociados a utillaje para pieza 3

Utillaje para pieza 4:

Módulo 1	Valores
Tiempo total de impresión	33,57 horas
Masa consumida	0,391 kg
Coste material	9,78 €
Coste eléctrico	0,83 €
Coste total	10,61 €

Tabla 13 Costes materiales asociados al módulo 1 del utillaje para pieza 4

Módulo 1	Valores
Tiempo total de impresión	15,75 horas
Masa consumida	0,184 kg
Coste material	4,6 €
Coste eléctrico	0,39 €
Coste total	4,99 €

Tabla 14 Costes materiales asociados al módulo 2 del utillaje para pieza 4

Utillaje para pieza 4	Valores
Coste material total	14,38 €
Coste eléctrico total	1,22 €
Coste total	15,6 €

Tabla 15 Costes materiales totales asociados a utillaje para pieza 4

7.2 COSTES TOTALES

Tras haber realizado los cálculos de los costes totales, teniendo en cuenta solo el coste material y eléctrico, obtenemos un resultado total de 48,9 €. A este resultado hay que añadirle, el coste de mano de obra, es decir, el coste del tiempo de diseño, el cual engloba todas las fases citadas en el apartado de diseño. Dicho tiempo asciende a 14 horas aproximadamente por cada módulo de utillaje, lo que deja un total de 112 horas de diseño. Teniendo en cuenta que el precio por hora de un becario es de 5 €, el coste económico total de la mano de obra total es de 560 €.

El precio original de la impresora es de 500€, se trabajan 1600 horas al año con la impresora. Para amortizar la impresora en un año, se tiene que el coste por hora de la impresora es de:

$$\text{Coste por hora} = \frac{\text{Precio impresora}}{\text{Horas totales}} = \frac{500}{1600} = 0,3125 \text{ €/hora}$$

Para saber el coste de amortización de cada pieza, se multiplica el resultado anterior, 0,3125 por la cantidad de horas de impresión de los módulos de utillaje. Los costes totales por cada módulo, asociados a la amortización se muestran en la tabla 16.

	Tiempo total	Coste amortización
Utillaje 1 modulo 1	21,9	6,85 €
Utillaje 1 modulo 2	13,87	4,33 €
Utillaje 2 modulo 1	14,75	4,61 €
Utillaje 2 modulo 2	25,93	8,11 €
Utillaje 3 modulo 1	20,77	6,50 €
Utillaje 3 modulo 2	9,65	3,02 €
Utillaje 4 modulo 1	33,57	10,50 €
Utillaje 4 modulo 2	15,75	4,93 €

Tabla 16 Costes de amortización de cada módulo de utillaje

Lo que nos deja un coste total por cada módulo de utillaje de:

	Coste material total	Coste amortización	Coste mano obra	Coste total
Utillaje 1 modulo 1	6,89	6,85	70,00	83,74
Utillaje 1 modulo 2	4,22	4,33	70,00	78,55
Utillaje 2 modulo 1	4,49	4,61	70,00	79,10
Utillaje 2 modulo 2	7,37	8,11	70,00	85,48
Utillaje 3 modulo 1	6,61	6,50	70,00	83,11
Utillaje 3 modulo 2	3,12	3,02	70,00	76,14
Utillaje 4 modulo 1	10,61	10,50	70,00	91,11
Utillaje 4 modulo 2	4,99	4,93	70,00	79,92
Total 4 utillajes	48,30 €	48,85 €	560,00 €	657,15 €

Tabla 17 Costes totales asociados al diseño y fabricación de los utillajes

El coste total del proyecto asciende a un total de 657,15 €, en los que podemos observar que lo más caro del diseño y desarrollo es la mano de obra, mientras que los costes asociados a materiales e impresora son los de menor cantidad.

8. ANÁLISIS Y OPTIMIZACIÓN TOPOLÓGICA

La optimización topológica es una técnica avanzada en el diseño estructural que busca determinar la distribución óptima del material dentro de un dominio dado, con el fin de maximizar el rendimiento y minimizar el peso de una pieza [3]. En el contexto de la impresión 3D para el diseño y desarrollo de utillajes, esta metodología permite crear estructuras altamente eficientes y adaptadas a las necesidades específicas de cada aplicación sin perder la funcionalidad.

La optimización topológica presenta grandes ventajas, entre las que están:

- **Reducción de peso:** Al eliminar material innecesario, se obtienen piezas más ligeras, lo que facilita su manipulación y puede mejorar la eficiencia en los tiempos de fabricación.
- **Ahorro de material:** La optimización topológica contribuye a un uso más eficiente del material, reduciendo costes de material y minimizando el desperdicio.
- **Ahorro de tiempo:** Al reducir la cantidad de material utilizado, se traduce en unos costes de impresión más rápidos, optimizando así el proceso de impresión.
- **Mejora del rendimiento estructural:** Las geometrías resultantes están diseñadas para soportar cargas específicas de manera óptima, aumentando la durabilidad y funcionalidad del utillaje.

Al igual que la optimización tiene ventajas, también presenta alguna serie de inconvenientes y desafíos:

- **Limitaciones de fabricación.** Aunque la impresión 3D permite geometrías complejas y libertad de diseño. Algunas estructuras optimizadas presentan la necesidad de incluir soportes para su impresión 3D, lo que puede generar malos acabados superficiales y no ajustarse a las tolerancias óptimas.
- **Complejidad en el diseño:** Las formas generadas pueden ser complejas y requerir software especializado para su modelado y análisis.
- **Costes computacionales:** Los procesos pueden requerir un gran gasto de recursos computacionales, por lo que es necesario contar con un hardware potente y tiempos de cálculos significativos.

La aplicación de la optimización topológica en prototipos permite iterar diseños más eficientes antes de la producción final. Esto no solo reduce el tiempo de desarrollo, sino que también disminuye el consumo de material en las etapas iniciales. Además, al producir prototipos optimizados, se pueden identificar y corregir posibles problemas estructurales o funcionales en la validación de estos. La optimización topológica en prototipo puede presentar problemas como:

- **Propiedades anisotrópicas del material:** La orientación de impresión puede afectar las propiedades mecánicas de la pieza, lo que debe considerarse durante el diseño optimizado. Aunque para unos costos computacionales más rápidos se puede tomar el material como isótropo
- **Precisión dimensional:** Las tolerancias de fabricación de la impresión 3D pueden influir en la exactitud de las dimensiones de las piezas optimizadas, afectando su funcionalidad.
- **Posprocesado necesario:** Las superficies complejas pueden requerir procesos adicionales de acabado para cumplir con los estándares de calidad requeridos.

En el presente proyecto se ha llevado a cabo la optimización topológica de uno de los módulos de utillaje para su estudio y ver las posibilidades de esta herramienta en la

creación de piezas, se ha desarrollado con la herramienta de CAD SolidEdge. Se ha utilizado un único módulo de utillajes debido al coste computacional que tiene este método.

Para llevar a cabo este estudio, se ha elegido el caso más restrictivo posible, es decir, en cada apoyo se ha puesto la carga máxima que puede soportar, teniendo en cuenta que la pulidora hace una fuerza máxima de 2,3 kilogramos. Es decir, esa fuerza se ha concretado en cada superficie de apoyo incluyendo los enganches. Se ha optado por un margen de seguridad de 1,5, por lo que la fuerza total que tiene que soportar cada apoyo es de 3,45 kilogramos. También se han puesto restricciones en el diseño, como son los apoyos al banco de ensayos y los enganches. En este estudio se ha tratado al PLA como material anisótropo con unos valores de:

- Módulo de elasticidad de 2700 MPa
- Coeficiente de Poisson: 0,3.
- Límite elástico: 60 MPa

En la figura 47 se puede ver la distribución de cargas del módulo 1 del utillaje 1 y también se pueden observar las restricciones aplicadas, cada conjunto de flechas indica una fuerza de 3,45 kg. Uno de los parámetros a tener en cuenta es la reducción de peso del 50 %.

