



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño ergonómico de un prototipo de arma corta con respuesta háptica para adiestramiento militar mediante realidad extendida

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Pablo Martínez García

DIRECTORES: Xavier Núñez Nieto
Francisco Manuel Troncoso Pastoriza

CURSO ACADÉMICO: 2023-2024

UniversidadeVigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

Diseño ergonómico de un prototipo de arma corta con respuesta háptica para adiestramiento militar mediante realidad extendida

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

Universidade de Vigo

RESUMEN

La realidad extendida (RE) está viviendo actualmente un periodo de pleno auge, insertándose cada vez más en la vida cotidiana y laboral de las personas. En esta línea, el empleo de simuladores de RE destinados a la instrucción de profesionales es una realidad que está ganando notable fuerza. Consecuentemente, las Fuerzas Armadas tienen puesto su interés en la adquisición de esta tecnología para complementar el adiestramiento de sus unidades.

Estos simuladores recrean entornos y situaciones muy próximas a la realidad adiestrando al usuario en la toma de decisiones. Para lograr estas experiencias inmersivas son necesarios dispositivos que envuelvan al máximo al usuario en la simulación, como son gafas, mandos u otros accesorios de RE.

Es por ello que este trabajo desarrolla el diseño, fabricación e implementación de un prototipo de arma corta que sea capaz de dar respuesta háptica a las interacciones de su portador con el arma. Su objetivo es sumergir al usuario en la experiencia de sostener un arma real y recrear la acción sensorial de su retroceso al disparar, todo ello destinado, a su vez, al adiestramiento militar. Es así que el trabajo se adentra en los modelos de diseño e ingeniería asistidos por ordenador, así como en el proceso de impresión 3D.

PALABRAS CLAVE

Realidad extendida, Diseño asistido por ordenador, FEM, Impresión 3D, Simulación de combate

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradecer enormemente a mis dos directores del trabajo por su profunda implicación y su continua ayuda para mejorar cada detalle del proyecto. Han seguido muy de cerca los avances y el progreso del trabajo a medida que se iban realizando y nunca dudaron de invertir su tiempo para sacar el máximo provecho de mí y hacer eficaces mis esfuerzos. Por todo ello, gracias.

Agradecer también a todo el profesorado del CUD y de la ENM por su docencia a lo largo de todo mi ciclo de formación.

A continuación, agradecer a mi madre. Una mujer excepcional que me ha acompañado muy de cerca en toda mi vida, en lo bueno y en lo malo, y su apoyo ha sido fundamental para que yo haya llegado hasta aquí. Todo lo que sé, lo he aprendido de ella.

Agradecer a Carmen. Una persona impresionante y muy especial para mí. Siempre me ha llenado de ánimos y motivación, incluso en la dura distancia. Su fortaleza y alegría me ha inspirado para sacar lo mejor de mí y sé, que juntos, vamos a alcanzar todas nuestras metas. Gracias.

Agradecer a mi estudio 208 y compañeros de promoción. Son más que mejores amigos, como propios hermanos. Siempre me han sacado una sonrisa, hasta en los momentos más complicados de esta bonita etapa en la ENM.

Por último, agradecer a mi abuelo. Aunque hoy no esté con nosotros, ha sido siempre mi modelo para todo, es la persona que más admiro.

CONTENIDO

Contenido	1
Índice de Figuras	5
Índice de Tablas.....	8
1 Introducción.....	9
1.1 Descripción del apartado.....	9
1.2 Antecedentes.	9
1.3 Motivación.	10
1.4 Objetivos.	10
1.5 Estructura del trabajo.	10
2 Estado del arte.	12
2.1 Descripción del apartado.....	12
2.2 Realidad extendida y sus aplicaciones.	12
2.2.1 Historia de los simuladores virtuales.	14
2.2.2 Tipos de Sistemas de Realidad Virtual.	15
2.2.3 HTC Vive Pro.	17
2.3 Proceso General de Diseño de un Proyecto de Ingeniería.	18
2.3.1 Estudio Previo.....	19
2.3.2 Ingeniería Conceptual.	19
2.3.3 Ingeniería de Detalle.....	20
2.3.4 Fabricación.	20
2.4 Diseño, Ingeniería y Fabricación Asistida por Ordenador.....	20
2.4.1 CAD.....	20
2.4.2 CAE.	21
2.4.2.1 FEM	21
2.4.3 CAM.	22
2.5 Autodesk Inventor.....	22
2.6 Fabricación Aditiva e Impresión 3D.	23
2.6.1 Aplicaciones de la Impresión 3D.....	24

2.6.2 Limitaciones de la Impresión 3D.....	24
2.6.3 Tipos.	25
2.6.4 SLA (Estereolitografía).	25
2.6.5 SLS (Sinterización Selectiva por Láser).....	25
2.6.6 Impresión por FDM (Fused Deposition Modeling).....	26
3 Desarrollo.	27
3.1 Descripción del apartado.....	27
3.2 Estudio Previo.	27
3.3 Ingeniería Conceptual.	28
3.3.1 Especificaciones.	28
3.3.2 Bocetos Iniciales.	29
3.3.3 Software de Modelado Informático.	29
3.4 Modelado Inicial.	30
3.4.1 Sujeción del Mando.	30
3.4.2 Ergonomía y Molde de Arcilla.	31
3.4.2.1 Escaneo 3D.	32
3.4.3 Generación de Alternativas para la Empuñadura.	33
3.4.4 Empuñadura Óptima.	34
3.5 Ingeniería de Detalle.	35
3.5.1 Modelado detallado de la empuñadura.	35
3.5.2 Brazo del soporte para el Actuador.	36
3.5.2.1 Optimización Topológica.	36
3.5.2.1.1 Estudio FEM en Autodesk Inventor.	36
3.5.2.2 Diseño Generativo.	38
3.5.1 Maqueta Digital del Actuador.	40
3.5.2 Mecanismo de agarre para el actuador	41
3.5.3 Mejoras y Prototipo Final.	43
3.6 Fabricación.....	44
3.6.1 Ultimaker Cura.	44
3.6.1 Materiales de Impresión.	45

3.6.1.1 Ácido Poliláctico.	45
3.6.2 Impresora 3D.	47
3.6.3 Impresión del Prototipo Final.	48
3.6.4 Ensamblaje Final.	50
3.7 Pruebas de Campo.	50
3.8 Presupuesto.	51
4 Resultados.	53
4.1 Descripción del apartado.	53
4.2 Modelado Inicial.	53
4.2.1 Modelo de Funda.	53
4.2.2 Resultado del Escaneo 3D.	55
4.2.3 Pruebas y Validaciones de la Empuñadura.	55
4.3 Modelado Detallado.	57
4.3.1 Estudios y Pruebas del Brazo.	57
4.3.1.1 Coeficiente de seguridad.	57
4.3.1.2 Análisis de la Optimización Topológica.	58
4.3.1.3 Análisis del Diseño Generativo.	60
4.3.2 Selección de Modelos de Brazo para el Soporte.	61
4.4 Pruebas y Validaciones del Primer Prototipo.	62
4.5 Validación del Prototipo Final.	63
4.5.1 Resultados del Estudio FEM.	63
4.5.2 Pruebas del Prototipo Físico.	64
4.6 Resultado del Modelado CAD.	65
4.6.1 Renderizado.	65
4.6.2 Planimetría.	66
4.7 Pruebas de Campo.	73
4.8 Presupuesto y Competencia.	73
5 Conclusiones y líneas futuras.	75
5.1 Descripción del Apartado.	75

5.2 Conclusiones de los Objetivos Iniciales.....	75
5.2.1 Proceso General de Diseño en Ingeniería.	75
5.2.2 Diseño y Modelado 3D.	75
5.2.3 Ergonomía.....	75
5.2.4 Compatibilidad.	76
5.2.5 Fabricación Aditiva.	76
5.3 Objetivos Adicionales.	76
5.3.1 Escaneado 3D.	76
5.3.2 Diseño Generativo.	76
5.4 Líneas Futuras.	77
5.4.1 Estudio dinámico y no lineal.	77
5.4.2 Implementación con otros sets de RV.	77
6 Bibliografía.....	78
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas y Ambientales	80
Anexo II: Reflexiones Éticas y Morales.....	83
Anexo III: Modelo Digital Interactivo	85
Anexo IV: Manuales de Usuario	87

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2-1 Diferencias entre Realidad Aumentada, Virtual y Mixta [1].....	12
Figura 2-2 Visualización de la Realidad Aumentada y Mixta [4].....	13
Figura 2-3 The Teleyeglasses, la televisión portable de 1963 [5].....	14
Figura 2-4 Simulador de RV de última generación [7]	15
Figura 2-5 Simulador de cirugía médica para el adiestramiento de cirujanos [9].....	16
Figura 2-6 Simulador Victrix de RV para el adiestramientos de soldados [11].....	17
Figura 2-7 Set HTC Vive Pro con todos sus elementos [13]	18
Figura 2-8 Proceso General de Diseño de un Proyecto de Ingeniería.....	18
Figura 2-9 Conceptos asociados dentro del estudio previo para adoptar una solución.....	19
Figura 2-10 Modelo de programa de Diseño Asistido por Ordenador (CAD) [16]	20
Figura 2-11 Ejemplo de análisis FEM en un programa CAE [16]	21
Figura 2-12 Modelo de programa CAM [16]	22
Figura 2-13 Interfaz intuitiva que ofrece Autodesk Inventor a sus usuarios.....	23
Figura 2-14 Fabricación aditiva (derecha) e impresión 3D (izquierda) [19]	23
Figura 2-15 Impresión 3D como herramienta para sanar una fractura craneal [20]	24
Figura 2-16 Posibles errores que suceden durante la impresión 3D [22].....	25
Figura 2-17 Principio de funcionamiento del SLA [23].....	25
Figura 2-18 Mecanismo de impresión 3D mediante FDM [24].....	26
Figura 3-1 Fases del proyecto	27
Figura 3-2 <i>ProVolver</i> , producto de arma corta de la marca <i>ProTube VR</i>	28
Figura 3-3 Idealización del concepto previo al modelado	29
Figura 3-4 Primeros bocetos conceptuales del dispositivo	29
Figura 3-5 Mediciones tomadas a la empuñadura del mando	30
Figura 3-6 Funda del mando realizada por sollevación y vaciado	31
Figura 3-7 Molde de arcilla para la optimización de la ergonomía.....	31
Figura 3-8 Proceso de escaneado 3D del molde de arcilla	32
Figura 3-9 Primera alternativa para la empuñadura	33

Figura 3-10 Segunda alternativa para la empuñadura	33
Figura 3-11 Tercera alternativa para la empuñadura.....	34
Figura 3-12 Operaciones de conformado de la empuñadura.....	34
Figura 3-13 Modelo óptimo para la empuñadura del dispositivo de arma corta.....	35
Figura 3-14 Adaptación del mando a la empuñadura.....	35
Figura 3-15 Idealización del brazo para el soporte del actuador háptico	36
Figura 3-16 Proceso de creación de un estudio FEM en Autodesk Inventor	37
Figura 3-17 Configuración del entorno de simulación para realizar un estudio FEM	37
Figura 3-18 Resultados del estudio FEM en Autodesk Inventor	38
Figura 3-19 Proceso de optimización topológica	38
Figura 3-20 Generador de forma en Autodesk Inventor	39
Figura 3-21 Proceso de generación de forma mediante diseño generativo	39
Figura 3-22 Diseño final del brazo basado en el diseño generativo.....	40
Figura 3-23 Piezas modeladas para realizar el ensamblaje del actuador.....	40
Figura 3-24 Maqueta digital del actuador	41
Figura 3-25 Componentes del mecanismo de agarre del actuador.....	42
Figura 3-26 Visualización del funcionamiento del mecanismo de agarre del actuador.....	42
Figura 3-27 Prototipo inicial consolidado	43
Figura 3-28 Toma de medidas para idealizar el brazo mejorado	43
Figura 3-29 Modelado del brazo mejorado mediante diseño generativo	44
Figura 3-30 Sistema de anclaje del actuador en el prototipo final	44
Figura 3-31 Interfaz de Ultimaker Cura	45
Figura 3-32 Impresora 3D Creality Ender 3 V2.....	47
Figura 3-33 Primera impresión fallida del prototipo final	48
Figura 3-34 Segunda impresión fallida del prototipo final	48
Figura 3-35 Tercera impresión fallida del prototipo final.....	49
Figura 3-36 Cuarta impresión fallida del prototipo final	49
Figura 3-37 Impresión exitosa del prototipo final.....	49
Figura 3-38 Resultado final del ensamblaje del dispositivo de arma corta.....	50
Figura 3-39 Ejercicio de tiro simulado con el prototipo de arma corta.....	50

Figura 4-1 Intentos de impresión de la funda para el mando	54
Figura 4-2 Defectos superficiales debido a la impresión por adición de capas	54
Figura 4-3 Primera prueba del modelo de funda para el mando	54
Figura 4-4 Toma de medidas sobre el molde digital para adaptar la ergonomía	55
Figura 4-5 Proceso de impresión 3D del prototipo de la empuñadura	56
Figura 4-6 Prueba ergonomía e implementación con el mando	56
Figura 4-7 Proceso de mejora en la ergonomía de la empuñadura después de su prueba.....	57
Figura 4-8 Primer diseño del brazo del soporte sometido a un estudio FEM	59
Figura 4-9 Segundo diseño del brazo del soporte sometido a un estudio FEM	59
Figura 4-10 Tercer diseño del brazo del soporte sometido a un estudio FEM.....	59
Figura 4-11 Diseño final del brazo del soporte sometido a un estudio FEM.....	60
Figura 4-12 Modelo de diseño generativo sometido a estudio FEM	60
Figura 4-13 Comparación de los modelos de estudio topológico y diseño generativo	61
Figura 4-14 Proceso de impresión del prototipo inicial para su validación	62
Figura 4-15 Prueba de ergonomía del prototipo inicial.....	62
Figura 4-16 Sistema de agarre del dispositivo de respuesta háptica	63
Figura 4-17 Resultados obtenidos del estudio FEM del prototipo final.....	64
Figura 4-18 Modelo físico del prototipo final	64
Figura 4-19 Producto final del modelado CAD (sin renderizar).....	65
Figura 4-20 Renderizado de imágenes del prototipo final	66
Figura 4-21 Código QR de acceso al vídeo de demostración	73
Figura 4-22 Comparativa del modelo comercial con el modelo propio	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3-1 Características generales del filamento PLA	46
Tabla 3-2 Características específicas del filamento PLA.....	46
Tabla 3-3 Especificaciones técnicas de la impresora 3D Creality Ender 3 V2	47
Tabla 3-4 Costes desglosados de material.....	51
Tabla 3-5 Costes energéticos desglosados	52

1 Introducción.

1.1 Descripción del apartado.

En este apartado se exponen los precedentes y el contexto en el que se desarrolla este Trabajo Fin de Grado (TFG). Adicionalmente, se explica cuál ha sido la motivación que ha impulsado a su realización y qué objetivos se pretenden alcanzar. Por último, se resume la estructura global que tiene el trabajo.

1.2 Antecedentes.

A lo largo de la historia la Raza Humana ha experimentado un profundo desarrollo y avance en los mecanismos y técnicas de producción en una industria que no cesa de cambiar. Así, la historia puede resumir esta evolución en tres revoluciones industriales que han tenido lugar desde hace más de dos siglos y medio. Sin embargo, a estas se le ha de sumar una nueva, una revolución que las generaciones actuales están siendo testigos de su comienzo y de la que formarán parte.

La llamada Cuarta Revolución Industrial o Industria 4.0 se trata de una renovación de la industria y de los procesos de fabricación que cambia por completo los modelos anteriores. Su principio básico es el *todo está conectado* y está caracterizado por la integración de los siguientes elementos: robótica colaborativa, realidad extendida, inteligencia artificial, *Big Data*, el *IoT (Internet of Things)* y la impresión 3D.

Ente ellos, la realidad extendida será pilar fundamental para este Trabajo Fin de Grado. Está compuesta por la realidad aumentada, la virtual y la mixta. Se trata de una técnica de gran relevancia en infinidad de ámbitos como son la medicina o la educación, gracias a que ofrece una serie de ventajas que anteriormente eran prácticamente inalcanzables. De esta manera la realidad virtual posibilita la recreación de espacios simulados para el ensayo y formación de personal tanto en situaciones rutinarias como en situaciones límite, difícilmente recreables en la vida real. Un buen ejemplo sería poder reproducir una operación en un quirófano simulado, donde un residente en formación se viera en la situación de tener que tomar acción. Por otra parte, la realidad aumentada puede llegar a integrar en el mundo actual la entrega de datos e instrucciones a tiempo real para acelerar procesos y aportar seguridad a los usuarios.

Es por ello que esta tecnología puntera se trata de una industria millonaria, en la que miles de compradores están dispuestos a invertir con el fin de gozar de sus ventajas.

1.3 Motivación.

En esta línea, los cuerpos de Defensa y Seguridad del Estado son plenos beneficiarios de estas innovaciones. Su entrenamiento y adiestramiento constante requiere de gran esfuerzo tanto económico como de material para llevarse a cabo, incluso en ciertas ocasiones no se ha podido completar su entrenamiento debido a estas limitaciones. Sin embargo, hoy en día está naciendo una solución viable para este problema de la mano de la realidad aumentada. La capacidad de recrear simulaciones virtuales de escenarios y armas sincronizados entre ellos es cada día más idónea para ofrecer a los usuarios una experiencia próxima a la realidad con fines formativos y educativos, abaratando también los costes.

Como resultado de lo expuesto anteriormente, este proyecto se encaja en el actual interés de las FAS para fomentar el desarrollo de simuladores virtuales capaces de adiestrar a las tropas en el combate real. Se requerirá de unos simuladores que permitan a sus usuarios una inmersión total en el escenario. Con esta finalidad, los dispositivos de realidad extendida han de alcanzar capacidades visuales, sonoras, hápticas o, incluso, olfativas. Como resultado, es motivación directa de este trabajo la creación de dispositivos con capacidad de realidad extendida que mejoren a los simuladores actuales, en concreto el desarrollo de un arma corta con respuesta háptica.

1.4 Objetivos.

La finalidad principal de este Trabajo Fin de Grado es la creación de un dispositivo que consiga aportar al usuario la sensación de sostener y disparar un arma real durante una simulación. Su experiencia ha de ser confortable a la vez que inmersiva. En esta línea, el dispositivo tiene que combinar un diseño ergonómico con la capacidad de respuesta háptica que logre recrear el retroceso real de un arma al disparar, así como la eficiencia en su producción.

Es por ello que este trabajo pretende alcanzar los siguientes objetivos:

- Proceso general de diseño en ingeniería. El desarrollo del Trabajo Fin de Grado debe obedecer a las etapas generales del proceso de diseño en cualquier proyecto de ingeniería. Desde las etapas iniciales hasta las finales, el desarrollo debe seguir una evolución secuencial y coherente facilitando su planificación y seguimiento.
- Diseño y modelado 3D. Haciendo uso de las herramientas modernas de diseño e ingeniería asistidos por ordenador, el trabajo debe lograr la creación del modelo digital tridimensional del prototipo de arma corta. Asimismo, es requerido la obtención de planimetría y la generación de archivos que permitan su futura fabricación.
- Ergonomía. A través de un estudio profundo, el proceso de diseño ha de implementar perfectamente el concepto de ergonomía. Su objetivo es optimizar el diseño del prototipo a los usuarios correspondientes para lograr una comodidad universal durante su uso.
- Compatibilidad. El prototipo de arma corta producto de este trabajo debe tener la capacidad de implementar los elementos necesarios para funcionar de forma correcta y simultánea sin interrumpirse entre sí.
- Fabricación aditiva. El prototipo debe ser materializado mediante impresión 3D haciendo uso de softwares y herramientas de ingeniería asistida por ordenador.

1.5 Estructura del trabajo.

La estructura del trabajo se esquematiza de la siguiente manera:

- 1) Introducción. En el apartado se exponen los antecedentes y el contexto en el que se desarrolla el trabajo. También contiene la motivación y los objetivos que han impulsado a su realización.
- 2) Estado del Arte. Aquí se detallan en profundidad los ámbitos de aplicación y las tecnologías que abarca el trabajo.
- 3) Desarrollo del TFG. En este apartado se describe el proceso paso por paso de elaboración del proyecto desde su inicio hasta su fin.
- 4) Resultados. Aquí se exponen y analizan en profundidad todos los resultados y decisiones tomadas al respecto que se han sacado de cada paso en consonancia con el desarrollo del trabajo.
- 5) Conclusiones y líneas futuras. Se realiza un resumen global de los resultados concluyentes del proyecto y se analizan los objetivos alcanzados en base a los establecidos inicialmente junto con aquellos adicionales, que también hayan sido logrados. Adicionalmente, se comentan futuras líneas de investigación y desarrollo para la ampliación de este TFG.
- 6) Bibliografía. Se listan las diferentes fuentes empleadas para el desarrollo de este trabajo.
- 7) Anexos. Se incluye material complementario al proyecto. En primer lugar, se analizan las implicaciones sociales, ambientales y económicas y, posteriormente, se realiza una reflexión ética y moral del asunto. También, se adjuntan los manuales de usuario de los dispositivos implicados.

2 ESTADO DEL ARTE.

2.1 Descripción del apartado.

En este apartado se realiza una contextualización detenida del ámbito de aplicación y de las herramientas involucradas en este Trabajo Fin de Grado para destacar los conceptos más importantes.

De esta forma, se desarrolla profundamente cuatro pilares fundamentales para entender el desarrollo de este trabajo: inicialmente, la realidad extendida, comentando su historia y aplicaciones; el proceso general de diseño en un proyecto de ingeniería con todas las etapas implicadas; las herramientas y softwares de diseño asistido por ordenador; y, finalmente, la fabricación aditiva y los tipos de impresión 3D.

2.2 Realidad extendida y sus aplicaciones.

El término de realidad extendida (RE) ha sido definido recientemente de la mano del profundo avance de las tecnologías. Estas han conseguido alcanzar límites prácticamente inimaginables por el hombre años atrás. En esta línea, los datos generados por medios digitales y la propia realidad parecen difuminar sus fronteras y mezclar conceptos. Ya no son mundos independientes. Este proceso de inmersión está muy presente hoy en día y está revolucionando completamente como se concibe el propio espacio físico. Es así que se ha llegado al término de realidad extendida. Es destacable que no se trata de una nueva tecnología, sino de un conjunto de ellas. Es aquella que engloba la realidad aumentada (RA), la realidad virtual (RV) y la realidad mixta (RM).

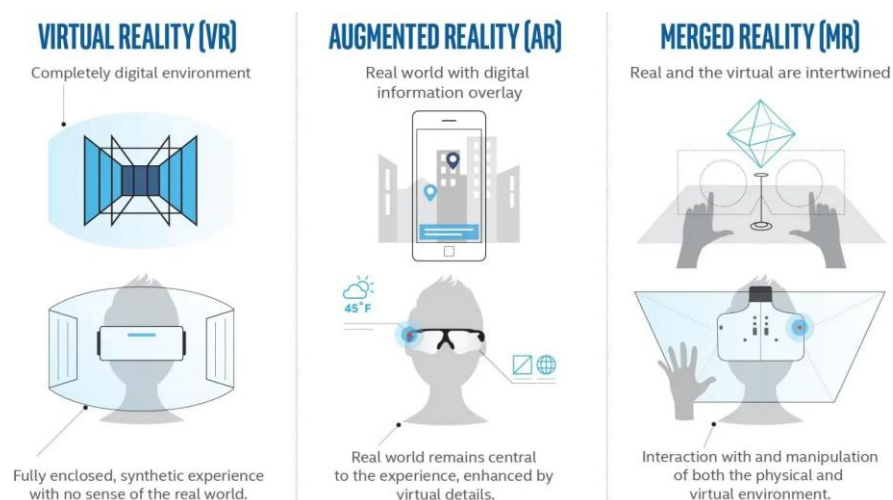


Figura 2-1 Diferencias entre Realidad Aumentada, Virtual y Mixta [1]

La introducción del término de realidad extendida es una herramienta que permite definir, de forma amplia, el enorme potencial de la tecnología con el objetivo de combinar de la información del entorno físico con la información generada de manera artificial por medio de computadoras. Esta fusión enmarca desde la propia percepción del hombre de la realidad hasta la infinita imaginación cultural y creatividad humana [2]. Para su entendimiento, es importante explicar las tres ramas que conforman la realidad extendida y tener claras sus diferencias (Figura 2-1).

Por un lado, la realidad aumentada se basa fundamentalmente en la visión de la propia realidad sobre la que se aplican capas de datos e información a tiempo real de origen digital sobre la misma, es decir, la realidad aumentada permite ver el mundo físico de manera enriquecida. Existen varios tipos de realidad aumentada según el mecanismo que utilicen: la basada en patrones o marcas, la basada en el reconocimiento de imágenes y la basada en la geolocalización. Esta tecnología ofrece una infinidad de ventajas y los vendedores tienen puesto sus intereses sobre ella para dar un valor añadido a sus compradores. Puede aplicarse a una gran variedad de ámbitos. Algunos de los más importantes son el campo del ocio, con videojuegos que se extienden por la realidad; el comercio electrónico y la publicidad virtual, como la campaña publicitaria millonaria que lanzó Ray Ban que permitía a los usuarios a probarse virtualmente modelos de gafas sobre ellos mismos; la educación y seguridad, pudiendo plasmar datos actualizados al momento de libros, precauciones o noticias; e incluso también en el prototipado y diseño 3D [3].

Por otro lado, la realidad virtual es una tecnología completamente inmersiva. El mundo real queda totalmente remplazado por una realidad 100% simulada de forma digital. El principio en el que se basa la realidad virtual es la idea de que una computadora puede producir un entorno gráfico 3D de forma numérica. Esta realidad trata de extenderse por todos los sentidos para ofrecer a sus usuarios una experiencia muy similar a la real. De esta forma, se utilizan dispositivos visuales, hápticos, sonoros y otros más para reforzar la simulación. Las simulaciones y entornos de realidad virtual que se recrean van desde situaciones cotidianas como puede ser un hogar o la simple conducción coche, hasta situaciones de ciencia ficción en entornos fantásticos. Cabe destacar que la realidad virtual es un pilar fundamental para el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado y, más adelante, se hablará con detalle de su historia y de sus aplicaciones.

Por último, la realidad mixta es tecnología muy similar a la realidad aumentada pero que también combina rasgos de la realidad virtual. Así, la realidad mixta es capaz de ofrecer una visión del mundo real complementada con elementos de entornos virtuales. Estos objetos virtuales coexisten con la realidad física pudiendo incluso interactuar entre las dos realidades. Las experiencias inmersivas y las capacidades interactivas de la realidad mixta desembocan en una infinidad de aplicaciones, como son el campo de la educación, medicina, arquitectura, ocio o la colaboración remota.



Figura 2-2 Visualización de la Realidad Aumentada y Mixta [4]

2.2.1 Historia de los simuladores virtuales.

La evolución de los simuladores a lo largo de los años se trata de una historia destacable marcada por el continuo cambio y adaptación a las necesidades del presente que vivían. Su punto de inicio lo toman los primeros simuladores mecánicos de vuelo en la década de los veinte, que ofrecían una experiencia pobre pero útil en el adiestramiento de los pilotos militares. En la década de los cincuenta, el avance analógico se vio reflejado en los simuladores, que empezaron a utilizar elementos electrónicos y también tenían propósitos militares. Es en este momento cuando Morton Heilig desarrolla una tecnología inmersiva basada en las técnicas cinematográficas. Su invento fue sorprendentemente avanzado para su época y sus usuarios lo describieron como impactante. En 1963, Hugo Gernsback lanza al mundo *The Teleyeglasses*, un dispositivo similar a una televisión que se abraza en la cabeza a modo de gafas como se aprecia en la Figura 2-3. Aunque este dispositivo no respondiera a los movimientos en la visión, si fue inspiración y estímulo para el desarrollo de la tecnología VR. Pocos años más tarde, Ivan Sutherland crea en 1968 un casco para la cabeza capaz de mostrar gráficos en pantalla que si respondían a los movimientos de cabeza. Este dispositivo binocular de visión 3D fue denominado *The Sword of Damocles* y es considerado el precursor real de las gafas de realidad virtual tal y como las conocemos actualmente [5].

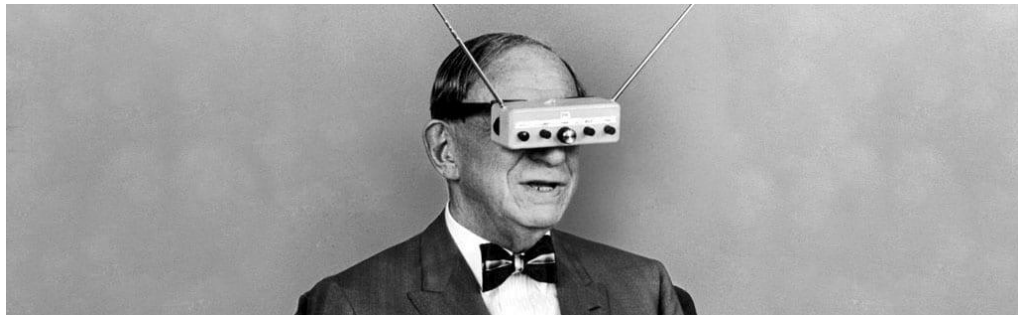


Figura 2-3 The Teleyeglasses, la televisión portable de 1963 [5]

La calidad de los simuladores sufrió un salto significativo en la década de 1980 debido al enlace de la realidad virtual con las computadoras personales y sus gráficos. Jaron Lanier comercializa en 1984 su gran innovación, un guante que trasladaba los movimientos de quien lo llevara al mundo virtual. Las interacciones reales de la mano eran representadas en perfecta sincronía con su representación digital. La sensación de estar dentro de la propia computadora era cada vez más real. En 1986, surge una nueva modernización que lleva a la realidad virtual a otro nivel. Se trata de un dispositivo de respuesta háptica. Implementando empuñaduras e imanes monitorizados se consiguió simular los esfuerzos sensoriales a la hora de interactuar con objetos virtuales. Será en 1987 cuando se acuña por primera vez el término de realidad virtual [6].

La Edad de Oro de los videojuegos llegará en los años noventa y, con ello, los simuladores de realidad virtual también se verían impulsados. Los dispositivos de visión eran ya notablemente avanzados, con una gran capacidad de reproducir los cambios del punto de vista real en su representación digital. Nintendo vio la oportunidad de lanzar al mercado su propio set de realidad virtual. Sega también se sumará a esta tendencia. Además, en esta década, la empresa de investigación de Jaron Lanier crea un modelo de cuerpo completo de su versión del guante virtual. Con él, los usuarios podían interactuar con el entorno virtual de manera más completa, incluso andando, gesticulando y hablando con otros usuarios interconectados [6].

Poco a poco se van desarrollando las tecnologías de realidad extendida en los primeros años del siglo XXI hasta la gran aparición de *Oculus* en 2012. Este set de visión de volumetría 3D con capacidad 360° supondrá, poco después, el comienzo de la realidad virtual moderna como la conocemos hoy en día. Uno de los modelos más avanzados actualmente es el *HTC Vive Pro*, sistema que emplearemos para

este trabajo. Adicionalmente, los simuladores de RV son cada vez más innovadores y tratan de maximizar la inmersión del usuario con dispositivos que permitan una mayor interacción con la simulación como se puede apreciar en la Figura 2-4.



Figura 2-4 Simulador de RV de última generación [7]

2.2.2 Tipos de Sistemas de Realidad Virtual.

Existen en la actualidad una gran variedad de simuladores de realidad virtual. Según diferentes criterios de clasificación se pueden encontrar unos tipos de sistemas de simulación u otros. Sin embargo, hay dos clasificaciones especialmente importantes: dependiendo el tipo de Interfaz/Hardware empleado o según sea el propósito del simulador.

Entre los sistemas de realidad virtual en función de su Interfaz/Hardware empleado para la visualización interactiva se encuentran:

- Sistemas Desktop. Son la mayoría de videojuegos para consola u ordenador que encontramos en los hogares para ocio. En estos, el usuario se ve inmerso en el supuesto escenario al presenciar una vista en primera persona. El entorno es presentado digitalmente en 2D o 3D a través de un monitor, gafas de RV o proyector.
- RV en Segunda Persona. Se trata generalmente de videojuegos también, pero en estos la inmersión es menor que en los anteriores. El jugador es consciente de estar en el mundo virtual al ver al propio personaje interactuando en este desde una vista exterior.
- Sistemas de Telepresencia. Están diseñados para proporcionar la sensación de estar presente en un lugar diferente de donde se está físicamente. Sus hardware están diseñados para visualización, interacción e incluso la manipulación de objetos en un lugar remoto. Esta experiencia se denomina Realidad Mezclada. Mediante el uso de cámaras, robótica avanzada y conexiones de alta velocidad, estos sistemas tienen potenciales aplicaciones en campos como la medicina, asistencia técnica remota o la colaboración en equipos distribuidos.
- Sistemas Inmersivos de Realidad Virtual. Sumergen plenamente a los usuarios en el entorno simulado. Para ello hacen uso de hardware especializados y dispositivos complementarios que aportan realismo y transportan al usuario a una realidad tridimensional generada digitalmente. Un dispositivo de estas características es por ejemplo un controlador de mano que cuente con sensores de posición que favorezcan la interacción del usuario con el entorno virtual [8].