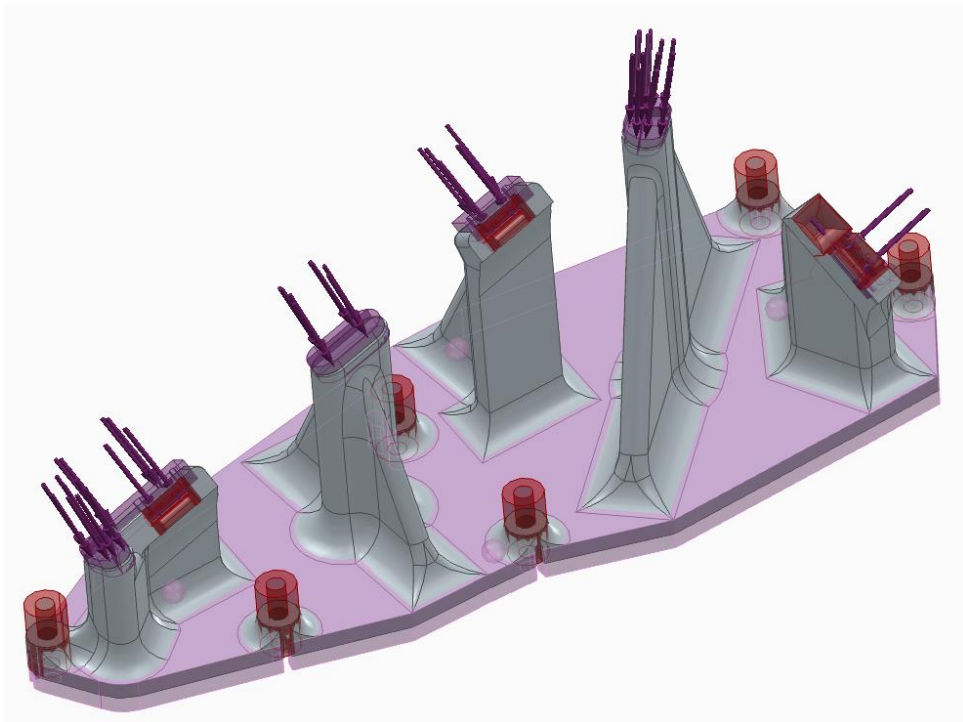


Figura 47 Distribución de cargas y restricciones del módulo 1 del utillaje para pieza 1

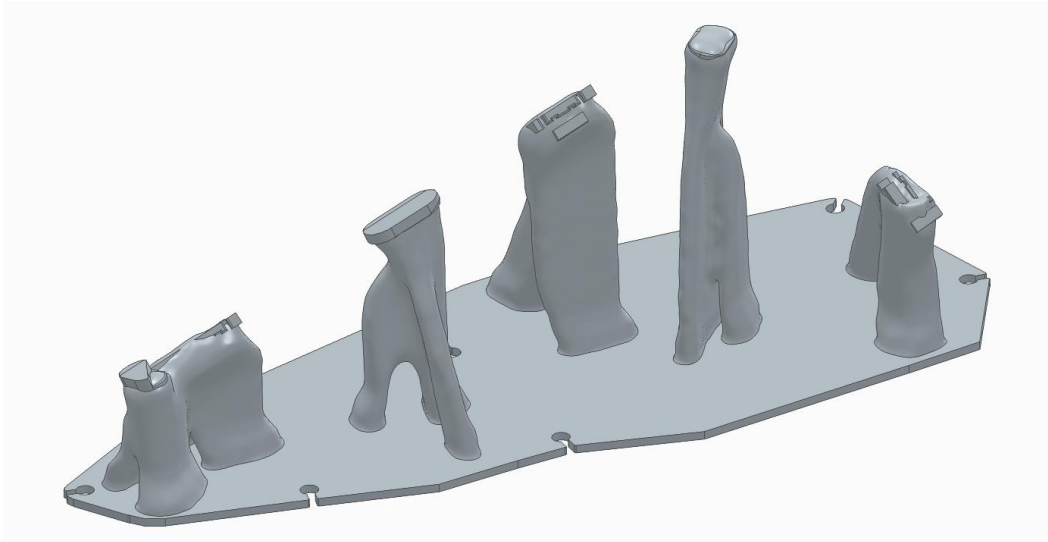


Figura 48 Módulo 1 del utillaje para pieza 1 optimizado

En la figura 48, tras reducir la masa en un 50% se puede observar que el estudio ha respetado los apoyos, sin embargo, no ha ocurrido lo mismo con los enganches ni con los huecos al completo para los tornillos.

9. DESCRIPCIÓN DE TAREAS

Este proyecto requiere una planificación estructurada y metódica. Cada tarea dentro del proyecto se desglosa en fases, asegurando una progresión lógica y eficiente desde el análisis inicial hasta la validación final de cada utillaje completo, con los dos módulos. Este apartado describe las tareas realizadas en cada fase del proyecto, detallando el responsable, los recursos técnicos empleados, la duración estimada y los entregables generados. Este enfoque garantiza la trazabilidad del proceso y permite optimizar los resultados obtenidos en cada etapa.

Para la ejecución de este trabajo, se requiere la participación de las siguientes figuras:

- **Graduado Junior:** será responsable de realizar las tareas técnicas asociadas al proyecto, incluyendo el diseño de los módulos de los utillajes y la parametrización de la impresora 3D.
- **Director de Proyecto:** tendrá a su cargo la supervisión y revisión de las actividades realizadas por el GJ, brindando apoyo técnico cuando sea necesario.

9.1 TAREA I: ESTUDIO PREVIO

Antes de iniciar el diseño y desarrollo del utillaje, es fundamental adquirir los conocimientos necesarios sobre las herramientas y tecnologías que serán utilizadas durante el proyecto. Esta tarea previa se centra en la búsqueda de información técnica y el aprendizaje de los programas Solid Edge y Ultimaker Cura, indispensables para el diseño CAD y la preparación de la impresión 3D. Dedicando tiempo a esta etapa formativa, se asegura que el técnico disponga de las competencias requeridas para afrontar las fases posteriores con eficacia y precisión.

- **Responsable:** Graduado Junior (120h), director de Proyecto (5h).
- **Recursos técnicos:**
 - Ordenador.
 - acceso a software CAD (Solid Edge) y de impresión 3D (Ultimaker Cura).
- **Duración:** 4 semanas
- **Meta:** Conocimientos básicos y avanzados en el uso de Solid Edge y Ultimaker Cura.

9.2 TAREA II: ANÁLISIS DE REQUISITOS DE LOS UTILLAJES

Esta es una fase crucial para garantizar que el diseño del utillaje cumpla con las necesidades específicas del proceso de pulido robotizado. Se analiza la geometría de la pieza de trabajo para que los utillajes cumplan las características funcionales y técnicas que deben. Características como la ergonomía del operario y la optimización del rango de trabajo del brazo robot.

- **Responsable:** Graduado Junior (15h), director de Proyecto (1h).
- **Recursos técnicos:**
 - Accesibilidad a las piezas de trabajo tanto físicamente como en archivo CAD (SolidEdge).
 - Acceso a banco de ensayos donde se instalarán los utillajes.
 - Herramientas de cálculo (Microsoft Excel).
- **Duración:** 2 días.
- **Meta:**
 - Concepto inicial del utillaje basado en las características observadas.
 - Cálculos documentados para la obtención del plano normal.

9.3 TAREA III: DISEÑO Y DESARROLLO DE LOS UTILLAJES

Durante esta tarea, se desarrollan modelos detallados que garantizan la sujeción precisa de las piezas de trabajo. Este proceso asegura que el diseño final cumpla con los estándares de calidad y requisitos de los utillajes.

- **Responsable:** Graduado Junior (150h), director de Proyecto (5h).
- **Recursos técnicos:**
 - Acceso a software CAD (Solid Edge) y de impresión 3D (Ultimaker Cura).
 - Impresora 3D ANET ET5.
- **Duración:** 5 semanas.
- **Meta:**
 - Modelos CAD de los módulos de utillaje.
 - Modelos físicos de los módulos de utillaje.
 - Informe de ajustes realizados respecto al modelo inicial.
 - Lista de modificaciones necesarias (si corresponde) antes de la validación final.

9.4 TAREA IV: VALIDACIÓN DE UTILLAJES

La fase de validación es el paso final para confirmar que el diseño del utillaje cumple con los requisitos y funciona correctamente en condiciones reales. Durante esta etapa, se realizan pruebas prácticas sobre el módulo fabricado, evaluando aspectos como la sujeción de la pieza, la estabilidad de los apoyos y el ajuste en el banco de ensayos.

- **Responsable:** Graduado Junior (5h), director de Proyecto (1h).
- **Recursos técnicos:**
 - Piezas de trabajo y banco de ensayos.
 - Utillajes completos.
- **Duración:** 1 día
- **Meta:**
 - Comprobación del correcto funcionamiento de los apoyos.
 - Validación de ajuste al perfil del banco de ensayos.
 - Lista de modificaciones necesarias (si corresponde).

9.5 TAREA V: ELABORACIÓN DE DOCUMENTO

Este trabajo, incluye desde los análisis iniciales hasta los resultados de las validaciones, pasando por cada etapa del diseño del utillaje. Su objetivo es explicar el proceso, justificar las decisiones tomadas y mostrar que se ha cumplido el objetivo del proyecto, diseño y desarrollo de utillajes para el pulido robotizado de piezas de plástico. Además, es una herramienta importante para dejar constancia del trabajo y poder usarlo como base para futuros desarrollos.

- **Responsable:** Graduado Junior (90h), director de Proyecto (8h).
- **Recursos técnicos:** Acceso a software (Microsoft Word) y de impresión 3D (Ultimaker Cura).
- **Duración:** 2 semanas.

- **Meta:** Conocimientos básicos y avanzados en el uso de Solid Edge y Ultimaker Cura.

A continuación, en la figura 49 se puede apreciar de manera más visual el desarrollo y distribución de tareas, en el diagrama de Gantt.