En cuanto a los distintos simuladores de realidad virtual en función de su aplicación o propósito para sus usuarios destacan principalmente los siguientes:

- Simulador de vuelo o conducción. El adiestramiento de pilotos y conductores en plataformas como vehículos terrestres, aviones o helicópteros es una de las aplicaciones más reseñables de la realidad virtual. Esta metodología de enseñanza es hoy en día un refuerzo imprescindible para los estudiantes a la hora de familiarizarse y ganar destreza en el pilotaje o la conducción específica de un vehículo. Además de ser un sistema completamente eficaz y fiable, también es un modelo de enseñanza económico y con riesgos mínimos de accidente. A pesar de que tienen limitaciones en cuanto al realismo (como la representación de las aceleraciones que experimentan los pilotos), sí que estos simuladores cuentan con plataformas de movimiento y dispositivos de visualización que pueden recrear la sensación de maniobras reales.
- Simuladores de cirugía médica. La realidad virtual ha supuesto una profunda revolución en el mundo de la medicina y una mejora considerable de las condiciones de los pacientes y en su calidad de vida. Aunque la realidad virtual ya se emplea para la realización de autopsias virtuales o en el tratamiento de fobias entre otros, su mayor aplicación se ve reflejada en la intervención quirúrgica. Esta tecnología ha conseguido desarrollar simuladores que permiten repetir una y otra vez una operación quirúrgica en un entorno simulado (Figura 2-5) para perfeccionar el proceso antes de llevarlo a cabo, reduciendo al mínimo los riesgos. Los casos quirúrgicos de éxito derivados de los métodos de realidad virtual se multiplican día a día a nivel mundial [8].



Figura 2-5 Simulador de cirugía médica para el adiestramiento de cirujanos [9]

- RV en el entrenamiento táctico de soldados. Actualmente, los ejércitos de las diferentes naciones tienen puesto su interés en la compra y utilización de software especializados y montajes completos de realidad virtual para el adiestramiento de sus soldados. Países como España y Estados Unidos ya ponen en práctica este modelo de entrenamiento de sus tropas en entornos virtuales que simulan operaciones reales terrestres, aéreas y marinas. El objetivo de estos simuladores va más allá de la preparación para el combate, también instruyen en la toma de decisiones y en el desarrollo de operaciones. Al igual que los anteriores simuladores, su mayor ventaja es el abaratar costes a largo plazo (a pesar de su inversión inicial) y el reducir riesgos si se entrenara de manera real. Su tecnología destaca por representar un escenario digital combinando elementos 2D y 3D que evolucionan durante la simulación, y por implementar características de la Inteligencia Artificial [10]. El Ejército Español cuenta ya con simuladores de estas características como es el Victrix, que se muestra en la Figura 2-6.



Figura 2-6 Simulador Victrix de RV para el adiestramientos de soldados [11]

2.2.3 HTC Vive Pro.

Actualmente existe en el mercado una gran oferta de sistemas de inmersión en realidad virtual. Sin embargo, la creación del fabricante de teléfonos inteligentes taiwanés *HTC* es uno de los más destacables por sus características competitivas a día de hoy. Se trata del set de gafas de realidad virtual es el *HTC Vive*, lanzado el 5 de abril del 2016 y galardonado con un gran número de premios. Partiendo de su exitoso comienzo, la empresa *HTC* lanzó años después, el 5 de abril de 2018, la versión *Vive Pro*, que mejora considerablemente las especificaciones técnicas del modelo básico. Es importante reseñar que es uno de los dispositivos utilizados para la investigación y desarrollo en los laboratorios de realidad virtual del Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval Militar (CUD-ENM) Marín. Es por ello que este Trabajo Fin de Grado centra su esfuerzo en lograr la compatibilidad de un dispositivo de arma corta con el set *HTC Vive Pro*.

En cuanto a las especificaciones técnicas del producto de *HTC*, el set inmersivo de realidad virtual está constituido por una serie de elementos. En primer lugar, las gafas de RV, que integran acelerómetro y sensores de posicionamiento, además de un sistema de audio envolvente. Cuentan con una gran resolución, 2880 x 1600 píxeles, y una tasa de refresco de 90 Hz. Pesan 555 gramos y su diseño es ergonómico para ofrecer al usuario una experiencia cómoda. Adicionalmente, el set cuenta con dos mandos inalámbricos geolocalizados, que rastrean a la perfección su movimiento, y con dos sensores infrarrojos fijos para el posicionamiento de mandos y gafas. El área de juego es el alcance de los sensores infrarrojos. Se trata de un área de 5 x 5 m o 10 x 10 m si se usaran 4 sensores. Fuera del área de juego, la detección de movimiento falla. El *Vive Pro* usa el software *Steam VR* y debe estar permanentemente conectado a un ordenador con capacidad de realidad virtual que cumpla las especificaciones mínimas para la compatibilidad con las gafas y mandos. El ordenador al que se conecte debe tener al menos 4 GB de RAM [12].

En cuanto a su uso, la aplicación más extendida es el ocio. Esta herramienta se utiliza popularmente entre los aficionados de los videojuegos para sumergirse en la realidad virtual y vivir experiencias de juego evolucionadas. El set permite a sus usuarios gozar de en seguimiento preciso de movimiento y de la alta resolución de sus gráficos. Sin embargo, aparte del ocio, también puede emplearse para el entrenamiento y adiestramiento de profesionales. Es por ello que tiene potenciales aplicaciones en el ámbito de defensa.

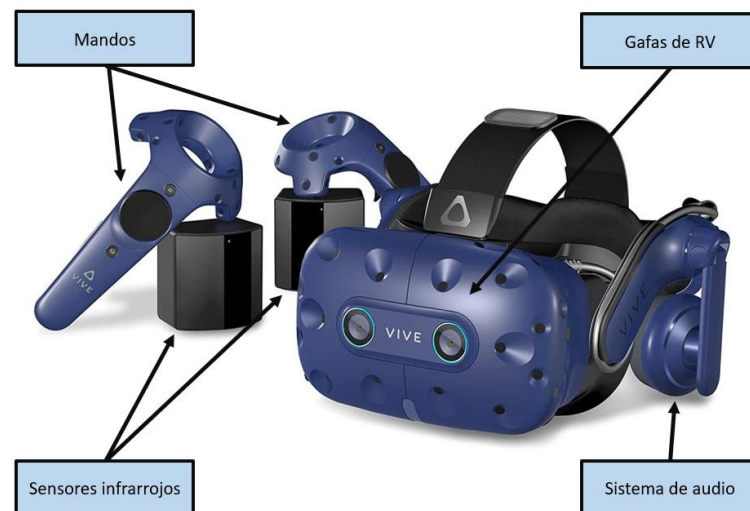


Figura 2-7 Set HTC Vive Pro con todos sus elementos [13]

2.3 Proceso General de Diseño de un Proyecto de Ingeniería.

El proceso general de diseño en ingeniería se trata de un modelo sistemático que permite a ingenieros y diseñadores desarrollar soluciones a problemas y generar nuevos objetos, ensamblajes o sistemas. Aunque el proceso pueda tener diferentes matices dependiendo de la disciplina o especialidad del proyecto, el proceso general sigue un esquema básico común para la mayoría de proyectos de ingeniería. Este proceso es el que se puede apreciar en la Figura 2-8. Dentro de este proceso se encajan las nuevas tecnologías de diseño, ingeniería y fabricación asistida por ordenador, que han supuesto toda una revolución en el sistema de producción industrial moderno. Estas nuevas herramientas han facilitado enormemente a los profesionales llevar a cabo sus labores de diseño y prototipado.

A pesar de la introducción de estas nuevas tecnologías, el proceso general de diseño sigue conservando su esquema fundamental. Este denso y extenso proceso abarca desde la primera concepción de la idea hasta su fabricación e implementación, y está marcado por una secuencia de etapas vitales. En la Figura 2-8 se muestra de manera esquematizada el proceso completo de diseño de inicio a fin y, a continuación, se desarrollan detenidamente cada una de sus etapas.

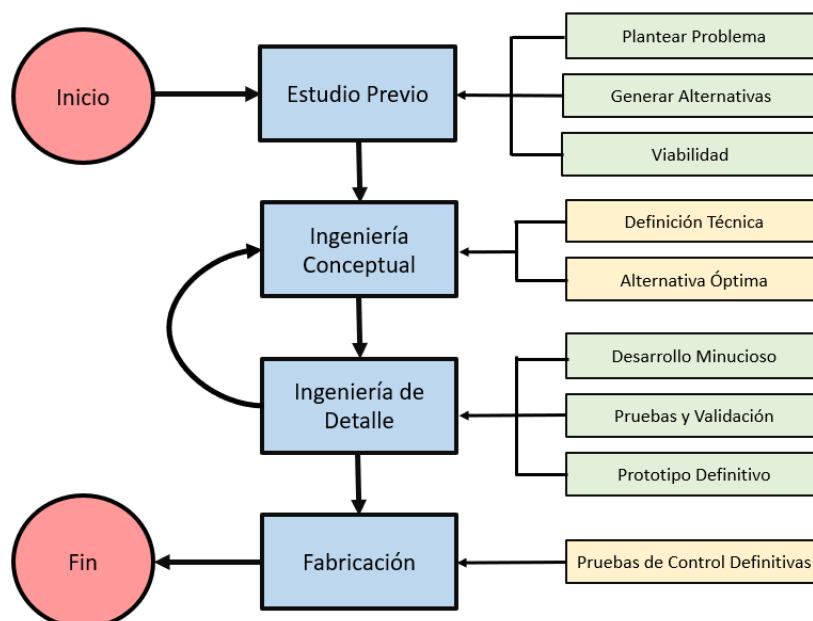


Figura 2-8 Proceso General de Diseño de un Proyecto de Ingeniería

2.3.1 Estudio Previo.

Se trata de un estudio concienciado de la viabilidad del propio proyecto, que es previo a su definición técnica. La idea es recoger el conjunto de soluciones de utilidad para resolver el problema que plantea el proyecto, este concepto se esquematiza de forma generalizada en la Figura 2-9. Los primeros pasos son el análisis de necesidades, determinar que requisitos que se deben satisfacer, y el análisis de ilimitaciones, para establecer los alcances del proyecto. A continuación, es de definir el problema de forma amplia y precisa. Dentro de esta evaluación, es importante enunciar las metas a alcanzar, los recursos disponibles y, con ello, estimar la viabilidad de llevar a cabo la idea. Por último, se ha de generar alternativas convenientes y tomar la decisión de si continuar o no a la siguiente etapa del proceso de diseñado [14].

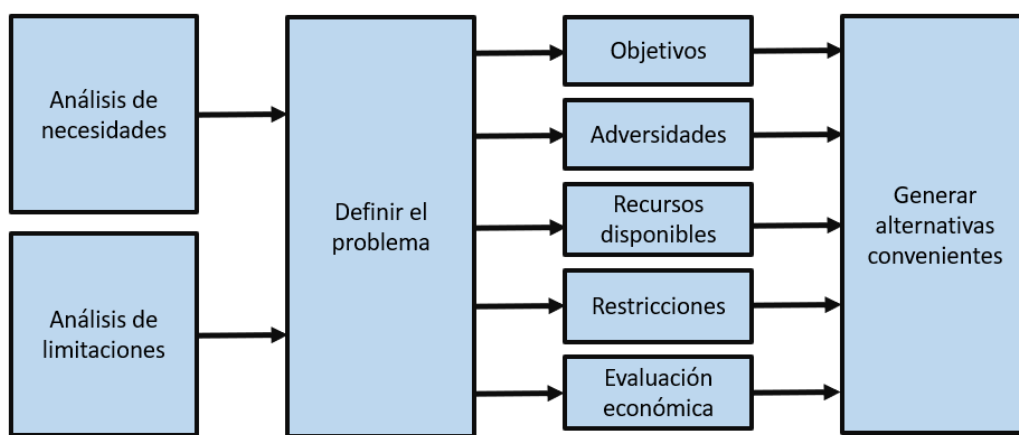


Figura 2-9 Conceptos asociados dentro del estudio previo para adoptar una solución

2.3.2 Ingeniería Conceptual.

La ingeniería conceptual es el proyecto preliminar, también conocido como anteproyecto. La idea fundamental de esta etapa es la definición del proyecto desde un punto de vista técnico. Se recoge toda la información analizada en el estudio previo con la finalidad de analizar las diferentes alternativas propuestas y, entre ellas, escoger la solución más idónea. Para ello, cada una de las alternativas es sometida a diversos análisis en esta fase. Los estudios que se realizan en el anteproyecto son:

- Análisis de compatibilidad.
- Análisis de sensibilidad.
- Análisis de Estabilidad.
- Optimización.
- Pronóstico de funcionamiento.
- Simplificación.
- Precisión.

Como resultado del anteproyecto, se ha de dar una argumentación justificada de la solución finalmente adoptada después de los estudios. Aquí son desarrollados los primeros bocetos y planos preliminares del proyecto. La elección de materiales y las dimensiones de las partes son otras decisiones que también son planteadas en esta fase. Adicionalmente, se ha de elaborar un estudio en profundidad de los costos y una planificación de las siguientes etapas. Por último, se vuelve a plantear la decisión de abandonar o continuar a la siguiente etapa [14].

2.3.3 Ingeniería de Detalle.

En el momento en el que se toma la decisión de continuar desde la etapa de la ingeniería conceptual se da paso a la ingeniería de detalle. Es en este punto donde se le da al proyecto un enfoque mucho más minucioso y especializado. Anteriormente, el proyecto se planeó en vistas al concepto general, todos sus componentes y subsistemas se estudiaron como un ensamblaje para satisfacer el propósito general. En la ingeniería de detalle se persigue dar solución a los requisitos y problemas más específicos mediante un profundo análisis pieza por pieza y parte por parte. En esta fase ya se elaboran los planos desarrollados de los componentes del sistema, que serán los pilares del proyecto detallado, y también se fijan los parámetros convenientes para su posterior mecanizado y fabricación. Finalmente, se llevan a cabo modelos a escala, como son maquetas o prototipos desarrollados, que son sometidos a las últimas simulaciones y pruebas. Con todo ello, se hace un desglose del presupuesto y se decide si proceder a la fase de fabricación [14].

2.3.4 Fabricación.

Una vez finalizados todos los estudios por partes de forma exitosa y elaborada la documentación necesaria, se pasa a la última fase del proceso general de diseño. La etapa de fabricación es donde se materializa todo el proceso de diseño explicado. Dentro de esta fase, destaca especialmente la fabricación aditiva, la cual se desarrolla más adelante en el Apartado 2.6.

2.4 Diseño, Ingeniería y Fabricación Asistida por Ordenador.

2.4.1 CAD.

El término de CAD (*Computer Aided Desing*) hace referencia a sistema de Diseño Asistido por Ordenador. Se basa en la aplicación de software y plataformas informáticas para agilizar el proceso de diseño y optimizar el desarrollo de productos. Y es por ello que, desde su aparición en la década de los noventa, el diseño asistido por ordenador ha supuesto un impacto radical en el sector industrial y sistema productivo. Gracias a esta tecnología, los diseñadores e ingenieros pueden explotar en mayor medida su trabajo, pudiendo proyectar, modificar y generar representaciones digitales de productos con gran precisión y rapidez. Estos productos pueden ser bidimensionales o tridimensionales y son expuestos con alta resolución. Los sistemas CAD también han favorecido el desarrollo de diseño mucho más innovadores que otros elaborados mediante modelos de diseño convencionales [15].

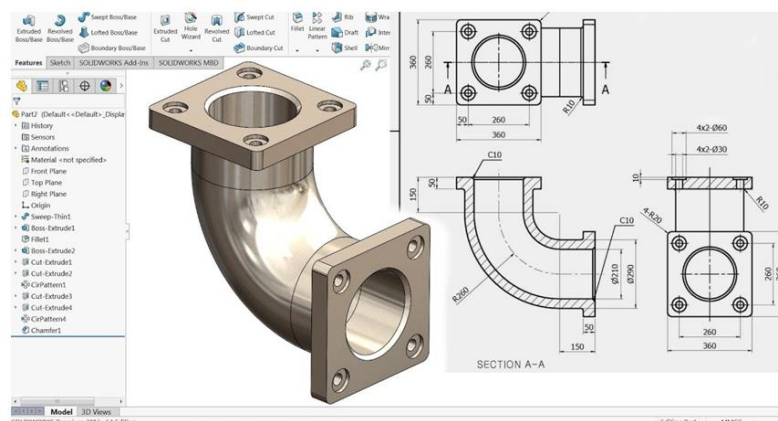


Figura 2-10 Modelo de programa de Diseño Asistido por Ordenador (CAD) [16]

El software CAD proporciona una serie de herramientas para lograr su cometido. Algunas de las herramientas que deben poseer estos programas son:

- Herramientas para el dibujo y definición de geometría.
- Cálculo de propiedades y simulación de comportamiento en entornos virtuales.
- Adición de modificaciones y restricciones de objetos.
- Generación de documentación técnica.

Los programas más comerciales de CAD a día de hoy son: Autocad, Pro/Engineer, SolidWorks, Solid Edge, Catia, Turbo CAD y, el más relevante para el desarrollo de este trabajo, Autodesk Inventor, que se explicará a continuación [17].

2.4.2 CAE.

Las herramientas CAE (*Computer Aided Engineering*) son otra extensión para la ayuda de modelado de productos a través de programas asistidos por ordenador. El término CAE se define en castellano como Ingeniería Asistida por Ordenador. Mediante la aplicación de metodologías matemáticas y computacionales, los programas CAE facilitan el proceso de análisis y estudio de comportamiento de un objeto en un entorno simulado. Las herramientas que deben integrar son:

- Métodos de Elementos Finitos (FEM).
- Mecánica de fluidos por computación.
- Optimización y diseño generativo.
- Sistemas multicuerpo.

Estas herramientas están destinadas para predecir y asimilar el comportamiento de sistemas mecánicos complejos, pudiéndose hacer un análisis desglosado por piezas o del ensamblaje completo. Existe una gran variedad de análisis que se pueden aplicar en la ingeniería moderna. Para poder realizarlos se ha de partir de unas condiciones iniciales que se imponen mediante la interfaz de los programas CAE, como es la aplicación de fuerzas, restricciones, presiones, temperaturas e interacciones entre componentes [15]. Un ejemplo de los estudios descritos es el que se observa en la Figura 2-11.

2.4.2.1 FEM

El FEM o Método de Elementos Finitos, en castellano, es un recurso numérico vital para la resolución de problemas físicos y matemáticos complejos basándose en ecuaciones diferenciales. Estas ecuaciones tienen una gran capacidad para definir fenómenos físicos y, como consecuencia, son empleadas para el análisis estructural, térmico, electromagnético, de fluidos, etc. Su funcionamiento se basa en la subdivisión de un objeto en numerosas porciones geométricas pequeñas y sencillas. Estos elementos finitos están conectados unos a otros a través de nodos, y su conjunto es denominado mallado. El tamaño de este mallado definirá la precisión del resultado matemático de las ecuaciones diferenciales. Así, FEM establece unos análisis de comportamiento detallados y flexibles, posibilitando su aplicación en productos más complejos e innovadores [18].

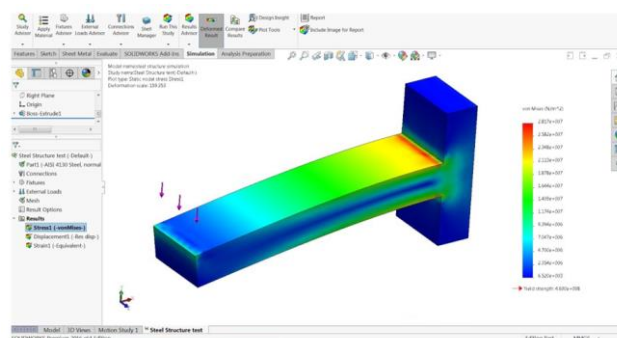


Figura 2-11 Ejemplo de análisis FEM en un programa CAE [16]

2.4.3 CAM.

El CAM (*Computer Aided Manufacturing*) es otro útil más en el proceso general de prototipado en un proyecto de ingeniería. Se define como como Fabricación Asistida por Ordenador, es decir, consiste en el uso de programas de computación para la gestión de las operaciones de fabricación. Mediante la aplicación de sistemas informáticos y software especializados, los programas CAM son capaces de administrar el control de máquinas, herramientas, robótica y otras tecnologías involucradas en el proceso de manufactura. Como resultado final, este sistema agiliza notablemente la producción y asegura, además, una mayor precisión y la reducción de errores. Este trabajo se realiza de manera sincronizada con maquinaria CNC (*Computer Numerical Control*). Las instrucciones de fabricación son codificadas en el proceso de diseño y son, más tarde, entregadas a maquinas CNC para que las lleven a cabo [15].

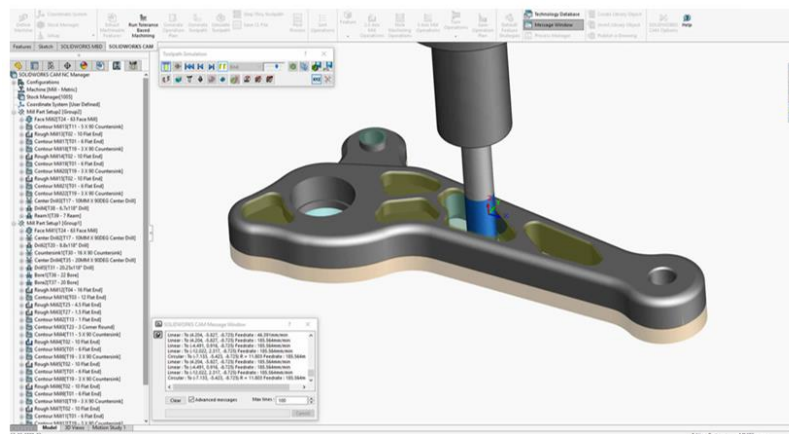


Figura 2-12 Modelo de programa CAM [16]

Los sistemas CAM tienen también aplicación para otras operaciones industriales, como por ejemplo en el transporte, almacenaje, planeamiento y organización. Los software más comerciales de CAM actualmente son: Unigraphics CAM, Prolight lathe, Benchman, Hypermill, HyperWork y EdgeCAM Solid Machinist [17].

2.5 Autodesk Inventor.

Actualmente, Autodesk Inventor es uno de los softwares de diseño asistido por ordenador más utilizados a nivel mundial. Desde su lanzamiento en 1999, este programa ha sido ampliamente empleado en el mundo de la ingeniería industrial con el fin de acelerar y potenciar el proceso de diseño de objetos. A lo largo de los años, Autodesk Inventor ha experimentado un gran desarrollo, aumentando la calidad de su interfaz, el número de operaciones disponibles para realizar y la precisión de sus acciones. Su última versión es la de 2024, que será la empleada para el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.

Implementa todas las herramientas de diseño expuestas anteriormente en el Apartado 0 y cumple con las suficientes especificaciones para que ingenieros y diseñadores puedan llevar a cabo del ejercicio de su profesión. A través de una interfaz sencilla e intuitiva, sus usuarios pueden ser capaces de realizar modelos digitales complejos y precisos en 3D como se puede apreciar en la Figura 2-13. Autodesk Inventor tiene numerosas ventajas, entre las cuales destacan:

- Optimización de tiempos en el proceso de diseño.
- Creación de productos innovadores.
- Automatización de los procesos.
- Herramientas CAE.
- Diseño generativo.

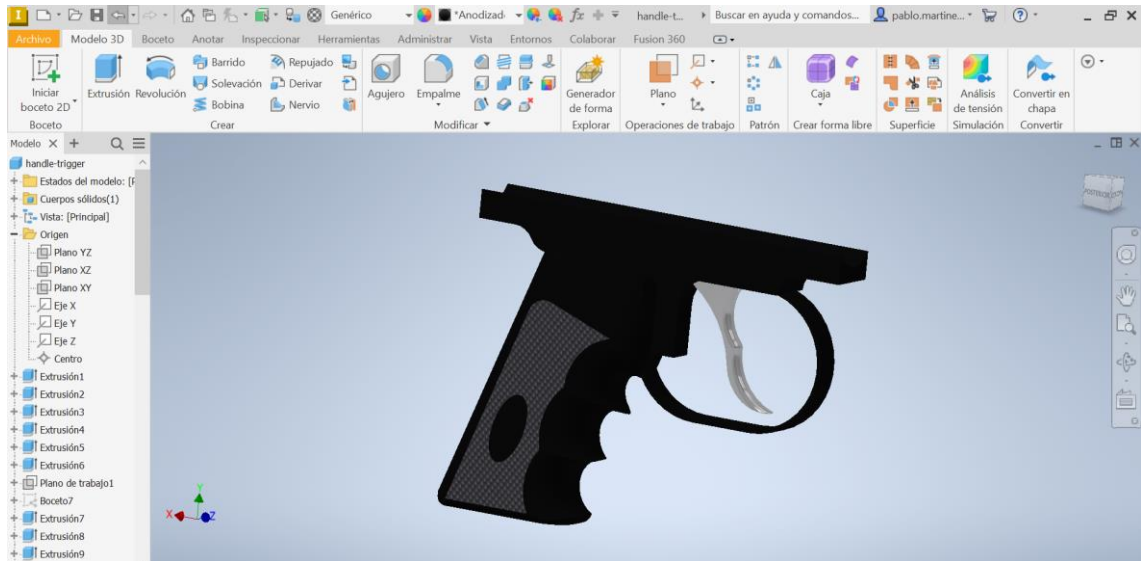


Figura 2-13 Interfaz intuitiva que ofrece Autodesk Inventor a sus usuarios

2.6 Fabricación Aditiva e Impresión 3D.

La fabricación aditiva, o su término en inglés *Additive Manufacturing* (AM), puede ser descrito como el conjunto de tecnologías y procesos de fabricación destinados a la producción de objetos mediante la deposición de material capa por capa. Generalmente, este término se utiliza como sinónimo de la impresión 3D. Si bien es cierto que ambas ideas están muy relacionadas, lo cierto es que tienen pequeños matices que los diferencian. Inicialmente, la fabricación aditiva se trata de un concepto muy amplio, en el cual se integran, entre otras, las tecnologías de impresión 3D. De esta manera, la impresión 3D es un tipo de fabricación aditiva que se basa en el mismo modelo de fabricación por capas. Generalmente, se deriva el término de impresión 3D a ámbitos más concretos e, incluso, caseros debido a las cantidades más limitadas de producción. Por otro lado, la fabricación aditiva se aplica más en el ámbito de la empresa, pues su capacidad de producción es superior a la de la impresión 3D.



Figura 2-14 Fabricación aditiva (derecha) e impresión 3D (izquierda) [19]

La impresión 3D permite fabricar piezas y objetos tridimensionales de manera rápida desde un diseño digital. Desde su aparición en la década de 1980 como modelo de prototipado rápido, esta tecnología ha supuesto toda una innovación en el sector de la producción. De hecho, se trata de una de las piezas claves e imprescindibles de la actual Cuarta Revolución Industrial.

Desde hace ya unos años empezaron a aparecer las denominadas impresoras 3D, que rápidamente inundaron las empresas e, incluso, muchos domicilios. Estas permiten obtener objetos en tres dimensiones a partir de diversos materiales plásticos por cantidades de dinero relativamente asequibles.

2.6.1 Aplicaciones de la Impresión 3D.

Debido a su precio no muy elevado, su tamaño compacto y su facilidad de fabricación de piezas, las impresoras 3D han supuesto toda una revolución en muchos aspectos dentro del ámbito industrial y están muy cotizadas a nivel mundial.

En primer lugar, la impresión 3D es una herramienta fundamental para el prototipado rápido de objetos personalizados. Por ello, su aplicación en la industria es reseñable en campos como: ingeniería aeroespacial y mecánica, con la fabricación de componentes ligeros e innovadores, así como la elaboración de modelos a escala para simulación; industria textil y joyería, permitiendo la creación de prendas y accesorios únicos y totalmente personalizados; y en arquitectura, pudiendo elaborar maquetas y elementos de construcción de manera rápida y precisa.

Otro sector que ha vivido una importante innovación es el de la medicina. La impresión 3D ha permitido a médicos y cirujanos la creación de prótesis a medida únicas y específicas para cada paciente. También se ha logrado imprimir los primeros órganos artificiales e, incluso, se han impreso piezas especialmente delicadas, como segmentos de cráneos fracturados que han sido implantados con éxito como se muestra en la Figura 2-15 [20]. La educación es otro sector que se beneficia de la impresión 3D, para que estudiantes puedan aprender y experimentar con los productos tridimensionales que se puedan imprimir.

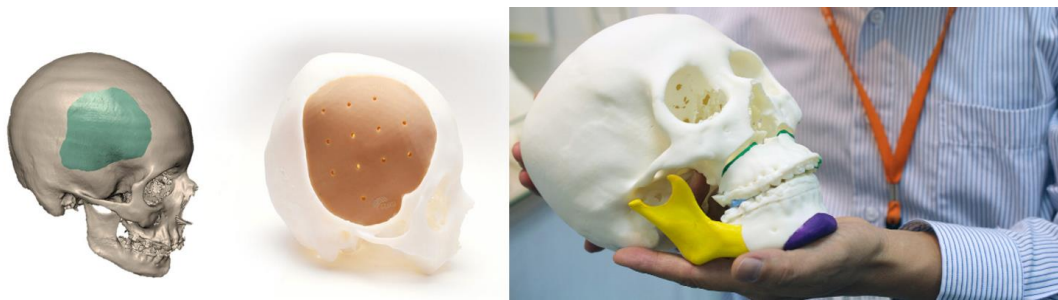


Figura 2-15 Impresión 3D como herramienta para sanar una fractura craneal [20]

Por último, las impresoras 3D son un útil imprescindible en sitios o situaciones donde la obtención de piezas se difícil de llevar a cabo mediante transporte y se hayan de conseguir in situ. Un perfecto ejemplo de esto es un buque que navegue largas travesías. Actualmente, la gran mayoría de buques de la Armada están equipados con impresoras 3D y personal técnico preparado, en cualquier momento, para imprimir un repuesto en caso de emergencia o necesidad extrema.

2.6.2 Limitaciones de la Impresión 3D.

A pesar de la infinidad de aplicaciones que se le pueden atribuir a la impresión 3D, esta tecnología puntera afronta ciertas limitaciones. Y es que la impresión 3D está en un proceso continuo de evolución y sigue constantemente perfeccionando su técnica de la mano de profesionales y expertos. Pero es cierto que se enfrentan a muchos desafíos y cuestiones abiertas, los cuales son actualmente una desventaja. Las limitaciones más influyentes son [21]:

- Pérdidas o retrasos por retransmisiones de paquetes de información durante el proceso de impresión 3D.
- Largos tiempos de impresión y dificultad de su estimación.
- Acceso y control remotos.
- Errores de fabricación en la consolidación por capas.
- Imperfecciones en el acabado de los modelos.
- Variedad de materiales de impresión limitada.

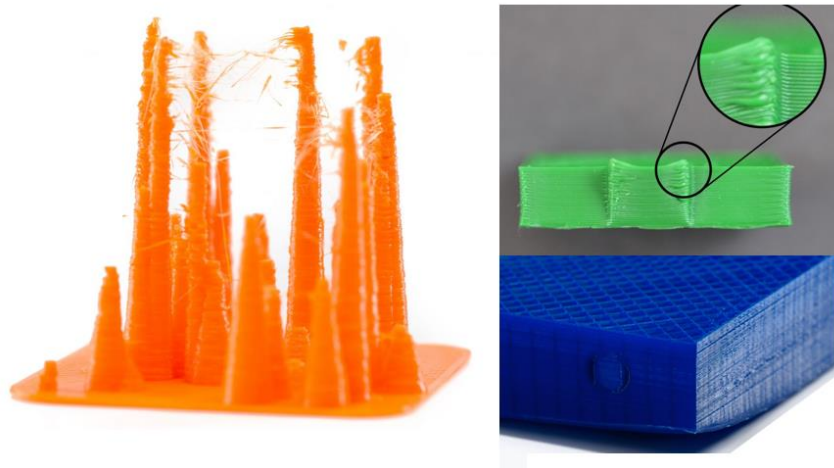


Figura 2-16 Posibles errores que suceden durante la impresión 3D [22]

2.6.3 Tipos.

Actualmente existen numerosos métodos de impresión 3D. Su clasificación está basada en la tecnología y metodología que emplean para llevar a cabo la impresión por capas. De esta forma, las técnicas más empleadas para el prototipado rápido mediante impresión 3D son:

2.6.4 SLA (Estereolitografía).

Fue ideada por primera vez en a principios de la década de los ochenta y es considerada la técnica pionera de la impresión 3D actual. Su principio de uso se basa en la solidificación de una resina líquida usando un rayo láser como se refleja en la Figura 2-17. Este rayo de luz ultravioleta a baja potencia va endureciendo la resina a medida que es enfocada, y se va depositando encima de una capa anterior. Así, capa por capa, la estereolitografía es capaz de imprimir objetos tridimensionales.

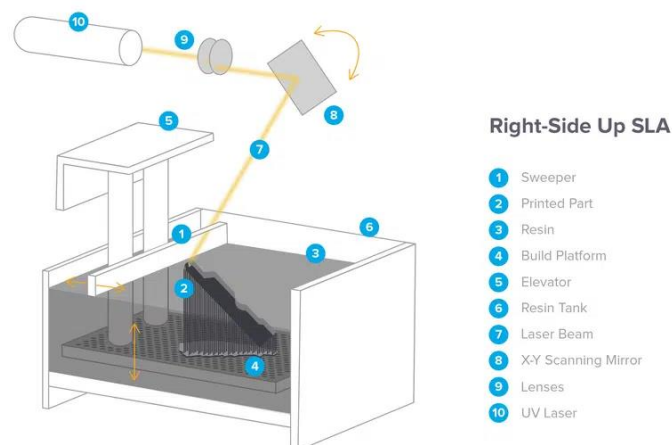


Figura 2-17 Principio de funcionamiento del SLA [23]

2.6.5 SLS (Sinterización Selectiva por Láser).

Se trata de una metodología de impresión 3D muy similar al SLA. Consiste en la solidificación de material por capas mediante láser, sin embargo, el material no es resina. Esta tecnología permite el uso de una variedad más grande de materiales fungibles en polvo, como por ejemplo nylon, cerámica o cristal.

2.6.6 Impresión por FDM (*Fused Deposition Modeling*).

El método de FDM, o su término en español Modelado de Deposición Fundida, es el más moderno y, a su vez, el más sencillo. El principio de funcionamiento del FDM consiste en la deposición por capas de material plástico que solidifica mediante un cabezal extrusor. Este extrusor va desplazándose por las dos dimensiones (ejes X e Y) de forma paralela a la capa de deposición del filamento hasta completar la geometría de la dicha capa del objeto. Una vez ha terminado esa capa, el extrusor asciende en eje Z para comenzar el mismo proceso sobre la capa inmediatamente anterior. Este proceso se repite continuamente hasta finalizar la pieza tridimensional totalmente.