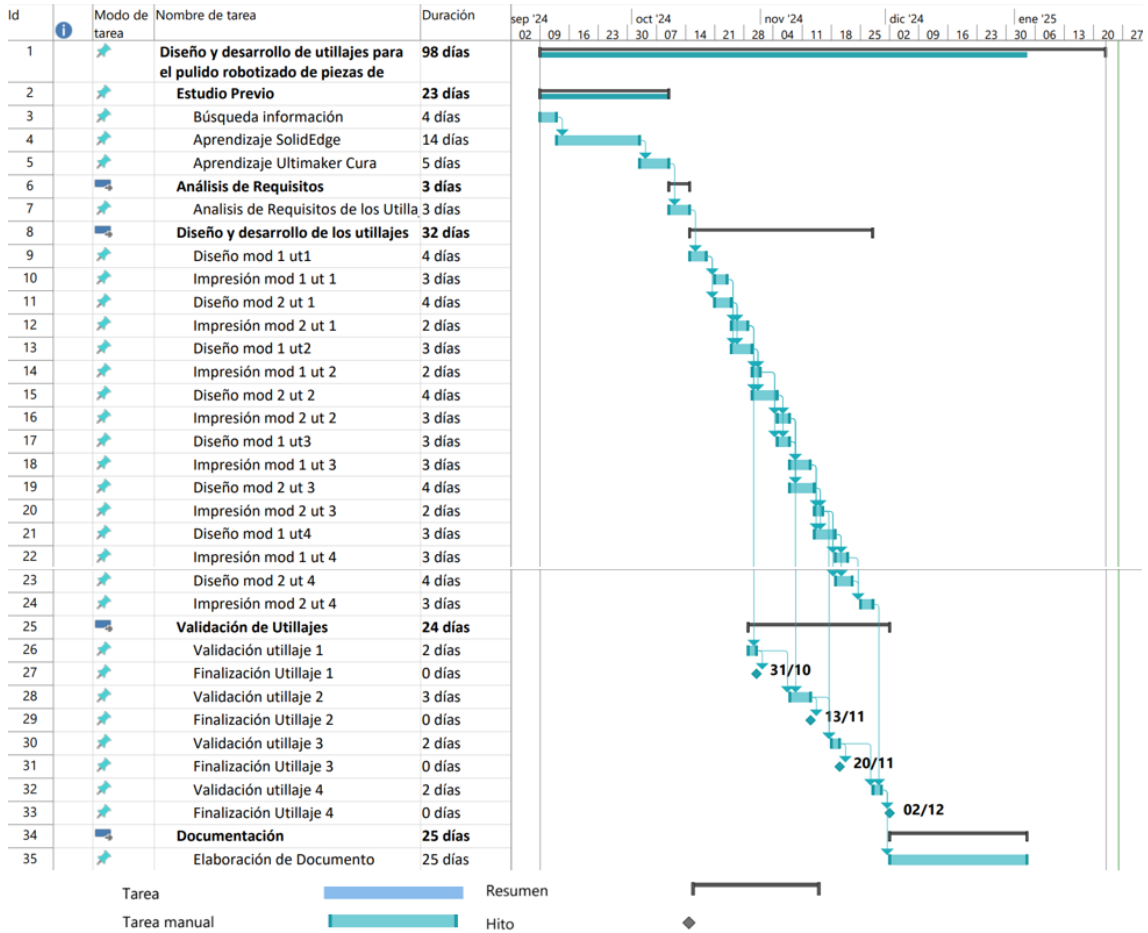


Figura 49 Diagrama de Gantt

10. PRESUPUESTO DEL PROYECTO

Después de organizar las tareas del proyecto y asignar las responsabilidades a cada trabajador, y también haber definido el coste asociado a los materiales necesarios. A continuación, se presenta un resumen completo del presupuesto, que incluye tanto los gastos directos como los indirectos. La tabla 18 muestra el presupuesto, el cual ofrece una visión clara y sencilla de los costes totales del proyecto, asegurando que todos los recursos estén bien planificados y se utilicen de manera eficiente. Como se muestra en la tabla, el coste total del proyecto asciende a la cantidad de 3.678,19€.

	Unidades	Nº Unidades	Coste unitario	Coste	Total
Costes directos					3.437,56 €
Personal					2.555,00 €
Director de proyecto	horas	20	32,75	655,00	
Graduado Junior	horas	380	5,00	1.900,00	
Amortizaciones de máquinas y software					256,56 €
ANET ET5	horas	157	0,31	49,06	
SolidEdge	horas	200	1,00	200,00	
UltimakerCura	horas	15	0,50	7,50	
Materiales					626,00 €
PLA	bobina (1Kg)	2	25,00	50,00	
Banco de ensayos	unidades	1	550,00	550,00	
Tornillo M5x16 DIN 912	unidades	40	0,30	12,00	
Tuerca T M5 DIN 508	unidades	40	0,20	8,00	
Arandela plana M5 DIN 125	unidades	40	0,15	6,00	
Costes indirectos 7%					3.678,19 €
TOTAL PROYECTO					3.678,19 €

Tabla 18 Resumen presupuestos del proyecto

11. CONCLUSIONES Y LINEAS DE TRABAJO FUTURAS

El proyecto ha demostrado que la impresión 3D es una herramienta altamente eficiente y versátil para la creación de prototipos, permitiendo un control exhaustivo de todas las fases del diseño y un seguimiento continuo de los avances. Su capacidad para realizar modificaciones rápidas y económicas, facilita la realización de múltiples diseños bajo un enfoque de prueba y error, permitiendo el desarrollo de piezas con tolerancias relativamente buenas. No obstante, la tecnología presenta ciertos desafíos, como errores derivados de la calibración de la impresora, la calidad de los materiales, o diseños que no se ajustan adecuadamente a las limitaciones de la impresión, especialmente en geometrías con detalles pequeños o bordes complejos, así como estructuras de impresión que necesiten soportes y a la vez necesiten una buena calidad superficial.

Durante el desarrollo del proyecto, se identificó la importancia de diseñar uniones más ajustadas en ciertos casos. Debido a que esta estrategia permite llevar a cabo procesos de acabado posterior, como el lijado, para garantizar un ajuste óptimo, en caso de ser necesario. Ya que, por el contrario, si se realizan ajustes más holgados y no ajustan correctamente, se tiene que desechar la pieza impresa. Asimismo, se ha comprobado que para lograr un diseño eficiente de los utillajes es crucial un análisis detallado de la pieza a fijar. Esto implica identificar posibles defectos en la pieza, así como determinar puntos de anclaje y apoyo que permitan un diseño funcional y optimizado.

Otro aspecto fundamental identificado es la consideración de los requerimientos técnicos y ergonómicos en la fase de diseño de utillajes. Como, por ejemplo, garantizar la facilidad de uso por parte del operario al colocar los utillajes, minimizar los movimientos extremos del brazo robótico y diseñar los componentes de manera que se optimice el proceso de impresión, evitando estructuras de soporte innecesarias y voladizos que comprometan la calidad final de las piezas.

También se ha analizado, que la fabricación aditiva mediante impresión 3D se consolida como una tecnología revolucionaria con un amplio potencial de crecimiento, no solo en el ámbito de los prototipos, sino también en la producción de piezas funcionales. Esto se debe, a la creciente diversidad de materiales disponibles, lo que abre nuevas oportunidades para aplicaciones más avanzadas en otros campos de la ingeniería.

En cuanto a la optimización topológica, aunque es una herramienta prometedora para reducir peso y material, presenta ciertos inconvenientes. Entre ellos, destacan los acabados superficiales deficientes, a consecuencia de soportes generados por formas complejas incompatibles con las impresoras. Además, el proceso tiene un alto coste computacional, especialmente cuando se trata de geometrías complejas como las presentes en los utillajes diseñados en este proyecto. Esto ralentiza considerablemente los tiempos de diseño y desarrollo, obteniendo en algunos casos resultados ineficientes.

Tras numerosas pruebas realizadas con distintos programas de análisis topológico, se concluye que obtener resultados más precisos requiere de equipos computacionales de mayor capacidad y licencias avanzadas de software, que permitan mayor capacidad de

cálculo. Si bien estas limitaciones han restringido parcialmente el alcance de los análisis en este proyecto, se sienta una base sólida para trabajos futuros que, con hardware y herramientas más avanzadas, podrán desarrollar optimizaciones topológicas más precisas y efectivas.

Por último, es importante destacar que los utillajes fueron diseñados desde un principio con criterios de optimización, lo que limita el impacto de la optimización topológica en comparación con otras aplicaciones. Una solución viable para reducir aún más el peso y los tiempos de impresión sería disminuir el número de paredes de la impresión a seis y reducir la densidad de relleno al rango del 35-40%. Estas modificaciones permitirían una reducción de material y tiempo de impresión de aproximadamente un 25-30%, manteniendo la funcionalidad y eficiencia de los utillajes.

También, este proyecto ha permitido identificar y poner en práctica múltiples aspectos clave en el diseño y desarrollo de utillajes mediante el uso de tecnologías avanzadas como la impresión 3D y la optimización topológica. Se ha demostrado que la fabricación aditiva no solo es una herramienta eficaz para prototipado, sino que también tiene un enorme potencial para producir soluciones funcionales, especialmente en aplicaciones personalizadas y de bajo volumen. Este proyecto también ha mostrado las principales ventajas y limitaciones de estas tecnologías.