Esta tecnología emplea unos calentadores en el extrusor para elevar la temperatura del filamento del material hasta el punto de fundición para su deposición. Todos los elementos mencionados se presentan en la Figura 2-18. El material empleado en el Modelado de Deposición Fundida se presenta en bobina, facilitando su fundición y extrusión durante la impresión. Entre los materiales más utilizados en el FDM se encuentran: el PLA (ácido poliláctico), barato y biodegradable; y el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), más caro, pero con mejores propiedades mecánicas.

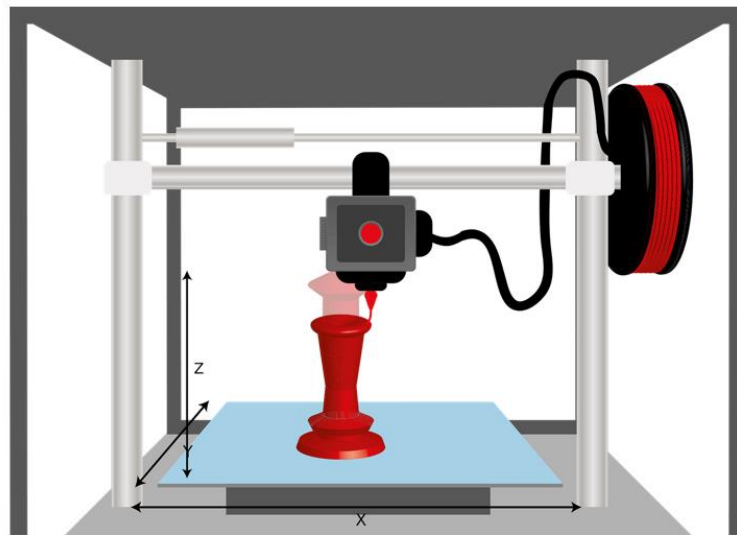


Figura 2-18 Mecanismo de impresión 3D mediante FDM [24]

Es importante destacar que tanto el FDM, mecanismo de impresión 3D, como el PLA, material para el prototipo, serán empleados para el desarrollo de este Trabajo Fin de Grado.

3 DESARROLLO.

3.1 Descripción del apartado.

En este apartado se describe el proceso paso por paso de elaboración del Trabajo Fin de Grado desde su inicio hasta su fin. Este proceso está completamente ligado al proceso general de diseño en un proyecto de ingeniería, respetando una evolución secuencial del trabajo.

El apartado parte del estudio previo y del planteamiento inicial del problema que prosigue con la parte de ingeniería conceptual del trabajo, estableciendo las especificaciones y bocetos iniciales. Posteriormente, como se representa en la Figura 3-1, se desarrollan los tres pilares fundamentales del TFG: en primer lugar, el modelado CAD a través del software de diseño; en segundo lugar, el análisis FEM de los prototipos diseñados; y, en tercer lugar, la fabricación del prototipo y sus pruebas de campo.

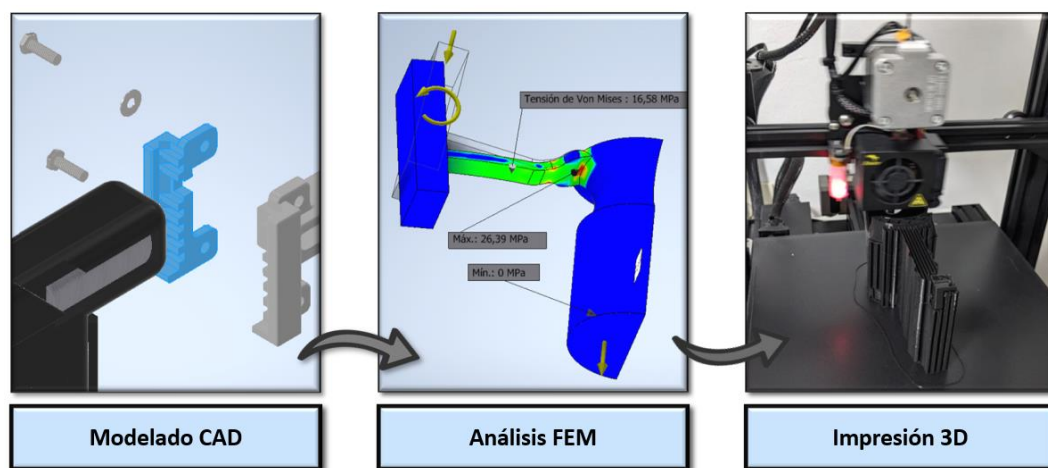


Figura 3-1 Fases del proyecto

3.2 Estudio Previo.

Es aquí donde el proyecto tomó su punto de partida. Y todo nace partiendo una serie de necesidades que se deben satisfacer de alguna forma. De esta forma, la realidad virtual está experimentando un momento de pleno auge, en el que está constantemente buscando nuevas ramas de innovación. Surge así la necesidad de desarrollar dispositivos que lleven la realidad virtual a otro nivel. Entre ellos, un dispositivo capaz de transmitir a su usuario la sensación real de disparar un arma dentro de un entorno simulado y que pueda, a su vez, emplearse para el adiestramiento militar.

Antes de todo, para poder satisfacer esta necesidad, se ha de tener en cuenta las limitaciones que afectarán a la solución que se vaya a tomar. Para el desarrollo de este TFG se contó con los medios disponibles en los laboratorios de realidad virtual del Centro Universitario de la Defensa de la Escuela Naval Militar en Marín. Estos disponen de ordenadores con programas de diseño, ingeniería y fabricación asistida por ordenador (CAD, CAE y CAM), los dispositivos de RV de HTC Vive Pro, impresoras 3D y material suficiente para la fabricación. Entonces, las limitaciones se vieron reducidas a las propias de estas ventajas.

Teniendo delimitadas las necesidades y los recursos disponibles, se pudo definir entonces el problema que trata de resolver este Trabajo Fin de Grado y que le pone su título: Diseño ergonómico de un prototipo de arma corta con respuesta háptica para adiestramiento militar mediante Realidad Extendida. Como resultado del estudio previo y una viabilidad positiva, fue momento de dar paso al proceso diseño conceptual.

Es importante destacar que la idea de diseñar un dispositivo de arma corta con respuesta háptica que recree el retroceso real de un arma fue inspirada en productos que ya ofrece la compañía comercial *ProTube VR*. Esta pone a disposición de sus clientes una gran variedad de productos que complementan a los sets de realidad virtual para ofrecer una experiencia inmersiva. Sin embargo, su modelo de arma corta, mostrado en la Figura 3-2, no es compatible con el *HTC Vive Pro*, objetivo que este Trabajo Fin de Grado pretende conseguir.



Figura 3-2 ProVolver, producto de arma corta de la marca ProTube VR

3.3 Ingeniería Conceptual.

3.3.1 Especificaciones.

Reuniendo la información extraída de la fase anterior, comenzó una etapa de definición del proyecto desde un punto de vista técnico. Para el diseño del dispositivo se partió de unos requisitos o especificaciones considerados como imprescindibles. Las especificaciones generales fueron:

- Un mango ergonómico que ofrezca una cómoda experiencia al usuario durante la simulación.
- El dispositivo debe ser capaz de integrar el mando HTC Vive Pro con una sujeción firme y sin oscilaciones.
- Un mecanismo de enganche del dispositivo de respuesta háptica.
- Un sistema que favorezca la pulsación del gatillo.
- Un diseño bonito y atractivo para los clientes.

3.3.2 Bocetos Iniciales.

Partiendo de estos requisitos, se concibieron las ideas iniciales con el objetivo de establecer los cimientos de partida del modelado. La idea parte de una empuñadura capaz de integrar tanto el mando HTC Vive Pro como el dispositivo de respuesta háptica como se muestra Figura 3-3.

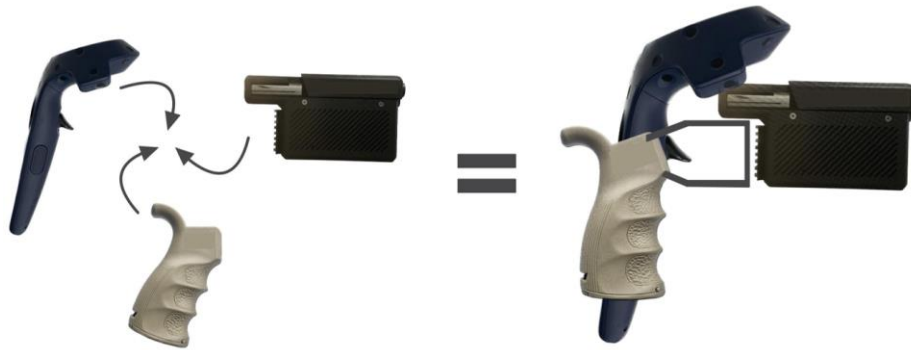


Figura 3-3 Idealización del concepto previo al modelado

A continuación, se esbozaron los primeros bocetos del dispositivo que sirven de concepto general para su visualización. A pesar de que estos bocetos no impliquen el modelo final, si son una ayuda inicial para ensalzar el modelo. Los bocetos que fueron elaborados se muestran en la Figura 3-4 y su diseño fue basado en un modelo de una empuñadura universal de un arma convencional. El objetivo que se perseguía era conseguir un diseño simple a la vez que confortable para su uso.

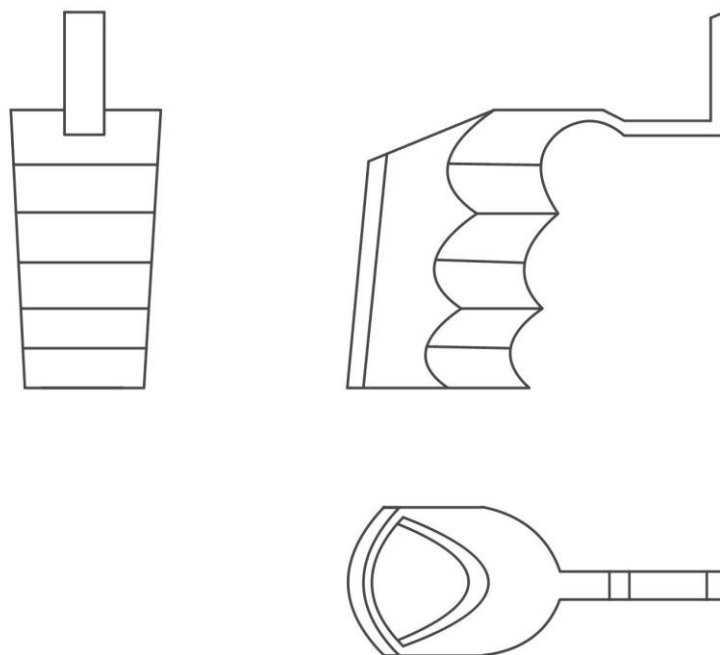


Figura 3-4 Primeros bocetos conceptuales del dispositivo

3.3.3 Software de Modelado Informático.

Una vez se tuvo clara la idea preconcebida del diseño, el siguiente paso fue extrapolar el concepto a un programa de diseño asistido por ordenador. En este proyecto se empleó el software de Autodesk Inventor Professional en su última versión, la del año 2024. Este programa facilitó la implementación de todas las ventajas que ofrecen los programas CAD, las cuales se explican en el Apartado 2.4.1.

Adicionalmente, Autodesk Inventor también integra todas las preeminencias propias de los programas de ingeniería asistida por ordenador. Gracias estas herramientas CAE, fue posible realizar estudios del comportamiento del dispositivo en un entorno simulado a través del Método de Elementos Finitos (FEM), detallado en el Apartado 2.4.2.1.

3.4 Modelado Inicial.

A la hora de asaltar el problema general de comenzar con el modelado, se vio preciso emplear el método *top-down*, también conocido en castellano como el *divide y vencerás*. Este método consiste en la resolución de un problema difícil mediante su subdivisión en dos o más problemas de dificultad inferior y, si fuera preciso, estos subproblemas en otros aún más sencillos. Al final, estos problemas pueden ser resueltos directamente para dar solución final al problema global.

3.4.1 Sujeción del Mando.

El modelado en Autodesk Inventor comenzó asaltando la necesidad de implementar el mando HTC Vive Pro. La solución era crear una cavidad o funda que sostuviera el cuerpo del mando por la parte de su agarre natural. La generación de esta forma debía ser obtenida de la manera muy exacta para adaptarse con perfección y sin oscilaciones al mando. Inicialmente, se realizó una toma de medidas minuciosas en el mando. Estas medidas fueron realizadas sobre el modelo digital del mando y contrastadas, a su vez, con un pie de rey electrónico de 0,1 mm de precisión en el dispositivo físico para mayor precisión. Fueron tomadas medidas sobre dos cortes transversales al cuerpo del mando, uno superior y otro inferior, tal y como se muestra detalladamente en la Figura 3-5.

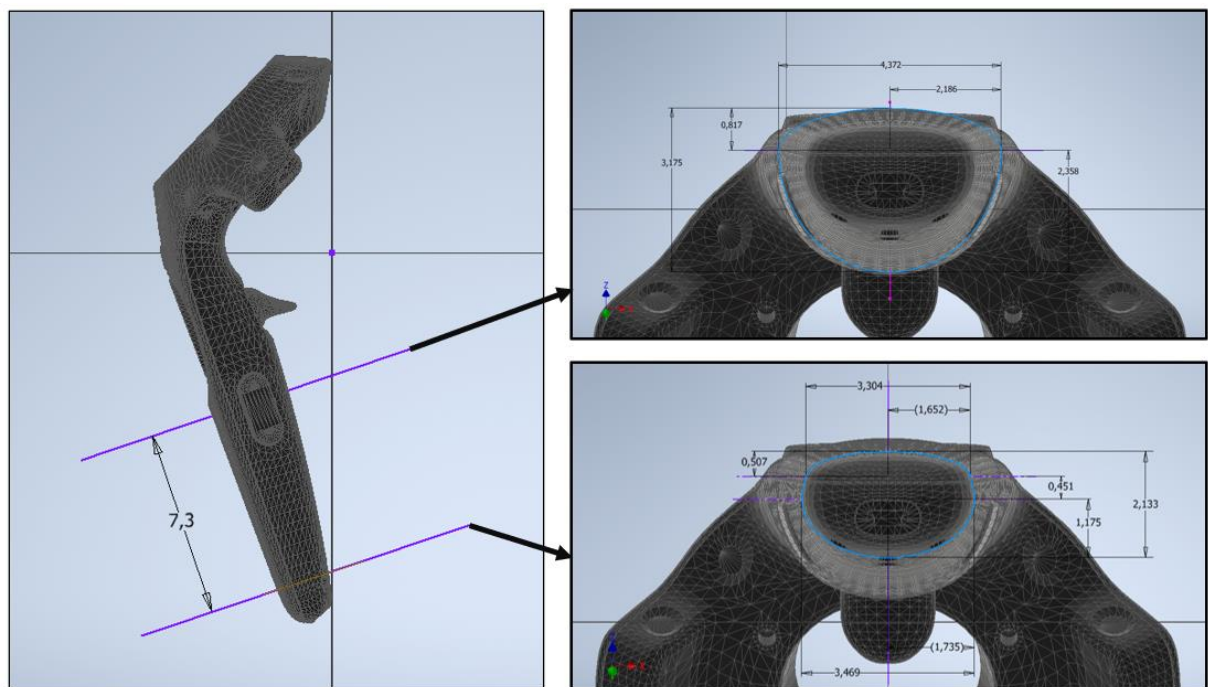


Figura 3-5 Mediciones tomadas a la empuñadura del mando

Las medidas y bocetos tomados de los cortes del cuerpo del mando fueron extrapoladas a dos bocetos idénticos respectivamente plasmados en planos paralelos en Autodesk Inventor con la debida separación entre ellos (73 mm). Por medio de la herramienta elevación fue posible la generación de una forma de transición entre estos dos objetos. Esta forma replica el cuerpo de agarre del mando, pero no una cavidad inversa para sostenerla. Consecuentemente, ensanchando la pieza resultante 3 mm y vaciando la operación anterior, se obtuvo la funda donde irá engarzado el mando dentro del arma. El resultado de este modelado inicial se refleja en la Figura 3-6.

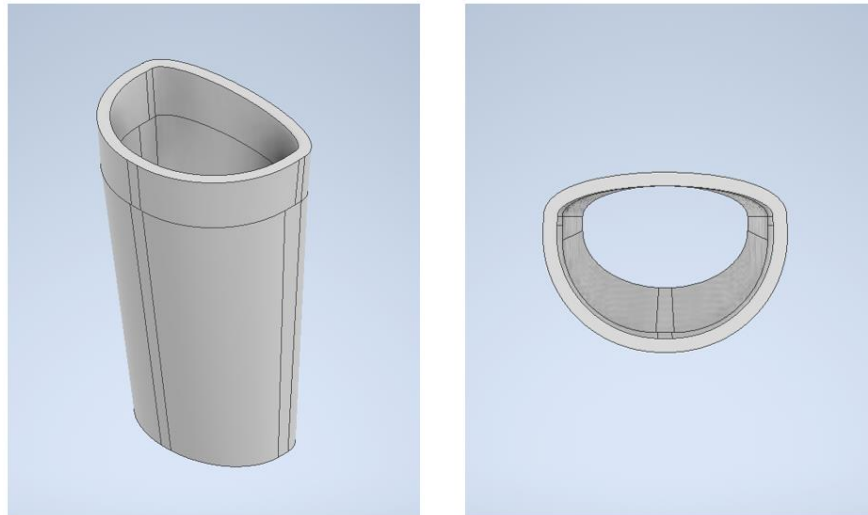


Figura 3-6 Funda del mando realizada por solevación y vaciado

Para comprobar la eficacia de la implementación de la funda sobre el mando se realizó una primera impresión que se detalla en la Apartado 4.2.1. Tras validar positivamente sus resultados, se decidió pasar al siguiente paso.

3.4.2 Ergonomía y Molde de Arcilla.

El siguiente problema por resolver fue el modelado de la empuñadura donde van posados los dedos y la palma de la mano adaptándose a la gran mayoría de los usuarios. Este proceso de alcanzar una comodidad universal es notablemente sensible y se conoce como ergonomía. En este proyecto, la ergonomía se trata de un pilar fundamental y se define como el estudio de la adaptación de las herramientas y máquinas a las personas que las utilizan regularmente, con el objetivo de lograr una mayor comodidad y eficacia. Con esta finalidad, la empuñadura del dispositivo de arma corta debía implementar perfectamente el término de ergonomía.

Así, para el diseño de la empuñadura, se vio necesario realizar un molde de arcilla que fue moldeado por las manos de una variedad de personas, satisfaciendo la comodidad de sus diferentes palmas en tamaño y forma en un único modelo. El resultado del molde de arcilla se muestra en la Figura 3-7. Sobre este modelo se ha realizado un profundo estudio y se han tomado las medidas pertinentes para el conformado de lo que fue la empuñadura del prototipo de arma corta.

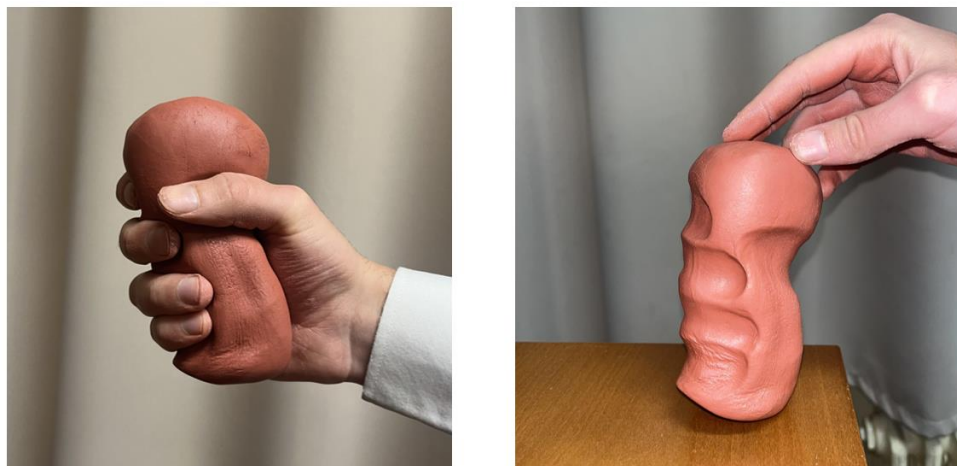


Figura 3-7 Molde de arcilla para la optimización de la ergonomía

3.4.2.1 Escaneo 3D.

Para poder transferir el molde de arcilla a una idea de modelado en Autodesk Inventor se realizó un escaneo tridimensional de su superficie. Para ello se hizo uso de la aplicación *Scaniverse*. Esta aplicación emplea el escáner LiDAR que implementan los móviles y tabletas electrónicas de últimas generaciones. Los sensores LiDAR (acrónimo del inglés para *Light Detection and Ranging*) se utilizan para medir distancias a través del tiempo que tarda un haz de luz en alcanzar objetos y volver reflejado al sensor. Gracias a esta avanzada tecnología se puede conseguir escanear objetos y obtener nubes de puntos en las tres dimensiones que plasman su superficie. De esta forma, *Scaniverse* permite construir modelos 3D con alta precisión y tener control sobre el proceso. La aplicación es completamente gratuita y se puede descargar fácilmente en la *App Store*, sin incluir costes adicionales dentro de la aplicación para su uso. Además, su interfaz de usuario es sencilla e intuitiva.

Para comenzar el escaneo, en la página de inicio dentro de *Scaniverse* se ha pulsado en la parte inferior la opción *New Scan* y, a continuación, se ha seleccionado el tamaño del objeto, en este caso pequeño. El siguiente paso es configurar la distancia a la que se va realizar el escaneo, 0,4 m es adecuado. El molde de arcilla de ha dispuesto en una zona amplia que permite su vista clara desde todas las direcciones para el video. Cuando se empieza la grabación se rodea completamente el objeto tomando todas las vistas posibles. La aplicación advierte de los puntos que no se han medido con un rayado rojo. Esto permite poder completar el escaneo la pieza y repasar las zonas que no han sido tomadas. Una vez finalizado el escaneo, se selecciona el modo de procesamiento del escaneo. El modo detallado ha sido seleccionado para el molde de arcilla para lograr una mayor precisión en la textura de la superficie. Posteriormente, la aplicación ofrece un menú para la edición que incluye herramientas para cortar zonas no deseadas o para ajustar el brillo y el contraste, entre otros. Cuando se ha terminado la edición del escaneo, se exportó el molde a Autodesk Inventor como un archivo STL (acrónimo del término inglés *Stereolithography*). Así, la nube de puntos fue convertida en una maya compuesta por triángulos que representa la superficie del molde de arcilla. El proceso de escaneado mediante *Scaniverse* se ha reflejado en la Figura 3-8.

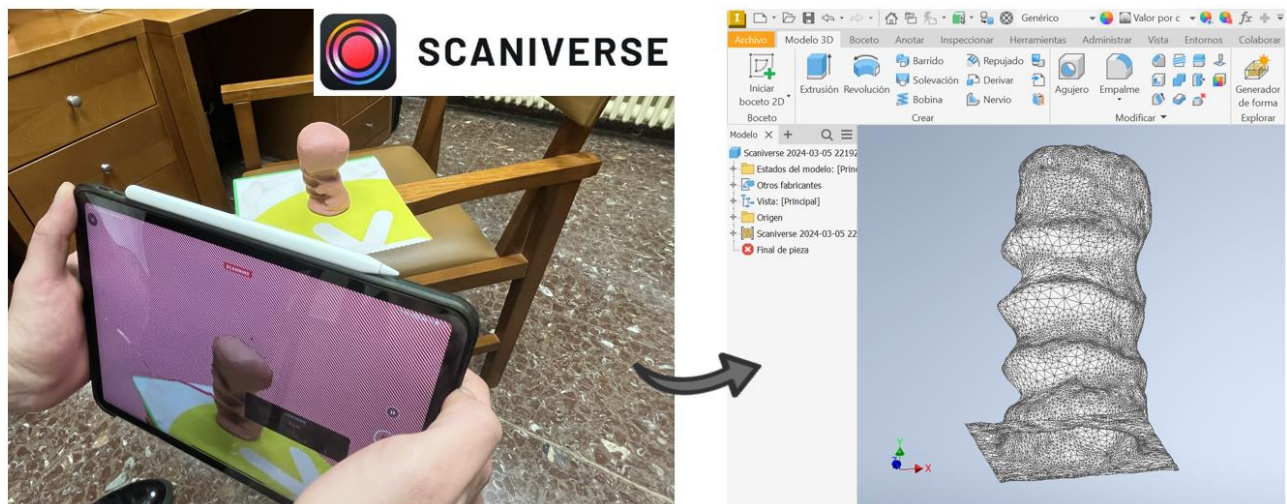


Figura 3-8 Proceso de escaneado 3D del molde de arcilla.

En Autodesk Inventor, sobre la superficie generada se comenzó una nueva pieza que trató de asemejarse a esta para poder adaptar la ergonomía del molde de arcilla a la posterior empuñadura del dispositivo de arma corta. La pieza que se tenía que modelar debía lograr asimilar los rasgos generales de la superficie y servir como estudio para la toma de medidas y visualización de formas para ser aplicados más tarde en la empuñadura. En el Apartado 4.2.2 se exponen los resultados y decisiones tomadas al respecto sobre el proceso de escaneado 3D.

3.4.3 Generación de Alternativas para la Empuñadura.

Partiendo de la funda para el mando como punto de partida y teniendo idealizada la empuñadura en base al molde de arcilla, surgieron numerosas soluciones para asaltar el siguiente problema. En esta fase se dispuso de cierta libertad de creación y se dio importancia a la creatividad para dar lugar a diferentes alternativas. Inventor es una gran herramienta para plasmar la creatividad del usuario y permitió la creación de modelos con enfoques diversos para dar solución a un mismo problema.

En primer lugar, se optó por realizar una pieza por capas de bocetos, que se fusionaron mediante la herramienta de solevación. Las intersecciones de las solevaciones han sido suavizadas con chaflanes para dar resultado a un diseño cómodo, pero poco atractivo. Adicionalmente, la complejidad de este modelo dificulta la implementación del mando (Figura 3-9).

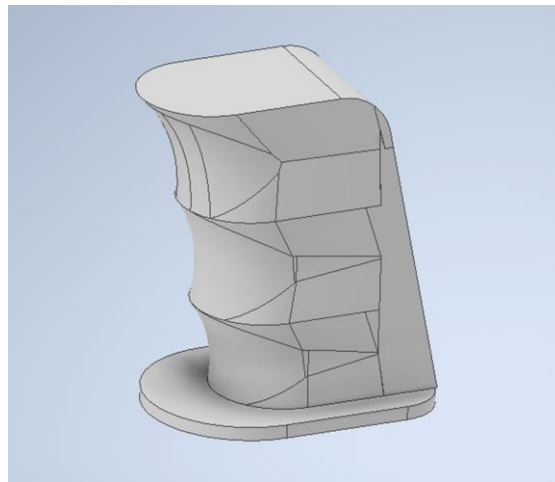


Figura 3-9 Primera alternativa para la empuñadura

La segunda alternativa se enfocó en solventar el principal problema de la primera alternativa, la disposición del mando dentro de la empuñadura. Este modelo partió de la pieza que hace de funda para engarzar el mando. Se han realizado varios bocetos por capas que fueron extruidos hasta conectar con la superficie curva de la funda y, posteriormente, se ha dado forma al perfil del objeto con otras operaciones. El resultado atiende a las necesidades básicas, sin embargo, su apariencia y ergonomía deben ser perfeccionadas (Figura 3-10).

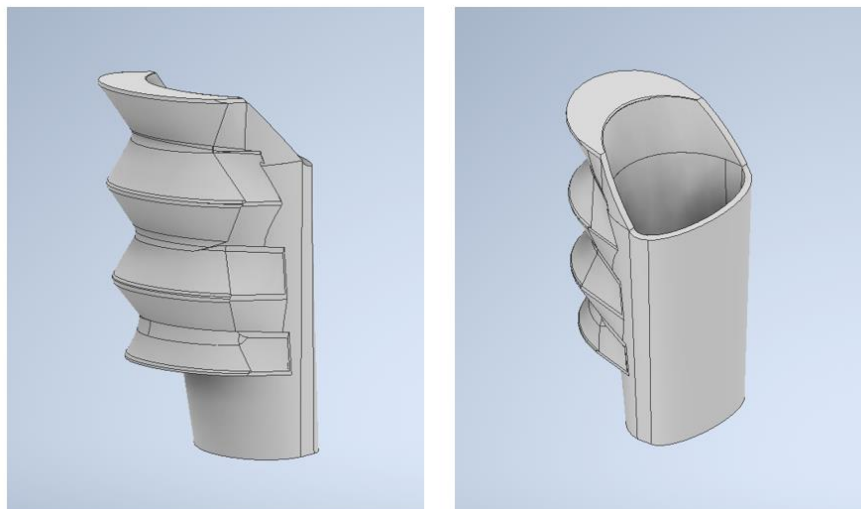


Figura 3-10 Segunda alternativa para la empuñadura

Para la tercera alternativa, se decidió tomar como modelo de inicio la segunda alternativa. Así, se partió de la pieza de la funda y se le aplicó una extrusión hasta la su cara curva. En este modelo se decide aplicar la herramienta de revolución. El corte del perfil que se quiere revolucionar aporta un acabado de la pieza más limpio y atractivo para el cliente, como se observa en la Figura 3-11. A pesar de que esta alternativa todavía podía mejorar su presentación y ergonomía, sí se tomó como ejemplo para el modelo definitivo de la empuñadura.

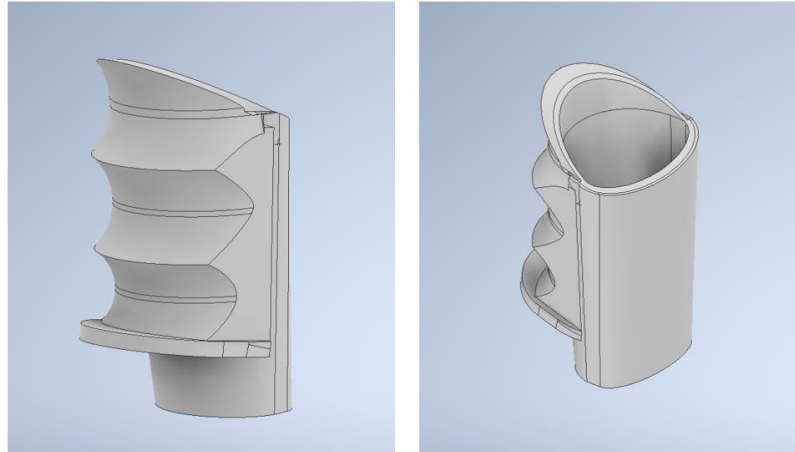


Figura 3-11 Tercera alternativa para la empuñadura

3.4.4 Empuñadura Óptima.

La alternativa final siguió un proceso de modelado similar a la tercera alternativa descrita anteriormente. La pieza se conformó a partir de la funda del mando y, sobre esta, se llevó a cabo una extrusión con margen que se extiende hasta su superficie curva posterior. A continuación, se realizó una revolución de corte del perfil detalladamente medido para lograr la buena adaptación de la mano a la empuñadura como se observa en la Figura 3-12.

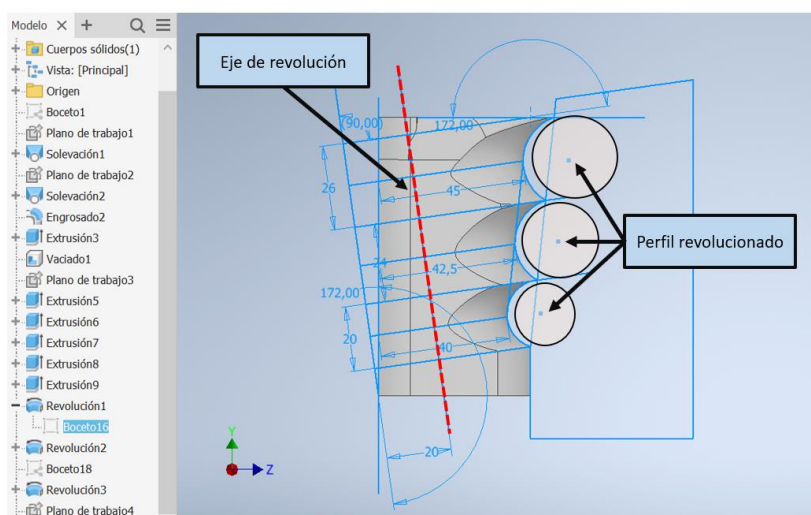


Figura 3-12 Operaciones de conformado de la empuñadura

Como resultado de este proceso de modelado, se obtuvo una empuñadura que integra perfectamente la cavidad donde va firme el mando a la altura más conveniente para favorecer el agarre y que deja el gatillo al alcance del dedo índice. Adicionalmente, la empuñadura combina a la perfección un diseño atractivo y limpio con una ergonomía destacable, ambas características destinadas a cumplir con las prioridades del cliente. Su diseño final se muestra en la Figura 3-13.

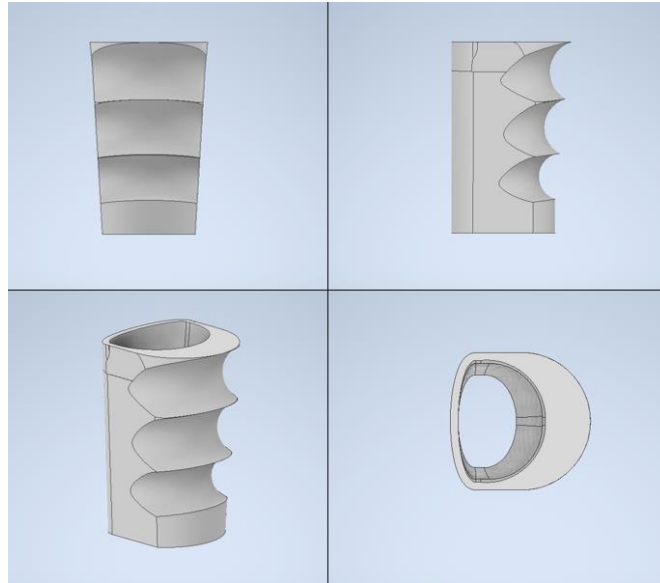


Figura 3-13 Modelo óptimo para la empuñadura del dispositivo de arma corta

3.5 Ingeniería de Detalle.

Hasta este punto se tenía modelado el concepto de la empuñadura para el dispositivo de arma corta, que combina ergonomía con la sujeción del mando. Sin embargo, era momento de profundizar en las especificaciones más técnicas y que requieren un estudio más minucioso para su modelado. Por ello, es en la fase de ingeniería detallada cuando se asaltaron estos problemas.

3.5.1 Modelado detallado de la empuñadura.

Como continuación del modelo *top-down*, el siguiente problema a atender fue una adaptación más lograda del mando de HTC Vive pro, así como una mayor comodidad para el usuario. Así, sobre la pieza de la Figura 3-13, se incluyeron unas modificaciones que permitan el paso de los botones y actuadores del mando. Para ello, se realizó un levantamiento de medidas precisas sobre el modelo digital del mando que, más tarde, se plasmaron en la pieza para practicar los orificios correspondientes. Finalmente, la pieza fue depurada mediante empalmes de cara para perfilar las aristas puntiagudas y ofrecer una experiencia de uso más cómoda al usuario. Este proceso de destalle se refleja en la Figura 3-14.

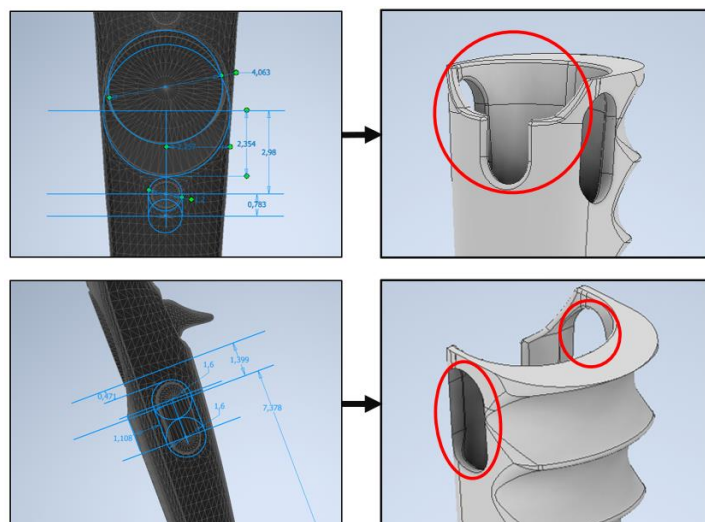


Figura 3-14 Adaptación del mando a la empuñadura

Llegado hasta este punto, fue preciso realizar una segunda impresión para verificar el avance y tomar las decisiones pertinentes. En esta prueba, se comprobó especialmente la implementación del mando en la empuñadura y su ergonomía. Los resultados de esta prueba y las decisiones al respecto están desarrollados en la Apartado 4.2.3.

3.5.2 Brazo del soporte para el Actuador.

Para el modelado del brazo que sostenga el actuador háptico se ha de tener en cuenta la fuerza que va a soportar y sus puntos más críticos. Además, el brazo ha de cumplir con unas medidas premeditadas para no interferir con el mando y dejar espacio de movimiento al dedo índice para su interacción con el gatillo. La idealización de las medidas fue el primer paso y para lograrlo se levantó un estudio de las medidas adecuadas sobre el mando proyectando, simultáneamente, tanto el actuador como la empuñadura. El boceto de la toma de medidas se muestra en la Figura 3-15.

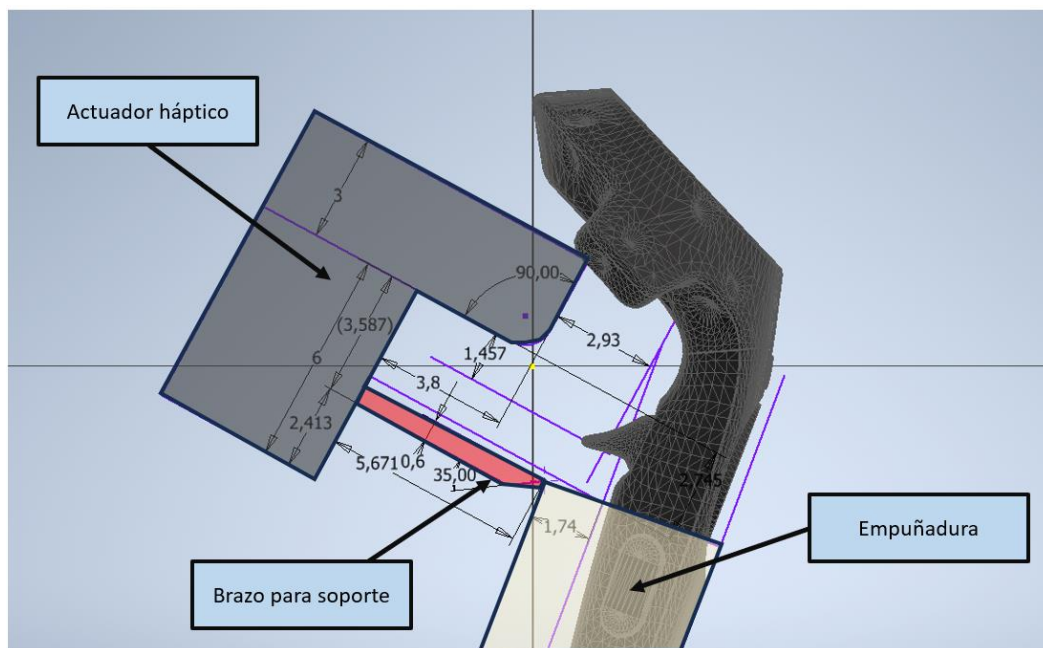


Figura 3-15 Idealización del brazo para el soporte del actuador háptico

3.5.2.1 Optimización Topológica.

Una vez idealizadas las medidas, fue momento de modelar la forma del brazo optimizando el material empleado con el esfuerzo que ha de soportar, sin dejar de lado una apariencia atractiva. Este proceso puede ser llevado a cabo mediante la optimización topológica, que consiste en mejorar un diseño preexistente para maximizar su eficacia. Con esta finalidad, el brazo fue sometido a un estudio profundo de su comportamiento en un entorno simulado gracias a las herramientas CAE que ofrece Autodesk Inventor. El estudio realizado es de tipo estático, que implica cargas que no varían en el tiempo, y lineal, que significa que las tensiones y deformaciones de la pieza son proporcionales a las cargas aplicadas y que las propiedades del material son constantes. A continuación, se desarrolla el proceso para llevar a cabo un estudio por el método de elementos finitos (FEM) a través de este software de diseño.

3.5.2.1.1 Estudio FEM en Autodesk Inventor.

Para comenzar el estudio de la pieza que se haya modelado hay que abrir la pestaña de *Entornos* en la barra de herramientas superior de la pantalla. Dentro, se selecciona la opción de *Análisis de tensión* y, posteriormente, el botón de *Crear Estudio*. Se abre entonces un desplegable donde se puede configurar el tipo de estudio que se quiere realizar y sus contactos. Como se explicó anteriormente, el estudio que

se va a iniciar es de tipo estático y lineal. Se pulsa *Aceptar* para desbloquear todas las opciones disponibles para personalizar el entorno que se desea simular. En la Figura 3-16 se muestra este proceso.

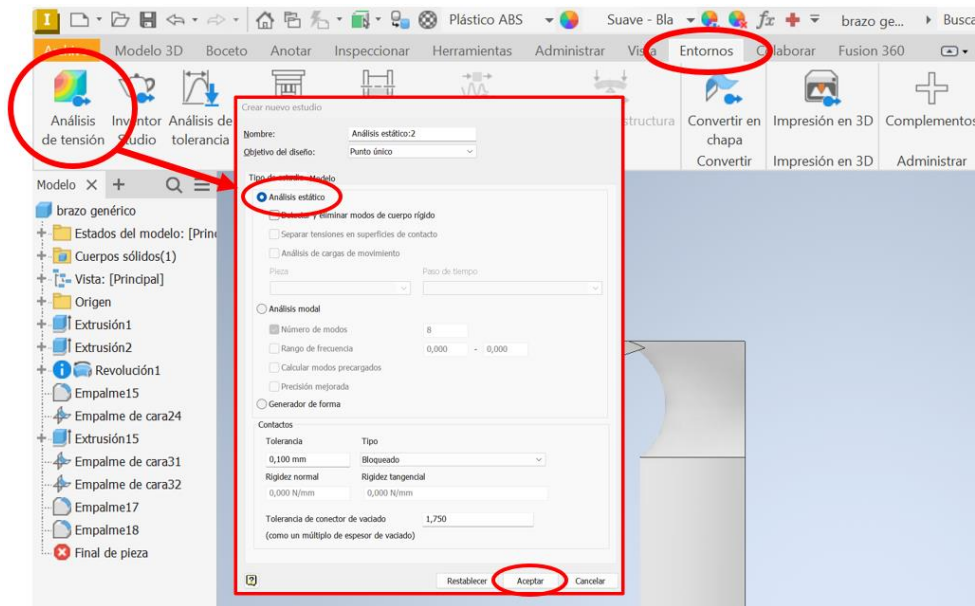


Figura 3-16 Proceso de creación de un estudio FEM en Autodesk Inventor

Aunque el orden puede variar, inicialmente se va a establecer el valor y el sentido de la gravedad pulsando su icono en el apartado *Cargas*, 9810,000 mm/s² hacia el suelo. También, dentro del apartado *Cargas* se deben de establecer las distintas fuerzas, presiones y momentos que haya de soportar la estructura con su valor y sentido. En este caso, se ha aplicado la fuerza que ejerce el peso del actuador y el momento que este crea en su anclaje en el extremo del brazo. Se deben seleccionar también las partes que se quieran fijar en el apartado de *Restricciones*. Para poder dar más precisión de detalle al estudio, se va a seleccionar la opción de *Configuración de malla* dentro del apartado *Malla*. Se abre un desplegable que permite configurar el tamaño medio del elemento de la malla, más pequeño para más detalle y más grande para menor precisión. Por último, es necesario establecer el material de la pieza. Autodesk Inventor ofrece una gran variedad de materiales y, si fuera necesario, se pueden personalizar y crear otros ajustando sus características. Se puede pulsar *Vista de malla* para visualizar su resultado. Finalmente, la simulación se puede ejecutar con el botón *Simular* de la barra superior de opciones.

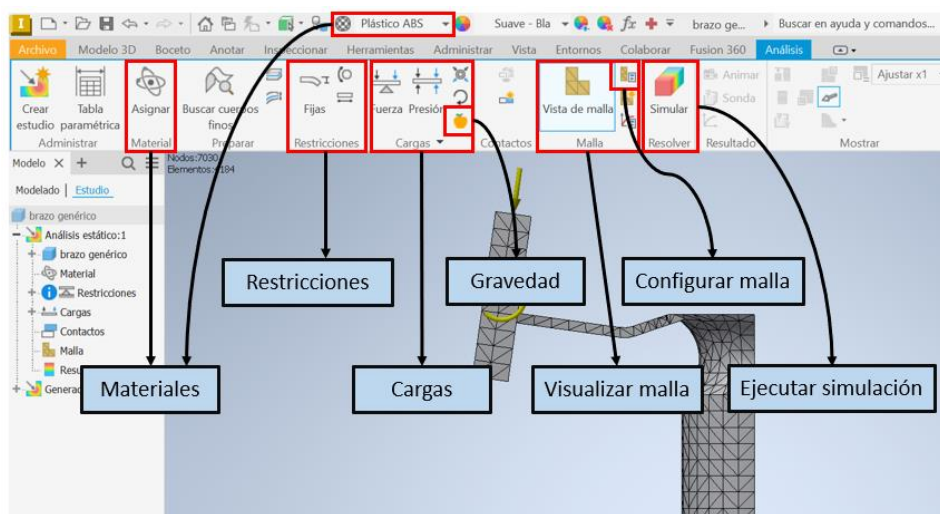


Figura 3-17 Configuración del entorno de simulación para realizar un estudio FEM

El estudio va a dar la posibilidad de obtener una serie de resultados, tales como la tensión de Von Mises, las tensiones principales, el desplazamiento y el coeficiente de seguridad que se pueden seleccionar en la ventana de la izquierda. La interfaz de Autodesk Inventor muestra una gama de colores que permite visualizar los valores de la magnitud de manera gráfica, además se adjunta una escala de colores a la izquierda que cuantifica los colores según su valor. Para poder obtener el valor máximo y mínimo y su ubicación exacta, se dispone de la opción en la sección *Mostrar*, así como la herramienta de *Sondas* para obtener el valor de una magnitud en un punto determinado.

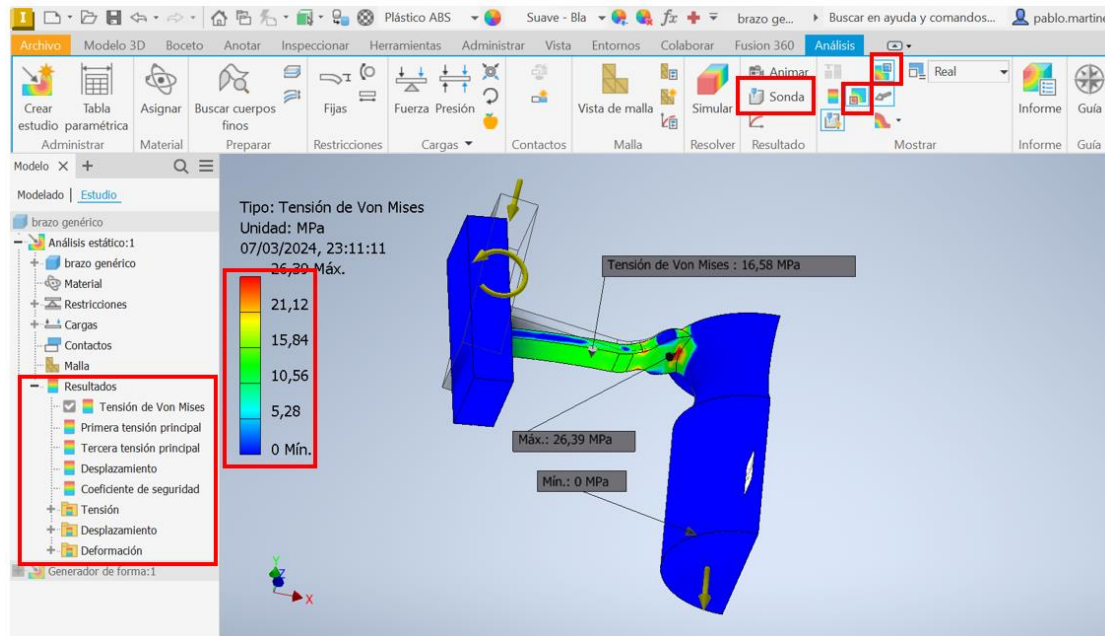


Figura 3-18 Resultados del estudio FEM en Autodesk Inventor

Esta herramienta es sin duda imprescindible en la optimización topológica que se ha realizado para el modelado del brazo. Partiendo de un modelo de brazo genérico y sencillo, se realizó su estudio FEM y se sacaron las conclusiones necesarias para reforzar el brazo. El siguiente modelo mejorado del anterior ha sido sometido al mismo estudio y proceso de mejora. Así, reiteradas veces hasta alcanzar una estructura que maximice su eficiencia. Los resultados y conclusiones obtenidos en este proceso de optimización topológica se desarrollan ampliamente en el Apartado 4.3.1.2.

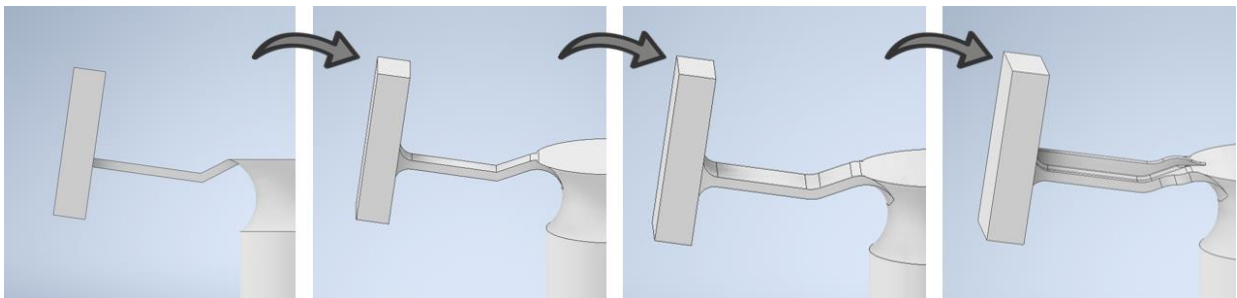


Figura 3-19 Proceso de optimización topológica

3.5.2.2 Diseño Generativo.

Anteriormente se propuso un modelo de brazo para que soporte el peso del actuador háptico mediante la prueba sucesiva de alternativas, reforzando los puntos más críticos para, finalmente, basarse en una estructura ya existente que optimiza los recursos. Sin embargo, Autodesk Inventor ofrece otra solución para lograr diseños optimizados: el diseño generativo. A diferencia de la optimización

topológica que busca mejorar un diseño ya concebido, esta herramienta de investigación de diseño iterativo permite modelar un brazo completamente nuevo y diseñado específicamente para las necesidades personalizadas de este trabajo. A continuación, se desarrolla el proceso de generación de formas en Autodesk Inventor.

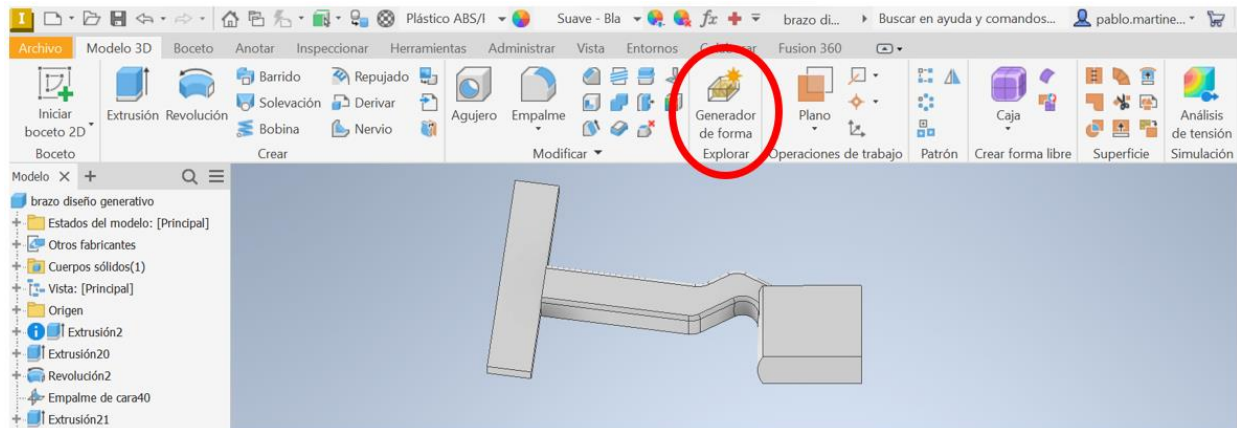


Figura 3-20 Generador de forma en Autodesk Inventor

En primer lugar, se ha proyectado en Inventor un brazo genérico y robusto, y se ha seleccionado la opción de *Generador de forma* en Inventor. Dentro de esta herramienta, es preciso parametrizar el entorno de simulación acorde a unas especificaciones. Las cargas aplicadas, las restricciones y la configuración de malla se ajustan de manera idéntica al proceso de estudio FEM explicado anteriormente. Mediante restricciones, uno de los extremos del brazo se ha empotrado en un bloque fijo que representa el cuerpo de la empuñadura al que está hecho firme. El otro extremo, que representa el acople del actuador, es volante y, sobre este, se aplican las fuerzas del peso del actuador. Posteriormente, se seleccionaron las partes que no se desean alterar mediante la opción *Conservar región* y se dejó libertad de modificación a la zona del brazo. El siguiente paso es establecer la reducción en masa desde el modelo original y la resolución de la malla dentro del desplegable de la opción *Configuración del generador de formas*. Fueron estudiados varios porcentajes de reducción, pero finalmente se decidió establecer un 20% (sobre la pieza total, lo que representa un porcentaje mucho mayor para la parte afectada por la reducción) y una resolución de malla alta. Esta configuración fue elegida por dar el resultado más coherente frente a otras. El producto de este proceso de configuración y generación de la forma optimizada se observa en la Figura 3-21.

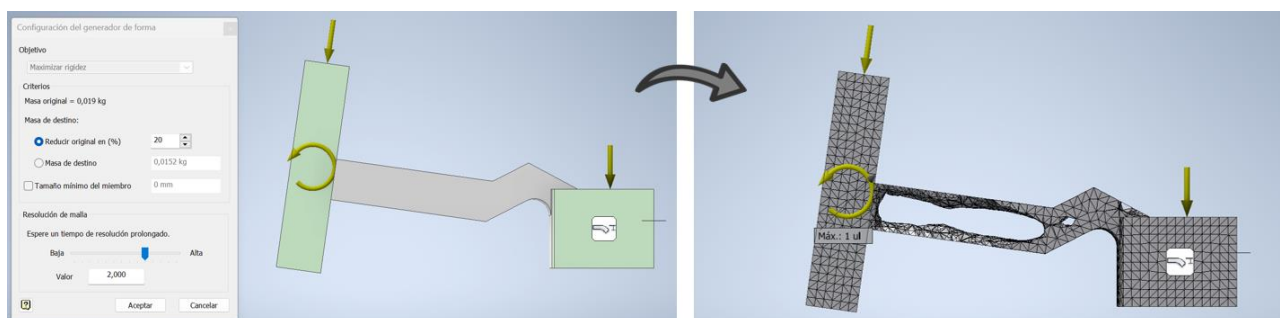


Figura 3-21 Proceso de generación de forma mediante diseño generativo

El resultado de la generación de forma es un modelo eficiente pero poco atractivo para el cliente. Para solventarlo, se modeló un diseño intermedio entre el brazo original y la forma generada. Este proceso se llevó a cabo solapando ambos modelos mediante la herramienta *Subir de nivel la forma y*, posteriormente, modelando sobre ellos para dar lugar a un diseño final. Gracias a esta herramienta, se

obtuvo como resultado es una estructura optimizada de manera rápida y que combina, a su vez, un diseño atractivo y personalizado como se muestra en la Figura 3-22.

Este producto ha sido sometido a un estudio FEM con los parámetros correspondientes para comprobar su comportamiento. Los resultados y conclusiones de este estudio se desarrollan en el Apartado 4.3.1.3.

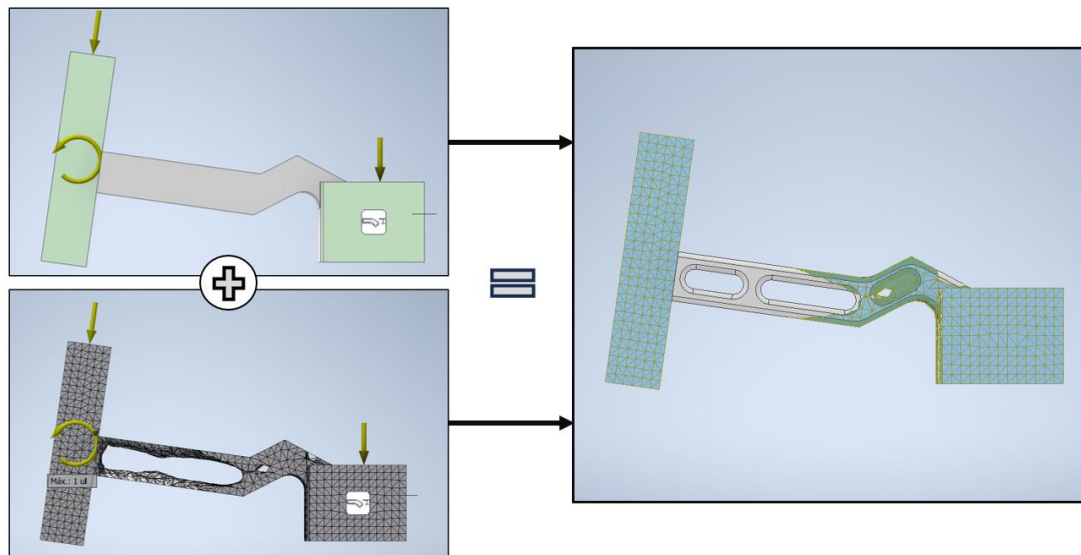


Figura 3-22 Diseño final del brazo basado en el diseño generativo

Adicionalmente, en el Apartado 4.3.2, se ponen en comparación los modelos finales para el brazo que sostiene al actuador. Se han analizado los brazos obtenidos por optimización topológica y por diseño generativo y, en base a los resultados de sus estudios, se tomaron unas decisiones al respecto.

3.5.1 Maqueta Digital del Actuador.

Para la visualización del conjunto total se vio conveniente elaborar la maqueta digital del dispositivo de respuesta háptica. Desde el modelo físico del actuador, se tomaron las medidas pertinentes para su recreación dentro de Autodesk Inventor. El actuador se dividió en una serie de piezas que se consideraron como principales, sin contar con elementos internos no visibles, pues el propósito era simplemente la obtención del gemelo sólido. Las piezas individuales, que se visualizan en la Figura 3-23, fueron las siguientes:

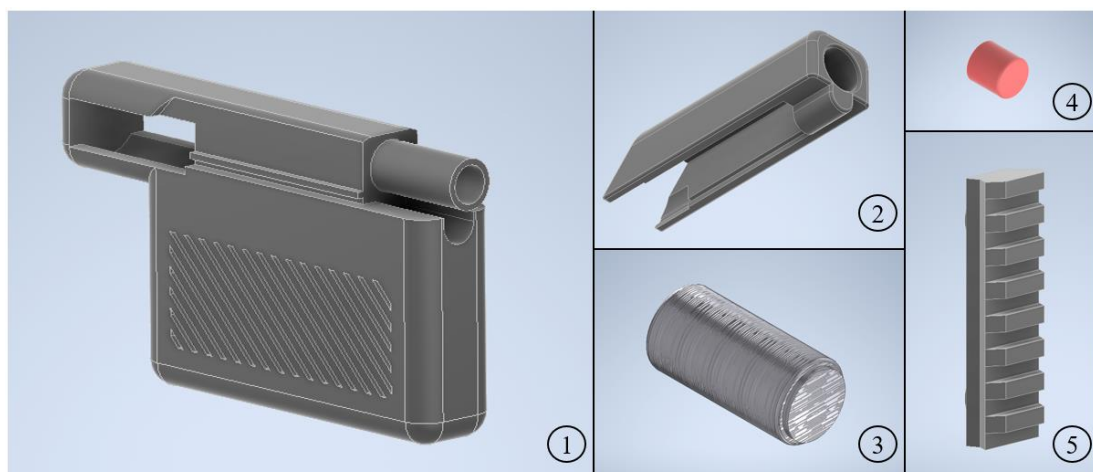


Figura 3-23 Piezas modeladas para realizar el ensamblaje del actuador

- 1) Cuerpo principal. Es la pieza sólida que forma el grueso del actuador. Sobre esta pieza se van a unir los demás elementos para formar el conjunto. Incluye las cavidades correspondientes para la pieza metálica, el botón y el acople con el arma. También presenta un mecanismo corredizo para el pistolete y el falso cañón del arma. En los laterales de la pieza se ha extruido el relieve real que tiene dibujado el actuador.
- 2) Pistolete. Es la pieza corrediza que se desliza sobre el cuerpo principal cuando se acciona el dispositivo. Complementando con la pieza principal, incluye el mecanismo corredizo inverso y la cavidad que abre paso para el cañón del arma.
- 3) Pieza metálica. Es la pieza que se inserta en la parte posterior del actuador. Se le dio la textura de acero inoxidable y un acabado mecanizado como si fuera elaborada en un torno al igual que la pieza real.
- 4) Botón. De color rojo y situado en la parte inferior del cuerpo principal.
- 5) Acople. Esta es una pieza especialmente sensible, pues es la que encaja con el dispositivo de arma corta. Sus medidas fueron tomadas cuidadosamente con un pie de rey electrónico de 0,1 mm de precisión. Estas medidas fueron usadas colateralmente para el modelado del mecanismo de agarre del prototipo de arma corta.



Figura 3-24 Maqueta digital del actuador

3.5.2 Mecanismo de agarre para el actuador

Teniendo ya diseñado cual será el brazo de sujeción para el actuador, fue momento de diseñar el propio mecanismo que lo abrace. Este mecanismo tenía que asegurar un agarre firme y consistente del dispositivo para evitar movimientos y que el actuador y el dispositivo de arma corta se movieran como un único bloque. Es importante destacar que su proceso de diseño se basó en la ingeniería inversa, es decir,

se va a partir de un producto ya existente para extraer la información necesaria y obtener la solución a este problema. Para ello se disponía del dispositivo de respuesta háptica de *ProTube VR* y, sobre este, se ha levantado un estudio de posibilidades y medidas. Concretamente se analizó la pieza que sirve de conexión con el actuador para crear una figura inversa que la abraze.

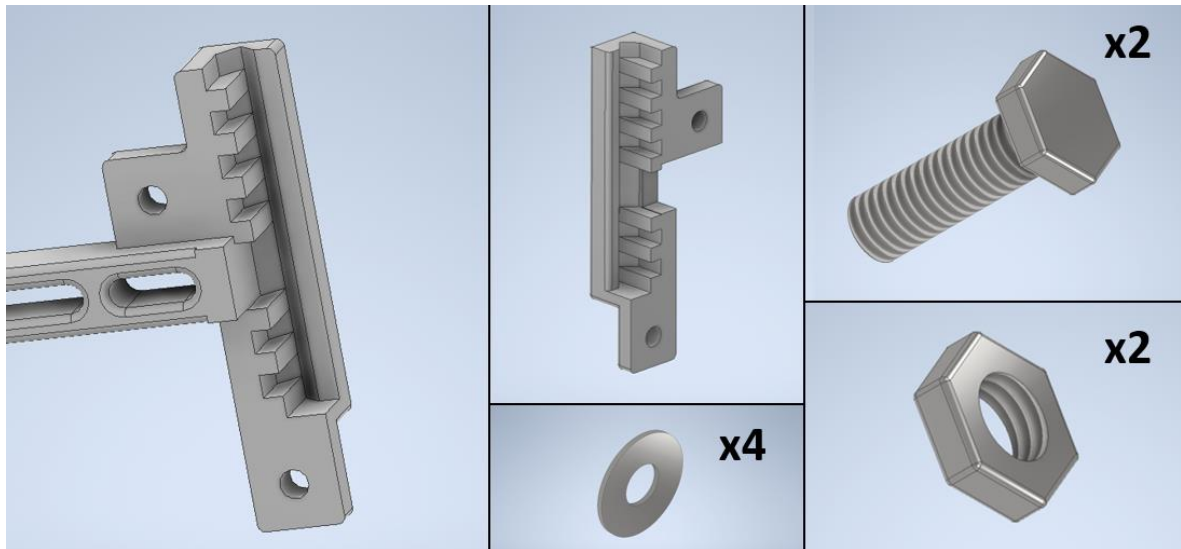


Figura 3-25 Componentes del mecanismo de agarre del actuador

Con esta información y basándose en la creatividad de diseño del alumno, se ideó el mecanismo, que consistirá en dos partes. Una parte va a estar fusionada en el conjunto de empuñadura y brazo y la otra parte va a ser una pieza separada que se complemente con la primera. El diseño permite la introducción del actuador de forma horizontal en el acople de la empuñadura para que, posteriormente, la segunda pieza abraze el otro lado. La unión de las dos partes y el agarre firme se consigue con dos tornillos hexagonales y sus respectivas tuercas que aprietan el conjunto con el actuador. Estos tornillos son de tipo M4 x 14 mm y las tuercas son M4 correspondientemente. Las tuercas no tienen que ser estrictamente hexagonales, pueden ser también ciegas, de mariposa o de cabeza moleteada. Se incluyen también cuatro arandelas para el contacto con la pieza y evitar su desgaste. Las piezas de este mecanismo se pueden visualizar en la Figura 3-25 y el funcionamiento en la Figura 3-26.

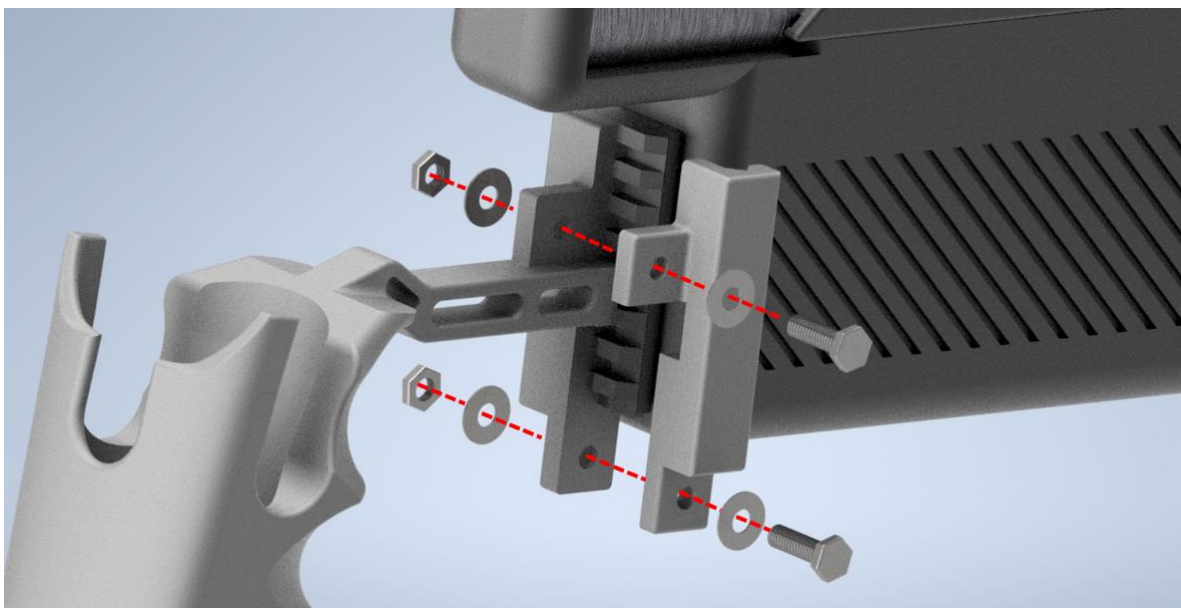


Figura 3-26 Visualización del funcionamiento del mecanismo de agarre del actuador

3.5.3 Mejoras y Prototipo Final.

Finalizado el sistema de agarre del actuador, el prototipo inicial con todas sus partes estuvo listo para ser impreso y probado. La finalidad de esta prueba fue analizar los aspectos positivos a mantener para el prototipo final y detectar aquellos detalles que debieran ser mejorados. El proceso de impresión y los resultados obtenidos de la prueba están ampliamente desarrollados en el Apartado 4.4. Las conclusiones que se extrajeron fueron las siguientes: la ergonomía y el sistema de anclaje del actuador fueron validados positivamente en el prototipo, por lo que se adoptarán para el posterior prototipo final; sin embargo, el modelo de brazo que sostiene el actuador debe ser reforzado.