Finalmente, este trabajo ha servido para consolidar el conocimiento sobre la integración de tecnologías innovadoras en procesos productivos, y ha abierto nuevas perspectivas para la mejora continua en proyectos similares. Se ha establecido una base sólida que no solo puede aplicarse a futuros diseños de utillajes, sino también extenderse a otros sectores donde la personalización, la precisión y la eficiencia sean esenciales. Este proyecto demuestra que, con una combinación adecuada de análisis técnico, creatividad y uso inteligente de herramientas disponibles, es posible afrontar desafíos complejos y aportar soluciones que optimicen los procesos productivos, reduciendo recursos y maximizando resultados.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. B. Ananda *et al.*, «3D printed 2D materials for tissue engineering applications», *ChemPhysMater*, ene. 2025, doi: 10.1016/j.chphma.2024.12.004.
- [2] «Guía de materiales de impresión 3D: Tipos, aplicaciones y propiedades», <https://formlabs.com/es/blog/materiales-impresion-3d/>.
- [3] J. ZHU, H. ZHOU, C. WANG, L. ZHOU, S. YUAN, y W. ZHANG, «A review of topology optimization for additive manufacturing: Status and challenges», *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, Chinese Journal of Aeronautics, pp. 91-110, enero de 2021. doi: 10.1016/j.cja.2020.09.020.
- [4] F. Bulleri, «Anet ET5 Pro, excelente impresora 3D para el precio, pero pocos cambios», <https://www.gizlogic.com/anet-et5-pro-precio-caracteristicas/>.
- [5] improto3d.com, «Todo lo que necesitas saber sobre el filamento PLA | Improto 3D | Impresiones 3D | Escaneado 3D | Diseño y Modelado 3D», <https://www.improto3d.com/blog/filamento-pla/>.
- [6] «PLA acido poliláctico - Plásticos Brello», <https://plasticos-brello.com/material/pla-acido-polilactico/>.
- [7] L. Serna C, A. Rodríguez de S, y F. Albán A., «Ácido Poliláctico (PLA): Propiedades y Aplicaciones», oct. 2003.
- [8] «Esios Red Eléctrica», https://www.esios.ree.es/es/analisis/1727?vis=2&start_date=01-10-2024T00%3A00&end_date=31-10-2024T23%3A55&compare_start_date=30-09-2024T00%3A00&groupby=hour&zoom=7&latlng=41.11246878918088%2C-1.5216064453125.

ANEXOS

ANEXO I: Cálculos para la obtención del plano perpendicular al vector normal.

En este anexo se detallan los cálculos utilizados para los utillajes para piezas de trabajo 2, 3 y 4. Se puede observar que para la pieza 2 se han utilizados pocos planos de referencia debido a la sencillez de su geometría a pulir. Sin embargo, las piezas de trabajo 3 y 4 han necesitado hasta 23 planos debido a los diferentes planos que tienen en la versión CAD.

Pieza 2	X	Y	Z
1	0,8	-0,1	0,59
2	0,7	-0,5	0,51
3	0,47	-0,7	0,52
4	0,19	-0,89	0,42
5	0,51	-0,83	0,24
6	0,48	-0,87	0,15
MEDIA	0,495	-0,765	0,465

Tabla 19 Cálculo vector normal de la pieza de trabajo 2

Pieza 3	X	Y	Z
1	0,78	-0,21	0,59
2	0,79	-0,53	0,3
3	0,73	-0,45	0,51
4	0,61	-0,23	0,76
5	0,61	-0,38	0,69
6	0,54	-0,56	0,62
7	0,35	-0,89	0,28
8	0,26	-0,96	0,07
9	0,18	-0,98	-0,11
10	0,38	-0,81	0,45
11	0,42	-0,71	0,56
12	0,3	-0,92	0,26
13	0,26	-0,95	0,16
14	0,16	-0,99	-0,04
15	0,58	-0,77	0,27
16	0,42	-0,9	0,12
17	0,33	-0,95	-0,01
18	0,26	-0,96	-0,1
19	0,31	-0,94	-0,13
20	0,39	-0,92	-0,08
21	0,48	-0,88	-0,02
22	0,69	-0,71	0,13
MEDIA	0,405	-0,885	0,21

Tabla 20 Cálculo vector normal de la pieza de trabajo 3

Pieza 4	X	Y	Y
1	0,69	0,01	0,72
2	0,83	0,02	0,55
3	0,9	0,03	0,44
4	0,87	0,29	0,4
5	0,78	0,26	0,57
6	0,73	0,23	0,65
7	0,62	0,18	0,77
8	0,76	0,33	0,57
9	0,81	0,56	0,18
10	0,19	0,97	-0,11
11	0,2	0,97	-0,11
12	0,45	0,85	0,28
13	0,52	0,77	0,38
14	0,61	0,49	0,62
15	0,62	0,08	0,78
16	0,52	0,76	0,4
17	0,19	0,98	-0,11
18	0,36	0,92	0,13
19	0,39	0,9	0,18
20	0,58	0,62	0,53
21	0,45	0,85	0,29
22	0,24	0,97	-0,03
23	0,18	0,98	-0,11
MEDIA	0,58	0,62	0,4

Tabla 21 Cálculo vector normal de la pieza de trabajo 4

ANEXO II: Cálculo del precio de la electricidad en España en octubre 2024

Para realizar el cálculo se han exportado 1441 datos de precios durante el mes de octubre de 2024 en España, se ha realizado la media del precio, tal como se explica en el apartado de costes económicos de los utillajes. A continuación, se muestra la gráfica de precios por horas que ha habido en el mes de octubre.

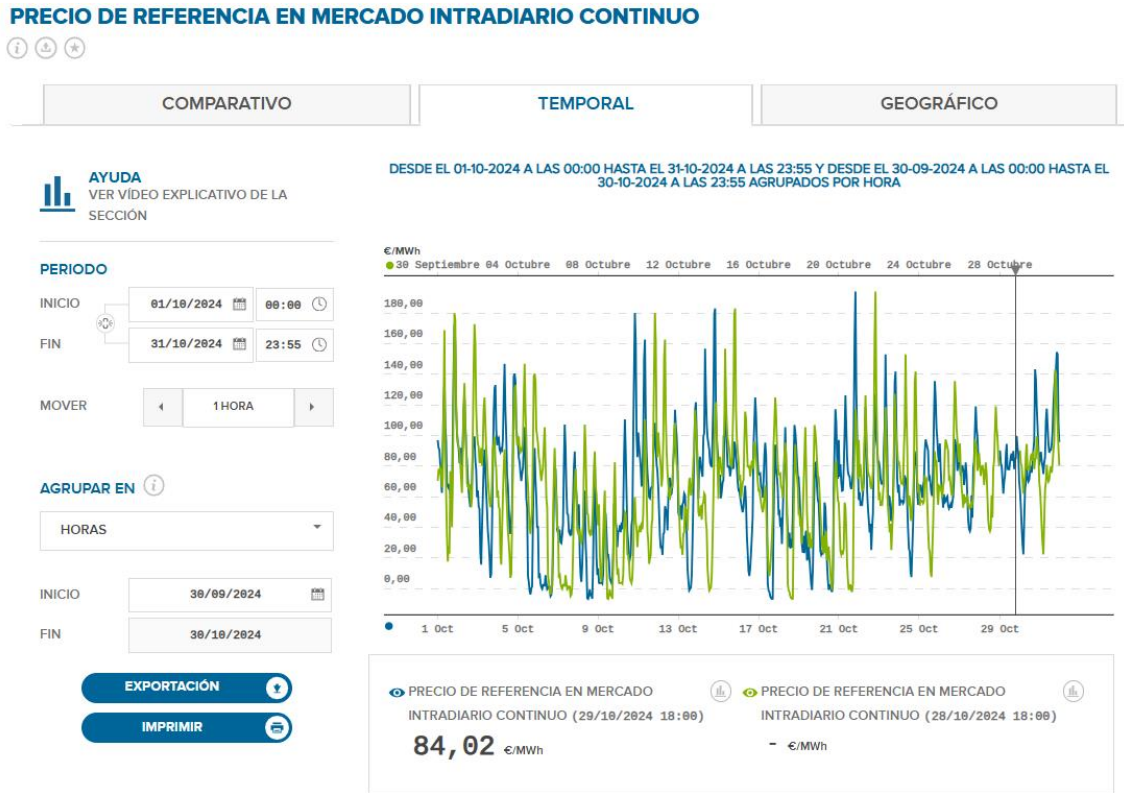


Figura A 1 Gráfico de variaciones del precio de la electricidad en España durante el mes de octubre de 2024

ANEXO III: Parámetros y laminado para impresión 3d de los módulos de utillaje.

En este anexo se detallan más parámetros de impresión que no han sido muy relevantes en el proceso de impresión, así como el laminado de impresión. También se muestran algunas imágenes de los slides durante el proceso de impresión, donde se observa el número de paredes y el relleno empleado

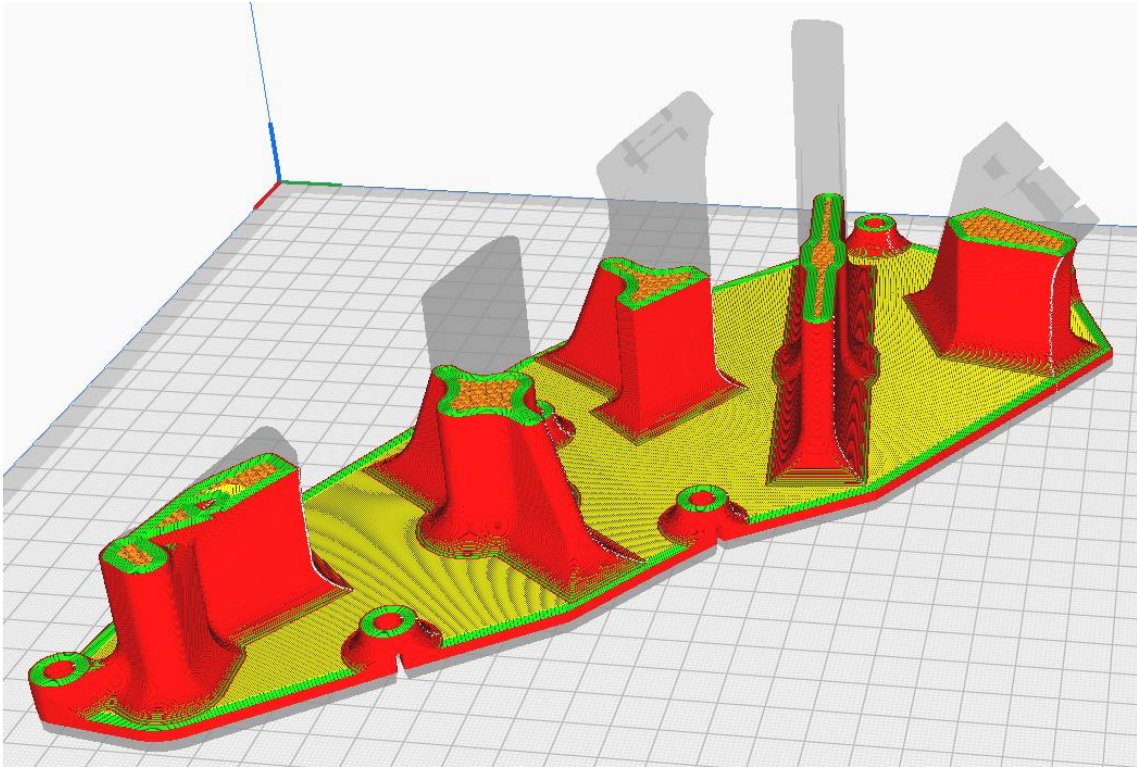


Figura A 2 Vista módulo 1 del utillaje para pieza 1 en el laminador de Ultimaker Cura

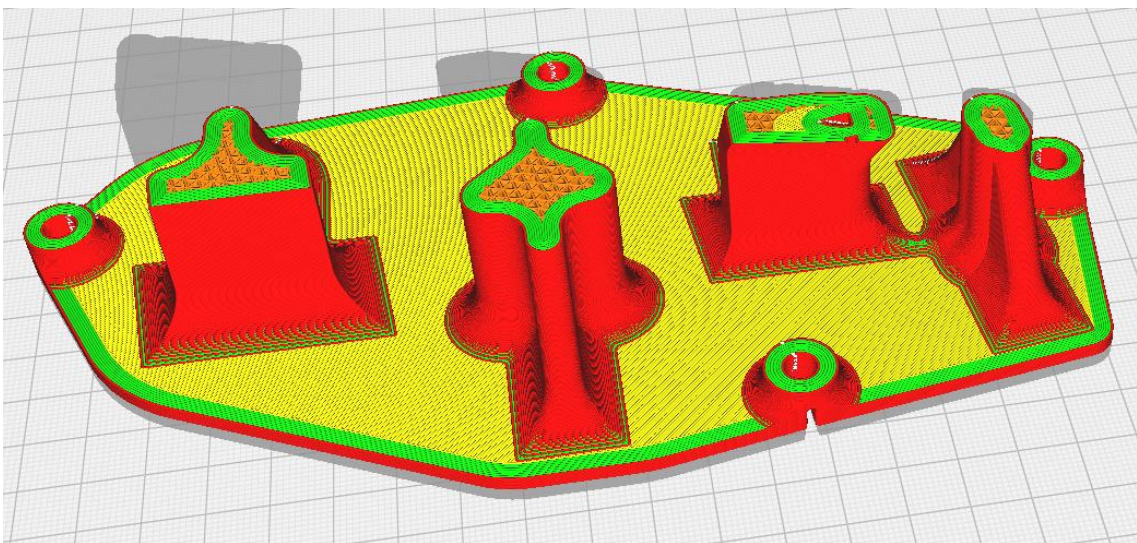


Figura A 3 Vista módulo 2 del utillaje para pieza 1 en el laminador de Ultimaker Cura

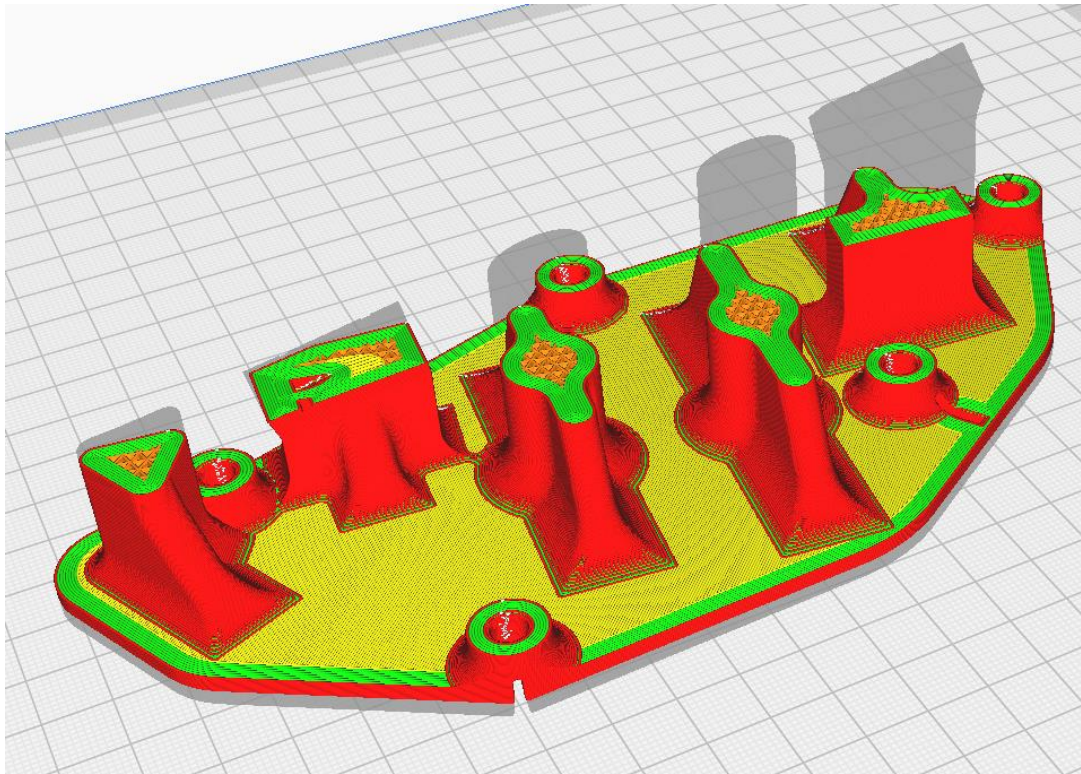


Figura A 4 Vista módulo 1 del utillaje para pieza 2 en el laminador de Ultimaker Cura