Figura 3-27 Prototipo inicial consolidado

De las conclusiones extraídas tras el prototipo inicial, se decidió modelar el siguiente prototipo que mejorara sus puntos débiles. La empuñadura permaneció idéntica y se tomó como punto de partida para esta nueva pieza. En este nuevo modelo se quiso reubicar la posición del actuador respecto del mando y poder, así, inclinar más el mando y lograr una mayor comodidad al simular el disparo. Se tuvieron que editar las medidas para idealizar el nuevo brazo como se muestra en la Figura 3-28.

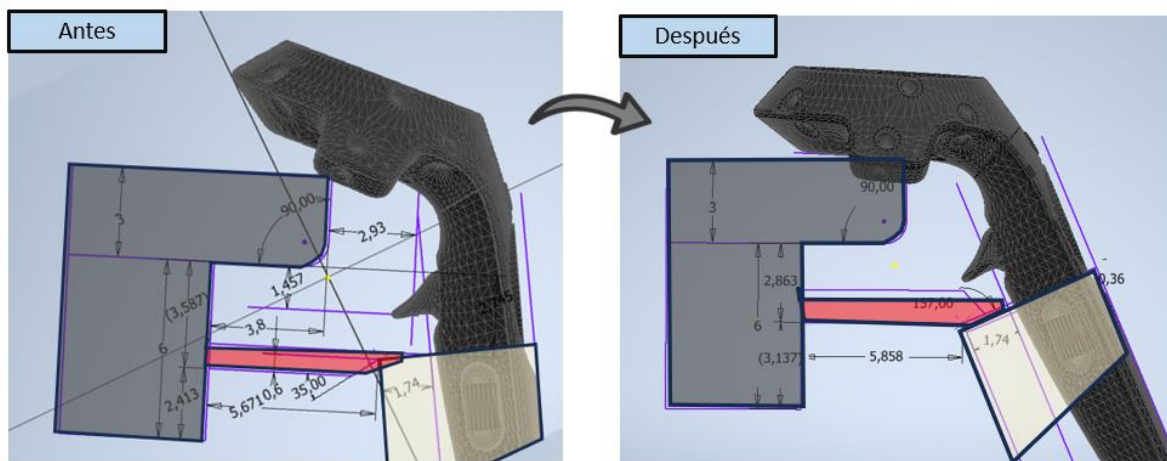


Figura 3-28 Toma de medidas para idealizar el brazo mejorado

De las lecciones aprendidas en el modelo anterior, esta vez se optó directamente por el proceso de diseño generativo de Autodesk Inventor. De esta forma, se extruyó un brazo suficientemente robusto en base a las medidas tomadas en el paso anterior. El brazo fue analizado con la opción *Generación de formas* y se aplicó el entorno de cargas correspondiente. Se configuró para obtener un brazo resultante que redujera la masa inicial en un 60% con un nivel de precisión alto. El resultado fue superpuesto sobre la figura original para modelar un diseño final como se muestra en la Figura 3-29. Al igual que la primera vez, este mecanismo de modelado destacó por su rapidez y por la personalización final de la pieza.

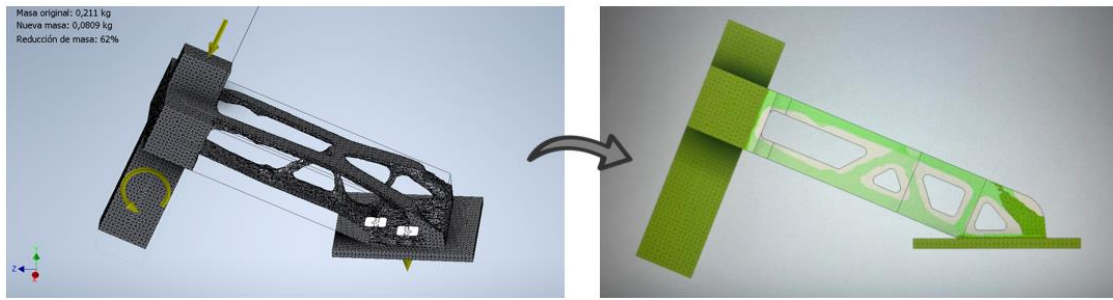


Figura 3-29 Modelado del brazo mejorado mediante diseño generativo

Este brazo se diseñó para ser eficiente, pero sin extremar la reducción de material para evitar cometer el fallo del anterior prototipo. Este modelo también tenía el propósito de mejorar su apariencia para hacerlo más atractivo al usuario. Se buscó que la pieza se mostrara como una unidad, fusionando las distintas operaciones del proceso y que hubiera una transición suave entre la empuñadura y el brazo. Una vez unificado el cuerpo de la empuñadura con el nuevo brazo reforzado, se añadió un sistema de anclaje muy similar al anterior, pero adaptado a la actual disposición de los elementos como se refleja en la Figura 3-30. Finalmente, se obtuvo un conjunto que implementa los aspectos positivos del prototipo inicial y que depura aquellos que debían ser perfeccionados, todo ello envuelto en una estética más conseguida. La Figura 3-30 muestra el resultado del ensamblaje digital consolidado de este nuevo prototipo.

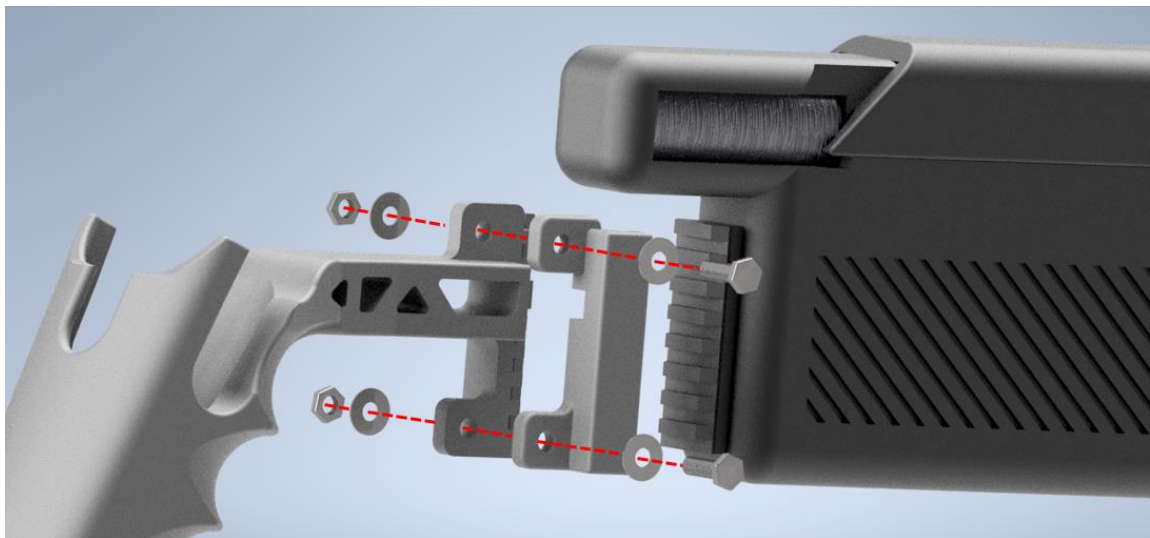


Figura 3-30 Sistema de anclaje del actuador en el prototipo final

3.6 Fabricación.

En este apartado se desarrollará en profundidad el proceso de fabricación mediante impresión 3D y todas las herramientas que implica. Entre las herramientas y tecnologías empleadas para llevar a cabo la impresión 3D se ha detallado el software empleado, el dispositivo impresor y el filamento con el que se han materializado las piezas. Finalmente, se muestra el resultado final del ensamblaje físico con todas sus piezas.

3.6.1 Ultimaker Cura.

Para poder materializar las piezas del dispositivo de arma corta ha sido necesaria la ayuda de Ultimaker Cura. Este software permite la traducción de un modelo 3D digital en instrucciones específicas que pueda ejecutar una impresora 3D. Además, mediante una interfaz sencilla de uso como

se muestra en la Figura 3-31, el software facilita la impresión personalizando sus parámetros. Algunas de las órdenes concretas que se pueden personalizar dentro del software son el porcentaje de relleno, estructuras de apoyo o el espesor de las paredes. Ultimaker Cura trabaja con archivos de extensión STL (acrónimo del término inglés *Stereolithography*), que transforman la superficie tridimensional de un objeto en una malla compuesta por triángulos conectados entre sí. Para el desarrollo del trabajo, el software Autodesk Inventor ha permitido transformar todas las piezas modeladas, que corresponden a archivos IPT (que es el formato de archivo Inventor Part nativo de Autodesk), en sus correspondientes archivos STL. Una vez exportados estos archivos a Ultimaker Cura, se pudo configurar los parámetros de impresión para, posteriormente, proceder a su impresión.

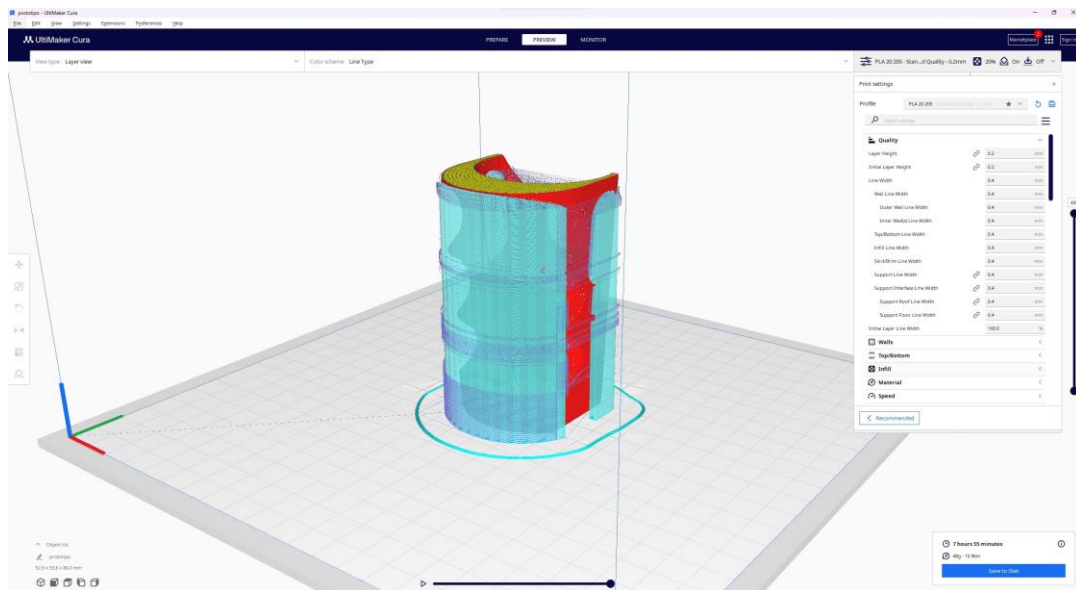


Figura 3-31 Interfaz de Ultimaker Cura

3.6.1 Materiales de Impresión.

En la fase de fabricación mediante del dispositivo se hizo la elección de materiales que se emplearon para su producción. El método de fabricación que fue empleado es la impresión 3D, concretamente la impresión por *Fused Deposition Modeling* (FDM), explicada ampliamente en el Apartado 2.6.6. Para la impresión basada en FDM pueden ser empleados una gran variedad de materiales, correctamente llamados filamentos 3D, según el tipo, textura, aplicación o calidad. Algunos de los filamentos más utilizados en la fabricación aditiva son el ABS (acrilonitrilo butadieno estireno), el nailon, los elastómeros termoplásticos o el PLA (ácido poliláctico). Este último es de especial relevancia, pues va a ser el material con el que se imprima el modelo.

3.6.1.1 Ácido Poliláctico.

El ácido poliláctico o poliácido láctico (PLA) se trata del material más utilizado a nivel mundial para la materialización de productos a través de la impresión 3D por FDM. Sus características más destacadas son su gran resistencia a la tracción y su buena calidad superficial. La producción del PLA es asequible, obteniéndose a partir de materias prima como el maíz y el trigo. Asimismo, un factor que lo sitúa por encima de otros filamentos es en su reducida huella ecológica, siendo un filamento reciclable y que no emite gases tóxicos durante su producción o tratamiento. El PLA también ofrece una gran facilidad de uso y un precio bastante económico, además de poder obtenerse en una gran variedad de colores. Otras características generales del filamento se pueden apreciar en la Tabla 3-1. Es por todo ello que se ha elegido el filamento PLA como material empleado para la fabricación del dispositivo de arma corta.

PLA

Dureza	Alta
Flexibilidad	Baja
Durabilidad	Media
Dificultad de uso	Baja
Temperatura de impresión	180°C – 230°C
Aislante eléctrico	Bueno
Contracción/Deformación	Mínima
Soluble	No

Tabla 3-1 Características generales del filamento PLA

Las especificaciones más técnicas del filamento, que se emplean a lo largo del desarrollo de este trabajo y para los estudios detallados del comportamiento del modelo, se encuentran detalladas en la Tabla 3-2. Estas propiedades han sido extraídas de los estudios realizados por la Universidad Jaime I [25] sobre las propiedades y limitaciones del ácido poliláctico y contrastado a su vez, por otras fuentes que validan los valores de sus propiedades.

Propiedad mecánica	Valor típico
Módulo de elasticidad a la tracción	2346,5 MPa
Límite elástico	55 MPa
Esfuerzo de tracción a la deformación	49,5 MPa
Esfuerzo de tracción a la rotura	45,6 MPa
Resistencia a la compresión	66 MPa
Alargamiento a la deformación	3,3 %
Alargamiento a la rotura	5,2 %
Resistencia a la flexión	103,0 MPa
Módulo de flexión	3150,0 MPa
Dureza	83 (Shore D)
Temperatura de fusión	145-160 °C
Peso específico	1,24 g/cm ³

Tabla 3-2 Características específicas del filamento PLA

3.6.2 Impresora 3D.

La impresora que se ha empleado para la materialización de las piezas de este Trabajo Fin de Grado ha sido la impresora *Creality Ender 3 V2*, mostrada en la Figura 3-32. Esta impresora 3D Open Source incorpora tensores de correa, alimentadores de los filamentos, un extrusor optimizado y muchas otras ventajas que la convierten en una de las impresoras más comercializadas en el mercado y que, adicionalmente, satisface todas las necesidades para el desarrollo de este trabajo. Su tipo de extrusión es por FDM, permite la impresión con filamento PLA y puede trabajar con el software Ultimaker Cura. Otras especificaciones más técnicas se pueden apreciar en la Tabla 3-3.

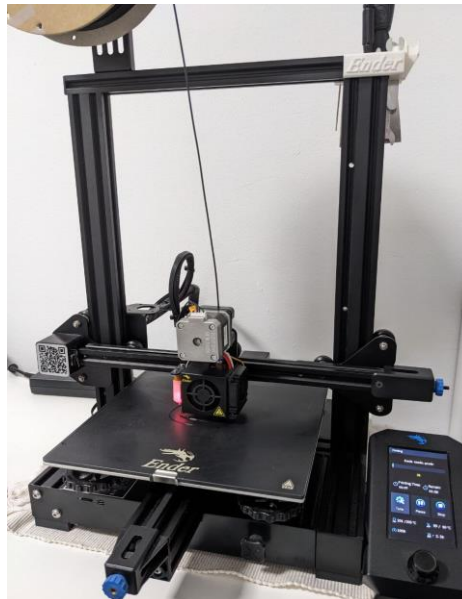


Figura 3-32 Impresora 3D Creality Ender 3 V2

Creality Ender 3 V2

Volumen de construcción	220 x 220 x 250 mm
Diámetro filamento	1,75 mm
Diámetro boquilla	0,4 mm
Espesor de capa	0,1 – 0,35 mm
Precisión	+/-0,1 mm
Temperatura máxima extrusor	255 °C
Temperatura máxima de cama	110 °C
Velocidad máxima de trayecto	180 mm/s
Volumen de la Impresora 3D	475 x 470 x 620 mm
Peso	8,6 kg

Tabla 3-3 Especificaciones técnicas de la impresora 3D Creality Ender 3 V2

3.6.3 Impresión del Prototipo Final.

En el momento que los resultados del estudio FEM fueron validados positivamente, se tomó la decisión de pasar a la fabricación del prototipo. Para la realización de esta última impresión, se tuvieron en cuenta todos los resultados y conclusiones obtenidos de las impresiones anteriores que se llevaron a cabo durante el desarrollo del trabajo.

Se ejecutaron varias impresiones de la pieza principal con diferentes configuraciones, la mayoría de ellas infructuosas. En primer lugar, se decidió realizar la impresión con el brazo paralelo a la base, y no la funda como en anteriores pruebas. El objetivo es tratar de mejorar las prestaciones mecánicas de la pieza. La fabricación por adición de capas afecta a las propiedades mecánicas de sus productos en base a la orientación de sus capas, siendo el eje z el más débil. En segundo lugar, se trató de utilizar, sin éxito, los soportes en árbol en lugar de los tradicionales. Estos soportes reducen la cantidad de material utilizado (y el tiempo de impresión) y mejoran el acabado en las zonas de contacto, pero son algo más frágiles y difíciles de utilizar. Las pruebas fueron las siguientes, todas ellas con el puente paralelo a la base, con variaciones en la orientación de la pieza, el tipo de soporte utilizado y la altura de capa:

- 1) Orientación invertida, con soportes en árbol y altura de capa de 0,12: resultado fallido. Los soportes fueron demasiado frágiles y no se generaron correctamente.

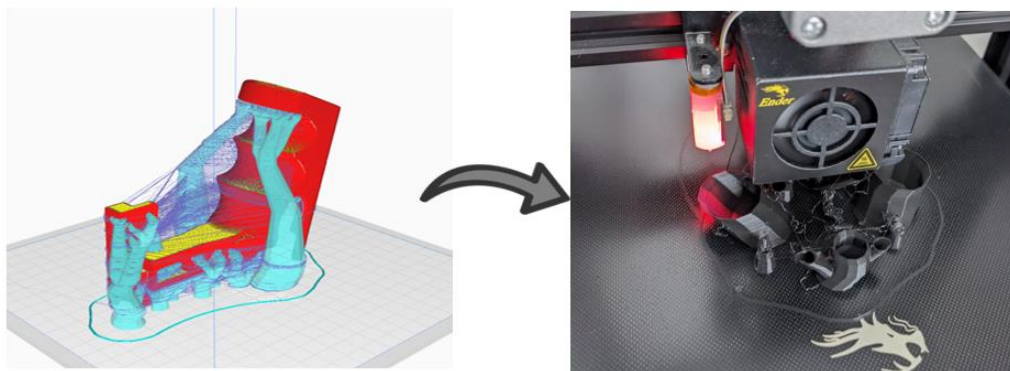


Figura 3-33 Primera impresión fallida del prototipo final

- 2) Orientación invertida, con soportes tradicionales y altura de capa 0,12: resultado fallido. Los puntos de inicio de la pieza en la zona de la funda eran demasiado pequeños y estaban situados únicamente sobre el soporte, sin contacto con la base, por lo que no se mantuvieron adheridos.

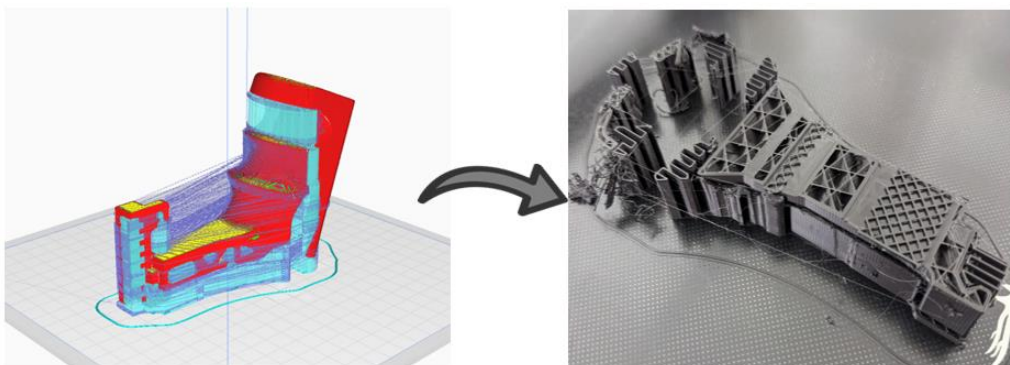


Figura 3-34 Segunda impresión fallida del prototipo final

- 3) Orientación vertical, con soportes en árbol y altura de capa 0,12: resultado fallido. De nuevo, los soportes eran demasiado frágiles y complejos y el punto de contacto de la pieza con la base era demasiado pequeño.

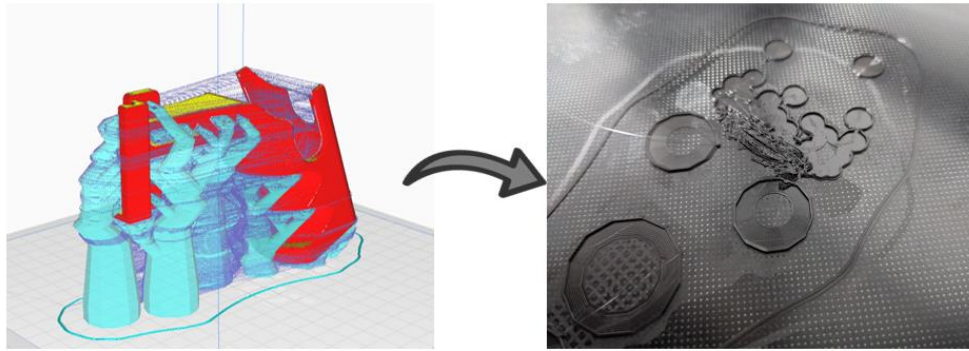


Figura 3-35 Tercera impresión fallida del prototipo final

- 4) Orientación vertical, con soportes tradicionales, y altura de capa 0,12: resultado fallido. Corte de luz durante la noche. La pieza requiere de mucho tiempo de impresión y, aunque se trató de continuar, la interrupción provocó una desviación visible en la pieza y las estructuras de soporte ya no estaban correctamente adheridas a la base.

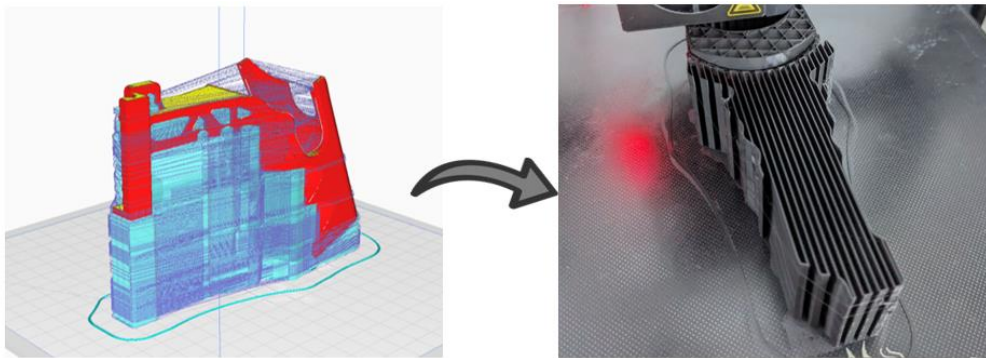


Figura 3-36 Cuarta impresión fallida del prototipo final

- 5) Orientación vertical, con soportes tradicionales y altura de capa 0.20: resultado exitoso. Se decidió aumentar la altura de capa para poder reducir el tiempo de impresión, ya que tampoco se apreciaba una diferencia visual significativa con las pruebas previas.

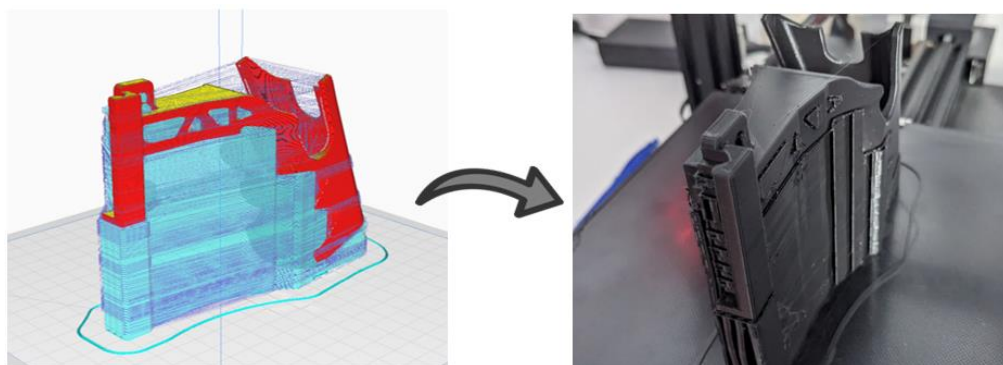


Figura 3-37 Impresión exitosa del prototipo final

A continuación, se imprimió la pieza auxiliar sin complicaciones. Se imprimió con su cara plana directamente apoyada en la base y se aplicaron las estructuras de apoyo correspondientes. Finalmente, las estructuras auxiliares de las dos piezas fueron retiradas fácilmente con las manos sin necesidad de herramientas y se limaron las pequeñas imperfecciones que dejan sobre las superficies que aguantan. Las piezas estaban entonces listas para proceder a su ensamblaje.

3.6.4 Ensamblaje Final.

A lo largo de todo el proceso de modelado, se fueron realizando múltiples impresiones para verificar los avances del proyecto, incluyendo un prototipo inicial. En este, el montaje fue validado muy positivamente por su facilidad y sencillez. Fue por ello que se implementó un mecanismo muy similar en el prototipo final. Del proceso de fabricación por impresión 3D se obtuvieron las dos piezas fundamentales que forman el conjunto del dispositivo de arma corta: la pieza principal, que incluye la empuñadura, el brazo y parte del anclaje; y la pieza auxiliar que complementa el mecanismo de anclaje del actuador junto con la primera.



Figura 3-38 Resultado final del ensamblaje del dispositivo de arma corta

El ensamblaje final destacó por su comodidad de ejecución. El dispositivo de respuesta háptica se inserta fácil e intuitivamente en la pieza principal. Posteriormente, se cierra el amarre con la pieza complementaria y se atornillan sus uniones mediante el uso de tornillos M4 (preferiblemente de longitud 14mm, pero pudiendo ser también de longitudes superiores) y sus respectivas tuercas M4. Es importante situar arandelas en los extremos de los tornillos y tuercas en su contacto con las piezas para soportar la carga de apriete y evitar dañar al prototipo. El resultado final se muestra en la Figura 3-38.

3.7 Pruebas de Campo.

Cuando el ensamblaje físico estuvo terminado y fue validado positivamente, se decidió proceder a testear su implementación en el simulador. La prueba consistió en llevar a cabo una simulación de realidad virtual para comprobar la experiencia de uso del prototipo de arma corta. Así, el entorno simulado que se escogió fue un campo de tiro. La finalidad era experimentar la movilidad y la respuesta del arma como ensamblaje durante una simulación de tiro.



Figura 3-39 Ejercicio de tiro simulado con el prototipo de arma corta

Para ello, se hizo uso del simulador de combate que se encuentra en el laboratorio de realidad virtual del Centro Universitario de la Defensa, en la Escuela Naval Militar de Marín. En él, se hizo uso del set completo de realidad virtual HTC Vive Pro, que incluye los mandos, los binoculares y los sensores fijos de movimiento; también se hizo uso del dispositivo de respuesta háptica de *ProTube VR*. Una vez arrancado el sistema, el primer paso fue la calibración completa de todos los elementos, incluyendo el enlace del actuador con el sistema. El programa que se ejecutó simula una experiencia de tiro en la galería de Figueirido, dentro de la base General Morillo del Ejército de Tierra, en la cual se puede realizar los ejercicios de tiro fundamentales para el adiestramiento profesional en el empleo de un arma corta. El desarrollo de la simulación se puede ver en la Figura 3-39. El ejercicio se pudo realizar sin ninguna complicación y permitió recoger los últimos resultados que validan el prototipo final. Estos resultados y sus conclusiones pertinentes se presentan en el Apartado 4.7.

3.8 Presupuesto.

Para cerrar el proceso de diseño, se calculó un presupuesto detallado de la producción de una sola unidad del dispositivo de arma corta. Este desglose va a tener en cuenta exclusivamente los costes del montaje de las piezas sin contar con el conjunto de realidad virtual HTC Vive Pro ni el módulo háptico de ProTube VR. Cabe destacar también que se van a despreciar los costes de mano de obra. Esto es debido a que el personal responsable del diseño y fabricación del prototipo ha sido el alumno, para el cual el desarrollo de su TFG entra dentro de su plan de estudios para terminar su formación en la Escuela Naval Militar. Adicionalmente, este trabajo ha estado tutorizado por dos directores, cuya participación en el proyecto ya viene remunerada en sus contratos con el centro de formación. En primer lugar, se analizaron los costes de material empleado. El coste medio del filamento PLA, el cual se ha empleado para el cálculo del coste de impresión de las piezas, es de 23,95 €/Kg. Por otra parte, el coste de los tornillos, tuercas y arandelas se fijó en base a su precio de compra en una ferretería de a pie. A continuación, la Tabla 3-4 muestra un desglose con los costes materiales de las piezas del ensamblaje.

Materiales de Impresión	Descripción	Uds.	Longitud (m)	Peso (g)	Coste (€)
	Pieza empuñadura	1	32,36	97	2,33
	Pieza anclaje	1	1,64	5	0,12
	Total impresión	2	34	102	2,45
Elementos de Unión	Descripción	Uds.	Tipo	Precio unitario (€)	Coste (€)
	Tornillo	2	M4 x 14 mm	0,15	0,30
	Tuerca	2	M4	0,08	0,16
	Arandela	4	M4	0,05	0,20
	Total uniones	8	-	0,28	0,56
Total	-	10	-	-	3,01

Tabla 3-4 Costes desglosados de material

En cuanto al coste energético, la impresión 3D requiere de largos tiempos de fabricación y grandes cantidades de energía consumidas, por lo que se trata de un factor relevante para el cálculo de los costes finales. Debido a que el coste de la luz ha tenido un valor muy fluctuante a lo largo de los años y meses (incluso a lo largo del propio día), su coste final se ha determinado a partir de su precio medio en los últimos cinco años. Así, el coste empleado para este presupuesto es de 122,24 €/MW. Se tiene en cuenta que la impresora 3D Creality Ender 3 V2, empleada para la fabricación de las piezas de PLA, tiene un consumo de energía de 0,35 kWh. La Tabla 3-5 expone los resultados del coste energético requerido.

Coste Energético	Descripción	Uds.	Tiempo de impresión	Coste (€)
	Pieza empuñadura	1	15 h 04 min	0,6448
	Pieza anclaje	1	56 min	0,0399
	Total	2	16 h 00 min	0,69

Tabla 3-5 Costes energéticos desglosados

Finalmente, tras unificar costes materiales y energéticos, despreciando los costes de mano de obra y diseño, el coste final de fabricación del prototipo final para el dispositivo de arma corta con respuesta háptica es de: **Tres euros con setenta céntimos (3,70 €)**.

4 RESULTADOS.

4.1 Descripción del apartado.

En este apartado se exponen y analizan en profundidad todos los resultados y las decisiones tomadas al respecto que se han extraído en cada paso del desarrollo del trabajo. Aquí se recogen todos los estudios estructurales y las validaciones de las pruebas parciales y finales a lo largo de la evolución del proyecto. Finalmente, se muestran los planos proyectivos del prototipo final.

4.2 Modelado Inicial.

4.2.1 Modelo de Funda.

Una vez terminado el modelo digital de la funda para el mando, fue preciso hacer una primera validación. Se quiso comprobar su adaptación en el cuerpo del mando antes de continuar con el proceso de modelado. Esta prueba inicial sirvió, a su vez, como una primera toma de contacto con el software Ultimaker Cura y para probar la configuración de los ajustes de impresión que consiguiera el mejor resultado.

Inicialmente, se transformó el diseño de la funda en Autodesk Inventor, que es un archivo IPT, en un archivo STL para ser trasladado a Ultimaker Cura. Dentro de este software, se seleccionó el archivo de la pieza y se dispuso de la mejor manera posible, en este caso en vertical y con la cara mayor posada en el base. A continuación, se seleccionaron los ajustes de impresión más apropiados para esta primera prueba. Se estableció una resolución media, por lo que se eligió una altura de capa de capa y de capa inicial de 0,2; un relleno del 60% para obtener una pieza parcialmente sólida, reduciendo así el tiempo y el material de impresión; y se aplicaron dos líneas de pared para la superficie. La impresión de esta pieza no necesitó generar ninguna estructura auxiliar de soporte ni adherencia de la plataforma para la pieza. Esta primera impresión, con esta configuración de parámetros, se pudo realizar de manera rápida.