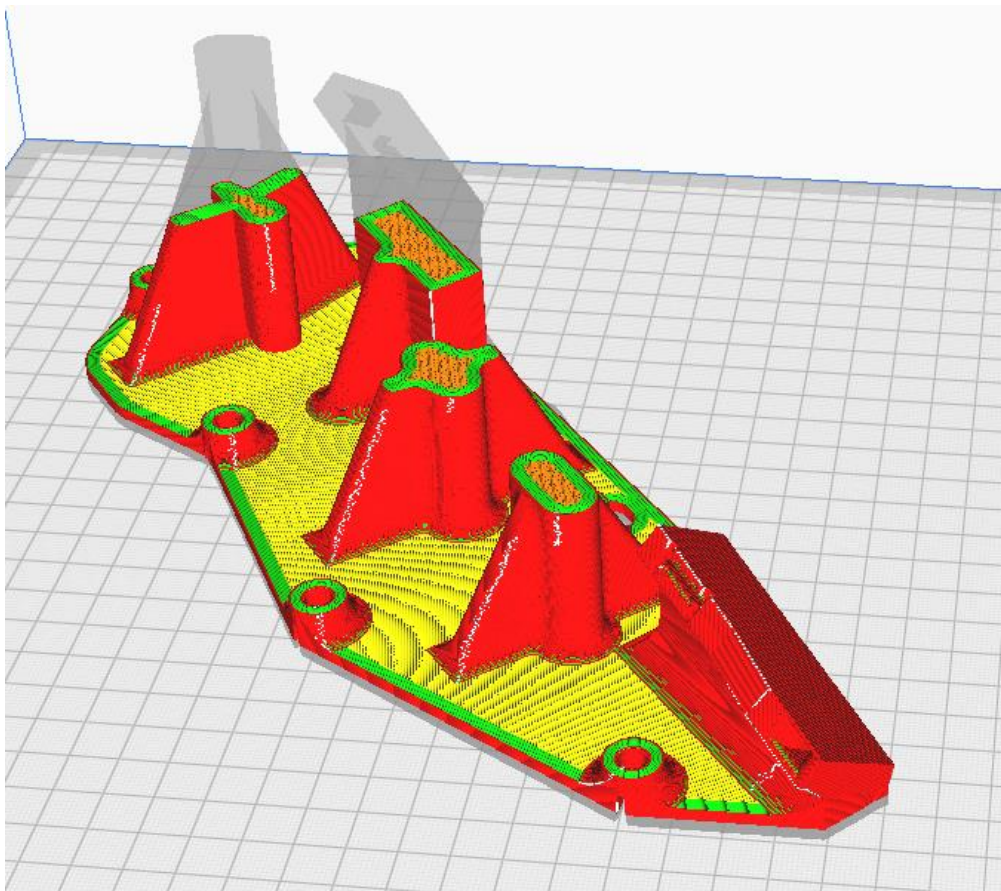


Figura A 5 Vista módulo 2 del utillaje para pieza 2 en el laminador de Ultimaker Cura

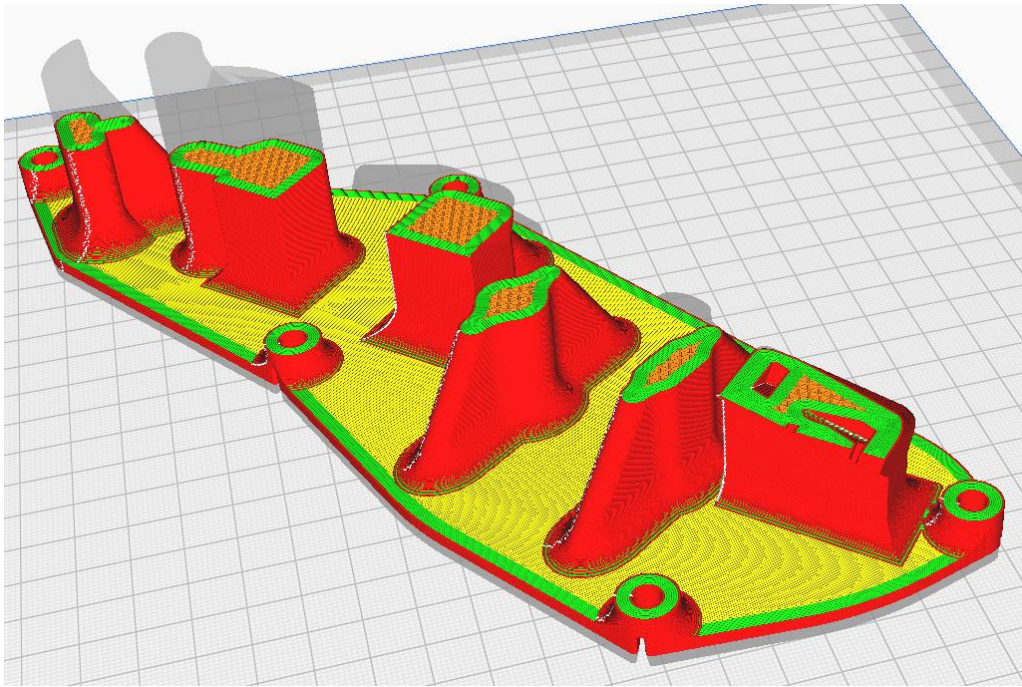


Figura A 6 Vista módulo 1 del utillaje para pieza 3 en el laminador de Ultimaker Cura

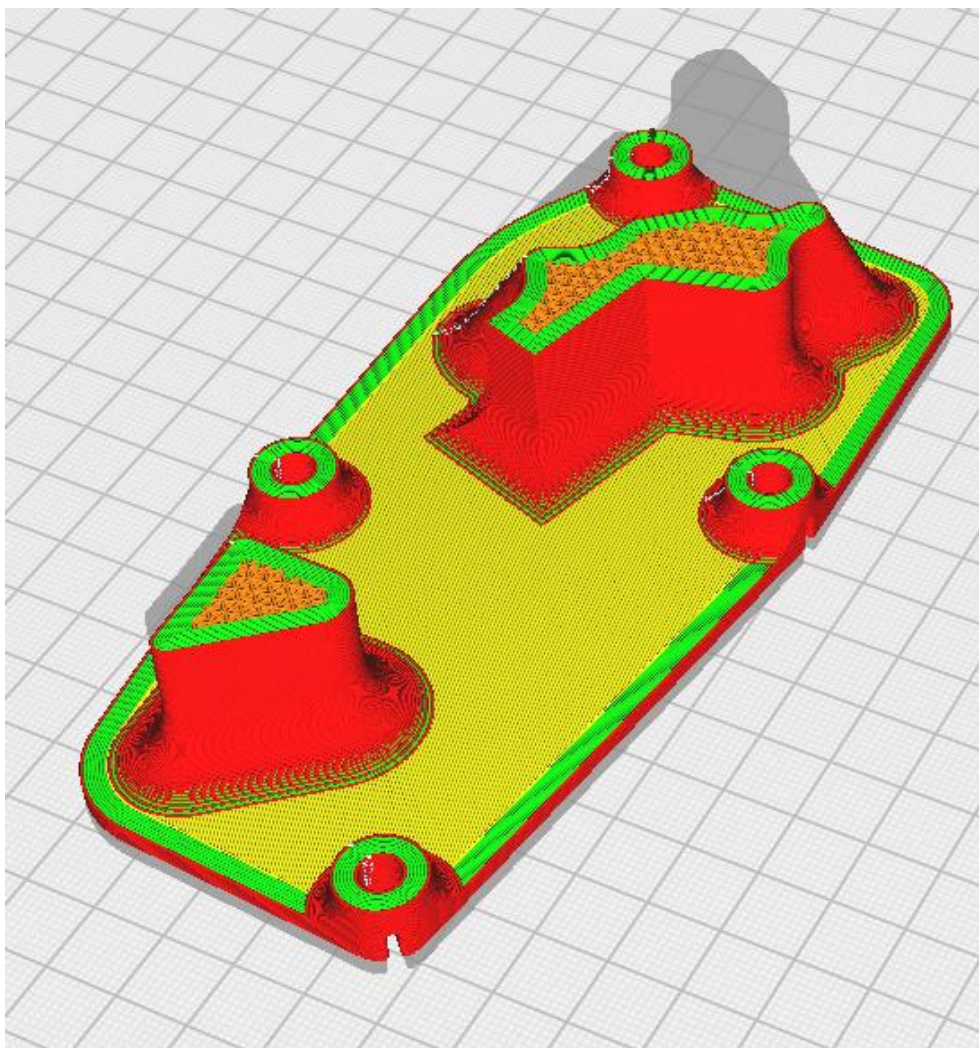


Figura A 7 Vista módulo 2 del utillaje para pieza 3 en el laminador de Ultimaker Cura

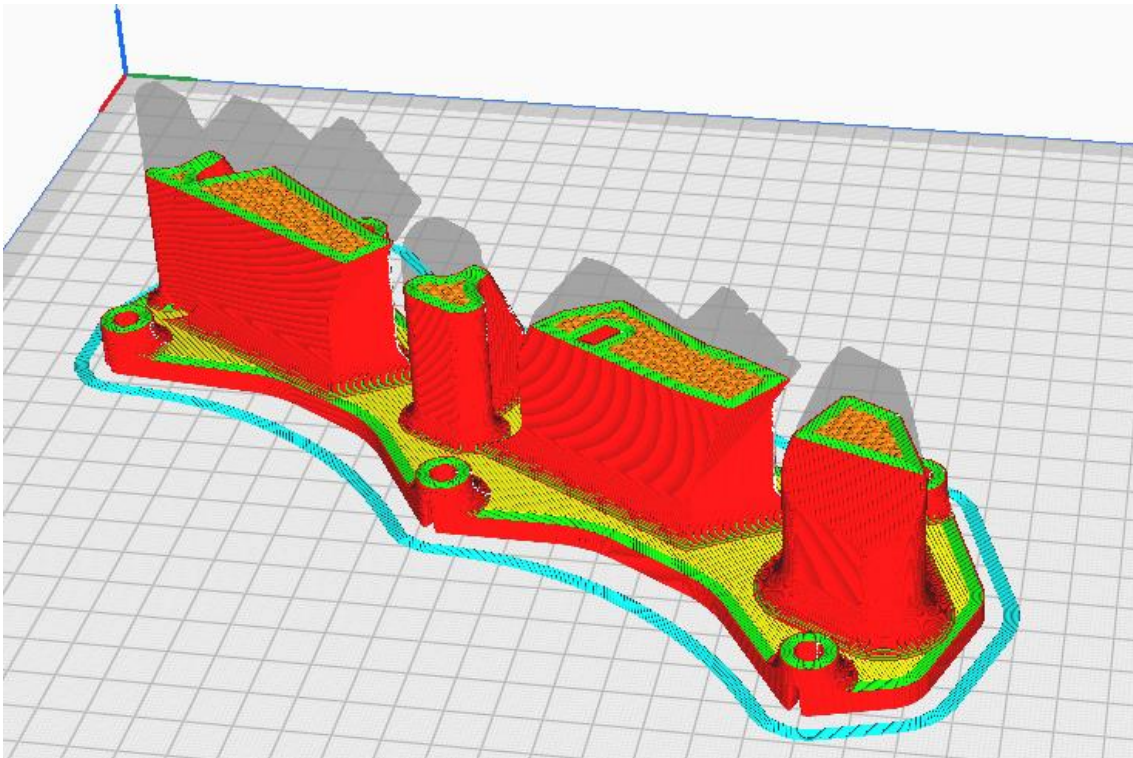


Figura A 8 Vista módulo 1 del utillaje para pieza 4 en el laminador de Ultimaker Cura