En la Figura 4-1 se aprecia los resultados de esta impresión, con un primer modelo defectuoso y un segundo modelo exitoso. La causa del fallo de impresión del primer intento fue el hecho de no haber puesto laca en la base. La falta de laca puede dar lugar al *warping* o despegado de la primera capa, como es lo que ha sucedido en este caso, y su exceso puede producir atascos en el extrusor. Debido a este efecto, la primera pieza se desplazó de su posición inicial y el extrusor comenzó a depositar capas fuera de la pieza. El segundo intento se llevó a cabo con éxito aplicando una cantidad adecuada de laca sobre la base. De la primera impresión de la prueba inicial del proyecto se sacó esta lección aprendida, que se aplicó en las siguientes impresiones evitando repetir fallos.

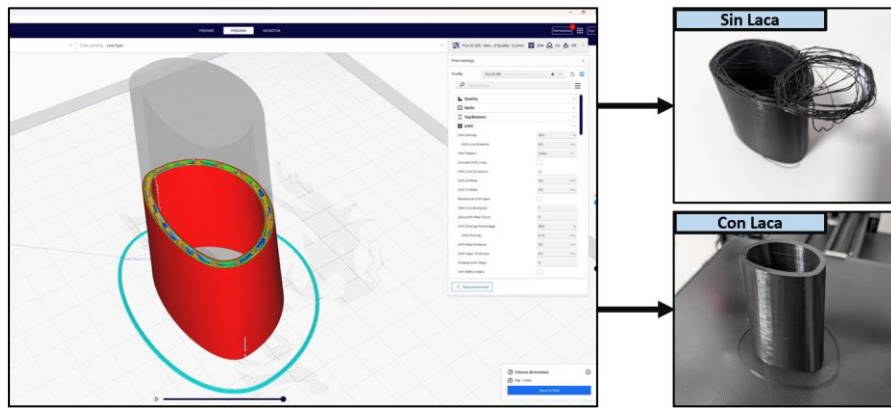


Figura 4-1 Intentos de impresión de la funda para el mando

Sin embargo, la calidad superficial de la pieza presentó desperfectos, en concreto mostraba la huella del extrusor al cambiar de capa siempre en el mismo punto como se muestra en la Figura 4-2. Esto se debe a que el parámetro z-seam no se puso en modo aleatorio para camuflar estas cicatrices. Este desperfecto fue corregido en las posteriores impresiones.

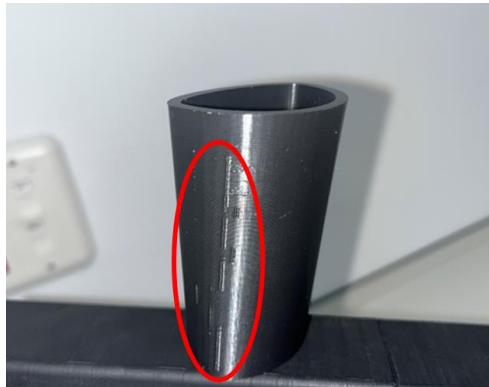


Figura 4-2 Defectos superficiales debido a la impresión por adición de capas

En cuanto a la adaptación de la funda con el dispositivo, el modelo impreso resultó encajar perfectamente con la geometría del cuerpo del mando. Su agarre es firme y no permite oscilaciones entre los dos objetos. Además, el mando permite ser insertado y retirado sin mucho esfuerzo. Como resultado de esta prueba, se validó el modelo inicial de funda para el mando y los parámetros de impresión para mejorar la calidad superficial de las siguientes piezas. Tras esta validación, se tomó la decisión de seguir con el modelado de la empuñadura trabajando sobre este diseño de funda.



Figura 4-3 Primera prueba del modelo de funda para el mando

4.2.2 Resultado del Escaneo 3D.

En este apartado se desarrollan los resultados del proceso de escaneo 3D del molde de arcilla y las decisiones tomadas al respecto para continuar con el proceso de modelado. Los factores más destacables del escaneo 3D han sido la sencillez de uso y la fácil disponibilidad de las herramientas para llevarlo a cabo. No son necesarios escáneres LIDAR profesionales de alto costo ni softwares de pago o de difícil acceso para un escaneo de estas características. Simplemente fueron necesarios un dispositivo móvil que implementara el escáner y el software gratuito y de fácil acceso de *Scaniverse*. El proceso también ha sido marcado por la rapidez y por la precisión de sus resultados, siendo perfectamente compatibles con los softwares de diseño como Autodesk Inventor.

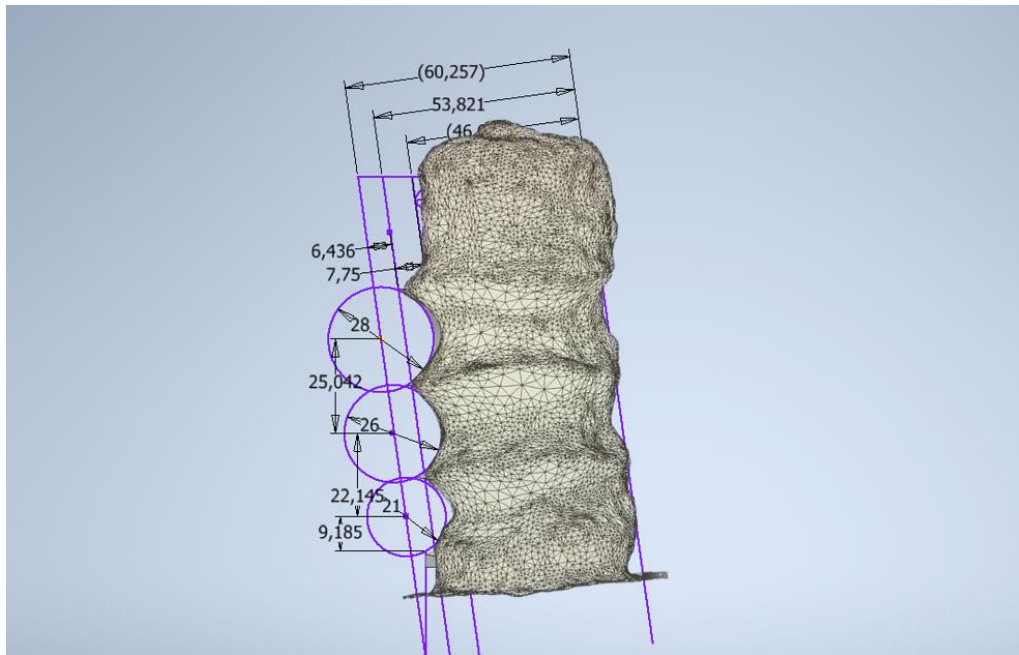


Figura 4-4 Toma de medidas sobre el molde digital para adaptar la ergonomía

Por otra parte, el modelado de la empuñadura a partir de la nube de puntos del molde de arcilla fue un proceso bastante complicado. A lo largo de este método de diseño, se llegó a la conclusión de que la creación de una nueva pieza que se adaptase al escaneo no era efectiva para el resultado que se buscaba. Esto era debido a la complejidad de la superficie del molde y el elevado número de acciones para modelar la pieza. Finalmente, se tomó la decisión de hacer una toma de medidas sobre el molde digital (como se aprecia en la Figura 4-4) y comenzar una pieza nueva. Partiendo de estas medidas, junto con las posteriores pruebas de los modelos impresos de empuñadura, se logró obtener la máxima ergonomía.

4.2.3 Pruebas y Validaciones de la Empuñadura.

Al igual que en la primera prueba, se quiso hacer una validación del diseño detallado de empuñadura antes de continuar con el proceso de modelado. Es por ello que se imprimió un prototipo de la empuñadura para poner a prueba los dos aspectos en los que se había estado trabajando: la ergonomía y una adaptación del mando más detallada. Similar a la primera impresión, esta prueba también ha servido para comprobar qué parámetros de impresión 3D son los más adecuados para obtener un mejor resultado en calidad.

A diferencia del modelo de funda, este prototipo fue impreso modificando el parámetro z-seam para que fuera aleatorio y no fueran visibles las costuras en la superficie de la pieza debido a la fabricación por capas. Por otra parte, esta pieza sí requería de estructuras de soporte para su fabricación. Sin

embargo, se redujo la altura de capa a 0,12 para prescindir de ellas. Esto es debido a que, al reducir este valor, se aprovecha la menor distancia entre capas para eliminar los soportes, con lo que se consigue una mayor calidad en prácticamente el mismo tiempo de impresión. El porcentaje de relleno se ajustó a al 40%. El resto de parámetros de configuración para la impresión se conservaron los de la prueba anterior y también se aplicó laca en la base para evitar desperfectos. El tiempo final de impresión de este primer prototipo es de 8 horas, empleando 32g de filamento PLA. Este proceso queda reflejado en la Figura 4-5.

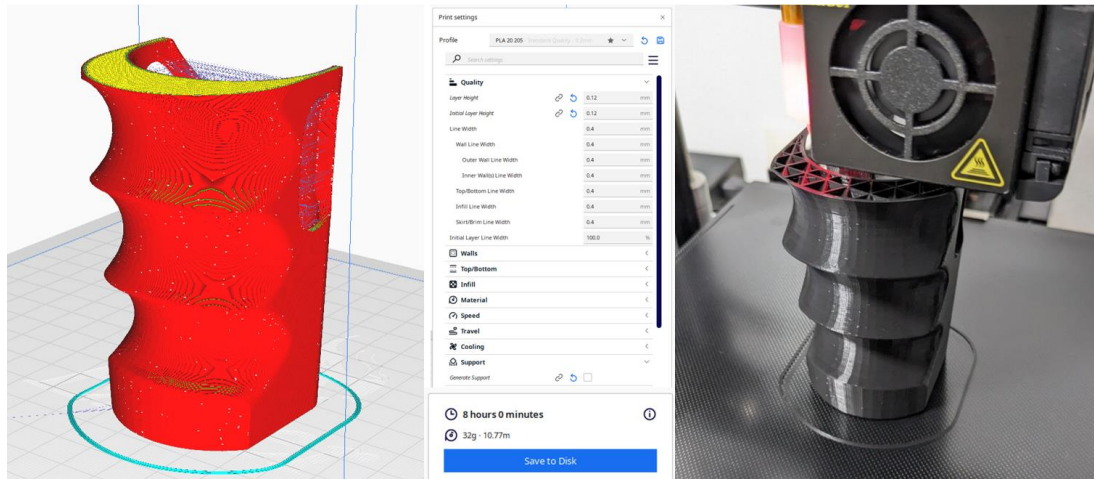


Figura 4-5 Proceso de impresión 3D del prototipo de la empuñadura

Se comprobó que el resultado de esta impresión fue notablemente bueno y la calidad superficial de la pieza es destacable. Gracias a esto, los parámetros empleados posteriormente en las siguientes piezas de impresión 3D serán similares a los que se han configurado para esta prueba. En cuanto al adapte del mando con la empuñadura resultó ser también excepcional. Su sujeción es fija, sin movimientos del mando dentro de su cavidad, y a la altura deseada para dejar el gatillo al alcance del dedo índice con comodidad. Además, el mando se puede insertar y extraer del prototipo con facilidad, pero también aguanta perfectamente el mando sujeto durante una simulación sin deslizamientos ni caídas. Similarmente, la ergonomía es otro factor que se alcanzó con éxito. Múltiples personas que han podido probar el dispositivo destacan su comodidad, pero añaden posibles mejoras. Así, esta primera prueba permitió detectar pequeños detalles que se pueden mejorar para maximizar la ergonomía.



Figura 4-6 Prueba ergonomía e implementación con el mando

Concluyendo, a raíz de esta prueba se sacaron varias conclusiones favorables y algún aspecto a mejorar. Por un lado, ha destacado la calidad superficial de la pieza gracias a establecer un valor z-seam aleatorio, evitando marcar en el acabado. Se han validado también dos aspectos de la empuñadura: la adaptación más detallada del mando con la pieza, incluyendo las cavidades para los respectivos botones y su disposición respecto al gatillo; y la ergonomía, que se adapta perfectamente a la palma de la mano. Por otro lado, fueron detectados dos detalles que reducían la comodidad del uso de la empuñadura. En primer lugar, la parte superior de los orificios de los botones laterales interfería con el dedo índice para llegar al gatillo cómodamente. Como solución, se eliminó dicha parte y se redujo la superficie superior de la empuñadura para dar más libertad de movimiento al dedo índice. En segundo lugar, el dedo meñique podía resbalar en ciertas ocasiones por debajo de su cavidad, por lo que se añadió una pequeña superficie que lo sostiene en su sitio. Estas mejoras se implementaron en el modelo como se muestra en la Figura 4-7.

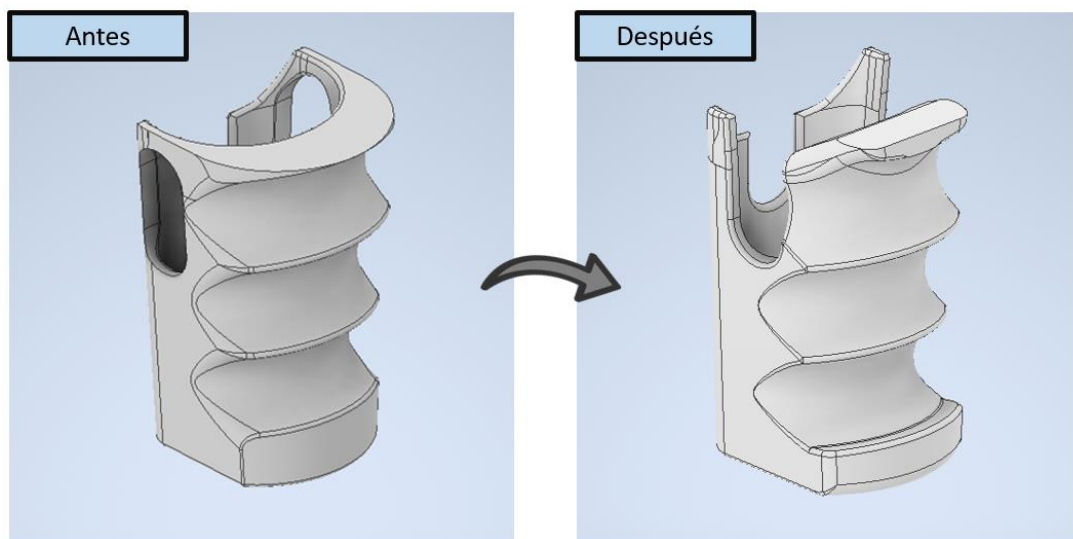


Figura 4-7 Proceso de mejora en la ergonomía de la empuñadura después de su prueba

4.3 Modelado Detallado.

4.3.1 Estudios y Pruebas del Brazo.

En este apartado se desarrollan los resultados y conclusiones de las diferentes alternativas que se han propuesto para el brazo del arma que soporte la acción del actuador. Inicialmente, se expone en profundidad el concepto de coeficiente de seguridad y como se va aplicar para obtener el mejor resultado en el dispositivo de arma corta. A continuación, se analizarán los modelos evolutivos de optimización topológica y el diseño generativo en base sus estudios FEM. Finalmente, se comparan las soluciones propuestas de cada proceso. La finalidad de esta comparación permite identificar qué proceso es más idóneo para las necesidades de este problema y que modelo es más conveniente de implementar en los prototipos que se desarrollen.

4.3.1.1 Coeficiente de seguridad.

El término de coeficiente de seguridad es un concepto fundamental en la ingeniería moderna y, por consecuente, es detenidamente analizado en este proyecto. El término cuantifica la capacidad en la que una estructura es capaz de soportar las condiciones de carga previstas para su uso. Su cálculo se basa en la relación entre la carga máxima que puede soportar un sistema previo a la ruptura o límite elástico con la carga máxima esperada durante su uso. Que la estructura diseñada tenga un coeficiente de seguridad superior a uno es una necesidad imprescindible que deben alcanzar los ingenieros.

El coeficiente de seguridad puede diferir enormemente entre unas estructuras y otras en base a su aplicación o especificaciones propias. Su determinación más técnica y profesional se basa en el método de Pugsley, aplicado en el ámbito de la arquitectura, por ejemplo. Este modelo establece un coeficiente de seguridad basándose en unas características que involucran al sistema: la calidad de los materiales, el control sobre las cargas aplicadas y la peligrosidad para el personal y el impacto económico que supondrían su colapso.

Sin embargo, este cálculo no es aplicable a este trabajo, pues depende sensitivamente de una incertidumbre. La validación estructural del modelo de brazo que se aplique al prototipo final se basa en una simulación aproximada a la realidad, pero existen factores que difieren entre estas dos realidades. De esta forma, aparecen una serie de causas principales que alimentan esta incertidumbre y que llevan a la necesidad de proveerse de un coeficiente de seguridad más amplio:

- La inexactitud del uso que se le dará al dispositivo. La finalidad del dispositivo de arma corta es conocida, tratándose del adiestramiento militar en un entorno de realidad extendida. Es por ello que el uso esperado sea el propio de un soldado portando, apuntando y disparando con un arma corta. A pesar de este conocimiento, existen situaciones límites en las que un usuario pueda salirse del uso normal del dispositivo y poner en compromiso la resistencia de las piezas. Algún ejemplo de estas situaciones sería una fuerte aceleración del brazo, una caída al suelo del dispositivo o, incluso, un impacto contra otro objeto. Estas situaciones son impredecibles y difícilmente calculables, agravando la incertidumbre y solicitando un mayor coeficiente de seguridad.
- Aumentar la sensación de seguridad del cliente. El cliente no se conforma con que su dispositivo sea suficientemente resistente a las cargas que se le apliquen si no es capaz de transmitir esa seguridad. De ser así, el cliente recaería en la desconfianza en el producto. Sin duda este factor es considerado como imprescindible y se ha tenido en cuenta a lo largo de todo el proceso de desarrollo del dispositivo.
- Diferencias entre el modelo digital y su resultado impreso. Los estudios de comportamiento que a continuación se exponen tienen en consideración una serie de cargas lineales que se aplican sobre un cuerpo completamente sólido y homogéneo. La realidad es que el producto de la impresión 3D es un cuerpo con un porcentaje de reducción de material construido por capas, que puede dar lugar a desperfectos entre estas. Es por ello que también hay que dar un extra de margen de seguridad a estas piezas.

Debido a todos estos factores es difícil de calcular o estimar un coeficiente de seguridad específico mínimo que deba de cumplir el modelo del brazo para el dispositivo de arma corta y, así, satisfacer las necesidades de sus usuarios. En los análisis de optimización del brazo se ha buscado continuamente alcanzar el coeficiente de seguridad máximo aplicando también una reducción adecuada de material.

4.3.1.2 Análisis de la Optimización Topológica.

Como se ha explicado en el Apartado 3.5.2.1, la optimización topológica consiste en mejorar un diseño preexistente para maximizar su eficacia. Para lograr este objetivo, se ha partido de un brazo inicial que ha sido sometido a un estudio FEM para analizar sus puntos débiles y mejorar su diseño. Este proceso es reiterativo hasta alcanzar un modelo que maximice su resistencia. Los estudios simulan el esfuerzo real que ha de soportar el brazo para aguantar la fuerza ejercida por el actuador. A continuación, se exponen los resultados y conclusiones de este proceso de optimización. En primer lugar, se estudió el comportamiento de un brazo genérico y sencillo de 10 mm de ancho. Esta prueba inicial tenía la finalidad de detectar los puntos más críticos, que debían ser reforzados prioritariamente.

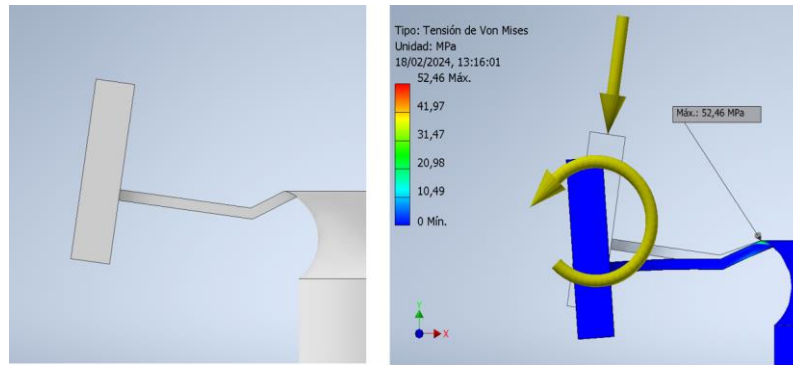


Figura 4-8 Primer diseño del brazo del soporte sometido a un estudio FEM

Como se aprecia en la Figura 4-8, el punto de esfuerzo máximo es de 52,46 MPa, muy próximo al límite elástico del filamento PLA (55 MPa), lo que deja un coeficiente de seguridad ínfimamente superior a 1. El desplazamiento que sufre es también significativo. Se observó que el punto crítico de la estructura se encontraba en el extremo que une con la empuñadura. Para el segundo modelo, se reforzó este punto crítico y se decidió suavizar con dos empalmes las caras superior e inferior del brazo con lo que sería el cuerpo de la empuñadura. Así, se eliminaron las aristas pronunciadas y se aumentó el área de la superficie más susceptible de alcanzar la rotura.

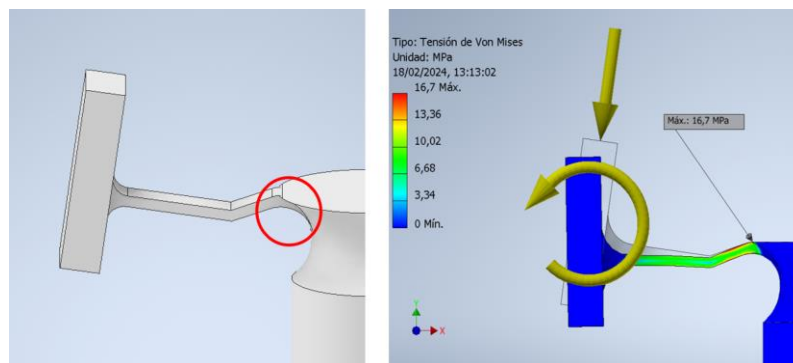


Figura 4-9 Segundo diseño del brazo del soporte sometido a un estudio FEM

El resultado del segundo modelo se muestra en la Figura 4-9. Destacó que el punto de esfuerzo máximo disminuyó su valor notablemente hasta 16,7 MPa desde los 52,46 MPa que soportaba anteriormente. Este modelo tiene un coeficiente de seguridad de 3,2 que ofrece un margen superior hasta alcanzar la rotura. Sin embargo, el desplazamiento que sufre este modelo sigue siendo un factor preocupante. Tomando como referencia el segundo modelo, se decidió duplicar el ancho del brazo a 20 mm.

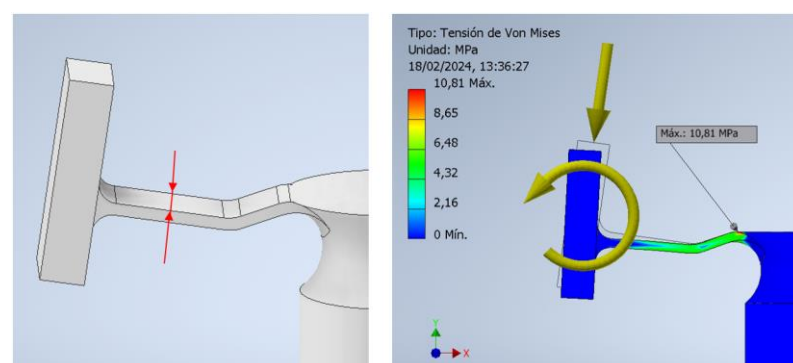


Figura 4-10 Tercer diseño del brazo del soporte sometido a un estudio FEM

Se puede comprobar en la Figura 4-10 que tanto el desplazamiento como el esfuerzo máximo disminuyeron su valor respecto del modelo de 10 mm de ancho. Aún así, este diseño no optimiza al máximo el material para lograr una estructura resistente. Para el siguiente modelo se tomó como referencia una viga en T. Estas vigas destacan por su diseño que maximiza su resistencia a la flexión respecto a su sección. Así, sobre el brazo de ancho 10 mm, se añadió un fino nervio de 5 mm de alto y 3 mm de ancho a lo largo de todo el brazo. También se ensanchó el extremo del brazo que une con el cuerpo de la empuñadura. Este modelo consigue minimizar el esfuerzo distribuido por todo el brazo y su valor máximo se reduce hasta 9,95 MPa como se muestra en la Figura 4-11. Su coeficiente de seguridad es de 5,53, que supera el de los diseños anteriores. Su mayor ventaja sobre el modelo anterior es el ahorro de material y un desplazamiento casi nulo. Esta configuración es ideal para las necesidades de este problema. Posteriormente, aunque se trató de buscar otros perfiles que mejoraran al anterior, no fue posible encontrar uno que superara su eficiencia.

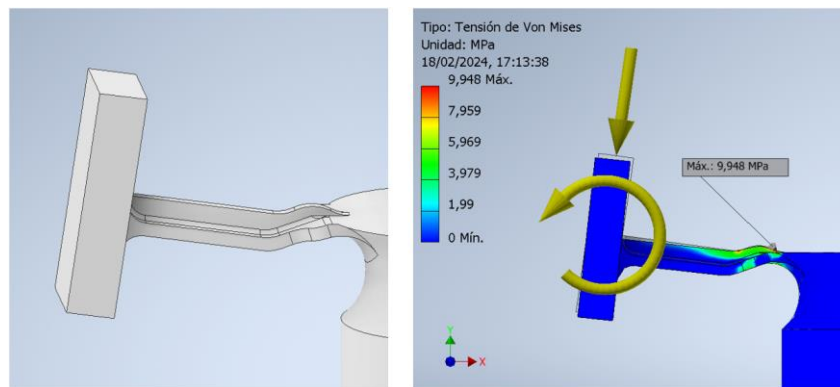


Figura 4-11 Diseño final del brazo del soporte sometido a un estudio FEM

4.3.1.3 Análisis del Diseño Generativo.

Por otra parte, el diseño generativo ofrece otra alternativa a la optimización topológica. Así, en el Apartado 3.5.2.2 se describe el proceso de generación de forma mediante la herramienta de diseño generativo en Autodesk Inventor. Una vez finalizado el diseño derivado de solapar la forma generada con el modelo original, se procedió a realizar un estudio de sus características en un entorno simulado. Este modelo fue sometido a un estudio FEM, idéntico al que se sometieron los diseños de la optimización topológica, para comprobar su comportamiento bajo el esfuerzo real ejercido por la acción del actuador.

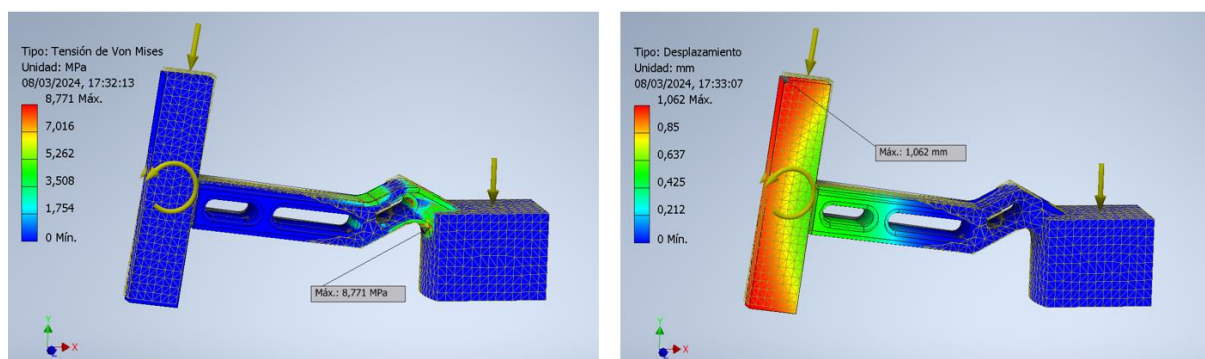


Figura 4-12 Modelo de diseño generativo sometido a estudio FEM

Finalmente, se obtuvo un esfuerzo máximo de 8,78 MPa, lo que deja un coeficiente de seguridad de 6,25, y un desplazamiento casi nulo. Los resultados fueron francamente buenos. En conclusión, el proceso de generación de formas en Autodesk Inventor ha destacado por su facilidad de uso y por su rapidez para el modelado de formas eficientes y específicas destinadas a dar solución a una necesidad concreta.

4.3.2 Selección de Modelos de Brazo para el Soporte.

En el desarrollo del trabajo, se llegó a un punto donde se tenía que seleccionar la alternativa más óptima para el modelo del brazo que hiciera de soporte del actuador. Para ello, se integraron en el modelo de la empuñadura tanto la alternativa final desarrollada por optimización topológica como la alternativa definida por diseño generativo. Esta selección se llevó a cabo comparando las características de ambos y estudiando sus comportamientos bajo un entorno simulado.

En primer lugar, se comparó la cantidad de material de los dos modelos si fueran completamente sólidos. El modelo de diseño topológico tiene una masa de 108 g y el modelo de diseño generativo 109 g, por lo que la cantidad de material es prácticamente idéntica. En segundo lugar, se estudió el comportamiento de ambos mediante estudios FEM. La característica de mayor relevancia es el esfuerzo máximo que van a llegar a soportar. Para el primer modelo fue de 11,1 MPa, lo que deja de margen un coeficiente de seguridad de 4,95. Y para el segundo modelo, fue de 7,27 MPa, con un coeficiente de seguridad de 7,56. Otro factor de importancia es el desplazamiento real que pueden llegar a alcanzar. El resultado fue de 2mm para el primero y 0,82 mm para el segundo en el extremo de sus brazos.

Comparando resultados, la alternativa basada en diseño generativo resultó ser más eficiente que la obtenida por estudio topológico. Adicionalmente, aparte de más eficiente, el proceso de generación de formas mediante diseño generativo fue notablemente más rápido para alcanzar una solución final. Fue, por tanto, el modelo que se empleó en el brazo que soporte el módulo de respuesta háptica. Aunque la optimización topológica finalmente no fue el modelo que se implementó, sí ha servido para identificar qué puntos son los más críticos y que tipo de estructuras pueden ayudar a disminuir la fatiga de la pieza. Estas lecciones aprendidas de la optimización topológica servirán para reforzar el resultado del diseño generativo y lograr maximizar, aún más, la eficiencia de este.

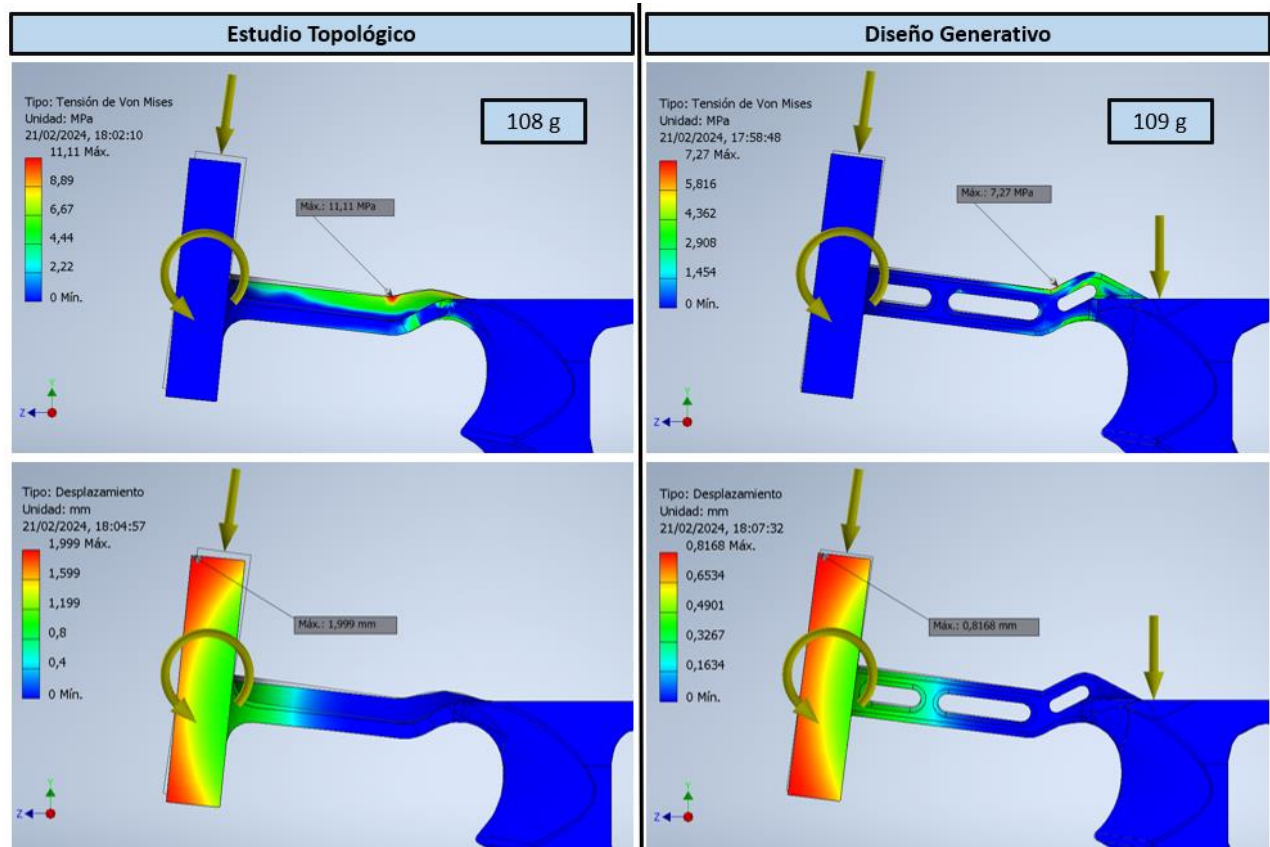


Figura 4-13 Comparación de los modelos de estudio topológico y diseño generativo

4.4 Pruebas y Validaciones del Primer Prototipo.

Una vez finalizado el modelado del sistema de enganche, fue preciso realizar una impresión para validar todo el avance hasta este punto, tratándose del primer prototipo de arma corta que implemente todas las partes. La finalidad de esta prueba era la validación de tres aspectos importantes: en primer lugar, la ergonomía mejorada respecto a la anterior impresión de la empuñadura; en segundo lugar, el sistema de agarre del actuador; y, por último, la capacidad del brazo para sostener al actuador.

En cuanto a los parámetros de impresión de Ultimaker Cura, por lo general se conservaron los ajustes de la anterior impresión. El valor de z-seam se estableció aleatorio y se aplicó laca sobre la base. Sin embargo, este modelo inevitablemente requiso de estructuras de apoyo para su impresión, por lo que se impuso una altura de capa y de capa inicial de 0,2 para reducir el tiempo total de impresión. Finalmente, el tiempo de fabricación de la pieza fue de 12 horas 28 minutos, empleando 70 g de filamento PLA. La pieza complementaria del agarre fue impresa de la misma manera. Este proceso de impresión se muestra en la Figura 4-14.

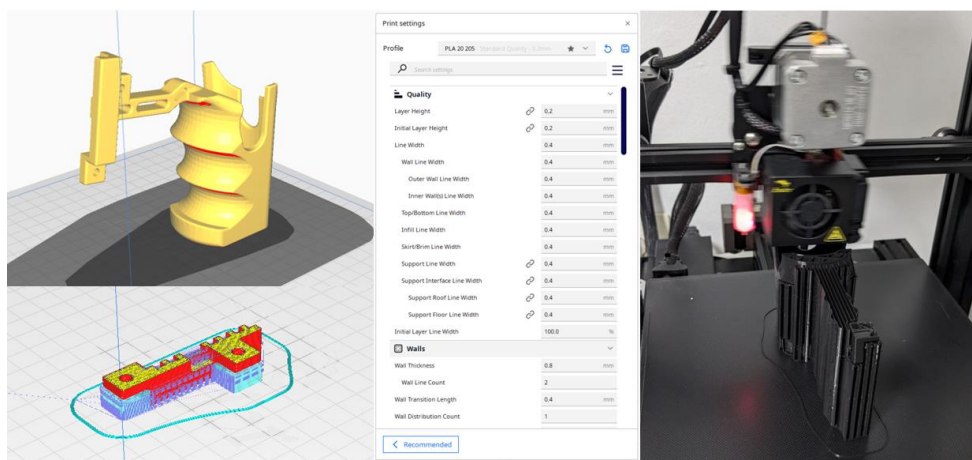


Figura 4-14 Proceso de impresión del prototipo inicial para su validación

Finalizada la impresión, lo primero fue retirar las estructuras de soporte. Estas son fácilmente retiradas con las manos, pero en ciertas partes se emplearon herramientas específicas como alicate y cúter para evitar dañar las piezas. Al ser retiradas, las estructuras adicionales dejaron pequeñas imperfecciones superficiales que fueron pulidas posteriormente para garantizar la calidad. Tras esto, el prototipo ya estaba listo para comenzar la prueba.



Figura 4-15 Prueba de ergonomía del prototipo inicial

Lo primero que se comprobó fue la ergonomía. Los detalles que reducían la comodidad en el modelo de empuñadura anterior fueron corregidos digitalmente y revalidados con esta impresión. El dedo índice puede alcanzar fácilmente el gatillo sin interferencias de la pieza y el dedo meñique tiene anclada su

posición gracias a la superficie inferior que lo sostiene. Las diferentes personas que han probado el prototipo verifican su comodidad de uso. Posteriormente, se adaptó en dispositivo de respuesta háptica al prototipo mediante el sistema de agarre propuesto. Su introducción y ajuste mediante el apriete de los tornillos es sencilla y no requiere de mucho tiempo. El resultado es un agarre firme sin oscilaciones entre la pieza y el actuador evitando en toda medida la caída de este durante una simulación como se muestra en la Figura 4-16.



Figura 4-16 Sistema de agarre del dispositivo de respuesta háptica

Por último, se testeó la capacidad del brazo para sostener al actuador durante una simulación. Como se pudo comprobar en el estudio FEM, el brazo aguanta perfectamente los esfuerzos del actuador, tanto su peso como la propia acción de 5 Julios al simular el disparo. Por el contrario, el desplazamiento en el extremo del brazo resulta ser superior al estudio simulado en Autodesk Inventor debido a las oscilaciones del actuador. Adicionalmente, a pesar de que el brazo sea capaz de soportar el esfuerzo, su apariencia puede parecer insuficiente o endeble. Estos factores juntos desembocan en una poca confianza de la resistencia del prototipo por parte del cliente. Otro factor que se ha percibido como inconveniente es la posición del tornillo inferior, que afecta a la comodidad del usuario al posar su otra mano en el actuador para mayor estabilidad.

De los resultados de esta prueba se extrajeron varias conclusiones. La ergonomía y el sistema de anclaje del actuador han sido validados positivamente en el prototipo, por lo que se adoptarán para el posterior prototipo final. Sin embargo, el modelo de brazo que sostiene el actuador debe ser reforzado, minimizando desplazamientos y asegurando la confianza del cliente en el producto.

4.5 Validación del Prototipo Final.

De las conclusiones extraídas de la prueba del prototipo inicial, se inició un proceso de mejora e implementación de los aspectos a mejorar que fueron detectados para finalmente concebir el siguiente prototipo. Antes de proceder con su impresión, se analizaron sus propiedades bajo estudio FEM. Inicialmente se estudió el entorno de cargas habitual para el que se ha diseñado, es decir, se parametrizó la simulación para que se tratara de la masa del actuador bajo la acción normal de la gravedad. Al igual que en las pruebas anteriores, los factores que se analizarán más detenidamente son los de esfuerzo máximo y desplazamiento real de la estructura.

4.5.1 Resultados del Estudio FEM.

Así, los resultados obtenidos fueron excelentes. Este prototipo soporta en su punto más crítico un esfuerzo de 1,39 MPa, lo que significa una mejora del prototipo inicial del 530 % y un coeficiente de seguridad de 40,4. El desplazamiento real es de 0,19 mm, lo que significa que es notablemente inferior a los 0,82 mm que ofrecía el prototipo anterior. Sin embargo, para este prototipo se ha querido simular

un caso más crítico que el habitual. Es caso va a recrear la situación en la que el usuario de una fuerte aceleración al conjunto, llegando a alcanzar hasta 5 g de aceleración (equivalente a lo que soporta un piloto de Fórmula 1 al frenar bruscamente). Esta nueva simulación también ha ofrecido resultados positivos que satisfacen las necesidades de esta circunstancia. El punto más crítico sufre 4,27 MPa, lo que representa un coeficiente de seguridad de 12,9. En esta situación límite, el desplazamiento no supera los 0,67 mm.

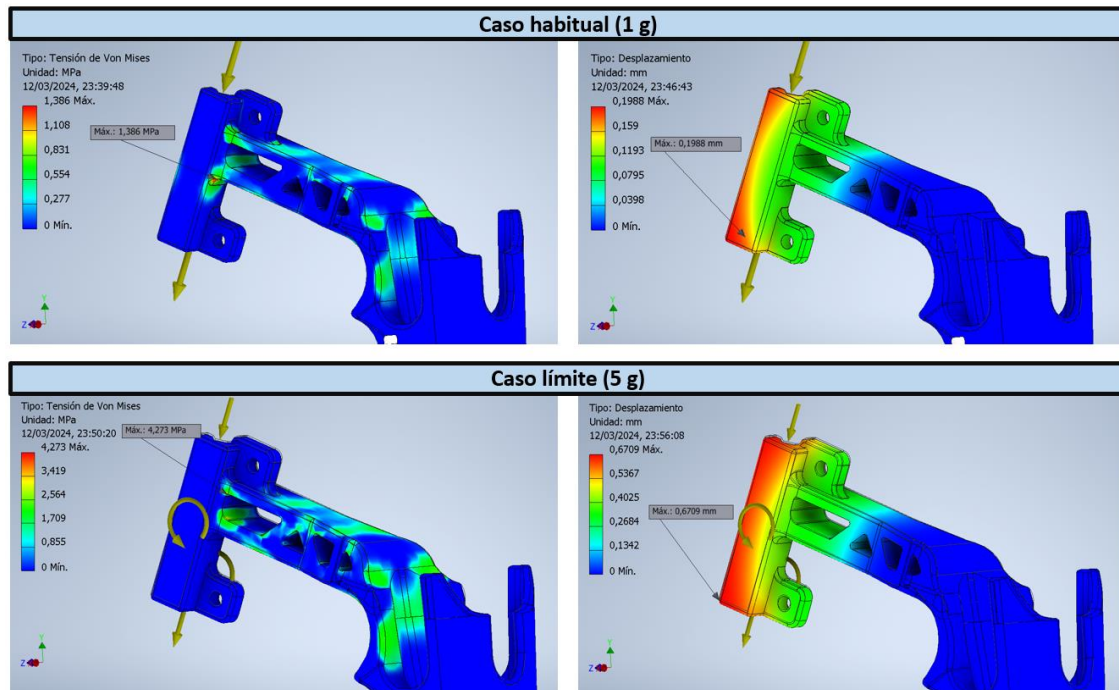


Figura 4-17 Resultados obtenidos del estudio FEM del prototipo final

En el momento que los resultados del estudio FEM fueron validados positivamente, se tomó la decisión de pasar a la fabricación del prototipo. El proceso de impresión 3D del prototipo final se explica detenidamente en el Apartado 3.6.3

4.5.2 Pruebas del Prototipo Físico.

El prototipo final fue ensamblado rápidamente. Destacó por la sencillez y lo intuitivo que es el montaje, lo cual se trata de un aspecto valorado muy positivamente de cara al usuario. Adicionalmente, el anclaje entre el modelo y el dispositivo de respuesta háptica es firme y seguro, no permitiendo ningún tipo de movimiento relativo entre ellos. El mando se insertó más tarde cómodamente. Su fijación es fuerte, sin peligro de resbalamientos ni caídas del mando desde su funda, sin embargo, su extracción no requiere de mucha fuerza.



Figura 4-18 Modelo físico del prototipo final

En cuanto al conjunto total, el primer aspecto que mejoró significativamente fue la disposición de sus elementos. El actuador queda más cerca de la empuñadura y del mando, haciendo el ensamblaje más compacto. En este prototipo, el mando permite ser inclinado más hacia delante quedando paralelo al actuador. Consecuentemente, el resultado del conjunto tiene una buena presentación de unidad de sus elementos, imponiéndose también la robustez y la economía proyectista. Así, el diseño también logró alcanzar una estética atractiva a la vez que eficiente debido al diseño generativo. Finalmente, la ergonomía ya fue validada en el prototipo inicial y reafirmada en el final.

Por otro lado, se probó físicamente la resistencia del brazo. Inicialmente, el brazo es capaz de soportar las cargas regulares del peso del actuador, incluso las cargas dinámicas al oscilar rápidamente el dispositivo como se demostró en los estudios FEM. Fue sometido también a situaciones más límite como es el caso de un fuerte impacto o la adición de una intensa presión con las manos. Por último, el conjunto fue testeado a varias pruebas bajo la acción del actuador: una primera prueba de una única acción en seco al 100% de su capacidad y otra segunda prueba de la vibración mantenida en un periodo extendido de tiempo. Todas estas pruebas fueron evaluadas muy positivamente respecto al prototipo inicial. Este prototipo no solo es capaz de aguantar todos los esfuerzos esperados, incluso los más extremos, sino que también es capaz de transmitir esa capacidad y seguridad al usuario.

4.6 Resultado del Modelado CAD.

Después de las numerosas pruebas se llegó a la validación final del prototipo de arma corta. Su proceso de modelado desde su punto de partida estuvo marcado por la flexibilidad y por la exactitud de creación, logrando desarrollar y visualizar en 3D formas completamente innovadoras que se adaptan a las necesidades de este proyecto. Así, Autodesk Inventor ha conseguido plasmar de manera profunda la creatividad del alumno mediante una fácil interacción de sus operaciones. Este software de diseño ha aportado una infinidad de acciones complementarias que han acompañado paralelamente al proceso de modelado como es el diseño generativo o el estudio FEM.



Figura 4-19 Producto final del modelado CAD (sin renderizar)

Todo esto ha supuesto a una validación muy positiva del modelado a través de programas CAD, concretamente Autodesk Inventor. En el Anexo III se adjunta un modelo digital interactivo en 3D que permite una mejor comprensión del dispositivo propuesto en su conjunto.

4.6.1 Renderizado.

Entre otros, Autodesk Inventor posibilita la opción de generar fotografías renderizadas. Esta herramienta consiste en crear una imagen digital de una pieza tridimensional con el objetivo de darle un atractivo más realista y detallado. Gracias a esta herramienta fue posible configurar la presentación y la iluminación de la escena. Como resultado del renderizado se obtuvieron imágenes del conjunto final del prototipo como las que se aprecian en la Figura 4-20.

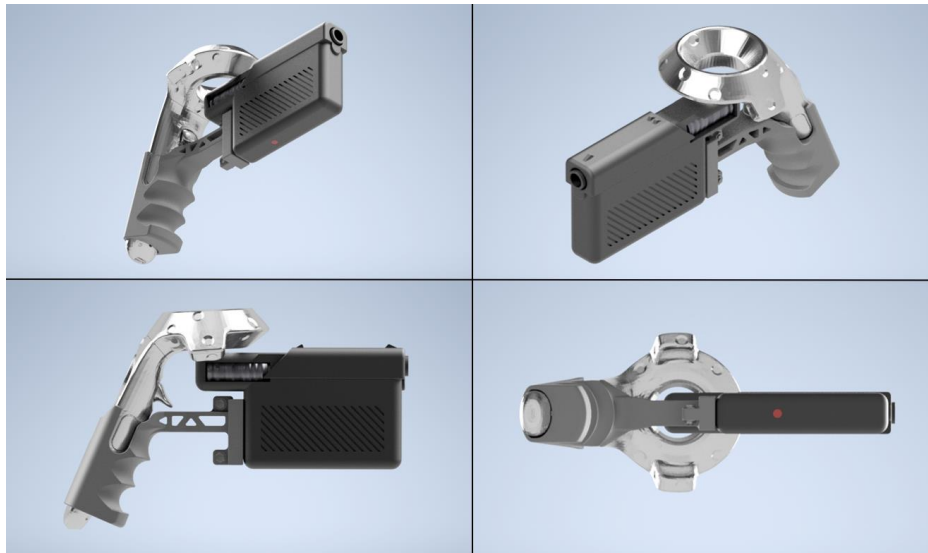
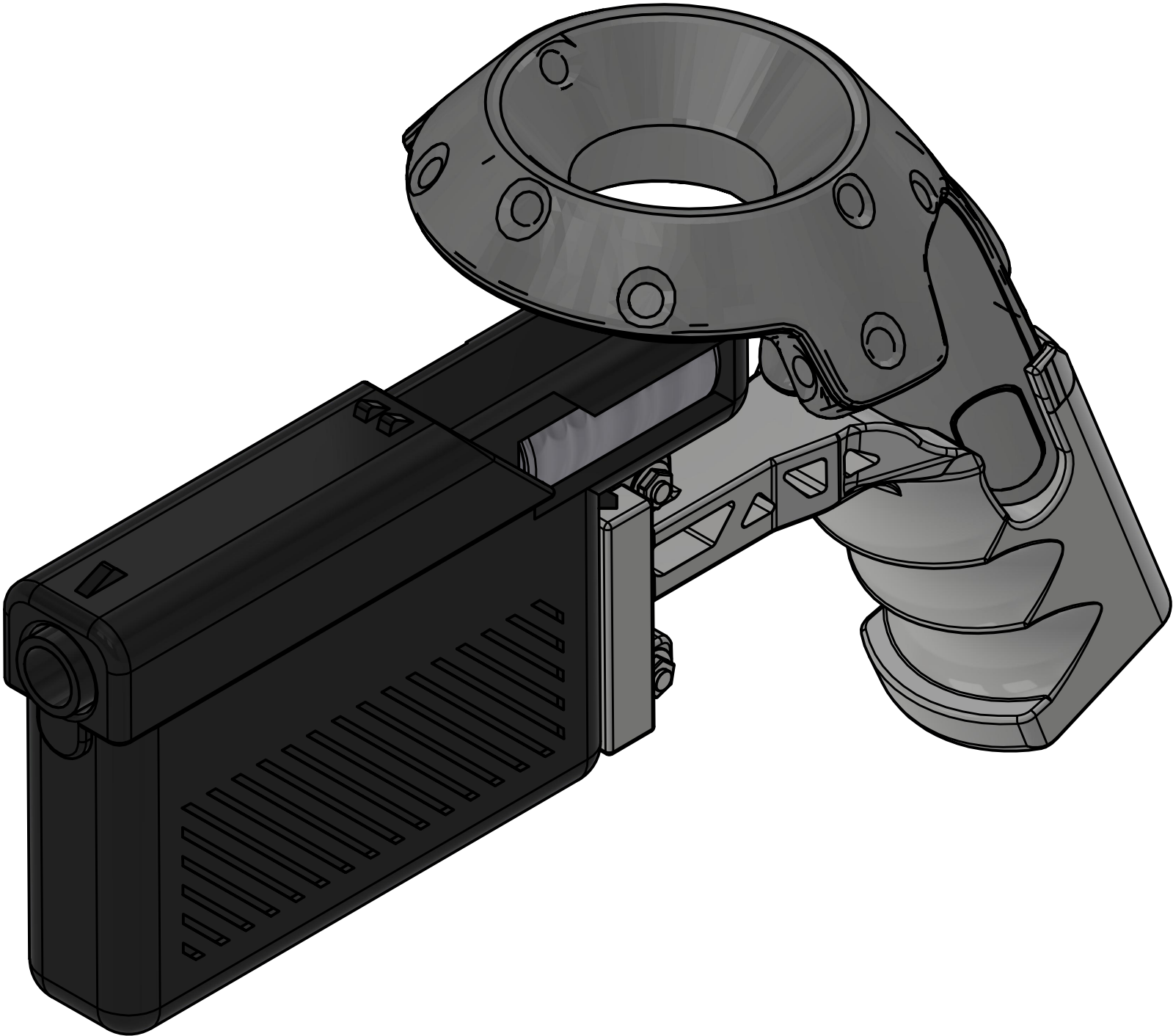


Figura 4-20 Renderizado de imágenes del prototipo final

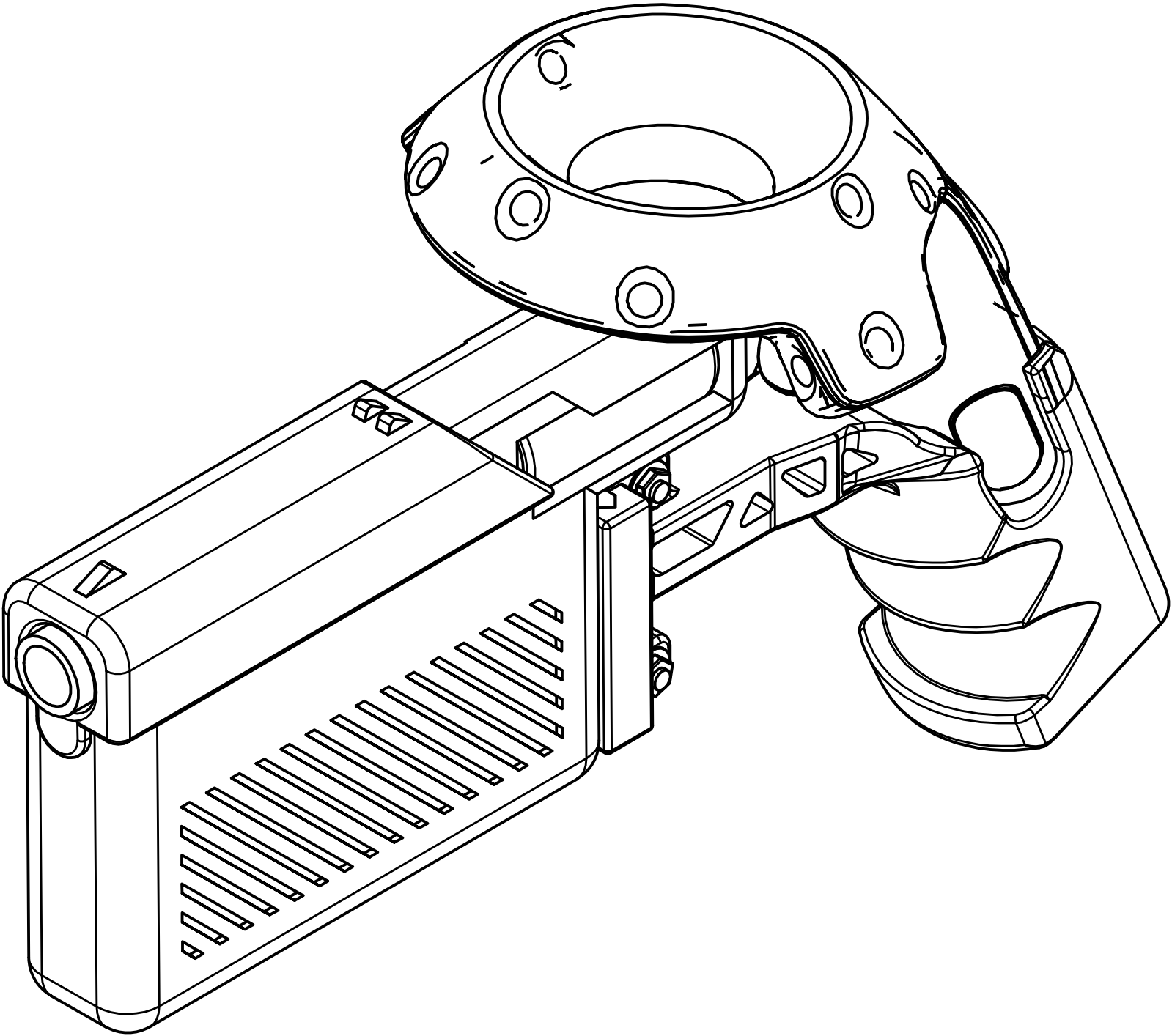
4.6.2 Planimetría.

En este apartado se exponen los planos proyectivos derivados del trabajo. Cabe destacar que se tratan de planos proyectivos y no de constructivos acotados. Esto es debido a la confidencialidad de su propósito, el adiestramiento militar, y por motivos personales de propiedad intelectual. Sí se podrá disponer de los archivos IPT originales de todas las piezas del ensamblaje final si fueran requeridos, así como de los archivos STL para su futura impresión 3D. A continuación, se mencionan todos los planos en el orden correspondiente y, posteriormente, se exponen en la memoria.

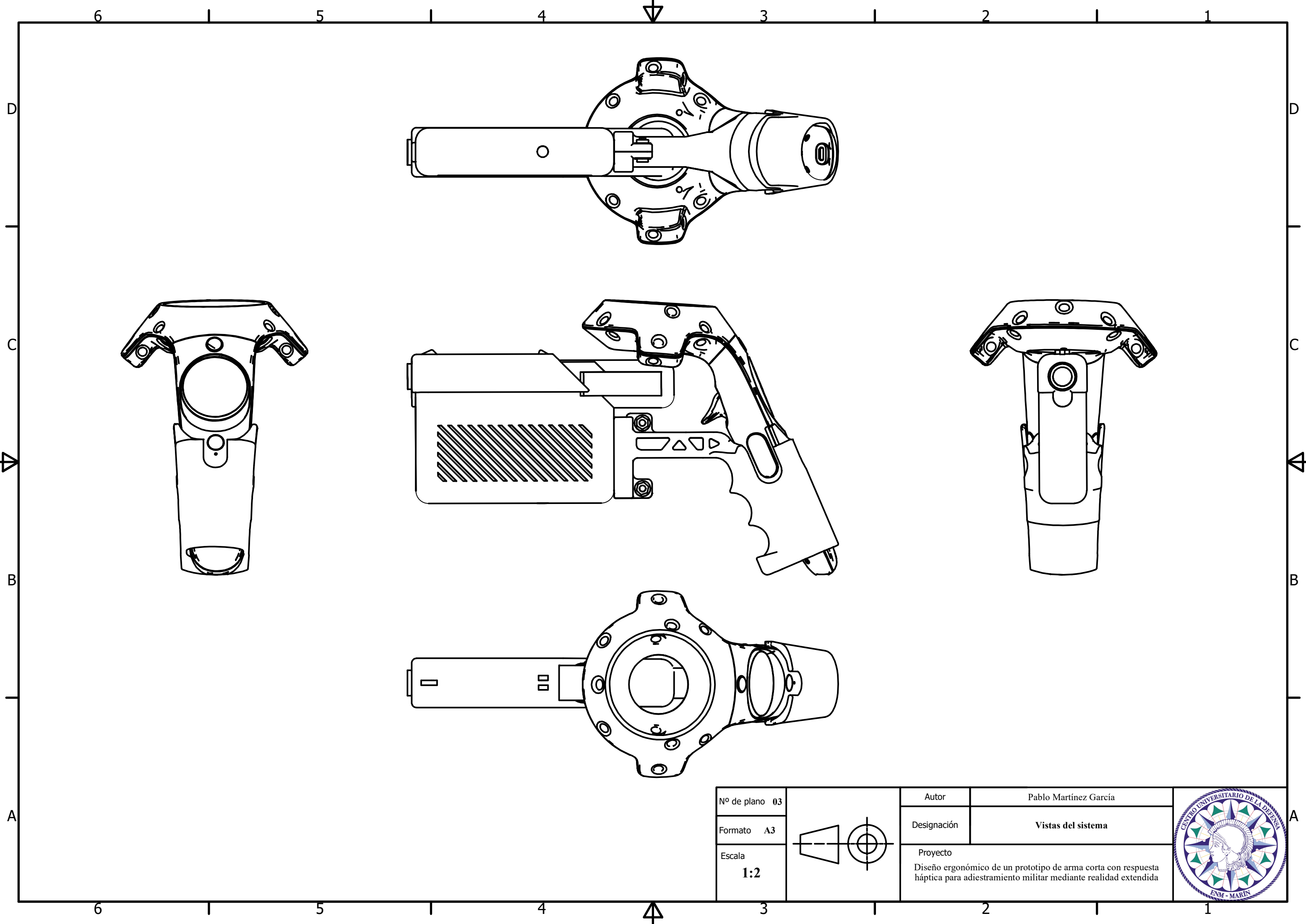
01. Conjunto a color isométrico. Para este plano se ha seleccionado un formato A3 en consonancia con la normativa ISO y una escala 1:1 para visualizar mejor el prototipo. El plano muestra una vista isométrica del sistema a color.
02. Conjunto blanco y negro isométrico. Se trata de un plano idéntico al anterior, pero este en blanco y negro.
03. Vistas del sistema. Para este plano también se ha seleccionado un formato A3 según normativa ISO, con una escala 1:2. En el plano se visualizan las vistas de planta, alzado, vista inferior y perfiles derecho e izquierdo del conjunto.
04. Explosionado con listado de piezas. El plano del explosionado está en formato A3 con escala 1:1. El listado de las piezas se sitúa en la esquina inferior izquierda e incluye la numeración, las unidades y la designación de cada una.
05. Cuerpo principal de la empuñadura. Su formato es A3 y se ha respetado la escala normal 1:1 para facilitar su idealización en tamaño. Se presentan las tres vistas principales de la empuñadura: planta, alzado y perfil izquierdo. Para el perfil izquierdo, se presenta la vista de un corte realizado sobre la planta de la pieza. Este corte está hecho en la mitad de la pieza para permitir visualizar el interior de la cavidad para el mando. Adicionalmente, se proporciona una vista isométrica a color en la parte inferior derecha del plano.
06. Pieza de agarre. Debido a que la pieza tiene unas dimensiones inferiores, se escogió un formato de plano A4, que plasma perfectamente la escala normal 1:1 para su visualización. En cuanto a las vistas presentadas, se muestran unas similares a las del plano anterior: planta, alzado y perfil izquierdo, junto con una vista isométrica a color de la pieza.



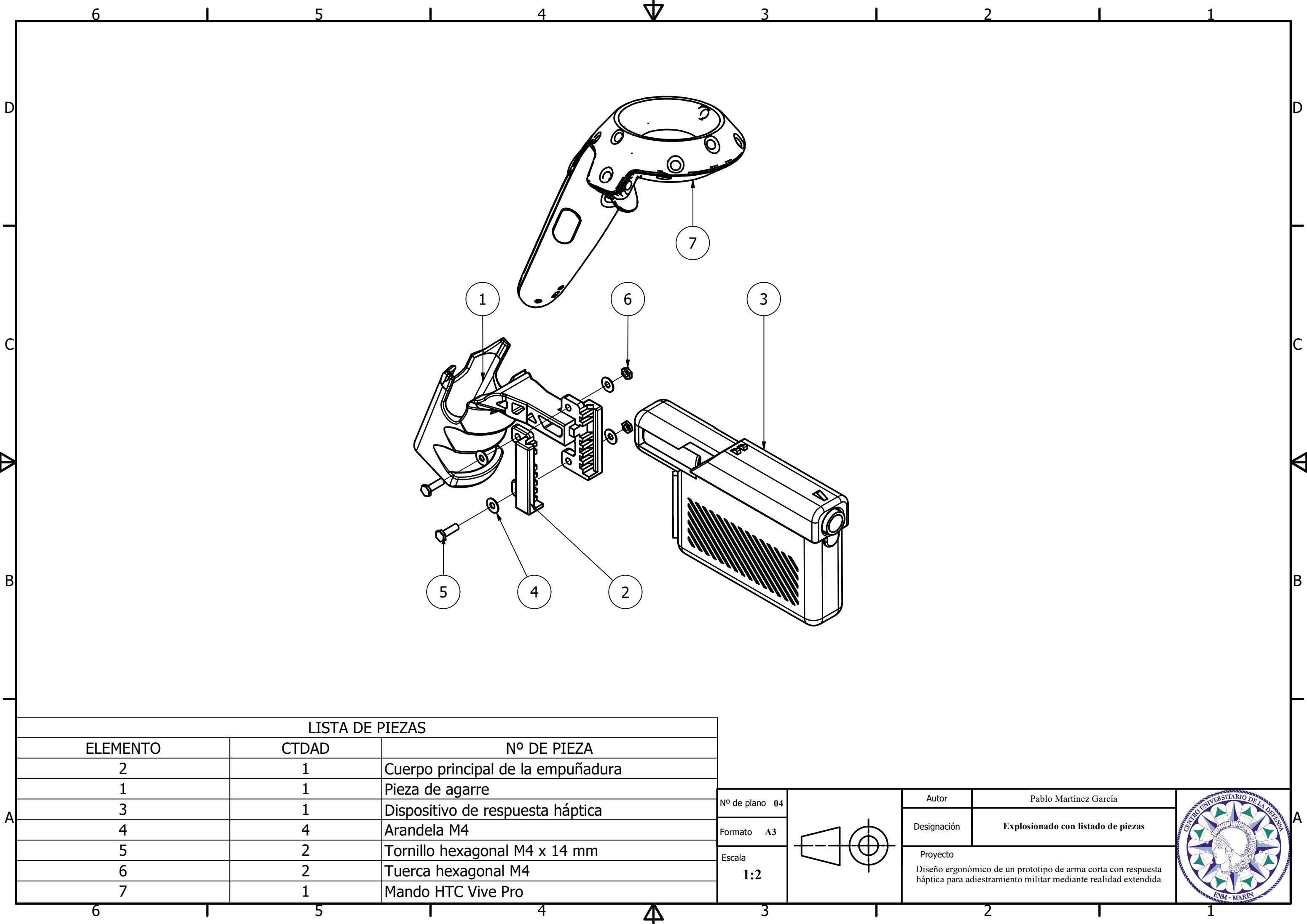
Nº de plano 01		Autor	Pablo Martínez García	
Formato A3		Designación	Conjunto a color isométrico	
Escala 1:1		Proyecto Diseño ergonómico de un prototipo de arma corta con respuesta háptica para adiestramiento militar mediante realidad extendida		



Nº de plano 02		Autor	Pablo Martínez García	
Formato A3		Designación	Conjunto blanco y negro isométrico	
Escala 1:1		Proyecto Diseño ergonómico de un prototipo de arma corta con respuesta háptica para adiestramiento militar mediante realidad extendida		

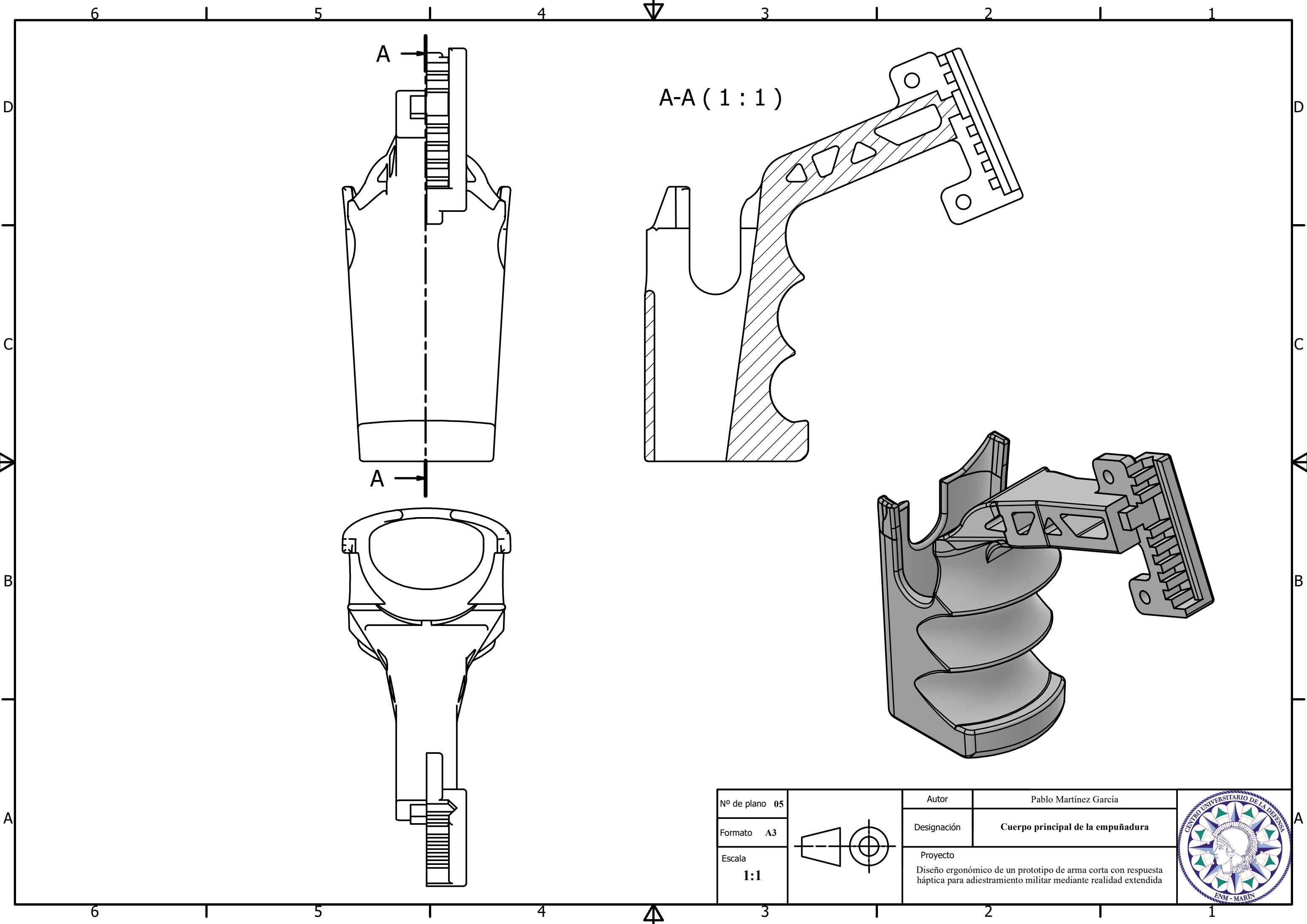


Nº de plano 03		Autor	Pablo Martínez García	
Formato A3		Designación	Vistas del sistema	
Escala 1:2		Proyecto Diseño ergonómico de un prototipo de arma corta con respuesta háptica para adiestramiento militar mediante realidad extendida		

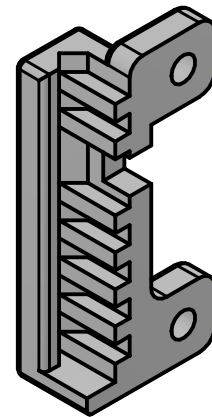
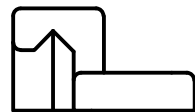
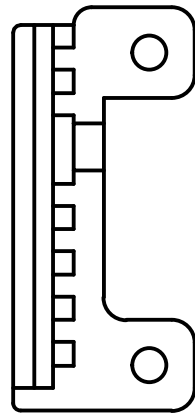


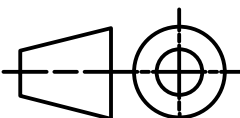
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
2	1	Cuerpo principal de la empuñadura
1	1	Pieza de agarre
3	1	Dispositivo de respuesta háptica
4	4	Arandela M4
5	2	Tornillo hexagonal M4 x 14 mm
6	2	Tuerca hexagonal M4
7	1	Mando HTC Vive Pro

Nº de plano	04		Autor	Pablo Martínez García	
Formato	A3		Designación	Explosionado con listado de piezas	
Escala	1:2		Proyecto	Diseño ergonómico de un prototipo de arma corta con respuesta háptica para adiestramiento militar mediante realidad extendida	



Nº de plano 05		Autor	Pablo Martínez García	
Formato A3		Designación	Cuerpo principal de la empuñadura	
Escala 1:1		Proyecto	Diseño ergonómico de un prototipo de arma corta con respuesta háptica para adiestramiento militar mediante realidad extendida	



Nº de plano 06		Autor	Pablo Martínez García	
Formato A4		Designación	Pieza de agarre	
Escala 1:1		Proyecto Diseño ergonómico de un prototipo de arma corta con respuesta háptica para adiestramiento militar mediante realidad extendida		

4.7 Pruebas de Campo.

Las pruebas de campo finales se llevaron a cabo sin problemas y los resultados fueron realmente satisfactorios. Gracias a la simulación, se pudo probar repetidas veces varios ejercicios completos de tiro.