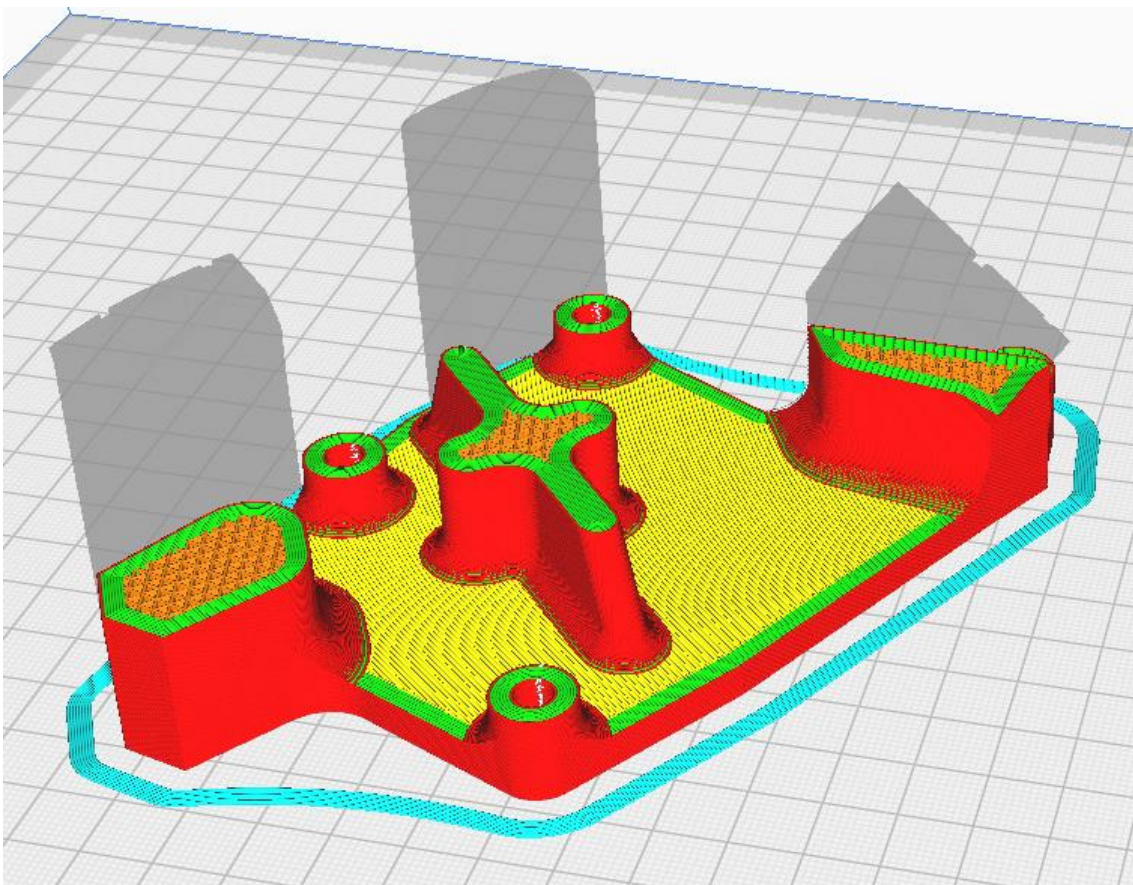


Figura A 9 Vista módulo 2 del utillaje para pieza 4 en el laminador de Ultimaker Cura

ANEXO IV: Optimización topológica

En este anexo se incluye algún parámetro más del optimizado topológico, además de otro módulo de optimizado, el cual se puede observar que, por complejidad de formas y cálculos, no se ha desarrollado correctamente.

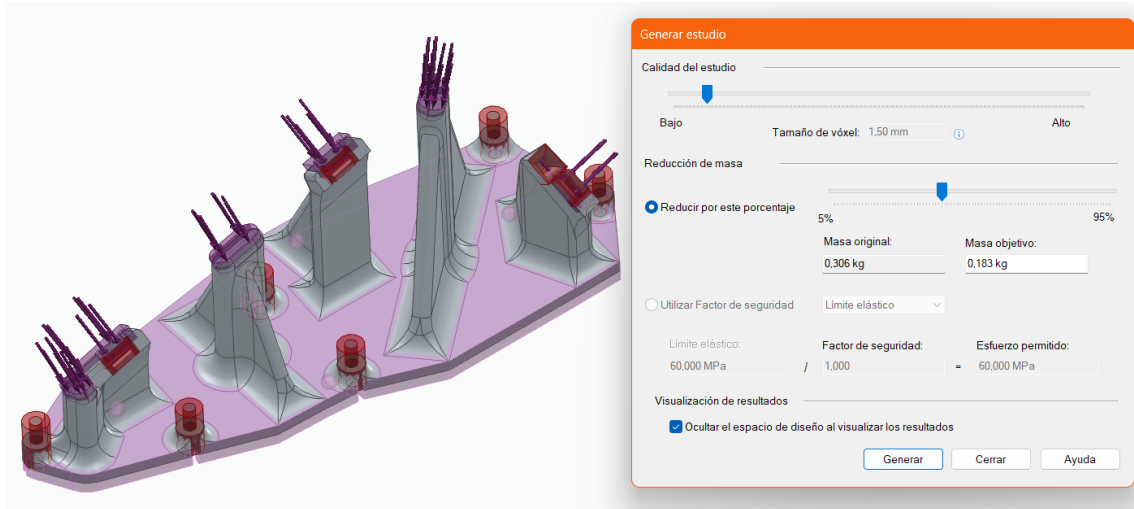


Figura A 10 Parámetros optimización módulo 1 utillaje para pieza 1

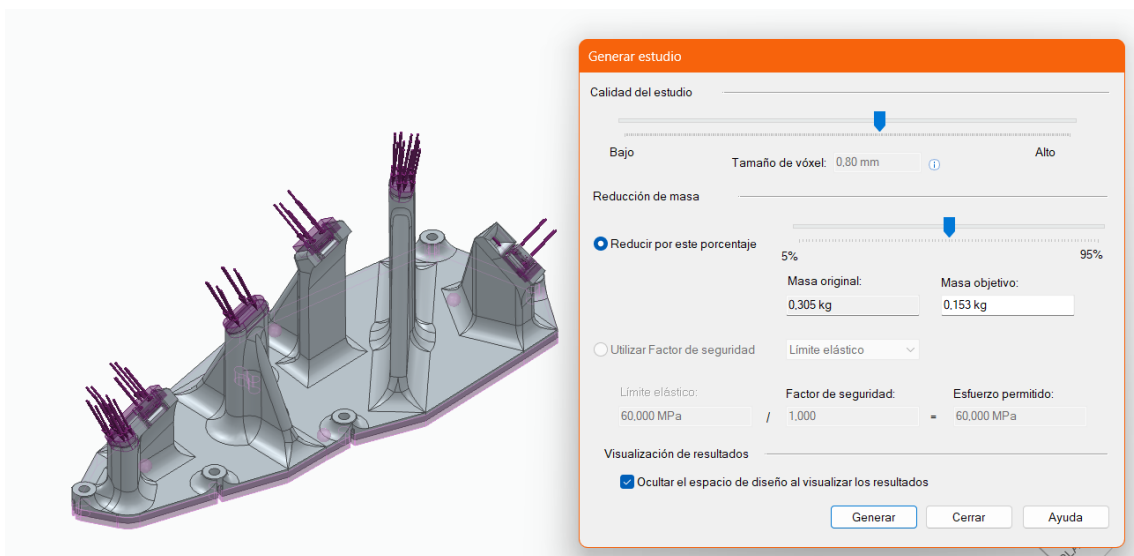


Figura A 11 Parámetros optimización módulo 1 utillaje para pieza 1

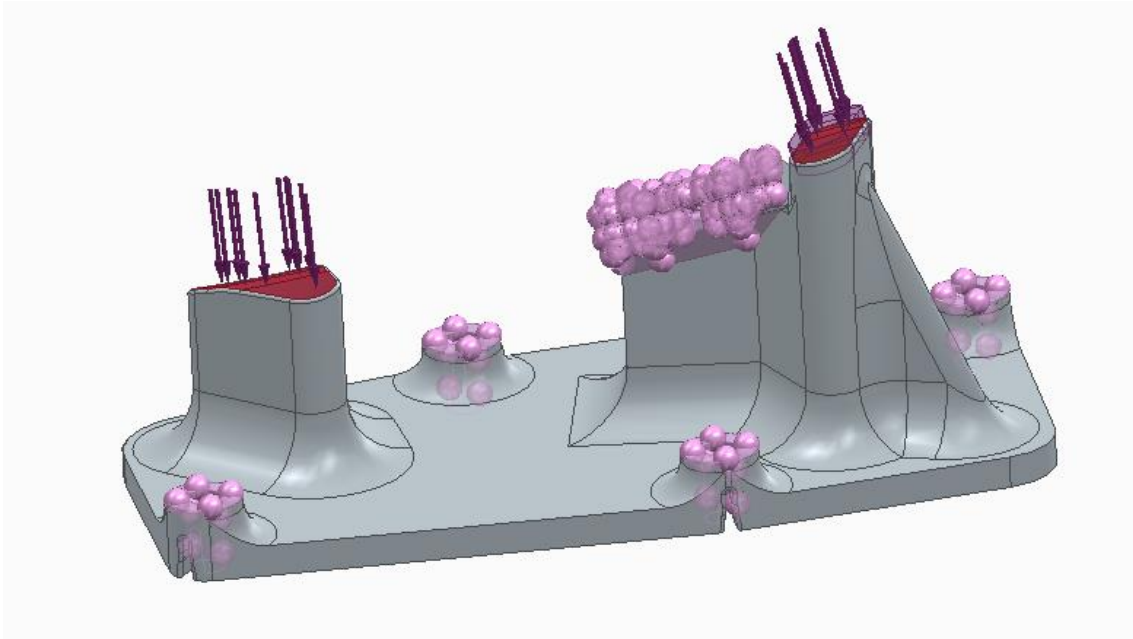


Figura A 12 Distribución de cargas y restricciones del módulo 2 del utillaje para pieza 3

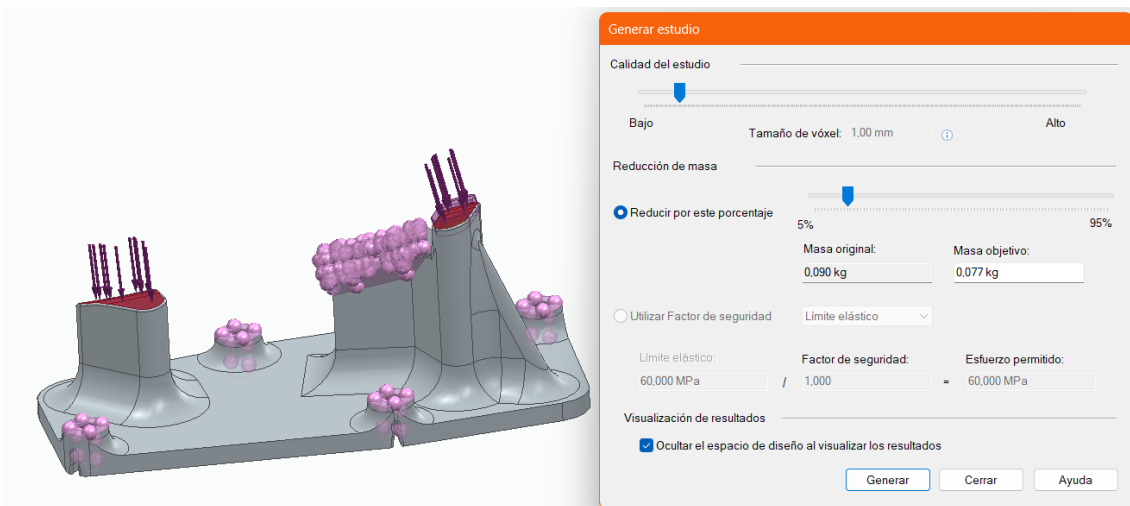


Figura A 13 Parámetros optimización módulo 2 utillaje para pieza 3

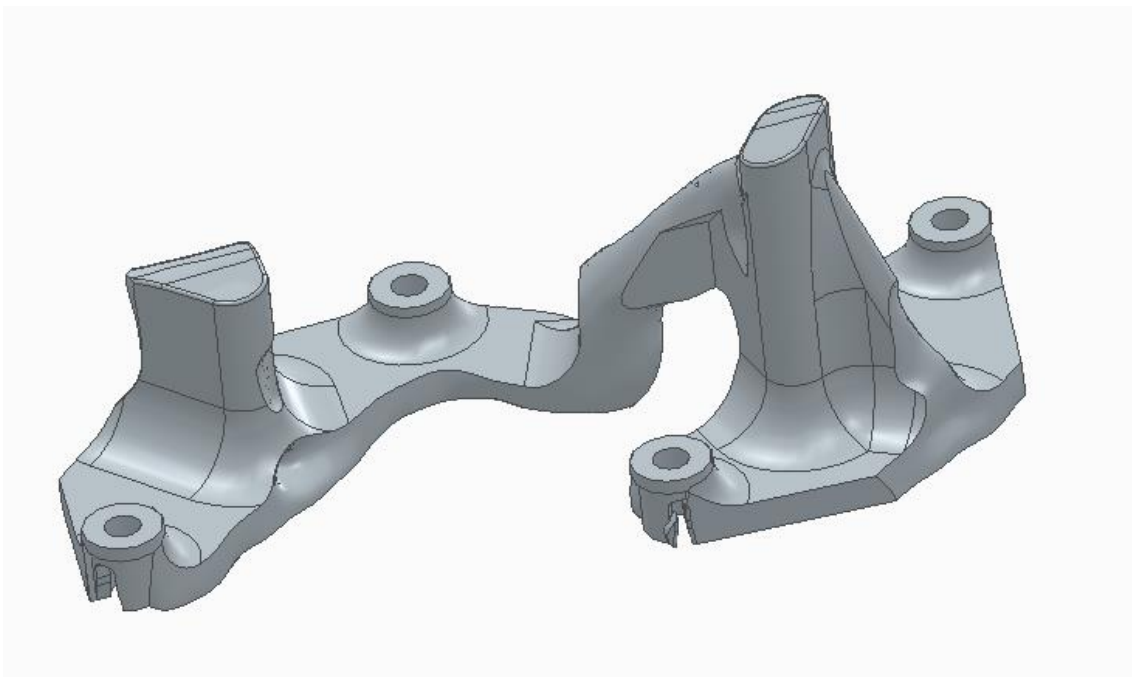


Figura A 14 Optimización del módulo 2 del utillaje para pieza

ANEXO V: Utillajes finales

En este anexo se incluyen las vistas detalladas de todos los utillajes diseñados en el trabajo. El objetivo es que estas imágenes permitan entender mejor el trabajo realizado y también ofrecer una visión más clara de cómo funcionan y para qué sirven. De esta forma, complementan la información presentada en el resto del documento.



Figura A 15 Vista lateral utillaje 1



Figura A 16 Vista de otro lateral utillaje 1



Figura A 17 Vista en planta utillaje 1



Figura A 18 Vista lateral utillaje 2



Figura A 19 Vista de otro lateral utillaje 2



Figura A 20 Vista en planta utillaje 2

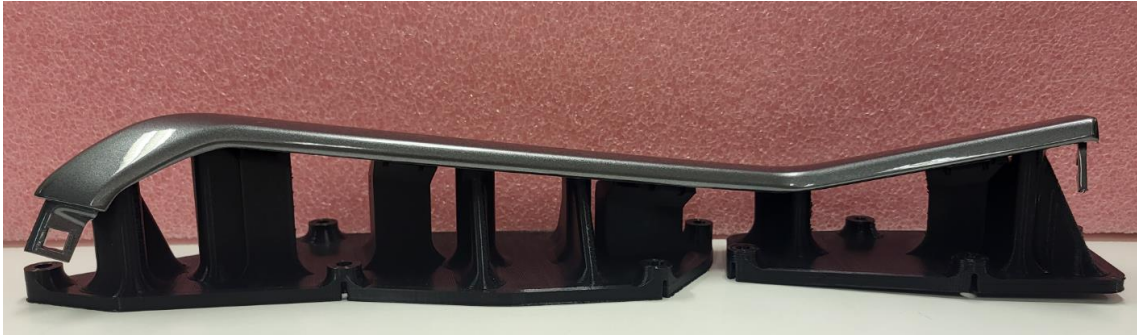


Figura A 21 Vista lateral utillaje 3



Figura A 22 Vista de otro lateral utillaje 3



Figura A 23 Vista en planta utillaje 3



Figura A 24 Vista lateral utillaje 4 en banco de ensayos



Figura A 25 Vista en planta utillaje 4 en banco de ensayos