Al empezar la simulación, el conjunto de empuñadura y actuador ya estaban montados y se insertó posteriormente el mando de forma sencilla. Dentro de la simulación, la primera impresión que ofrece el prototipo es la portación de un arma real, lo que sumerge al usuario en una experiencia más próxima a la realidad. El mando está perfectamente expuesto a la detección de los sensores fijos, por lo que el prototipo no interfiere en este aspecto. El conjunto también permite una interacción completa con ambos brazos, pudiendo insertar el cargador y recargar el arma con la mano que no porte el arma. Para más estabilidad, la mano contraria puede sostener cómodamente al prototipo siendo y representa fielmente el mismo gesto dentro de la simulación.

A continuación, se realizó la simulación del disparo del arma. La forma de apuntar se asemeja a la experiencia de hacerlo con un arma real al igual que el propio disparo. El actuador está sincronizado a la perfección con el sistema, actuando de manera instantánea al apretar el gatillo. Así, el retroceso y el impacto de reacción de un arma real son fielmente transmitidos a su usuario a través del prototipo. Además, el prototipo demostró su seguridad y firmeza de uso durante toda la simulación, incluyendo desenfundados rápidos, disparos laterales y otros movimientos exagerados.

En resumen, el prototipo permite una jugabilidad completa sin limitaciones en las acciones normales del uso de un arma. La empuñadura destacó por su ergonomía y su agarre no molesto en ningún momento del ejercicio. Por último y más relevante, el prototipo consigue sumergir completamente al usuario en la experiencia de portar y disparar un arma corta real, tratándose de un objetivo fundamental para este TFG.



Figura 4-21 Código QR de acceso al vídeo de demostración

Para finalizar la prueba de campo y validar las conclusiones extraídas, se ha adjuntado un código QR en la Figura 4-21 que dará acceso al video de demostración de una simulación de tiro.

4.8 Presupuesto y Competencia.

El coste final de fabricación de la empuñadura y el mecanismo de anclaje, para el prototipo de arma corta con respuesta háptica, fue de tres euros con setenta céntimos (3,70 €). Este resultado se trata de un coste notablemente competitivo en el mercado comparándolo con las ofertas que ofrecen las empresas de productos similares. Hay que tener en cuenta que este cálculo desprecia los costes de mano de obra y de diseño, pues recaen en los requisitos del alumno para completar su ciclo de formación. Además, este

coste es únicamente el propio de las piezas de impresión 3D y los elementos de unión, sin contar el coste del actuador y del mando, que no son obra de este trabajo. Aún así, el coste resultante sigue situando a este prototipo por encima de otras alternativas en el mercado.



Figura 4-22 Comparativa del modelo comercial con el modelo propio

Comparando con el modelo de *ProVolver* de la compañía *ProTube VR*, el prototipo de arma corta para realidad extendida producto de este Trabajo Fin de Grado presenta una gran ventaja económica. En primer lugar, la empresa *ProTube VR* oferta varios modelos de arma corta compatibles con una gran variedad de sets de realidad virtual, sin embargo, no ofrece un modelo específico para el conjunto de *HTC Vive Pro* (para el que sí hace este trabajo), por lo que no representa competencia. En segundo lugar, *ProTube VR* es la única compañía que implementa el módulo de respuesta háptica en el mercado, por lo que, fuera de esta, solo este prototipo de arma corta es capaz de compatibilizar la extensión háptica, imprescindible para una experiencia de uso inmersiva. Y, en último lugar, la versiones que ofrecen esta marca son específicas para zurdos y diestros, por lo que se requiere un modelo de arma para cada caso, mientras que este prototipo permite el uso indistinto de zurdos y diestros.

Independientemente de las mejoras anteriores, el modelo *ProVolver* está muy distante en coste de adquisición frente al modelo desarrollado en este trabajo. Profundizando en una comparación más precisa en cuanto a la adquisición del producto, el prototipo propio tiene un coste de 3,70 €, mientras que la empuñadura de *ProVolver* únicamente (sin complementos ni otros dispositivos) es comprado desde 64.00 €. Esto representa un ahorro del 94,2 %, o bien por el coste de una única empuñadura *ProVolver* se pueden adquirir 17 prototipos como el de este trabajo. Esto representa un ahorro significativo para su compra, que escala notablemente con grandes volúmenes de compra como sería el caso de las Fuerzas Armadas para el adiestramiento de sus unidades.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS.

5.1 Descripción del Apartado.

En este apartado se realiza un resumen global de los resultados concluyentes del proyecto y se analizan los objetivos alcanzados en base a los establecidos inicialmente junto con aquellos adicionales que también hayan sido logrados. Adicionalmente, se comentan futuras líneas de investigación y desarrollo para la ampliación de este TFG.

5.2 Conclusiones de los Objetivos Iniciales.

5.2.1 Proceso General de Diseño en Ingeniería.

El desarrollo del Trabajo Fin de Grado se ha llevado a cabo de acuerdo a las etapas del proceso general de diseño que siguen todos los proyectos de ingeniería. Esta secuencia ha permitido llevar una evolución ordenada y lógica del proyecto. De esta manera, las fases del proceso de diseño han permitido definir inicialmente el problema general, los recursos necesarios y las limitaciones presentes para el desarrollo de este trabajo. Consecuentemente, este punto de partida ha facilitado realizar una división clara del problema global en problemas menores y poder hacer una planificación coherente para abordarlos de uno en uno. Se ha llevado un control y seguimiento cercano de la evolución del proyecto y, también, ha sido posible una toma de decisiones más adecuada a las fases futuras. Finalmente, seguir las fases del proceso optimizó los tiempos y esfuerzos empleados en cada etapa del proceso.

5.2.2 Diseño y Modelado 3D.

Se ha alcanzado con éxito un modelado tridimensional haciendo uso del software Autodesk Inventor. Sus herramientas de diseño asistido por ordenador han permitido elaborar un prototipo digital detallado con todas sus piezas acorde a las especificaciones de este trabajo, así como la generación de planimetría proyectista que representa fidedignamente el ensamblaje completo. El resultado de este diseño 3D se plasma en los archivos finales IPT y STL de los componentes del conjunto, de los cuales se puede disponer si fuera requerido.

5.2.3 Ergonomía.

La ergonomía ha sido un factor que se ha estudiado detenidamente y que ha supuesto un diseño y rediseño continuo a lo largo del proceso de modelado del prototipo para alcanzar la máxima comodidad. El molde de arcilla estableció las pautas iniciales para la concepción de la empuñadura y las pruebas de

los prototipos permitió perfeccionar el agarre. De esta forma, la ergonomía fue validada positivamente en el prototipo final y las personas que pudieron probar el modelo lo confirmaron.

5.2.4 Compatibilidad.

En el prototipo final se alcanzó con éxito una compatibilidad total. La disposición de los distintos elementos fue planificada en profundidad, lo que resultó en una integración armoniosa del conjunto. Cada componente fue debidamente dispuesto con precisión, contribuyendo así a la cohesión general del sistema. El resultado de esta compatibilidad deriva en un atractivo visual que asemeja el prototipo final a un arma corta real. El objetivo no solo era visual, sino que también se refleja en su funcionalidad. Así, los elementos no interfieren entre sí para permitir una experiencia cómoda y profesional del dispositivo. El actuador no interrumpe la inserción normal del mando quedando ambos paralelos al suelo cuando se apunta al frente. El actuador se dispuso a una distancia precisa para evitar que estuviera muy distante, pero que tampoco interfiriera con la acción del gatillo. De esta forma, el gatillo puede ser accionado sin obstáculos, permitiendo un movimiento completo. El conjunto final trabaja como una unidad sólida sin movimientos independientes entre las piezas.

5.2.5 Fabricación Aditiva.

El prototipo final fue materializado a través de la fabricación aditiva que se llevó a cabo de forma excepcional, a pesar de los errores de impresión iniciales. Gracias a las capacidades de la impresión 3D fue posible fabricar piezas con geometrías específicas e innovadoras totalmente adaptadas a las necesidades del proyecto, como son las piezas que fueron diseñadas en Autodesk Inventor para este trabajo. Esto ha permitido una máxima flexibilidad en el proceso de modelado y no ha supuesto limitaciones en el diseño del prototipo. Adicionalmente, es un método que acelera el proceso de fabricación enormemente y abarata significativos costes frente a los mecanismos convencionales de producción al tratarse de piezas únicas y totalmente personalizadas. Colateralmente, otro objetivo alcanzado es el aprendizaje y experiencia ganada en el uso de softwares de impresión 3D como Ultimaker Cura. Este software ha permitido configurar y personalizar el proceso de fabricación de las piezas del prototipo.

5.3 Objetivos Adicionales.

5.3.1 Escaneado 3D.

El escaneado 3D ha sido una herramienta que ha destacado por su facilidad de uso y por la rapidez para la obtención de resultados precisos a través del empleo de los escáneres LiDAR que implementan los dispositivos móviles de las últimas generaciones. Existen en el mercado de aplicaciones móviles una gran variedad de softwares totalmente gratuitos y de fácil acceso para su descarga. En concreto, para este TFG se utilizó la aplicación gratuita *Scaniverse*, que facilitó un escaneo rápido y preciso del molde de arcilla, haciendo incluso posible su exportación al software de diseño Autodesk Inventor para su análisis.

5.3.2 Diseño Generativo.

El diseño generativo ha sido un mecanismo de modelado que fue implementado exitosamente en el prototipo de arma corta. A diferencia de la optimización topológica (objetivo también conseguido adicionalmente), esta herramienta de investigación iterativa permite la generación de estructuras totalmente nuevas y personalizadas a unas necesidades específicas. En lugar de depender de la creatividad del diseñador y de las iteraciones manuales de la optimización topológica, el diseño generativo hace una búsqueda automática de estas estructuras óptimas, lo que acelera enormemente el proceso de diseño. En el desarrollo de este trabajo, se ha profundizado en el aprendizaje de la herramienta *Generación de formas* que ofrece Autodesk Inventor y, a su vez, se ha añadido en la memoria una

descripción ordenada de su aplicación para los usuarios del software que quieran aplicar esta herramienta de diseño generativo. Cabe destacar que la implementación de la herramienta es sencilla y ofrece resultados óptimos de manera casi instantánea.

Esta herramienta no solo supone un gran ahorro de tiempo dentro de la fase de modelado de productos optimizados, sino que también supone (obviamente) un ahorro significativo de material en su fabricación. Para el diseño del brazo del prototipo final, el diseño generativo pudo generar una forma óptima con una reducción de masa del 62%. Tratándose de un único modelo no es una reducción significativa de material, sin embargo, si se tratara de una fabricación en masa, el ahorro sería cuantioso.

5.4 Líneas Futuras.

5.4.1 Estudio dinámico y no lineal.

Para el desarrollo de este TFG, solo se vio necesario la realización de estudios estáticos y lineales, pues el material es considerado lineal y sus desplazamientos eran mínimos. Adicionalmente, las cargas previstas que sufrirá el prototipo son aproximables a estudios de este tipo, acelerando y simplificando el proceso de análisis y ofreciendo resultados muy aceptables. Sin embargo, una simulación dinámica (con cargas cambiantes en el tiempo) y no lineal (sin proporcionalidad entre las acciones y los resultados) ofrece una serie de ventajas como, en primer lugar, una precisión de resultados mucho mayor. Un futuro estudio dinámico sobre el prototipo puede permitir obtener información sobre respuestas estructurales a cargas variables, como pueden ser las vibraciones transmitidas por la acción del actuador al conjunto. Similarmente, un estudio no lineal aplicado sobre el prototipo ofrece unos resultados dependientes del historial de carga, pudiendo analizar la fatiga del dispositivo tras su repetido uso en el tiempo. Para hacer un análisis de estas características y, así, expandir en el futuro este TFG, será necesario el empleo de Inventor Nastran, programa capaz de llevar a cabo estas simulaciones.

5.4.2 Implementación con otros sets de RV.

Este dispositivo de arma corta fue diseñado para la compatibilidad del sistema de realidad virtual *HTC Vive Pro*, que es el conjunto disponible en el laboratorio de realidad virtual del Centro Universitario de la Defensa. Una futura línea de estudio para expandir este TFG es el diseño de prototipos de arma corta de características similares que compatibilicen otros sistemas de RV como son el *Meta Quest 3* o el *HTC Focus 3*.

6 BIBLIOGRAFÍA.

- [1] J. S. Hurtado, «Realidad Virtual, Aumentada y Extendida: Qué son, diferencias y futuro del sector», *Think. Innov.*, oct. 2021, Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.iebschool.com/blog/realidad-extendida-virtual-aumentada-mixta-tecnologia/>
- [2] L. Muñoz-Saavedra, L. Miró-Amarante, y M. Domínguez-Morales, «Augmented and virtual reality evolution and future tendency», *Appl. Sci.*, vol. 10, n.º 1, p. 322, 2020.
- [3] C. R. Bello, «La realidad aumentada: lo que debemos conocer», *Tecnol. Investig. Acad.*, vol. 5, n.º 2, pp. 257-261, 2017.
- [4] «Realidad virtual, aumentada y mixta. Qué son y diferencias.», Editeca. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://editeca.com/realidad-virtual-aumentada-y-mixta-que-son-y-en-que-se-diferencian/>
- [5] «Xperimenta Cultura | Historia de la Realidad Virtual». Accedido: 20 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://xperimentacultura.com/historia-de-la-realidad-virtual/>
- [6] S. Dixon, «A history of virtual reality in performance.», *Int. J. Perform. Arts Digit. Media*, vol. 2, n.º 1, 2006.
- [7] «Los sectores donde se utilizan las plataformas de realidad virtual», Two Reality. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.tworeality.com/los-sectores-donde-se-utilizan-los-simuladores-y-plataformas-de-realidad-virtual/>
- [8] F. P. Martínez, «Presente y Futuro de la Tecnología de la Realidad Virtual», *Creat. Soc.*, vol. 16, pp. 1-39, 2011.
- [9] «El costo y la importancia de los simuladores médicos en la formación». Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://govirtualia.top/cual-es-el-costode-los-simuladores-medicos/>
- [10] A. Cabrera García-Valdés «Diseño de un dispositivo configurable para simulación de tiro en entornos de realidad virtual», 2023, Trabajo Fin de Grado obtenido del repositorio institucional del CUD de la ENM Calderon, disponible en: <http://calderon.cud.uvigo.es/>
- [11] «Victrix, el simulador de tiro del cuartel de Dolores», La Voz de Galicia. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en:

<https://www.lavozdegalicia.es/album/ferrol/ferrol/2019/11/21/victrix-simulador-tiro-cuartel-dolores/01101574347744910850418.htm>

- [12] D. C. Ogdon, «HoloLens and VIVE pro: Virtual reality headsets», *J. Med. Libr. Assoc. JMLA*, vol. 107, n.º 1, p. 118, 2019.
- [13] MakerPro, «HTC Vive Pro 2 Full Kit», GAFAS VR. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://gafasvr360.com/htc-vive-pro-2/>
- [14] G. García, «Un proceso general de diseño en Ingeniería Mecánica», *Ing. E Investig.*, n.º 10, pp. 35-43, 1984.
- [15] C. E. Arenas Calvo y S. R. Gifford Velasquez, «Applying CAD/CAE/CAM Techniques for Optimizing the Design and Reducing the Cost of a Pediatric Stander», 2023.
- [16] «Entenda a diferença entre CAD, CAE e CAM», VFG Engenharia. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://vfgengenharia.com/entenda-a-diferenca-entre-cad-cae-e-cam/>
- [17] P. I. Á. Peñín, R. P. G. Diaz, y J. S. Quirós, «Sistemas CAD. Nuevas tendencias en los programas de modelado de sólidos», *dyna*, vol. 76, n.º 3, pp. 15-18, 2001.
- [18] C. Liu y R. G. Kelly, «A review of the application of finite element method (FEM) to localized corrosion modeling», *Corrosion*, vol. 75, n.º 11, pp. 1285-1299, 2019.
- [19] «Fabricación aditiva | ¿Qué es la fabricación aditiva? | Autodesk». Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.autodesk.es/solutions/additive-manufacturing>
- [20] «Impresión 3D y medicina, tecnología para la salud – Autodesk LATAM». Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://blogs.autodesk.com/latam/2022/05/10/impresion-3d-y-medicina-tecnologia-para-la-salud/>
- [21] C. M. Thakar, S. S. Parkhe, A. Jain, K. Phasinam, G. Murugesan, y R. J. M. Ventayen, «3d Printing: Basic principles and applications», *Mater. Today Proc.*, vol. 51, pp. 842-849, 2022.
- [22] D. Trapero, «La guía visual definitiva para resolver problemas impresión 3D de Bitfab», Bitfab. Accedido: 31 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://bitfab.io/es/blog/problemas-impresion-3d/>
- [23] 3D Newworld, «La guía de impresión de estereolitografía (SLA) en 3D», 3D Newworld. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://3dnewworld.com/la-guia-de-impresion-de-estereolitografia-sla-en-3d/>
- [24] «¿Sabes cuál fue la primera impresora 3D?», Dynapro 3D | Empresa dedicada al diseño digital e impresión 3D. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://dynapro3d.com/sabes-cual-fue-la-primera-impresora-3d/>
- [25] «Propiedades del PLA». Accedido: 31 de marzo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://sites.google.com/view/poliacidolactico-coma/poli%C3%A1cido-l%C3%A1ctico/propiedades-del-pla>

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS Y AMBIENTALES

La actual 4ª Revolución Industrial o Ingeniería 4.0 está caracterizada, entre otros aspectos, por un análisis profundo de los impactos sociales, económicos y ambientales de sus productos y servicios. Correspondientemente, este Trabajo Fin de Grado, completamente enmarcado en este contexto, ha perseguido elaborar e introducir estas implicaciones con el fin de promover un desarrollo sostenible y alcanzar el bienestar colectivo.

En primer lugar, la realidad extendida (RE) está teniendo un impacto social extraordinario. Su huella está realizando un profundo cambio en la forma en la que las personas socializan y se comunican. Estas tecnologías son cada vez más sofisticadas e inmersivas, pudiendo llegar a conectar unas personas con otras en cualquier punto del planeta de manera excepcional. Esto se plasma también en el ámbito laboral, potenciando el trabajo remoto y sus interacciones. La educación y el bienestar también son ramas sociales que están siendo modernizadas positivamente gracias a la realidad extendida. En esta línea, las herramientas de RE permiten un fácil acceso a la información, así como su presentación, volcando esta gran ventaja al adiestramiento. Ofrecen, adicionalmente, la recreación de experiencias terapéuticas y rehabilitaciones alternativas que desembocan en la mejora de la sanidad social y son un vehículo para la potenciación de la medicina moderna. No obstante, el uso irresponsable y excesivo de estas tecnologías puede derivar en la desconexión social y la adicción digital, por lo que es importante promover un uso responsable y saludable de los dispositivos de realidad extendida para el lograr un desarrollo social.

En cuanto a las implicaciones sociales del dispositivo de arma corta para realidad extendida, se ha tenido muy presente a lo largo de todo su proceso de diseño los principios de equidad e inclusión para todos los clientes. Cabe destacar que la finalidad fundamental de este proyecto es el adiestramiento militar de soldados mediante realidad extendida. Esta comunidad, para la que va dirigido este producto, está compuesta por una población de diferente naturaleza, género, edad o etnia. Por ello, el estudio de la ergonomía ha perseguido alcanzar una comodidad universal y un diseño desarrollado para el uso indistinto de zurdos y diestros. Gracias a este diseño inclusivo, su uso no solo se limita al ámbito militar, sino que también puede ir destinado a aquellos que quieran emplear el dispositivo con finalidades de ocio o educativas.

Las implicaciones ambientales han sido un factor presente en el desarrollo del proyecto. Desde las fases preliminares al desarrollo, se seleccionó el material más conveniente para reducir al máximo la huella ecológica del producto. De esta forma se decidió escoger PLA como filamento para la impresión 3D. Este material destaca por su producción ecológica, obteniéndose a partir de materias prima como el maíz, la yuca o el trigo. La principal característica que destaca al PLA frente a otros polímeros es que es biodegradable. Adicionalmente, El filamento es renovable y reciclable. Así, los residuos de PLA producidos por una población pueden ser empleados para dar una segunda vida al material. Otro factor de este material es que no emite gases tóxicos durante su producción o tratamiento. Todas estas características hacen del PLA un material muy conveniente para la producción de objetos con un compromiso con el medioambiente. Sin embargo, no todos los plástico y resinas empleados para la impresión 3D comparten estas características y pueden resultar dañinos para el medio. Los fabricantes y los usuarios deben ser conscientes de hacer un uso responsable de estos productos, así como de su debido reciclaje. Es importante dirigir las líneas de estas tecnologías hacia un futuro más verde empezando, por ejemplo, por hacer un uso más generalizado de materiales biodegradables y reciclables como el PLA.

Por otro lado, la realidad extendida está teniendo un impacto económico significativo en numerosos aspectos gracias, en gran parte, al desarrollo de proyectos como este Trabajo Fin de Grado, que permiten fomentar y potenciar el uso de esta tecnología. El mercado de la realidad extendida alcanza ya cifras millonarias y se prevé que siga aumentando de manera exponencial. Cabe destacar que la realidad extendida es uno de los pilares fundamentales de la 4ª Revolución Industrial. Correspondientemente, son cada vez más empresas las que están invirtiendo grandes sumas de capital para tanto su investigación y

desarrollo como para poder gozar de las ventajas competitivas de la implementación de estas tecnologías. El fuerte impulso de nuevos métodos de comercio y la mejora de la experiencia que ofrecen las empresas a sus clientes son algunas de las ventajas que ofrece la realidad extendida. Como consecuencia directa del interés por la adquisición de estas ventajas es la creación de empleo y nuevas oportunidades laborales debido a que las empresas requieren más que nunca de profesionales y técnicos en tecnologías de realidad extendida.

La realidad extendida está revolucionando numerosos sectores como es la medicina, la milicia o la arquitectura. Como ya se ha explicado anteriormente en este trabajo, estos sectores ven en la realidad extendida una forma de formar y adiestrar eficazmente a sus profesionales o incluso las emplean para llevar a cabo planificaciones de acciones o para visualizar proyectos. Los nuevos métodos de enseñanza basados en realidad extendida abaratan costes tanto de material como de personal logrando una instrucción profesional. Un claro ejemplo de esto es la finalidad principal de este Trabajo Fin de Grado, que lucha por el adiestramiento avanzado de militares en un entorno inmersivo con dispositivos que simulan su equipo y armas.

Por último, técnicas como la optimización topológica y el diseño generativo, que han sido empleadas en el desarrollo de este trabajo, brindan grandes ventajas económicas en el sector industrial. Su principal característica es la reducción de material de los productos derivados de estas metodologías, lo que se resuelve en un ahorro significativo de costes. El estudio topológico y el diseño generativo optimizan las estructuras, eliminando el exceso de material y reduciendo desperdicios. También optimizan los procesos de fabricación debido, en primer lugar, a la rápida generación de formas personalizadas y de alto rendimiento, y, en segundo lugar, reduciendo cuantiosamente los tiempos de desarrollo.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y MORALES

La Cuarta Revolución industrial y los elementos que la caracterizan plantean unas profundas reflexiones éticas y morales que deben ser analizadas detenidamente para evaluar si realmente son en beneficio de la sociedad. De esta forma, la ética y la moral hacen referencia al estudio de los comportamientos, principios y valores que la sociedad considera aceptables y están estrechamente ligados a las implicaciones sociales y ambientales que se desarrollan en el Anexo I. A continuación, se exponen unas reflexiones de este tipo relativas a los ámbitos abarcados por este TFG.

Actualmente, la realidad extendida (RE) está viviendo un periodo de pleno auge y se está insertando poco a poco en la vida cotidiana y laboral de las personas. Las tecnologías de realidad extendida aportan numerosas ventajas a favor del desarrollo favorable social, sin embargo, se debe ser consciente de las consecuencias que estas implican. En primer lugar, el uso de la RE, especialmente la destinada al ocio, puede provocar en los usuarios experiencial totalmente inmersivas y adictivas. Esto puede derivar en la desconexión social y en la distorsión de la realidad, pudiendo desembocar en serios problemas de salud mental e, incluso, en accidentes debido a la imprudencia de su uso. Por otro lado, la realidad virtual puede llegar a ser empleado como medio para la extracción de datos y la monitorización de los usuarios sin su debido consentimiento, resultando en un problema de privacidad.

En esta línea aparece el término de gamificación, que consiste resumidamente en el aprender jugando. Así, se emplean, por ejemplo, simuladores de realidad extendida como método educativo moderno que potencia la motivación de los alumnos mediante la superación de minijuegos o la obtención de recompensas. En base a esta mecánica de enseñanza, la gamificación se puede interpretar como un mecanismo de manipulación de los comportamientos para lograr unos objetivos específicos. Es por ello que la gamificación debe tener una finalidad completamente transparente y clara para el adiestramiento de alumnos.

La impresión 3D es otro pilar fundamental de la Industria 4.0 y de este trabajo, la cual evoca una serie de reflexiones éticas y morales. La impresión 3D destaca por la gran libertad y flexibilidad para la creación de productos viéndose únicamente limitada por la creatividad humana. Esta faceta tiene unas connotaciones generalmente positivas, sin embargo, también puede suponer aspectos negativos. Esta vía de fabricación personalizada y de fácil acceso puede ser empleada, en las manos equivocadas, para la producción de objetos potencialmente peligrosos para la sociedad, como son armas de fuego o artilugios explosivos. Similarmente, la impresión 3D ayuda a la expropiación indebida de la propiedad intelectual. Así, piezas comerciales pueden ser fácilmente replicadas y fabricadas sin la autorización de sus creadores suponiendo, incluso, fines lucrativos de terceros. Por último, este nuevo modelo de fabricación rápido, personalizado y preciso está afectando en gran medida al comercio local. La fabricación tradicional y artesanal se está viendo sobrepasada por los nuevos medios de producción como es este, desembocando en la destrucción de pequeños talleres y comercios locales con el paso del tiempo, lo que supone una brecha difícilmente reparable.

En conclusión, tanto la realidad extendida como la impresión 3D son tecnologías con infinitas posibilidades y ventajas que ayudan al progreso y beneficio social. Sin embargo, no deben dejar de lado sus implicaciones más negativas. Para ello, se deben establecer una serie de regulaciones y pautas de seguridad para garantizar el uso responsable de estas tecnologías.

ANEXO III: MODELO DIGITAL INTERACTIVO



Título	3D Interactivo
Detalle	Pistola Háptica Virtual
Vista	Conjunto
Proyecto	Trabajo Fin de Grado
Centro	CUD / ENM

Descripción
Este modelo interactivo permite una mejor comprensión de conjunto mediante la visualización tridimensional del dispositivo diseñado. Mediante el uso del ratón sobre la imagen se puede interactuar con la misma, aumentando, disminuyendo o desplazando el contenido. Asimismo, se presentan diferentes vistas del conjunto descrito, que favorecen y complementan la interpretación visual de la realidad descrita mediante el modelo. Se puede seleccionar entre las diferentes opciones simplemente con elegir la indicada de entre todas las disponibles en el panel desplegable.

◀



Principal

▶

EL CONTENIDO QUE SE PRESENTA EN ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD E INFORMACIÓN RESTRINGIDA.

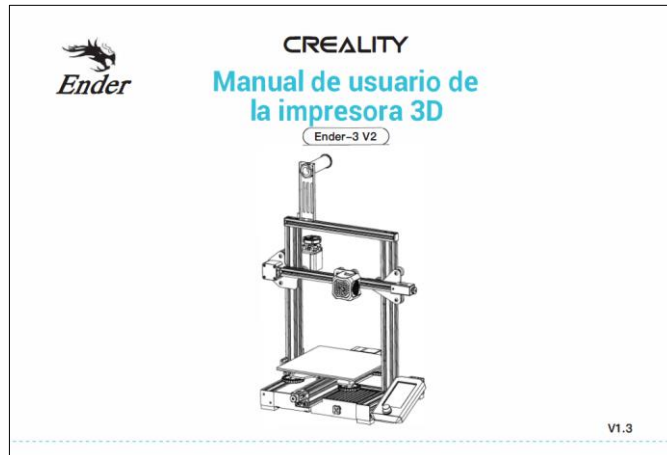
ESTA INFORMACIÓN NO SE PUEDE UTILIZAR, REPRODUCIR, PUBLICAR O REVELAR A TERCEROS SIN AUTORIZACIÓN POR ESCRITO.

CUALQUIER USO INADECUADO DE DICHA INFORMACIÓN PODRÁ SER DENUNCIADO ATENDIENDO A LA NORMATIVA.

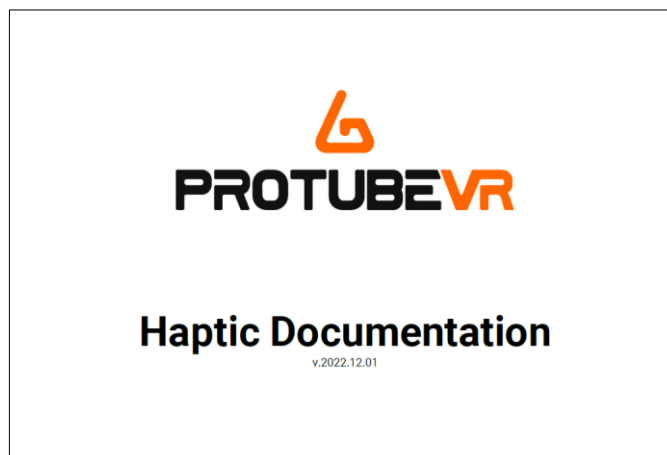
ANEXO IV: MANUALES DE USUARIO

En este anexo se van a adjuntar los manuales de uso relativo a los dispositivos empleados para la fabricación e implementación del prototipo de arma corta con respuesta háptica. Estos manuales van a orientar a los usuarios del prototipo para aprender a montar y usar los dispositivos y conocer todas sus funcionalidades. A continuación, se adjuntan imágenes con link directo (sólo habría que pulsar sobre la imagen) para acceder a los siguientes manuales:

- Manual de usuario de la impresora 3D. Ender 3 V2:



- Manual de usuario del dispositivo de respuesta háptica de *ProTube VR*:



- Guía de usuario del casco *HTC Vive Pro*:

