



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un dispositivo de tipo arma corta para simulador de
realidad virtual*

Grado en Ingeniería Mecánica

ALUMNO: Fernando Herce Peña

DIRECTORES: Pablo Falcón Oubiña
Xavier Núñez Nieto

CURSO ACADÉMICO: 2022-2023

Universida_{de}Vigo



Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño de un dispositivo de tipo arma corta para simulador de
realidad virtual*

Grado en Ingeniería Mecánica
Intensificación en Tecnología Naval
Cuerpo General

UniversidadeVigo

RESUMEN

En el mundo actual las tecnologías de la simulación permiten recrear vivencias inmersivas de gran valor en múltiples sectores. Son de especial relevancia en el ámbito militar, en el cual un adecuado realismo potencia el adiestramiento del combatiente.

Para lograr un entorno inmersivo no sólo es necesario el uso de tecnologías digitales, si no que el empleo de herramientas físicas que simulen los medios usados en el combate facilita al combatiente entrenar los movimientos y reflejos empleados en el combate.

En el presente proyecto se emplearán técnicas de ingeniería inversa, diseño digital e impresión 3D para modelar y fabricar una réplica de la FN-P9-17, pistola de dotación de la Armada. Este dispositivo se asemejará al arma real para facilitar el adiestramiento de tiro con arma corta de los alumnos de la Escuela Naval Militar.

Además de recrear dimensionalmente la pistola original, la réplica simulará fielmente las manipulaciones más comunes del arma por parte del usuario, y podrá ser integrada en un simulador de realidad virtual para permitir al tirador adiestrarse en escenarios que recreen situaciones de combate.

PALABRAS CLAVE

Ingeniería inversa, CAD, impresión 3D, pistola, realidad virtual.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a Don Pablo Falcón Oubiña y Don Xavier Núñez Nieto, mis tutores en este Trabajo de Fin de Grado, el esfuerzo e implicación demostrados para lograr la mejor consecución de este trabajo. Así mismo, me gustaría dar mis agradecimientos a todas las personas que, por la ayuda prestada, han contribuido al desarrollo de este proyecto.

Además, me gustaría agradecer a mi familia, amigos y compañeros por ser un apoyo todos estos años.

Finalmente, me gustaría dedicar el presente proyecto a mi madre, M.^a Victoria Peña Esquivias, por estar siempre a mi lado.

CONTENIDO

Contenido	5
Índice de Figuras	8
Índice de Tablas.....	11
1 Introducción.....	12
1.1 Descripción del apartado.....	12
1.2 Antecedentes	12
1.3 Motivación	13
1.4 Objetivos	14
1.5 Estructura del trabajo	14
2 Estado del arte	16
2.1 Descripción del apartado.....	16
2.2 Ingeniería inversa	16
2.2.1 Toma manual de medidas	16
2.2.2 Máquinas de Medición por Coordenadas (MMC).....	17
2.2.3 Escaneo 3D sin contacto	18
2.2.4 Computer Aided Design (CAD)	18
2.3 Simulación	19
2.3.1 Simuladores en el ámbito militar	21
2.3.2 La simulación en la Armada	24
2.4 Realidad virtual	26
2.4.1 Componentes de la realidad virtual	27
2.4.2 Dispositivos comerciales de VR.....	28
2.5 Impresión 3D.....	30
2.5.1 Ventajas y desventajas de la impresión 3D	30
2.5.2 Estereolitografía (SLA)	31
2.5.3 Sinterización Selectiva por Laser (SLS).....	31
2.5.4 Modelado por Deposición Fundida (FDM)	32
2.5.5 Comparación entre las diferentes técnicas de impresión 3D	33
3 Desarrollo del TFG.....	34
3.1 Descripción del apartado.....	34
3.2 Ingeniería inversa	34
3.2.1 Toma manual de medidas	34
3.2.2 Corredera	35
3.2.3 Cuerpo del pistolete	35

3.2.4 Cargador y retenida del cargador.....	36
3.2.5 Cola del disparador	37
3.2.6 Seguro	37
3.2.7 Retenida de la corredera	38
3.2.8 Peso y posición del centro de gravedad de la FN-P9-17	38
3.3 Consideraciones previas al diseño	39
3.3.1 Funcionamiento del arma	39
3.3.2 Limitaciones	40
3.3.3 Elementos electrónicos	41
3.4 Diseño de la réplica.....	41
3.4.1 Modelado geométrico	41
3.4.2 Elementos electrónicos	61
3.5 Fabricación.....	62
3.6 Lastrado de la réplica	65
3.6.1 Elementos de lastrado	65
3.6.2 Distribución de los lastres.....	65
3.7 Montaje y construcción de la réplica	67
3.8 Conexión al <i>software</i> de simulación	70
4 Resultados	72
4.1 Descripción del apartado.....	72
4.2 Diseño y planimetría	72
4.2.1 Planimetría	73
4.3 Fabricación y montaje	76
4.3.1 Peso y centro de gravedad de la réplica.....	77
4.4 Coste de fabricación.....	80
4.5 Implementación.....	82
5 Conclusiones y líneas futuras	83
5.1 Descripción del apartado.....	83
5.2 Conclusiones de los objetivos iniciales.....	83
5.2.1 Objetivo principal: diseño.....	83
5.2.2 Objetivo complementario: fabricación y montaje	84
5.2.3 Objetivo complementario: conectividad.....	84
5.3 Líneas futuras	84
6 Bibliografía.....	86
Anexo I: Implicaciones Sociales, Económicas, y Ambientales	89

Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales	92
Anexo III: Modelo digital interactivo.....	94
Anexo IV: Presupuesto detallado	96
Anexo V: Guía del desarrollador del <i>Vive Tracker 3</i>	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 - Simulador de puesto de observador avanzado SIMACA [2].....	13
Figura 2-1 - Empleo de una máquina MMC para medición de una pieza [3].....	17
Figura 2-2 - Disposición de elementos en escáneres de luz estructurada [4]	18
Figura 2-3 - Simulador quirúrgico de alta fidelidad Ramphal [7]	20
Figura 2-4 - Simulador MINERVA del Ejército [2]	21
Figura 2-5 - Simulador de caza de combate [2]	23
Figura 2-6 - Alumnos de la ENM en el CISI de Ferrol (elaboración propia)	25
Figura 2-7 - Software y hardware del simulador SCATT [14]	26
Figura 2-8 - Simulador de conducción en el VR CAVE [17]	27
Figura 2-9 - Simulación de buceo mediante el KAT Walk C2 [19]	28
Figura 2-10 - Principales características <i>Vive Tracker 3</i> [22].....	29
Figura 2-11 - Elementos de la estereolitografía inversa [23].....	31
Figura 2-12 - Elementos de la SLS [24]	32
Figura 2-13 - Características de la impresión FDM [24]	32
Figura 2-14 - Comparativa FDM (izquierda) frente a SLA (derecha) [25]	33
Figura 3-1 - Fases del proyecto.....	34
Figura 3-2 - Elementos de la corredera de la FN-P9-17 [26].....	35
Figura 3-3 - Elementos principales del cuerpo del pistolete [26]	36
Figura 3-4 - Cargador y funcionamiento del cargador y su retenida	36
Figura 3-5 - Cola del disparador de la FN-P9-17.....	37
Figura 3-6 - Detalles del seguro activado (izquierda) y desactivado (derecha).....	37
Figura 3-7 - Aspecto externo y funcionamiento de la retenida trasera	38
Figura 3-8 – Posición del CDG en el arma y momento	39
Figura 3-9 - Elementos de la FN-P9-17 a desarrollar en el proyecto	40
Figura 3-10 - Diagrama de arma corta con <i>Vive Tracker 3</i> integrado [22].....	41
Figura 3-11 - Vista isométrica de los lados derecho e izquierdo del cuerpo del pistolete.....	42
Figura 3-12 - Vistas y secciones del acople de un accesorio mediante el rail	43
Figura 3-13 Corrugado de la réplica y del arma real	43
Figura 3-14 - Vista isométrica de la sección del canal de paso de cables.....	44
Figura 3-15 - Corredera real (con mira trasera), corredera 3D y sección transversal de esta.....	45
Figura 3-16 - Relación de la corredera (azul) con otros elementos y sus guías.....	45
Figura 3-17 – Comparación de los grosores del saliente durante el desarrollo	46
Figura 3-18 - Detalle del muelle recuperador, su guía y el platillo	47
Figura 3-19 - Soporte de la guía del muelle recuperador y alojamiento de su sensor	47
Figura 3-20 - Geometría de la placa delantera del cuerpo del pistolete y explosionado de su montaje	48

Figura 3-21 - Detalles de la parte frontal del pistolete y sección de las colas de milano	49
Figura 3-22 - Elementos del martillo y su alojamiento.....	49
Figura 3-23 - Geometría de la cola del disparador y disposición en el conjunto.....	50
Figura 3-24 - Elementos del alojamiento de la cola del disparador y su sensor	51
Figura 3-25 - Explosionado y ensamble del conjunto del seguro	52
Figura 3-26 - Elementos del alojamiento del seguro	52
Figura 3-27 - Detalle del alojamiento del sensor del seguro de la ranura para sus pines	53
Figura 3-28 - Geometría de la retenida del cargador y secciones de su ensamblaje.....	54
Figura 3-29 - Elementos del alojamiento de la retenida de la corredera.....	54
Figura 3-30 - Detalle del alojamiento del sensor de la retenida de la corredera.....	55
Figura 3-31 - Comparación cargador real y réplica y elementos de este	55
Figura 3-32 - Funcionamiento del cargador (verde) y de su retenida (blanco).....	56
Figura 3-33 - Elementos del alojamiento de la retenida del cargador	57
Figura 3-34 - Alternativas del posicionamiento del tracker y CDG estimado del arma real	58
Figura 3-35 – Antiguo soporte del conector hembra y elementos del soporte macho del <i>tracker</i>	59
Figura 3-36 - Elementos del soporte hembra del <i>tracker</i> y su tapa	60
Figura 3-37 - Numeración de los pines de los elementos electrónicos	62
Figura 3-38 – Impresión y curación de piezas mediante SLA.....	63
Figura 3-39 - Comparación de la retenida de la corredera impresa mediante FDM y SLA	63
Figura 3-40 – Comparación del desempeño de piezas de SLA frente a FDM.....	64
Figura 3-41 - CDG de la réplica sin lastrar	66
Figura 3-42 – Lastrado de la corredera	66
Figura 3-43 – Lastrado del cargador (izquierda) y lastres empleados	67
Figura 3-44 - Montaje de los elementos eléctricos y de elementos del cuerpo derecho del pistolete	67
Figura 3-45 – Detalle de la disposición de los elementos internos del pistolete	68
Figura 3-46 - Elementos del montaje del muelle recuperador y la corredera	68
Figura 3-47 - Paso del montaje del muelle recuperador y la corredera	69
Figura 3-48 – Montaje de la conexión eléctrica con los <i>pogo pin</i>	69
Figura 3-49 – Diagrama de conexión del <i>Dongle</i> (izquierda) y ventana de <i>Steam VR</i>	70
Figura 3-50 – Menús desplegables de <i>Steam VR</i> y menú de “ajustes de mando”	70
Figura 3-51 – Menú de “probar mando” de <i>Steam VR</i>	71
Figura 4-1 – Renderizado de la réplica	72
Figura 4-2 – Renderizado de sección transversal de la réplica	73
Figura 4-3 – Perfil de la réplica con elementos transparentes	74
Figura 4-4 - Comparación entre la longitud de la FN-P9-17 (izquierda) y la de la réplica (derecha)	76
Figura 4-5 – Comparación entre la altura de la FN-P9-17 (izquierda) y la de la réplica (derecha).....	76

Figura 4-6 – Detalles de la instalación eléctrica en el soporte del <i>tracker</i> y en el pistolete	77
Figura 4-7 – Pesaje de la réplica	77
Figura 4-8 – Comparación lastrado de la corredera frente al 100% de ocupación de esta	78
Figura 4-9- Comparación del lastrado del cargador frente al 100% de la ocupación de este	78
Figura 4-10 – Comparación de la posición del CDG en la FN-P9-17 frente a la réplica	79
Figura 4-11 – Comparación visual de la réplica frente a la FN-P9-17	79
Figura 4-12 - Vista lateral de la réplica y la pistola real	80
Figura 4-13 – Comprobación de la integración de la réplica en el simulador	82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 - Relación de conexiones eléctricas	62
Tabla 2 - Gastos de fabricación.....	80
Tabla 3 - Desglose de características de las piezas impresas.....	81
Tabla 4 - Resumen de gastos.....	81
Tabla 5 - Gasto en material de impresión	97
Tabla 6 - Gasto de la electricidad por pieza.....	98
Tabla 7 - Gasto en materiales de uso y montaje	99

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del apartado

En el presente apartado se expondrán las razones que motivaron el desarrollo de proyecto, así como el contexto en el que se ha desarrollado. Con este fin se indicarán los antecedentes del trabajo, a continuación, la motivación de su realización, los objetivos perseguidos durante la realización del proyecto y, finalmente, la estructura que sigue la presente memoria.

1.2 Antecedentes

Desde la primera revolución industrial el mundo ha cambiado drásticamente gracias a los grandes avances tecnológicos. La naturaleza auto catalizadora de la ciencia ha favorecido que dichos avances se sucedan cada vez con mayor prontitud. El mayor exponente de dicho efecto se ha vivido en el último siglo, en el que la aparición de los ordenadores ha multiplicado los avances de las ciencias puras y, especialmente, de las ciencias aplicadas.

En este contexto, en las últimas décadas la tecnología de la impresión 3D ha visto la luz, siendo una de las tecnologías emergentes de mayor importancia para la industria actual. Mediante estas tecnologías, es posible crear piezas de geometrías de gran complejidad de manera mucho más eficiente que previamente. Además, la amplia variedad de materiales que actualmente pueden ser empleados para la impresión 3D permite la aplicación directa de estas tecnologías en ambientes tan variados como la medicina o la industria aeroespacial. Finalmente, la gran versatilidad de esta tecnología ha motivado una fuerte inversión en la misma, lo que ha permitido que las impresoras 3D, lejos de quedarse en caras máquinas de producción industrial, puedan ser adquiridas a precios razonables por el ciudadano medio. De esta manera, instituciones de la Armada tienen un gran interés en este tipo de tecnologías, al permitirles fabricar piezas de gran calidad en el propio momento sin necesidad de depender de una larga cadena logística.

Otro de los pilares de la ciencia moderna son los simuladores, que permiten obtener datos a los que previamente sólo se podía acceder de manera empírica. El gran avance en la computación permite que la simulación sea de gran calidad en la gran mayoría de las situaciones, obteniéndose resultados de gran verosimilitud incluso en casos complejos. Así mismo, al igual que la impresión 3D, la simulación es una tecnología de una amplísima versatilidad, pudiendo ser empleada desde para el diseño y testeo de piezas y elementos constructivos hasta para la resolución de problemas físicos de gran complejidad. No obstante, las Fuerzas Armadas centran su atención en otro tipo de simuladores: aquellos que permiten a un ser humano adiestrarse en una tarea compleja en un ambiente controlado.

Siendo estas tecnologías tan prometedoras, las Fuerzas Armadas tienen un gran interés en la aplicación de dichas tecnologías en el mundo de la defensa. Este hecho se manifiesta en la disposición

de la Armada a introducir impresoras 3D en sus buques [1] debido a las amplias capacidades que ofrecen. Entre estas destacan la capacidad de fabricar repuestos en el propio buque cuando, por motivos de una larga navegación o la lejanía de puerto, no sea posible obtenerla a través de la cadena logística establecida. Además, esto permitiría reducir y simplificar el almacenamiento de repuestos en el propio buque.

Respecto a los simuladores, la aplicación de estas tecnologías en el mundo castrense es y será de gran importancia. Aplicable en todos los ámbitos, en la actualidad las Fuerzas Armadas españolas hacen uso de simuladores para adiestrar al personal que opera en prácticamente cualquier plataforma desde carros de combate a cazas o submarinos, como se puede ver en la Figura 1-1. Esto se debe al gran ahorro que permite la simulación, al no ser necesario emplear la plataforma real (normalmente de gran costo de empleo) para adiestrarse, así como da al operador el margen de error necesario como para aprender sin poner al aparato ni a sí mismo en peligro.



Figura 1-1 - Simulador de puesto de observador avanzado SIMACA [2]

No obstante, también permite a individuos entrenar en entornos donde no interviene una plataforma, y este es el caso (entre otros) de los simuladores de tiro. Gracias a estos el operador puede adiestrarse en ejercicios de tiro realistas en ambientaciones tácticas de alta tensión, situando al usuario en circunstancias cuya replicación en la realidad serían muy difíciles. Además, permiten al usuario adiestrarse en los movimientos que implican el uso de sus armas, ganando así la memoria muscular (tan necesaria en el estrés del combate) sin el coste y el riesgo inherentes al uso de munición de guerra.

Es en este último aspecto en el que incide el presente proyecto: mediante la creación de un dispositivo de arma corta para el simulador de realidad virtual, el usuario puede adiestrarse en situaciones tácticas donde la toma rápida de decisiones y el tiro reactivo sean la piedra angular. Debido a ello, el presente trabajo pretende contribuir en el esfuerzo de adiestrar al personal de la Armada en la habilidad, tan necesaria para un militar, del tiro con arma corta.

1.3 Motivación

Así pues, el presente proyecto busca indagar en ese mismo concepto: vista la idoneidad con la que los simuladores se adaptan a las necesidades actuales de la Armada, pretendemos contribuir en el esfuerzo de adiestrar al personal de la Armada en la habilidad, tan necesaria para un militar, del tiro con arma corta.

A medida que la naturaleza del conflicto avanza hacia el espectro gris del combate, es especialmente importante incidir en la rápida reacción del operador a los estímulos externos. Para ello, el realismo de los simuladores ha de ser el máximo posible tanto en la ambientación como en los instrumentos. Debido a ello el arma corta del simulador ha de ser tan parecida al arma real como sea posible, de manera que las reacciones aprendidas en el simulador puedan ser extrapoladas fácilmente al empleo del arma corta. Concretamente, nuestros esfuerzos se realizarán en torno a la Fn-P9-17, al ser esta la pistola de dotación de la Armada.

Debido a ello, el diseño del arma corta utilizada en el simulador cobra una especial relevancia. Así pues, las dimensiones, el peso, el equilibrio y el tacto del arma deben ser tan parecidas como sea posible a su contraparte real. Cumplimentar estos objetivos de manera simultánea será, de esta manera, el cuerpo principal del proyecto.

1.4 Objetivos

Con el propósito de facilitar nuevos medios de adiestramiento individual para los miembros de la Armada, el presente proyecto pretende diseñar una réplica de un arma corta de fuego que pueda ser empleada en entornos de realidad virtual. Se replicará la pistola FN-P9-17, empleada extensivamente en las unidades de la Armada al ser su arma de dotación.

De esta manera, el objetivo del presente trabajo es: diseñar una réplica de la pistola FN-P9-17 que pueda ser empleada en el simulador de realidad virtual del CUD. Este objetivo principal se divide en los siguientes objetivos secundarios:

- Dimensiones y geometría: la réplica debe tener las mismas características dimensionales que el arma real, con el objetivo de que la manipulación de ambas sea el mismo.
- Apariencia: el dispositivo diseñado debe ser reconocible como la FN-P9-17, siendo identificables sus elementos más característicos por el tirador.
- Peso: se buscará que tanto el peso como la posición del centro de gravedad sean lo más parecidos posible a la pistola original, con el fin de las cargas físicas que sufra el usuario durante la simulación sean las mismas que si usara el arma real.
- Funcionalidad: los principales mecanismos del arma deberán estar presentes en la réplica, de manera que la manipulación de esta última sea igual a la de la pistola.

Además, y en el caso de finalizar de manera satisfactoria el diseño de la réplica de la pistola FN-P9-17, se contemplan los siguientes objetivos complementarios:

- Fabricación y montaje: fabricar los elementos diseñados del dispositivo y ensamblar estos de manera que el prototipo sea funcional.
- Conectividad: vincular la réplica al software de realidad virtual de manera que el uso y manipulación de esta se vean reflejados en el entorno virtual.

1.5 Estructura del trabajo

La estructura del presente proyecto seguirá la establecida por el Centro Universitario de la Defensa:

- Introducción: en este apartado se desarrollarán los antecedentes al trabajo, la motivación de este mismo y los objetivos perseguidos.
- Estado del arte: se estudiarán las distintas tecnologías que han influenciado el desarrollo del proyecto.
- Desarrollo: en este apartado se analizará en detalle el proceso seguido en el trabajo, según la secuencia de diseño, fabricación y las posteriores acciones de vinculación entre el arma corta y el *software* de simulación.

- Resultados: en este apartado se presentarán los resultados obtenidos en el proyecto, estudiando si cumplen de manera satisfactoria los objetivos planteados inicialmente.
- Conclusiones y líneas futuras: se analizará de manera crítica el desarrollo del proyecto y sus resultados, planteando las posibles ampliaciones que podrían complementar el mismo.
- Anexos: donde se desarrollarán de manera más exhaustiva aquellos asuntos que previamente no pudieron estudiarse en profundidad, entre los que se incluyen las implicaciones sociales, económicas y ambientales y las reflexiones éticas y sociales resultantes del proyecto.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Descripción del apartado

En el presente apartado estudiaremos el desarrollo y características de las tecnologías que se aplican en el presente trabajo. Debido a ello, nos centraremos en la ingeniería inversa, la simulación y la realidad virtual y, finalmente, en la impresión 3D.

En cada uno de estos apartados estudiaremos su origen, sus características, sus principales fortalezas y debilidades y sus ámbitos de aplicación. Así mismo, veremos varios ejemplos del uso de estas tecnologías en el mundo moderno y, en alguna de ellas, su aplicación directa en el ámbito de la defensa y en la Armada.

2.2 Ingeniería inversa

La ingeniería inversa es el proceso por el cual se observa un objeto ya existente y se estudian sus características, de manera que la información aprendida pueda ser empleada en un diseño posterior. Pese a que los orígenes de la ingeniería inversa datan de la Segunda Guerra Mundial, cuando ambos bandos estudiaban los diseños de los adversarios como base para mejorar los propios, en la actualidad se emplea en prácticamente todos los campos de la ingeniería y la construcción. De esta manera, entre las aplicaciones de la ingeniería inversa se encuentran:

- Comparación con productos ya existentes en el mercado.
- Diseño y fabricación de modelos nuevos partiendo de objetos preexistentes ya anticuados.
- Reproducción de modelos complejos.
- Reconstrucción del modelo original a partir de un objeto desgastado.
- Fabricación de un producto de cuyo modelo no se tienen las dimensiones.

La observación, elemento herramienta principal de la ingeniería inversa, puede centrarse en diferentes aspectos, como su funcionamiento, sus materiales, su construcción su interacción con otros elementos. Dicho proceso suele seguir un patrón iterativo, debiéndose modificar el diseño original en múltiples ocasiones hasta obtener el resultado deseado. El enfoque aplicado en el presente proyecto es precisamente la aplicación de la ingeniería inversa para obtener las características dimensionales de un objeto ya existente (en este caso una pistola FN-P9-17). De esta manera, algunos de los métodos existentes de para obtener dichas medidas son:

2.2.1 Toma manual de medidas

Este método, el más tradicional y sencillo de todos, consiste en tomar un instrumento de medida mecánico (como puede ser un pie de rey o un goniómetro) y que una persona tome personalmente las medidas del objeto. Este método es de gran sencillez y permite la toma efectiva de dimensiones de

objetos de geometría sencillos, perdiendo efectividad a medida que aparezcan curvas complejas. Finalmente, una de las grandes ventajas de este método es el coste económico, ya que los instrumentos de medida manual no suelen precisar de componentes electrónicos de gran complejidad, como ocurre con otros métodos. Esto permite que este método de medida pueda ser empleado por prácticamente cualquier persona.

2.2.2 Máquinas de Medición por Coordenadas (MMC)

Como hemos visto, la toma de medidas manuales es problemática en el caso de objetos complejos o con gran cantidad de curvas. Una de las posibles soluciones son las Máquinas de Medición por Coordenadas. Estas emplean un palpador que envía una señal eléctrica cada vez que toca el objeto a medir (Figura 2-1). Dicho palpador se desplaza a través de unas guías tridimensionales o a través de un brazo mecánico, permitiendo conocer con precisión la posición del palpador y, por lo tanto, las dimensiones de la pieza a medir.

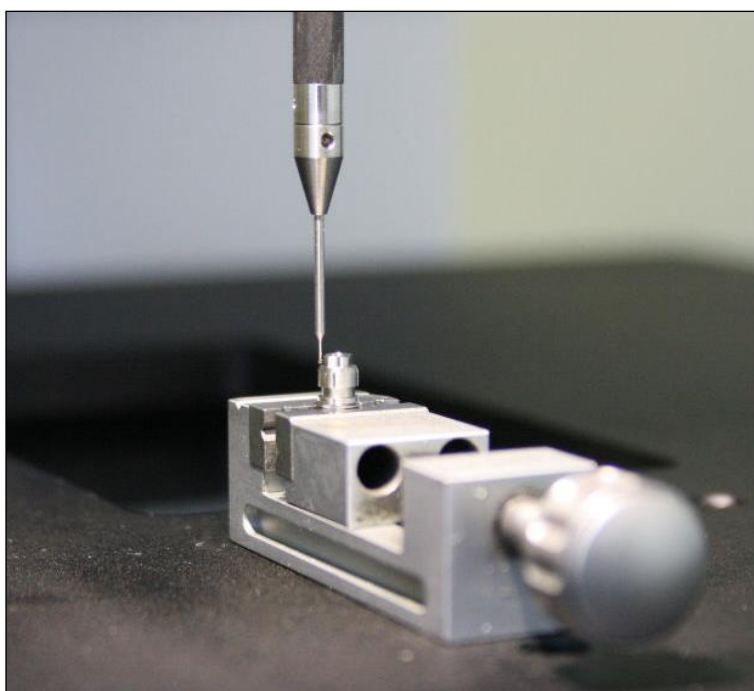


Figura 2-1 - Empleo de una máquina MMC para medición de una pieza [3]

Debido a su complejidad, los MCC tienen un mayor número de componentes que los sistemas de medida manuales. Para que las mediciones sean precisas, estos elementos deben de ser confiables y las partes móviles deben de moverse en perfecta coordinación. Algunos de los elementos más destacables son:

- **Probeta:** de gran importancia al ser el elemento encargado de contactar con el objeto y enviar la señal eléctrica. Debe tener una gran dureza y estabilidad dimensional frente a los cambios de temperatura, por lo que suelen emplearse materiales como el rubí.
- **Estructura:** son todos los elementos que soportan la probeta y la desplazan por el espacio. Puede constar de varios railes perpendiculares entre sí, de un brazo mecánico o de una combinación de estos. La precisión en el movimiento y parametrización de este, así como la capacidad de regular la velocidad del movimiento, o la estabilidad, son características clave de este elemento.
- **Tabla de granito:** es la base sobre la que se sitúa el objeto y se monta la maquinaria. Se emplea una tabla de gran tamaño y peso debido a la estabilidad inercial y dimensional que le caracteriza. Es un elemento clave pues dota de una gran estabilidad a la estructura de la maquinaria, permitiendo mayor precisión en las medidas.

- **Software:** de gran importancia pues es responsable de la coordinación del resto de elementos, además de la toma de datos, el registro de estos y el posterior procesamiento de esta información para su empleo por el usuario de la máquina.

Gracias a estos elementos, el software obtiene una nube de puntos que se corresponde a la forma tridimensional del objeto estudiado. Mediante un procesamiento posterior, esta nube de puntos es presentada al usuario de la máquina, pudiendo así trabajar con un modelo 3D del objeto original.

2.2.3 Escaneo 3D sin contacto

En el caso de enfrentarse a una figura compleja en los cuales el empleo de una probeta es problemático, un método alternativo es el empleo de escáneres 3D. Estos permiten obtener la nube de puntos correspondientes al objeto mediante el empleo de sensores ópticos, láseres, etc. Algunas de las tecnologías empleadas en este campo son:

- **Triangulación por láser:** este sistema emplea una fuente de luz láser y un fotodetector no alineados que recibe la luz reflejada en el objeto. Sabiendo el ángulo de emisión del láser y la distancia al objeto (obtenida mediante el fotodetector), mediante la medición del ángulo con el que el rayo reflejado incide en el sensor, es posible obtener las características dimensionales del objeto. La implementación de la tecnología LIDAR en *smartphones* pone esta capacidad al alcance del ciudadano medio.
- **Fotogrametría:** este método consiste en la realización de múltiples fotografías desde múltiples ángulos distintos. Mediante la “intersección” digital de dichas fotografías se puede obtener un modelo tridimensional del objeto fotografiado. Este método, de gran popularidad en el ámbito geográfico y topográfico para crear planos 3D de grandes áreas, es aplicado también para la obtención de modelos 3D de objetos de menor tamaño.

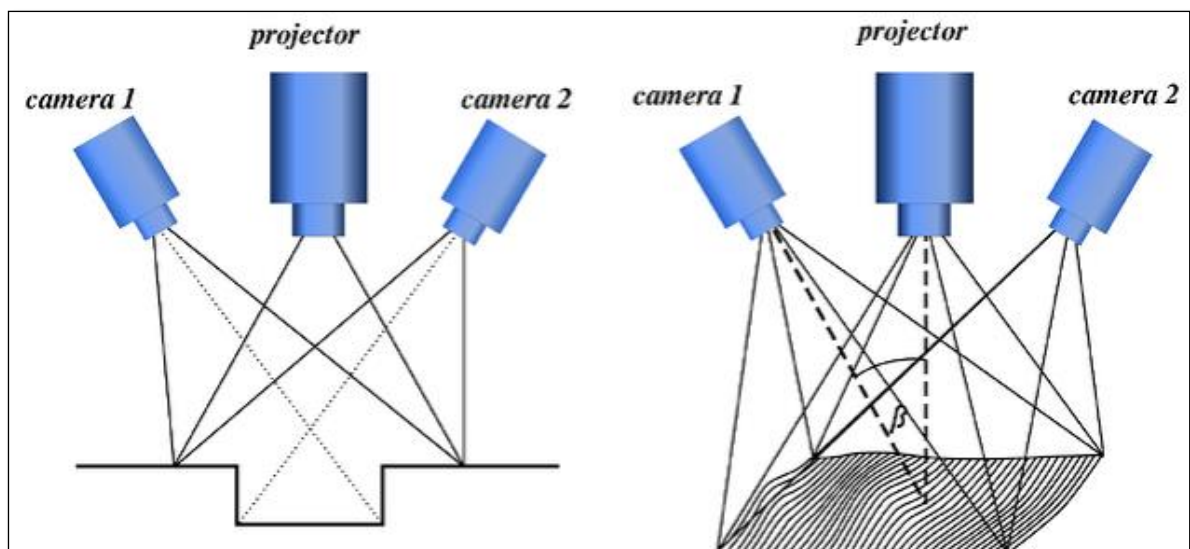


Figura 2-2 - Disposición de elementos en escáneres de luz estructurada [4]

- **Escáneres de luz estructurada:** este sistema consiste en la emisión de un patrón de luz concreto y conocido (generalmente líneas rectas). Además del foco de luz, se sitúan una o más cámaras en ángulos distintos, captando cada una de estas el patrón de luz modificado por la geometría del objeto. Mediante un procesamiento posterior de dichas grabaciones se puede obtener la nube de puntos correspondiente al objeto escaneado (Figura 2-2).

2.2.4 Computer Aided Design (CAD)

Una vez medida la geometría de la figura, el siguiente paso en la ingeniería inversa es recrear un modelo de dicha pieza que sirva para desarrollar el proyecto deseado. Una de las mejores herramientas

es el *Computer Aided Design (CAD)*, que es el empleo de un ordenador para diseñar y documentar el proceso de diseño de un producto. Estos programas pueden permitir generar un objeto (sólido o no) tridimensional o trabajar con los planos 2D del objeto. En el primer caso suelen tener la capacidad de generar los planos detallados del objeto tridimensional diseñado, facilitando la comprensión del modelo por personal cualificado.

Otra gran ventaja es, en el caso de trabajar con un sólido 3D, la facilidad para realizar el diseño, ya que permite visualizar directamente la pieza y facilita un modelado más intuitivo de esta. Finalmente, la gran ventaja del CAD respecto al modelado tradicional es el ahorro de tiempo que permite, ya que la modificación de la pieza y los planos es menos engorrosa que en la realidad, así como facilita el almacenamiento de las diferentes fases del diseño y, por último, compartir los archivos del diseño.

Otra de las grandes ventajas del CAD es la implementación del *Computer Aided Engineering (CAE)*, que son los softwares que permiten la simular el funcionamiento de la pieza mediante la aplicación de fenómenos físicos como la dinámica, la cinética o el cálculo de fatigas. Gracias a ello el ingeniero es capaz de comprobar el funcionamiento de la pieza y realizar los cambios pertinentes sin necesidad de fabricar un prototipo y someterlo a pruebas reales.

Por último, otro aliciente de emplear CAD en la actualidad es el *Computer Aided Manufacturing (CAM)*, que es el software encargado de procesar los procedimientos de fabricación de la pieza según las indicaciones del usuario y partiendo del archivo CAD pertinente. Gracias a ello la fabricación se simplifica y agiliza considerablemente.

A continuación, veremos con más detalle el software empleado en el presente trabajo haciendo las funciones de CAD y CAE:

Autodesk Inventor:

Inventor combina las capacidades CAD y CAE en un mismo programa. De esta manera permite realizar el diseño 3D de una pieza sólida y modificar esta de manera intuitiva. A partir de esta permite generar los planos correspondientes rápidamente. Además, el mismo programa permite realizar ensamblajes de varias piezas y trabajar con estas controlando las interacciones que tienen entre sí.

Respecto a la capacidad CAE, *Inventor* permite determinar el material de las piezas con sus características físicas y estudiar el comportamiento de estas ante combinaciones de cargas físicas. Mediante mallado, permite determinar de manera precisa el funcionamiento de dichos objetos ante la fatiga.

Finalmente, una de las grandes ventajas de *Inventor* es que facilita el trabajo colaborativo entre varias personas implicadas en el proyecto, permitiendo que las modificaciones realizadas en una pieza se vean reflejadas en automático en todos los planos y ensamblajes del proyecto, así como llevando un registro adecuado de toda la actividad.

2.3 Simulación

Con el avance de la tecnología moderna, la industria moderna se apoya en varias tecnologías habilitadoras en las cuales se apoyan todas las demás y que las hacen posibles. Una de ellas es la simulación [5], cuyo objetivo es conocer las respuestas que da un determinado sistema ante una situación específica sin generar ningún riesgo para los humanos ni para las máquinas.

De esta manera, la simulación es un concepto amplio cuya aplicación es de utilidad en una gran variedad de sectores: desde la industria hasta la astrofísica. Esto se debe a que, a pesar de la gran inversión que supone la creación de un simulador específico a las necesidades del cliente, la experiencia generada por dicha simulación acaba generando beneficios. Esto es especialmente destacable en aquellos casos en los cuales la práctica real de dicha actividad conlleve un coste o un riesgo prohibitivo, como puede ser el caso de la automoción o la medicina. [6]

Un ejemplo práctico de la gran utilidad de la simulación la encontramos en los simuladores quirúrgicos. Estos permiten a los estudiantes de medicina adquirir una experiencia previa a las operaciones con pacientes reales sin la cual sería inviable realizar sus primeras operaciones. De esta manera, la simulación quirúrgica persigue:

- Entrenar al estudiante en casos reales, de manera que se enfrente a casos demandantes de toma de decisiones y trabajo en equipo.
- Adquirir las destrezas y habilidades técnicas mediante la práctica, reduciendo el tiempo necesario para adquirirlas y suavizando la curva de aprendizaje.
- Adquirir competencias en el tratamiento de enfermedades de baja prevalencia¹ acerca de las cuales sería casi imposible adquirir experiencia sin el uso de simuladores.
- Permitir entrenamiento progresivo, regulando la dificultad de las simulaciones y el tiempo dedicado a cada fase.
- Realizar exámenes clínicos objetivos y estructurados, siendo esta una competencia crítica en los residentes y profesionales de la medicina.
- Disminuir los errores debidos a la complejidad de las intervenciones quirúrgicas, resultantes de la complicación inherente a la medicina moderna.



Figura 2-3 - Simulador quirúrgico de alta fidelidad Ramphal [7]

Para lograr estos objetivos, en el mundo de la simulación sanitaria se han clasificado los simuladores en función del realismo que pueden ofrecer al usuario, habiendo así:

- **Simuladores de baja fidelidad:** sólo imitan una parte del paciente. Ejemplos de estos son los maniqués y modelos tridimensionales enfocados a una enfermedad concreta. Estos permiten una mejor comprensión de dicha dolencia y enfocarse en la planificación de la solución.
- **Simuladores de fidelidad media:** combinan el modelo anatómico con programas electrónicos de baja complejidad. Un ejemplo sería el maniquí de entrenamiento de reanimación cardiopulmonar.
- **Simuladores de fidelidad alta:** permite la integración de maniqués de alta complejidad con múltiples programas y sensores. De esta manera se logra simular escenarios complejos en los que la comprensión de todas las variables del paciente es vital.

Un ejemplo concreto de un simulador quirúrgico de fidelidad alta sería el Simulador Ramphal (Figura 2-3). Este incluye un corazón de cerdo el cual, mediante el uso de sistemas hidráulicos,

¹ “Las enfermedades poco frecuentes (EPOF o EPF) o raras, son aquéllas que se presentan con escasa frecuencia en la población general y afectan a un número reducido de personas en una población determinada (baja prevalencia) [27]”.

permite simular los latidos del paciente y las reacciones de este a varios estímulos. De esta manera, variables como la velocidad, la fuerza de contracción o el tamaño del corazón pueden variarse para obtener escenarios diferentes. Gracias a ello, los usuarios pueden practicar múltiples técnicas quirúrgicas de manera realista, incluyendo reacciones a situaciones de emergencia que serán de aplicación en casos reales en un hospital [8].

En el caso previamente expuesto, la simulación precisaba de la interacción activa del ser humano para llegar a los resultados obtenidos. Además, aparte de los elementos electrónicos y lógicos empleados en el cálculo de los resultados biológicos obtenidos, la carga computacional de dicho simulador es baja. Esto es una excepción en el mundo actual, donde la gran mayoría de los simuladores son realizados en su totalidad mediante computación.

En estos, la simulación puede ser interactiva, en la cual las acciones humanas son una variable más que influye en el resultado (como es el caso de Simulador Ramphal) o no interactiva, en la que se cargan unos parámetros preestablecidos y los resultados se obtienen sin intervención humana posterior [9].

2.3.1 Simuladores en el ámbito militar

Como hemos visto, la simulación ofrece unas amplísimas oportunidades a múltiples sectores de nuestra sociedad. Debido a ello no es sorpresa saber que el mundo militar también se aprovecha de estas ventajas y, de hecho, lleva empelándose desde la antigüedad.



Figura 2-4 - Simulador MINERVA del Ejército [2]

Un ejemplo es el juego Chaturanga, un predecesor del ajedrez de origen indio. En este juego cuatro jugadores enfrentaban sus ejércitos respectivos formados por los principales elementos de los ejércitos de aquel entonces: infantería, caballería, carros, elefantes y el rajá. Pero este no es un caso aislado. Los romanos empleaban sistemas de simulación mediante cajones de madera y figuras de madera recreando, tan fielmente como podían, los escenarios a los que iban a enfrentarse. Posteriormente, en la actual Alemania se desarrolló el *Kriessspiel*, un juego de guerra empleado para enseñar táctica a sus oficiales. El matemático francés Gaspard Mongue diseñó modelos matemáticos aplicados a la logística militar que fueron empleados de manera efectiva por Napoleón.

Como podemos ver, la simulación ha acompañado a la milicia a lo largo de su prolongada carrera. La complejidad y realismo de dichas simulaciones han aumentado a medida que los medios y, especialmente la capacidad de computación, han crecido. Eso se debe a la estrecha relación que hay entre los modelos matemáticos y la propia simulación. De esta manera, la creación de los ordenadores ha permitido la mejora de los simuladores militares hasta límites jamás pensados (Figura 2-4). Debido

a ello, múltiples instituciones ofrecen prácticas de alta calidad cuyo precio, como el *Wargaming Center* del *Naval Warfare Studies* de EEUU, puede alcanzar hasta los 100.000 euros por diez días de adiestramiento [2].

No obstante, los simuladores militares hace ya tiempo que dejaron de emplearse exclusivamente para la simulación constructiva dedicada a la instrucción de los mandos. En la actualidad, las capacidades tecnológicas han permitido el empleo de simuladores enfocados al adiestramiento de las dotaciones de plataformas, desde simuladores de vuelo a carros de combate o submarinos (como el SIMPLA del submarino S-80). El realismo de dichos sistemas permite que estos sean prácticamente indistinguibles de la plataforma real. Como podemos ver, existe una gran variedad de simuladores de aplicación militar. Estos suelen ser clasificados en función de su naturaleza:

- A. **Constructiva:** son aquellos en los que se representan unidades propias y adversarias en un escenario premeditado, de manera que el usuario controle los movimientos y acciones generales de sus unidades y las relaciones entre ellas en vez de centrarse en las acciones concretas de una sola unidad. Este es el caso de los juegos de guerra previamente citados y es empleado mayormente en el adiestramiento de los miembros de los estados mayores, donde el mando y control son las habilidades de mayor importancia.
- B. **Virtual:** aquellos en los que se emplean ambientes simulados para el adiestramiento individual. Ejemplos de estos serían los simuladores de tiro de realidad virtual.

De entre los simuladores virtuales cabe destacar el concepto de *serious games*. Estos son “aplicaciones de ordenador con el objetivo de combinar simultáneamente aspectos serios como la enseñanza, el aprendizaje... con experiencias lúdicas propias de un videojuego” [10]. Este concepto, que es muy amplio, es de especial relevancia en el mundo militar debido a que existe una amplia oferta de videojuegos de temática bélica cuyo realismo los hacen aptos para el adiestramiento de militares profesionales. Por ejemplo, el *Virtual Battlespace 3* es empleado como simulador para entrenamiento de sus tropas por el US Army [2] y el la Infantería de Marina española [11]. Este ejemplo es la punta del iceberg de la relevancia que tiene el mundo de los videojuegos en la simulación militar.

- C. **Real:** en ellos se emplean medios reales para simular combates entre la unidad que se adiestra y una fuerza opositora. Un ejemplo es el empleo de munición UTM en enfrentamientos entre equipos realistas. Esta consiste en un casquillo de plástico con cera coloreada en su interior que se puede utilizar en armas reales mediante un conjunto del cierre modificado [12].

Como podemos ver, la naturaleza de los simuladores militares es rica y variada. El gran interés de la milicia en esta tecnología, entre otros motivos, a que permite afrontar escenarios de manera sistemática. En las operaciones militares, el desconocimiento (parcial o total) de la realidad en el terreno, así como la dificultad a la hora de transmitir sus intenciones a sus subordinados, son la principal causa de que los planeamientos no suelen sobrevivir a la realidad sobre el terreno. El empleo de simuladores permite paliar este efecto al dar a los mandos una experiencia en múltiples escenarios en los que los *inputs* suelen ser imprevisibles.

Otro beneficio de los simuladores en la carrera de las armas es que el coste de empleo es relativamente bajo al coste de hacer prácticas reales. Esto es especialmente cierto para los simuladores constructivos, en los que el adiestramiento real de estados mayores implicaría la movilización de numerosas unidades reales durante un tiempo prolongado de tiempo. A los prohibitivos costes monetarios se sumarían los problemas de disponibilidad de dichas unidades y la incapacidad estratégica de emplear tantos recursos de las fuerzas del estado para dicha tarea de manera recurrente. Otro ejemplo claro es encarecimiento del empleo de plataformas militares: con un coste de miles de euros por hora de vuelo, es inviable emplear exclusivamente los aparatos reales para el tan necesario

adiestramiento de los pilotos de los cazas de combate (Figura 2-5). Esta misma realidad es aplicable al resto de plataformas militares, como los carros de combate o los buques de guerra.

Otra razón es la capacidad de usar el simulador un número indefinido de veces. Los sistemas militares, como los de cualquier otra industria, sufren desgaste con su uso, y esto es especialmente destacable en la milicia, donde el empleo de dichos sistemas generalmente implica someterlos a condiciones extremas como suponen un deterioro destacable. Por ejemplo, el lanzamisiles portátil Instalaza C-90 es un sistema empleado a nivel pelotón en las fuerzas armadas, lo que significa que cualquier soldado debe conocer su empleo. No obstante, es un lanzador de un sólo uso, por lo que sus limitaciones en número impiden que todos los soldados puedan adiestrarse con modelos reales. Gracias a simulador SAARA de Instalaza, es posible que todos los miembros del pelotón tengan conocimientos del manejo del arma sin caer en el problema de la disponibilidad del arma real, que puede reservarse al combate [13].



Figura 2-5 - Simulador de caza de combate [2]

Además, otra ventaja es la posibilidad de adiestrarse en múltiples situaciones. Desde la orografía, la plataforma del usuario, la plataforma enemiga o las condiciones meteorológicas, todas estas variables u y más son parámetros modificables en el entrenamiento. Esto permite, tomando el ejemplo de un simulador de navegación, modificar el buque empleado cambiando las características de la propulsión, la maniobrabilidad, etc. También permitirían variar el tráfico marítimo o parámetros tan importantes como la visibilidad o la corriente. Gracias a ello, la cantidad de escenarios a los que el usuario puede enfrentarse se multiplica, permitiendo que obtenga experiencia en las más variadas situaciones y, por lo tanto, que esté mejor preparado en un caso real.

Un beneficio añadido es que, debido a la alta parametrización, los valores obtenidos durante la simulación pueden guardarse para el posterior análisis de los datos de la sesión. Esto permite una evaluación del resultado más precisa y objetiva, permitiendo a los usuarios conocer en detalle los errores y aciertos cometidos, estudiarlos y sacar conclusiones acertadas. Esto tiene una aplicación a más alto nivel incluso, al permitir poner en práctica las tácticas y doctrinas establecidas y, gracias a abundante cantidad de información guardada, detectar posibles puntos débiles y corregirlas. Este grado de control y análisis de los parámetros sería prácticamente imposible en un entorno distinto a la simulación.

Finalmente, una ventaja añadida a la simulación militar es su bajo impacto medioambiental en comparación con realizar los mismos ejercicios de manera real. Las plataformas militares suelen ser elementos de gran tamaño cuyo consumo de combustibles fósiles es muy elevado, generando una

huella medioambiental. A esto hay que añadirle los efectos de otros elementos como las explosiones, las emisiones electromagnéticas de alta potencia o el uso de sónares en zonas marítimas. Como podemos ver, aunque imprescindibles, las maniobras militares tienen un efecto en el medioambiente que, afortunadamente, pueden ser minimizadas mediante el empleo de simuladores.

En resumen, hay múltiples beneficios en el uso de simuladores en la carrera de las armas. Ello se refleja en la tendencia actual a aumentar la cantidad y complejidad de dichos sistemas y es previsible que dicha tendencia continúe creciendo, especialmente si el coste y complejidad de las plataformas y sistemas militares también sigue aumentando.

2.3.2 La simulación en la Armada

En la actualidad, la simulación se encuentra en la Armada tanto en la educación e instrucción de sus nuevos integrantes como en el adiestramiento de los miembros en activo. Los motivos para ello es la dificultad para que sus miembros obtengan experiencia en situaciones bélicas, así como los costos asociados al empleo de las plataformas navales. De esta manera se logra mejorar la preparación de los marinos e infantes de la Armada, así como se ponen a prueba doctrinas y se avanza en su elaboración.

Para la Armada, hay múltiples beneficios en el uso de simuladores. No obstante, el principal de ellos es el alto importe asociado a un posible incidente en la mar. El enorme coste de las plataformas, y de sus sistemas y la dificultad para solucionar una avería en la mar hace que pocos riesgos puedan ser tomados en maniobras reales con buques o aeronaves. No obstante, la simulación permite practicar todo tipo de maniobras evitando este riesgo, permitiendo un adiestramiento más completo de los marinos en todo tipo de situaciones. Así, un marino mejor adiestrado mediante un simulador será capaz de actuar más adecuadamente en la mar, dotando de una mayor seguridad a personal y material.

Debido a la gran variedad de necesidades de adiestramiento de una marina de guerra, hay múltiples centros de simulación en la Armada. Así pues, podremos encontrar simuladores en centros de enseñanza como la Escuela Naval Militar, la Escuela de Infantería de Marina, la Escuela de Submarinos o el centro de Instrucción y Adiestramiento de la Flota (CIA) entre otros [11]. Como podemos ver en la variedad de centros mencionados, la formación impartida en cada uno difiere bastante en su naturaleza con los demás. Debido a ello, y como mostraremos a continuación, la Armada precisa de un gran número de simuladores, cada vez más punteros. Entre ellos se encuentran:

- **SIMNAV:** se trata de un simulador enfocado a la maniobra y navegación de los buques en entornos de elevada densidad de tráfico o compleja navegación por su orografía, fondo marino, condiciones meteorológicas, etc. Para ello el simulador recrea el puente de un barco con todos sus elementos (caña, control de máquinas, giroscópica...) También incluyen instrumentos vitales para la navegación como la carta digital WECDIS o el radar ARPA que, interactuando con el escenario recreado, permiten realizar una navegación segura. El simulador permite así el adiestramiento de un equipo completo de puente y la integración de varios puentes en el mismo escenario, de manera que puedan interactuar entre ellos y realizar maniobras conjuntas.
- **Simulador Táctico GALEÓN:** consiste en un simulador táctico de operaciones navales en la que una habitación con múltiples consolas recrea el Centro de Información y Combate (CIC) de un buque de guerra. Cada una de estas consolas permite emplear la totalidad de medios y sensores del buque para la navegación y el combate. De esta manera, y situados en un escenario realista (en una zona geográfica real con tráfico marítimo, aéreo, plataformas petrolíferas, etc.), múltiples cabinas pueden integrarse e interactuar para formar una fuerza naval.

El escenario es dirigido por unas consolas controladas por los examinadores, que pueden actuar como fuerza opositora. Además, las consolas pueden tomar el control de otros tipos de plataformas, como aeronaves o submarinos, abriendo un enorme abanico de posibilidades en el empleo de este simulador.

- **SIMPRA S-80:** es un simulador en el que se recrea el control de la propulsión de los submarinos clase Isaac Peral. En él la dotación de adiestra en el empleo de los sistemas de propulsión y generadores de dichos submarinos, así como en la solución a posibles averías de estos. Se complementa con el SIMTAC S-80 (simulador táctico) y el SIMPLAT S-80 (simulador de plataforma) en el adiestramiento e instrucción de las dotaciones de estos submarinos.



Figura 2-6 - Alumnos de la ENM en el CISI de Ferrol (elaboración propia)

- **Centro de Instrucción de Seguridad Interior (CISI):** este simulador consiste en un conjunto de instalaciones dedicadas a la instrucción y adiestramiento en Seguridad Interior² del personal de la Armada o de personal ajeno (por ejemplo, bomberos, policía nacional, etc.). Consiste en varios módulos que recrean incendios en compartimentos que simulan el interior o los exteriores de un buque (Figura 2-6).

También cuenta con un compartimento inundable para practicar los procedimientos contra averías y de módulos independientes para practicar ambos tipos de incidencias en situaciones de menor dificultad para equipos con menos experiencia. El CISI es empleado para el adiestramiento periódico de las unidades, así como para la certificación del personal de la Armada en Seguridad Interior.

Estos son una muestra de la gran variedad de simuladores que hay en la Armada. No obstante, y a razón de la naturaleza del presente trabajo, querría hacer un especial hincapié en los simuladores enfocados al combatiente individual:

- **VICTRIX:** se trata de un simulador de tiro para el adiestramiento de combatientes individuales. Se sustituyen elementos puntuales de un arma real (en el caso del fusil de asalto HK-G36, la bocacha y el conjunto del cierre) por equivalentes adecuados al simulador que, entre otros elementos, incluyen sensores. Además, se emplea munición de gas comprimido, de manera que tanto el peso, el equilibrio, como el retroceso del arma son muy similares a disparar con munición de guerra. Gracias a estos elementos, y a una

² Seguridad Interior se refiere a los sistemas, acciones y doctrinas cuyo objetivo es mantener la operatividad del buque ante una incidencia (como puede ser un incendio, una incidencia o un ataque químico), sea o no de origen bélico.

pantalla interactiva, el usuario puede someterse a entrenamiento individual o de entidad equipo de fuego en escenarios de tiro de precisión o de tiro de combate.

- **Virtual Battle Space 3:** se trata de un *serious game* (B) interactivo que permite la simulación a nivel individual o colectivo. Permite de esta manera un entrenamiento intensivo a nivel táctico para los combates realizados en tierra.
- **SCATT:** se trata de un simulador de tiro de precisión en el que un sensor se conecta al arma real permitiendo obtener de manera precisa y en tiempo real todas las características del tiro (Figura 2-7). Permite hacer tiro a varias distancias y en distancia real (la distancia a la que se supone que disparas coincide con la real) o simulada (la distancia simulada es mayor que la real) [14].



Figura 2-7 - Software y hardware del simulador SCATT [14]

Los anteriores son apenas una muestra de los simuladores en la Armada. No obstante, la marina busca seguir mejorando los simuladores que tiene y conseguir nuevos que mejoren sus capacidades de instrucción y adiestramiento. Para ello se encuentran publicadas las necesidades que la Armada considera que tiene en este aspecto. Entre ellas destacan la interoperabilidad entre sus simuladores o la modernización de estos mismos [11].

2.4 Realidad virtual

Dentro de las tecnologías de la simulación, una es especialmente prometedora: la realidad virtual (VR: *virtual reality* en inglés). La Real Academia Española la define como “Representación de escenas o imágenes de objetos producida por un sistema informático, que da la sensación de su existencia real” [15]. De esta manera, se busca la representación realista de escenas y objetos, haciendo que el usuario pueda desenvolverse e interactuar con el escenario mediante elementos que la propia persona portaría. Estos elementos y sus movimientos serían detectados por unos sensores integrados en el simulador. Este devolvería los efectos de dichas interacciones al usuario mediante elementos sensoriales portados por el usuario. Estos últimos podrían ser visuales (unas gafas), táctiles o incluso posicionales.

Para lograr una VR efectiva, hacen falta cuatro elementos esenciales [9]:

- **El mundo virtual:** es el conjunto de objetos en el espacio y las normas que los gobiernan, normalmente generadas por ordenador.
- **Inmersión:** es la sensación de estar presente en el escenario simulado, en vez de ser un observador externo a este.
- **Retroalimentación sensorial:** es la devolución de información sensorial al usuario como resultado de sus acciones en el entorno virtual.
- **Interactividad:** es la correlación entre las acciones del usuario y las reacciones que recibe del entorno virtual.

Estos elementos pueden combinarse de manera más o menos estricta, dando lugar a conceptos más o menos estrictos de realidad virtual. Por ejemplo, en el mundo de los videojuegos comúnmente no se

emplean todos los elementos vistos para lograr la inmersión. Videojuegos como *Tom Clancy's: Rainbow Six: siege* o *Doom: Eternal* no son puramente inmersivos, al estar sus elementos de retroalimentación sensorial limitados a la vista (pantalla), el oído (cascos) y tacto (vibración del mando/ratón). Este sería un ejemplo de definición laxa de VR. Ejemplos más estrictos de VR incluirían la integración del mayor número de elementos posibles para asegurar una inmersión total del usuario.

La realidad virtual no debe confundirse con la realidad aumentada. Mientras que en la primera la experiencia inmersiva es parte de un ambiente artificial puramente construido de manera digital, la segunda usa la realidad percibida por usuario como base sobre la que se añaden elementos digitales fácilmente distinguibles. La combinación de las dos es la realidad mixta, en la cual se añaden objetos virtuales a la realidad que envuelve a la persona. De esta manera, las diferencias entre objetos reales y digitales pueden ser prácticamente inexistentes [16].

2.4.1 Componentes de la realidad virtual

Los sistemas de VR están compuestos de dos subsistemas principales, software y el hardware. El primero se divide en la base de datos que almacena los parámetros de simulación y el software propiamente dicho que realiza la simulación. Por su parte, el hardware se compone de el ordenador que corre el software y los elementos que transmiten y reciben información del usuario.



Figura 2-8 - Simulador de conducción en el VR CAVE [17]

Dispositivos de Entrada: son aquellos medios a través de los cuales el usuario interacciona con el escenario digital. Manda señales al sistema acerca de la acción de usuario, permitiendo que este, tras procesar dichas acciones, le devuelva el resultado a través de los dispositivos de salida. Algunos ejemplos serían las gafas o los mandos de un simulador de conducción (Figura 2-8). Se clasifican en dispositivos de seguimiento, dispositivos de entrada puntuales, bio-controladores y dispositivos de voz.

- Dispositivos de seguimiento: también conocidos como sensores de posición, sirven para detectar la posición del usuario, de alguna parte de esta (por ejemplo: las manos) o de algún objeto con el que interactúe el usuario.

Suelen emplear sensores magnéticos, láseres, ultrasonidos, mecánicos, giróscopos o electromagnéticos [18].

- **Dispositivos de entrada puntuales:** consiste en la adaptación de la tecnología de un ratón de ordenador dotándole de capacidades añadidas, generalmente enfocadas a su empleo en entornos 3D.
- **Dispositivos de voz:** son sistemas que emplean el reconocimiento y procesamiento de voz para su empleo en simulación.

Dispositivos de salida: son aquellos empleados en devolver al usuario la respuesta ya procesada por el software. Para ello utilizan elementos que generan un estímulo en los sentidos del usuario. Debido a ello, contamos con dispositivos gráficos (visión), de audio (oído), hápticos³ (tacto), olorosos y de gusto. Los tres primeros son comunes en la VR mientras que los últimos no se emplean frecuentemente.

El audio es un medio de gran importancia en la VR, sólo sobrepasada por los elementos gráficos. Para obtener una salida sonora eficaz se suelen emplear cascos u altavoces con capacidad de sonido 3D. Para los elementos gráficos, las pantallas o las gafas suelen ser los métodos más empleados. Concretamente, las combinaciones pantalla-altavoz y gafas-cascos son empleadas comúnmente. Respecto al tacto, se emplean elementos hápticos como guantes o dispositivos mecánicos activados mediante señales electrónicas [18].

2.4.2 Dispositivos comerciales de VR

En la actualidad existe una amplia oferta de simuladores de VR en el mercado. De esta manera, el cliente puede disponer del dispositivo que mejor se adapte a sus necesidades. De entre todas estas ofertas, vamos a describir las más notables:



Figura 2-9 - Simulación de buceo mediante el KAT Walk C2 [19]

- **VR CAVE:** el simulador CAVE (Cave Automatic Virtual Enviroment) consiste en una habitación cúbica en cuyo interior de sitúa el usuario. Mediante la proyección de imágenes en las seis paredes de la habitación se crea un escenario altamente inmersivo. El usuario suele usar gafas estereoscópicas, guantes hápticos, joysticks u otros dispositivos de entrada [17].
- **KAT Walk C2:** se trata de un simulador de VR montado sobre una plataforma resbaladiza. El usuario emplea unos zapatos especiales que le permiten deslizar sobre dicha plataforma, a la vez que su peso está soportado por un arnés, permitiendo que el usuario ande, corra e incluso nade sobre dicha plataforma sin llegar a desplazarse (Figura 2-9). El usuario porta,

³ La háptica es el empleo de estímulos mecánicos para lograr una mayor inmersión del usuario (en este caso en una simulación) mediante el empleo del sentido del tacto [35].

además, unas gafas de realidad virtual y unos mandos, con los que interactúa con el simulador. La gran novedad de KAT Walk C2 respecto otros modelos similares es el hecho de que la plataforma también es háptica, permitiendo que el usuario reciba señales a través de sus propios pies [20].

- **Meta Quest Pro:** Meta Quest Pro es la última propuesta de la empresa Meta (previamente Oculus VR), que sacó al mercado las gafas de VR Oculus Rift, siendo estas el primer sistema óptico y acústico de realidad virtual pensado para interconectarse con mandos o joysticks. En la actualidad el modelo Meta Quest Pro es el más avanzado que dicha empresa ha sacado, implementando múltiples mejoras al Oculus Rift [21].

Vistos estos ejemplos, a continuación, analizaremos más en detalle los dispositivos VR que emplearemos en el presente proyecto:

2.4.3 HTC Vive

La empresa HTC ofrece un conjunto de dispositivos diseñados para de manera integrada, ofreciendo una simulación de VR de alta calidad al usuario. La capacidad de emplear dichos sensores de manera versátil da un amplio abanico de opciones al usuario, permitiéndole interactuar y desplazarse de manera realista por un escenario altamente inmersivo. Para ello se sirve de los siguientes elementos:

- **SteamVR Base Station 2.0:** se trata de parejas de sensores laser que emplea la tecnología *Lighthouse*. Estableciendo los sensores en esquinas opuestas de una habitación cerrada, permite detectar la posición y movimientos de los dispositivos de entrada del simulador. Estos últimos disponen de más de setenta sensores (como acelerómetros o giróscopos) que le permiten transmitir su posición y movimiento con una precisión de un milímetro. Usando dos parejas de sensores se logra dicha precisión en una habitación de 10mx10m, mientras que con una sola pareja la habitación sería de 5mx5m como máximo.
- **Vive Pro:** se trata de unas gafas VR de alta calidad que permiten la visualización del escenario virtual con un campo de visión de 110°. Incluyen cascos de alta resolución sonora para el empleo de simulación acústica, así como micrófonos integrados. Así mismo, incluye múltiples sensores que le permiten ser localizado con precisión por la SteamVR Base Station. 2.0.

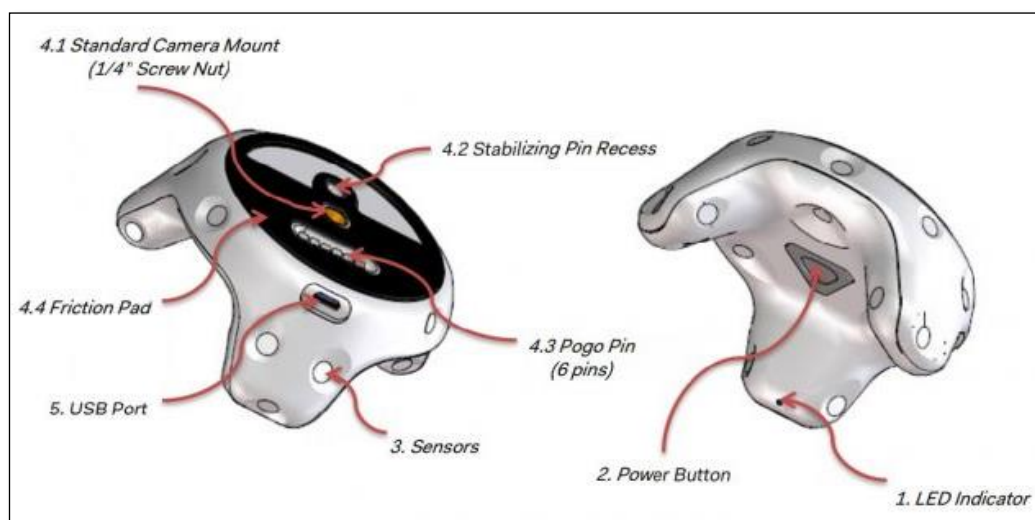


Figura 2-10 - Principales características Vive Tracker 3 [22]

- **Vive Tracker 3:** en este caso consiste en un elemento de localización en cuyo interior hay múltiples sensores inerciales y ópticos que permiten su rastreo por parte del SteamVR Station 2.0. Gracias a su pequeño tamaño, puede montarse en múltiples objetos o ser

portado por el usuario en distintas partes de su cuerpo, permitiendo así al simulador detectar de manera precisa esos elementos y que así el usuario pueda interactuar con el entorno virtual.

Por último, el *Vive Tracker 3* incluye unos pines en su base (Figura 2-10), a los cuales el usuario puede conectar sus propios sensores y, a través del software, definir el significado de estos. Esta característica es de gran utilidad, pues permite el uso de plataformas altamente personalizables por el usuario, dotándole de una gran libertad.

2.5 Impresión 3D

Los orígenes de la impresión 3D vienen de finales del S.XX, cuando, tras inventarse las impresoras por inyección de tinta, se aplicaron los frutos de dicha tecnología a la impresión con materiales. Los primeros intentos de impresión 3D se realizaron durante los comienzos de los años 80, cuando, casi simultáneamente, el Dr. Hideo Kodama y un equipo de ingeniería francés lograron desarrollar dos métodos independientes de fabricación aditiva empleando resinas que se solidificaban al interactuar con la luz. No obstante, ninguno de ambos proyectos fue fructuoso debido a la falta de presupuesto, al no ver la comunidad científica de ambos países la aplicación práctica de los proyectos respectivos.

Fue apenas pocos años más tarde cuando Charles Hull desarrolló la estereolitografía, que permite la solidificación de un polímero sensible a la luz ultravioleta, de manera que se solidifique una pequeña capa sobre la que se imprimirán las capas posteriores. Además, el diseño de Hull permitía realizar impresión 3D a partir de diseños digitales. Esta nueva capacidad dotaba a la tecnología de la impresión tridimensional de una mayor versatilidad.

De esta manera, a comienzo de los años 90, Charles Hull crea la empresa *3D Systems*, empleando la estereolitografía y revolucionando la industria moderna. Desde entonces la tecnología de la impresión 3D se ha desarrollado rápidamente. Desde la impresión exclusiva de resinas y plásticos hasta la impresión de materiales compuestos, metales, o tejido orgánico, la impresión 3D ha supuesto un enorme avance para la sociedad en los más amplios ámbitos.

2.5.1 Ventajas y desventajas de la impresión 3D

La impresión 3D no sólo es tan popular debido a su gran versatilidad, sino también a muchas otras ventajas que ofrece:

- Permite crear de manera sencilla diseños complejos sin necesidad de recurrir a subcontratas ni a terceros.
- Dan la opción de fabricar múltiples objetos de distinta geometría sin necesidad de modificar el proceso de construcción ni la maquinaria.
- Gracias a la versatilidad de esta tecnología, muchas piezas se pueden fabricar de manera sencilla con una impresora, obviando procesos intermedios como los moldes o herramientas complejas. De esta manera, el coste se reduce a la compra inicial de la impresora, la materia prima de la impresión y el coste energético de tener la máquina encendida.
- Al prescindir de los servicios de terceros y de múltiples procesos intermedios, se logra una reducción del tiempo total de fabricación.

No obstante, no todo son virtudes, la impresión 3D tiene ciertas desventajas a tener en cuenta:

- Las piezas fabricadas muchas veces no tienen el acabado perfecto y es necesario un trabajo posterior para darle el acabado deseado.
- El número de materiales disponibles para la impresión 3D es limitado, sin embargo, a medida que la tecnología se desarrolla, cada día es posible encontrar más materiales adecuados a nuestras necesidades.

Como resultado, la impresión 3D es una tecnología polivalente cuya aplicación en el mundo de la ingeniería la podemos encontrar en el diseño de prototipos. La capacidad de producir piezas complejas de manera sencilla da la opción de usarlas para probar el desempeño de nuestro diseño o para crear un molde a partir de este, que ya pueda ser empleado para fabricar el diseño definitivo a gran escala. Otras aplicaciones son la creación de herramientas por un precio reducido cuando no es posible su compra. Por ejemplo, en empresas de pequeño tamaño. Finalmente, la impresión 3D es empleada diariamente en la ingeniería inversa, ya que tiene una gran sinergia con todos los procesos de escaneo 3D (sección 2.2).

Los métodos de impresión se han desarrollado aún más que los materiales con los que se imprime, permitiendo al fabricante adaptar el método de fabricación a la pieza concreta. A continuación, veremos algunos de los métodos de impresión 3D:

2.5.2 Estereolitografía (SLA)

La estereolitografía, dentro de la impresión 3D, pertenece a la rama de la fotopolimerización en tanque o impresión 3D en resina. Todas las tecnologías de esta familia se basan en el empleo de una fuente de luz para curar una resina termo-endurecible transformándola en plástico. El proceso químico consiste en que la luz empleada permite que las cadenas cortas de las resinas se unan generando estructuras rígidas o flexibles sólidas. De esta manera, la diferencia entre cada una de las tecnologías individuales es la disposición de sus componentes, entre los que se encuentra la fuente de luz, la base de impresión y el tanque de resina (Figura 2-11).

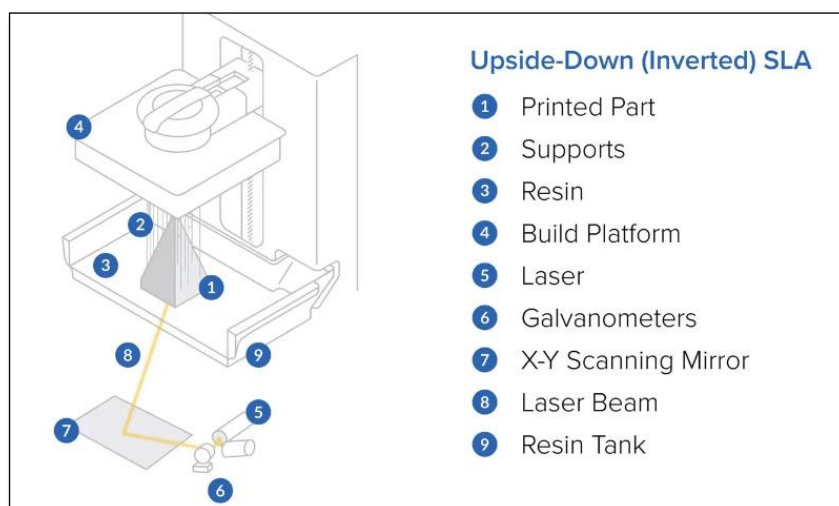


Figura 2-11 - Elementos de la estereolitografía inversa [23]

La estereolitografía ofrece grandes ventajas frente a otras tecnologías de fabricación, e incluso a otros métodos de impresión 3D. Una de sus principales fortalezas es que logra que las piezas sean muy isotrópicas, permitiendo un mayor control sobre el desempeño de estas.

Además, gracias a la uniformidad con la que se enlazan las capas, se obtiene una alta impermeabilidad. Por último, es de los métodos de impresión 3D que logra una mayor precisión y fiabilidad al construir las piezas, obteniendo unos resultados muy similares al diseño original, así como proveyendo al objeto impreso de una gran calidad superficial y unos detalles precisos.

2.5.3 Sinterización Selectiva por Laser (SLS)

La tecnología del SLS consiste en una plataforma sobre la cual se esparce polvo de la materia prima (por ejemplo, polvo de nylon). Unas resistencias calientan la impresora a una temperatura ligeramente inferior al punto de fusión del material. Entonces un láser recorre dicha plataforma siguiendo las formas dictadas por el diseño 3D, fundiendo el material según la forma que corresponde

a dicha sección de la pieza. La fusión, lograda fácilmente por el láser gracias al precalentamiento, permite la unión mecánica de las partículas creando una pieza sólida. Tras ello la plataforma desciende y se esparce una nueva capa de material, repitiéndose el proceso (Figura 2-12).

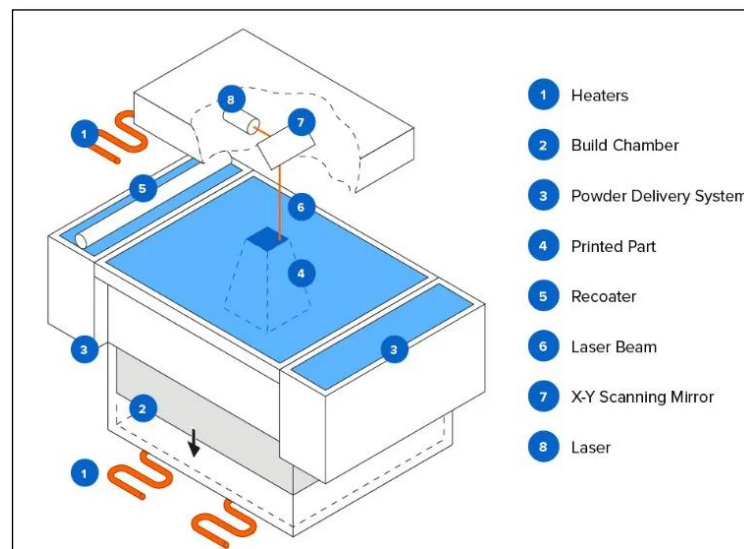


Figura 2-12 - Elementos de la SLS [24]

No obstante, tras la impresión es necesario realizar algunos trabajos posteriores. Habrá que dejar enfriar la pieza para lograr las propiedades mecánicas deseadas, limpiar el exceso de polvo (que puede ser reutilizado) y realizar las operaciones de pulido que consideremos, ya que la SLS genera un acabado superficial granulado.

2.5.4 Modelado por Deposición Fundida (FDM)



Figura 2-13 - Características de la impresión FDM [24]

El Modelado por Deposición Fundida (FDM) o Fabricación con Filamento Fundido (FFF) consiste en derretir un plástico (por ejemplo, ABS o PLA) y extruirlo a través de una boquilla que se desplaza sobre la placa base. Al finalizar con una sección de la pieza, la placa desciende y se comienza con otra capa (Figura 2-13). Para la fabricación de piezas que no son enteramente sólidas se emplean estructuras de soporte generadas por software para aguantar el peso estructural de la pieza durante la impresión. Dichos soportes pueden ser retirados posteriormente. Los modelos más modernos de impresoras FDM permiten extruir varios materiales distintos (por ejemplo: para la pieza y para el soporte) o incluso materiales compuestos cuya combinación afecta a las características mecánicas de la pieza.

En la tecnología de FDM, el plástico extruido es de mayor grosor que las capas generadas en otras tecnologías de impresión 3D, lo que causa algunas desventajas como una menor resolución, precisión

o un peor acabado superficial. Además, la orientación de la pieza durante la impresión tiene un gran efecto, no sólo en las características previamente mencionadas, sino también en las propiedades mecánicas de la pieza, siendo estas mucho menos resistentes si se aplica una fuerza paralela a las capas que si se realiza perpendicular a esta. No obstante, la rapidez de impresión, el no tener que curar las piezas tras la impresión y el precio económico de la maquinaria y del material hacen que sea una opción perfecta para la creación de diseños básicos y prototipos.

2.5.5 Comparación entre las diferentes técnicas de impresión 3D

- **SLA:** la estereolitografía es la tecnología de impresión que ofrece una mayor precisión en la pieza fabricada (Figura 2-14), así como una calidad superficial no alcanzable por otros métodos. Además, su gran ventaja es la variedad de materiales que se pueden emplear en este tipo de impresión, permitiendo jugar con propiedades térmicas, ópticas o materiales que las hacen competitivas con otras técnicas industriales de fabricación de termoplásticos. Debido a ello, sus principales aplicaciones son para la creación de prototipos o moldes para una posterior producción en masa de la pieza.



Figura 2-14 - Comparativa FDM (izquierda) frente a SLA (derecha) [25]

- **SLS:** en este caso, las principales fortalezas de esta técnica de impresión son el precio competitivo de la materia prima (y por lo tanto de la pieza), el hecho de que no es necesario emplear soportes, la rapidez al producir piezas complejas. Pero, sobre todo, su mayor ventaja son las excelentes capacidades mecánicas de los objetos producidos, superiores a los de las otras técnicas. Debido a ello, las principales aplicaciones del SLS es en la producción de los prototipos finales y, finalmente, la fabricación del producto final.
- **FDM:** como vimos anteriormente, las principales desventajas de este método son su menor resolución dimensional y superficial, así como la direccionalidad de sus propiedades mecánicas. No obstante, y gracias al precio económico de esta tecnología y a su velocidad de impresión, es de gran aplicación en la fabricación de prototipos y diseños básicos.

3 DESARROLLO DEL TFG

3.1 Descripción del apartado

En el presente apartado explicaremos el proceso que ha conllevado este proyecto, representado en la Figura 3-1. Comenzaremos con la aplicación de toma de medidas para realizar ingeniería inversa, dónde se verá cómo se dimensionó la FN-P9-17 real para la posterior generación de la réplica. A continuación, abordaremos el diseño, en el cual veremos el proceso seguido hasta llegar al modelo final, deteniéndonos en sus características principales y su funcionamiento. Por último, desarrollaremos el proceso de fabricación y montaje del dispositivo y la conexión de este al software de simulación.



Figura 3-1 - Fases del proyecto

3.2 Ingeniería inversa

3.2.1 Toma manual de medidas

Las dimensiones de la pistola original se han tomado de manera manual. Para ello se ha empleado los siguientes instrumentos:

- **Pie de rey digital:** se ha decidido usar este dispositivo ya que, al tener que realizar un gran número de medidas ha permitido una mayor agilidad en el proceso, así como reducir el error debido al factor humano.

El rango de medición de este calibre va de 0mm a 150mm, y dispone de mordaza (tanto interior como exterior) y sonda. Su resolución es de 0.01mm y su precisión de ± 0.03 mm.

- **Medidor de ángulos:** empleado para medir los ángulos existentes entre distintas superficies.

A continuación, se detallarán las zonas de la pistola cuyo dimensionamiento se ha considerado crucial en el proyecto, ya que han tenido una gran importancia en el funcionamiento final del modelo o porque son las zonas que empleará el usuario para empuñar el arma. Cabe destacar que, generalmente, sólo se han tomado medidas de las dimensiones externas del arma ya que esta es la parte que el usuario manipulará y reconocerá estéticamente como similares al arma real. Las dimensiones internas no se han tomado ya que no se han considerado relevantes para el usuario final.

3.2.2 Corredera

La corredera es una pieza sólida de metal de geometría similar a un paralelepípedo cuyas funciones incluyen albergar la recámara y el cañón, soportar y mantener inmóviles las miras y albergar gran parte de los mecanismos del arma.

Como se puede ver en la Figura 3-2, de su geometría destacan las muescas laterales (C), cuyo objetivo es mejorar el agarre a la hora de montar el arma. Además, en su zona central tiene una apertura en cuyo interior se albergaría la recámara del arma real (B). Debido a que en la réplica no existe dicha pieza, esa zona se imprimirá como parte de la propia corredera, con el fin de que la apariencia y el tacto sean similares a las del arma original.

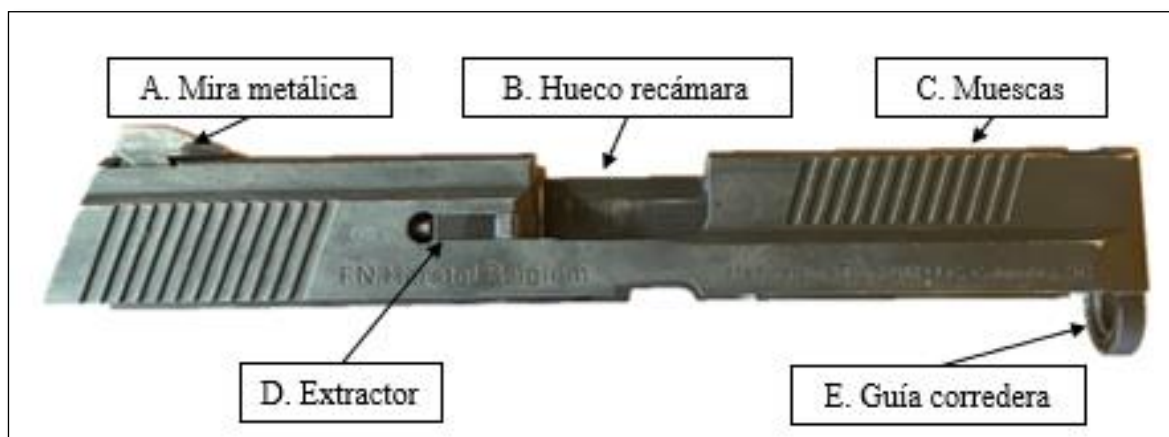


Figura 3-2 - Elementos de la corredera de la FN-P9-17 [26]

Otro elemento de la corredera es la guía de la corredera (E). Esta circula sobre la guía del muelle recuperador controlando el desplazamiento de la corredera. Este elemento aparecerá también en la réplica, con dimensiones similares a la del arma real. Finalmente, destacan las miras metálicas (A) y el extractor (D). Este último, pese a no ser necesario en la réplica, aparecerá en esta al ser un elemento fácilmente identificable por el usuario.

3.2.3 Cuerpo del pistolete

El cuerpo del pistolete es otro de los elementos principales de la pistola. Se compone de un elemento paralelepípedo sobre el que se monta la corredera. De dicho elemento, de manera diagonal, surge la empuñadura. Sobre el cuerpo del pistolete se montan la mayoría de los mecanismos de la pistola, entre los que se incluyen el martillo, el seguro, la retenida de la corredera, la retenida del cargador o la cola del disparador (Figura 3-3). En la parte delantera se encuentra un rail el sobre el cual se montan elementos accesorios del arma, como una linterna.

Debido a la variedad de mecanismos que se montan sobre el cuerpo del pistolete, es un elemento de extrema importancia para el simulador, ya que casi la totalidad de manipulaciones que el tirador hace con el arma implican el empleo de este elemento. Debido a ello, un correcto dimensionamiento de este es primordial.

Para tomar las medidas de manera adecuada se ha hecho empleo de las herramientas previamente mencionadas. Para medir la empuñadura y del resto de zonas complejas, se han tomado medidas cada 1cm, permitiendo con estas secciones reconstruir la forma original de manera fidedigna.



Figura 3-3 - Elementos principales del cuerpo del pistolete [26]

3.2.4 Cargador y retenida del cargador

El cargador es el elemento en el que se almacena la munición del arma. Se compone de un paralelepípedo alargado que se estrecha en su extremo superior y una base desmontable (quitando un tornillo y extrayéndola). En su interior hay un muelle y una placa que presiona la munición del cargador contra la parte superior de este. Tiene capacidad para 16 cartuchos, con 16 agujeros que permiten contar la munición restante de manera rápida. Por la parte frontal tiene un saliente, que es el encargado de mantener el cargador dentro del pistolete, al estar sujeto por la retenida del cargador.

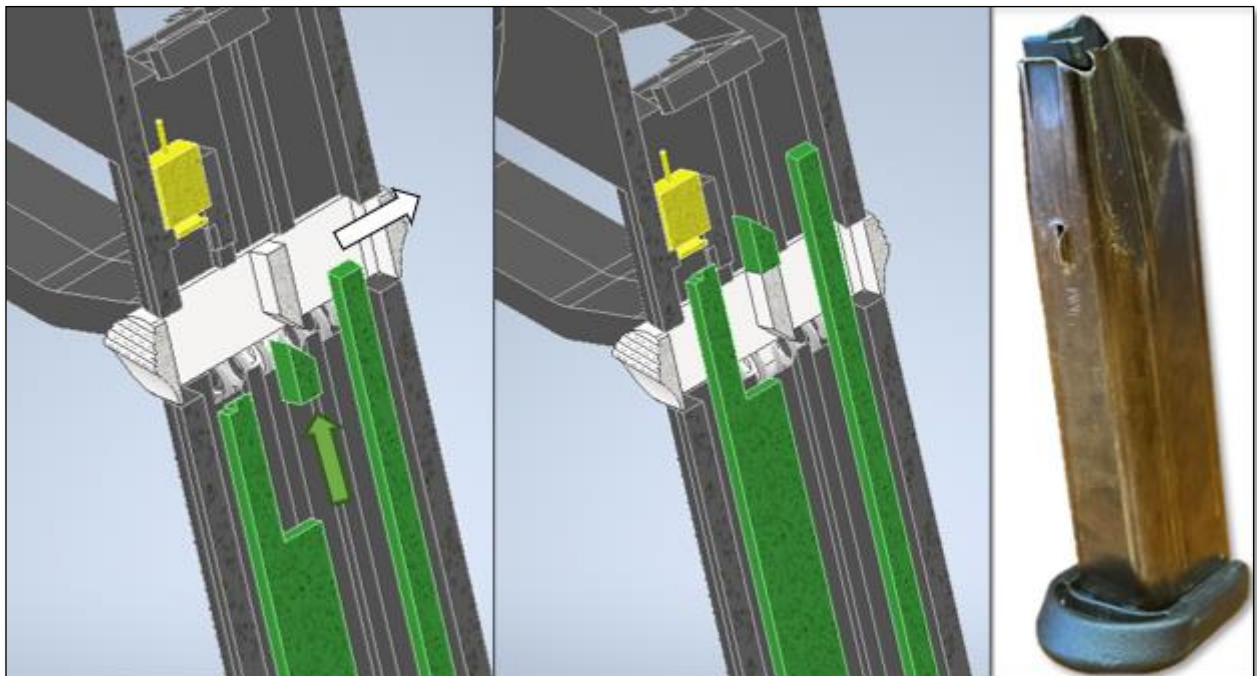


Figura 3-4 - Cargador y funcionamiento del cargador y su retenida

La retenida del cargador consiste en una única pieza alojada en el cuerpo del pistolete que se puede accionar de manera ambidiestra. En su parte central tiene un saliente que sujeta su homólogo del cargador, impidiendo su salida. Al introducir el cargador, este desplaza la retenida hacia uno de los lados, permitiendo que cargador suba totalmente. Por defecto un muelle mantiene la retenida centrada

en el arma, de manera que, al presionar por cualquiera de ambos lados, se desplaza y libera el cargador (Figura 3-4). Al funcionar la réplica de manera análoga, he utilizado el modelo de inventor de esta misma para ilustrar el funcionamiento de la pistola real, siendo la pieza blanca la retenida y la verde el cargador.

3.2.5 Cola del disparador

La cola del disparador es el elemento cuya activación causa el disparo del arma. Debido a ello el usuario lo toca con el índice de manera regular y es una pieza muy reconocible a nivel táctil. Por lo tanto, es especialmente importante que su geometría sea la adecuada.



Figura 3-5 - Cola del disparador de la FN-P9-17

Tiene una forma curva muy característica (Figura 3-5). Para reproducirla se ha medido la sección de la cola del disparador cada centímetro, reconstruyéndose posteriormente la forma final a raíz de estas secciones. La parte interna de la cola del disparador no se ha dimensionado, debido a que el funcionamiento interno de este elemento no es de aplicación directa en la réplica. No obstante, se ha estudiado el funcionamiento de este para comprender este a partir del manual de empleo del arma de la EIMGAF [26] y así emplearlo de referencia para el modelo del simulador.

3.2.6 Seguro

Esta pieza es la encargada de impedir el disparo del arma a pesar de que se pulse la cola del disparador, cuando dicho disparo no es deseado. Para ello cuenta con dos posiciones. En la superior (tapando el círculo rojo) impide el disparo y en la inferior (se puede ver el círculo rojo) permite el fuego (Figura 3-6). Al igual que la retenida del cargador, se puede accionar de manera ambidiestra. El funcionamiento, a diferencia de en el HK-G36, no bloquea el movimiento de la cola del disparador, si no que saca ciertos elementos del mecanismo de su posición original impidiendo que el martillo se active. De esta manera, tanto como el seguro activado como no, se puede pulsar la cola del disparador la totalidad de su recorrido, pero el arma llegará a dispararse o no.



Figura 3-6 - Detalles del seguro activado (izquierda) y desactivado (derecha)

Respecto al dimensionamiento del seguro, solamente se ha prestado atención a los elementos externos de estos, ya que son con los que el tirador interactúa táctilmente y los que reconoce visualmente. Debido a ello se ha prestado especial atención a su correcta geometría y el movimiento de este. El giro que realiza el seguro entre su posición de activado y de desactivado es de 25°.

3.2.7 Retenida de la corredera

La FN-P9-17 cuenta con dos sistemas para retener la corredera en su posición trasera. La delantera (en adelante RD) se emplea para mantener la corredera atrás durante el montaje y desmontaje del arma. La trasera (en adelante RT) sirve para detener la corredera en su posición trasera cuando el cargador está vacío. Para ello, la placa del cargador sobre la que se apoyan los cartuchos tiene una pestaña que sobresale cuando el cargador está vacío (Figura 3-7). Esta pestaña empuja la RT hacia arriba, la cual bloquea la corredera manteniéndola atrás.

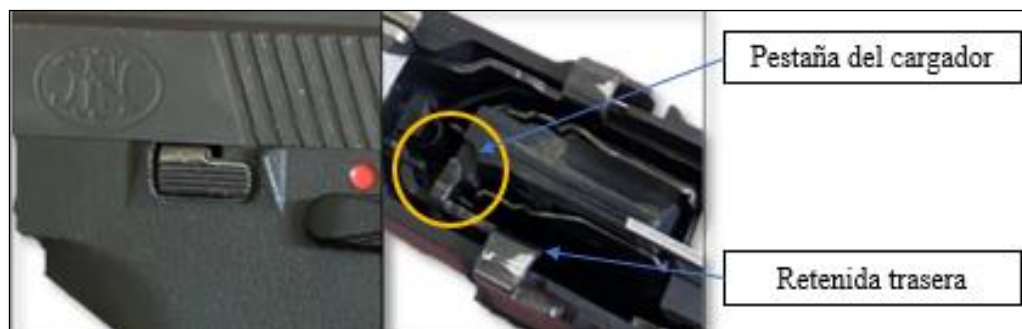


Figura 3-7 - Aspecto externo y funcionamiento de la retenida trasera

En ese momento, y una vez introducido un nuevo cargador municionado, se puede liberar la corredera tirando de ella hacia atrás o apretando la RT hacia abajo. El primer método es más lento (hacen falta más movimientos) y emplea ambas manos (una para agarrar el pistolete y otra para liberar la corredera). En cambio, en el último la RT se puede apretar con el propio dedo pulgar de la mano que agarra el pistolete, resultando en un movimiento mucho más rápido. Debido a ello la RT es el método más utilizado para liberar la corredera. La RD sólo se puede accionar en el lado izquierdo del arma, mientras que la RT es de accionamiento ambidiestro.

Durante la fase de diseño se decidió no emplear la RD en la réplica pues, al ser el montaje y desmontaje de la réplica distintos a las del arma real, dicho elemento no era de aplicación. Así mismo, la RT tampoco es de aplicación directa pues, al no retroceder la corredera y no haber munición real en el cargador, no se puede simular el funcionamiento de esta pieza. No obstante, como hemos explicado, la RT es un elemento vital para el correcto uso del arma, por lo que se ha decidido simular su funcionamiento, en este caso de manera electrónica, como explicaremos en el apartado de diseño (3.4.1.8).

3.2.8 Peso y posición del centro de gravedad de la FN-P9-17

El peso y equilibrio de un arma son de los factores de mayor importancia en el empleo de esta. Afectan crucialmente al esfuerzo físico y tensiones que debe soportar el tirador durante el combate y, por lo tanto, a su desempeño en este. Además, estos elementos también afectan al retroceso del arma, tanto en su fuerza como en el momento que ejercen sobre el tirador. Debido a todos estos motivos, determinar de manera exacta esas características permitirá, posteriormente, crear una réplica de alta calidad que ayude al tirador a adiestrarse en condiciones realistas para el arma que empleará en situaciones de combate.

Para determinar el peso real del arma situó en una balanza con cargador y munición. Su peso se situó en 907g, coincidiendo con lo que aparece en el manual del usuario de la FN-P9-17 [27]. Para determinar el centro de gravedad (CDG de ahora en adelante) se fue sujetando el arma por posiciones

alejadas del centro, acercándose progresivamente a este hasta encontrar el punto en el que estaba en equilibrio.



Figura 3-8 – Posición del CDG en el arma y momento

Como se puede observar en la Figura 3-8, dicho CDG se encuentra en la corredera, ligeramente adelantado a la retenida trasera de la corredera. La razón de esto es que la corredera es una pieza sólida de metal, mientras que gran parte del resto de los componentes del arma son de plástico. De esta manera, desplaza el CDG hacia la parte superior del arma. Además, el CDG está ligeramente retrasado respecto al centro geométrico del arma (a la altura de la cola del disparador) ya que el cargador y su munición, así como los mecanismos del disparador, retrasan dicho CDG. Esto producirá un momento hacia delante en la mano del tirador, ya que el mango está retrasado respecto al CDG.

3.3 Consideraciones previas al diseño

3.3.1 Funcionamiento del arma

Antes de avanzar, es importante contemplar ciertas observaciones acerca de la pistola FN-P9-17 y su relación con el modelo a desarrollar. El objetivo de la réplica es que el empleo de esta sea tan similar a la del arma real como sea posible, de manera que el usuario no pueda distinguir entre el uso del arma real y la réplica.

Para ello, factores como la geometría y las dimensiones, el peso y el equilibrio del arma, los materiales, o el adecuado funcionamiento de la réplica son vitales. Gracias a ello se logrará que, al emplear el simulador, el usuario sea capaz de ganar efectividad con el arma real a pesar de emplear una réplica.

De esta manera, durante el desarrollo de la réplica buscamos desarrollar algunas funcionalidades claves que consideramos críticas para que el empleo de esta sea útil en un simulador de tiro. Dichas funcionalidades, reflejadas en la Figura 3-9, son:

- A) **Seguro del disparador.** En el caso de la FN-P9-17 real, este seguro actúa impidiendo que el martillo se libere, golpeando la aguja percutora y disparando el arma. De esta manera, aún con el seguro puesto la cola del disparador se moverá al apretarse, simplemente no disparará el arma.

- B) **Botón de retenida de la corredera.** Este permite liberar la corredera cuando esta se ha quedado atrás al dispararse el último cartucho de un cargador.
- C) **Cargador** y detección de este en el arma. De esta manera, y mediante una cuenta de los disparos realizados, el simulador sabrá cuanta munición restante queda en el cargador.
- D) **Corredera móvil** y detección del movimiento de esta. Esto permitirá que el simulador se percate de que se ha montado el arma para, de manera simulada, “introducir el primer proyectil en la recámara”, al igual que al cambiar el cargador cuando el anterior haya quedado vacío.
- E) **Cola del disparador.** Esta debe ser apretada para poder abrir fuego.



Figura 3-9 - Elementos de la FN-P9-17 a desarrollar en el proyecto

De esta manera, para abrir fuego, deben darse estas condiciones:

1. Cargador introducido y existencia de munición restante.
2. Seguro quitado.
3. Arma montada. Esto se puede lograr de dos maneras:
 - a. Primer disparo: echando atrás la corredera.
 - b. Disparos sucesivos: echando atrás la corredera o apretando el botón de la retenida de la corredera. Ambas acciones simulan el liberar la corredera para introducir un nuevo cartucho en la recámara.
4. Apretar la cola del disparador.

3.3.2 Limitaciones

Las principales limitaciones que encontramos al realizar la réplica van a ser los materiales y el espacio:

- **Materiales**

La dificultad se debe a que la gran mayoría de las piezas serán de plástico o resina (al ser elaboradas mediante impresión 3D). Los polímeros carecen de la densidad del acero (del que está compuesto gran parte del arma real), así como de sus propiedades mecánicas. De esta manera, lograr que el arma tenga el peso y el equilibrio adecuados será un reto.

Además, uno de los elementos más importantes en un simulador de tiro es el retroceso del arma. Este debe ser tan rápido como el del arma real y con la misma inercia, a fin de que le sirva al usuario para adiestrarse en el empleo del arma real. No obstante, con los medios disponibles no es posible desarrollarlo. Esto se debe a que, para lograr dicha velocidad sería necesario emplear gases a presión, y no disponemos de esa capacidad. Además, el plástico del que está compuesto la réplica sufriría daños como consecuencia de la fatiga tras múltiples disparos.

- **Espacio**

Respecto al espacio, la FN-P9-17 es un arma de pequeño tamaño. En el presente trabajo se pretenden replicar la gran mayoría de sus funcionamientos reales, con la cantidad de mecanismos, sensores y cableado que esto implica. Además, al emplear plástico será necesario introducir lastre en la réplica para replicar el peso del arma real. No obstante, la menor densidad y capacidades mecánicas del plástico producen que los espesores de las piezas tengan que ser mayores que en el arma real, por lo que hay menos espacio disponible para todos estos elementos interiores. Debido a ello, la correcta distribución de estos mismo será crucial para el correcto desarrollo del proyecto.

3.3.3 Elementos electrónicos

Uno de los objetivos del presente proyecto es la integración de la réplica en el software de simulación. Para ello se dispone de un sensor *Vive Tracker 3* que irá integrado en la réplica (Figura 3-10). Mediante sensores *Microswitch 12* se recogerá el uso de los diferentes mecanismos que está accionando el usuario, y esa información se pasará al *Vive Tracker 3* para que este se la transmita al simulador junto con la posición y orientación del arma.



Figura 3-10 - Diagrama de arma corta con *Vive Tracker 3* integrado [22]

De esta manera, será necesario implementar 5 sensores *Microswitch 12* (uno por cada funcionalidad clave previamente mencionada) (Figura 3-9) y superficies específicamente creadas para albergarlos en la réplica, cableado desde estos hasta el *Vive Tracker 3* con sus respectivos pasantes y un soporte para el *Tracker*.

3.4 Diseño de la réplica

3.4.1 Modelado geométrico

A continuación, se estudiará el proceso del diseño de las piezas 3D de la réplica. Para ello se ha empleado el software *Inventor* de *Autodesk*, de tipo CAD/CAE. Este nos permitirá realizar el modelo digital de las distintas piezas, hacer los ensambles y ciertas pruebas sobre el modelo final. Como base se emplearán las medidas tomadas de la FN-P9-17 y se empleará el funcionamiento de este como referencia.

Como se detallará a continuación, prácticamente la totalidad de mecanismos de la réplica se alojan en el pistolete. De esta manera, y para facilitar la comprensión y evitar repeticiones, se explicará primero el diseño general del cuerpo del pistolete, sin entrar en detalle en sus uniones con el resto de piezas. Posteriormente se analizarán el resto de las piezas individualmente, así como su alojamiento en el pistolete y, si corresponde, el alojamiento de sus sensores *Microswitch 12*.

Además, para una mayor claridad en la explicación del diseño, en el presente apartado se han coloreado ciertas piezas para hacerlas más sencillamente identificables (por ejemplo: los *Microswitch*

12 de amarillo). Estos colores no tienen ninguna relación con el material ni la apariencia final de la réplica.

3.4.1.1 Cuerpo del pistolete

El cuerpo del pistolete es el elemento principal de la réplica, cuyo modelo 3D se puede observar en la Figura 3-11. En él se alojan la gran mayoría de mecanismos, sensores y cableado de la pistola, por lo que se trata de una pieza de gran complejidad. Se ha diseñado de manera que su geometría y dimensiones externas sean muy similares a las de la FN-P9-17, de manera que el usuario apenas note diferencia entre la réplica y el arma real.

- **Descripción general**

Para diseñarla se ha realizado un boceto de la sección en *Inventor* la cual se ha extruido. Sobre esta se han realizado múltiples bocetos con los que se ha trabajado para dar al pistolete el mismo aspecto interno que el arma real. Una vez realizada el bloque macizo del cuerpo del pistolete, esta se ha vaciado dejando paredes con un espesor de 3mm. Esta carcasa vacía ha sido la base sobre la que se han ido añadiendo los alojamientos para los diferentes mecanismos que describiremos posteriormente.

De manera general, se ha dejado un juego de 0,2mm entre las inserciones de las otras piezas con el cuerpo del pistolete. El motivo es que la precisión de la impresora 3D a utilizar es también de 0,2mm.



Figura 3-11 - Vista isométrica de los lados derecho e izquierdo del cuerpo del pistolete

- **Elementos destacados**

Uno de los principales elementos a destacar es el rail que tiene el cuerpo del pistolete bajo su parte frontal. Este rail de forma aserrada se ha inspirado en el rail *picattini*, que está presente gran multitud de armas de fuego y se utiliza para añadir accesorios como linternas, señalizadores láser o IR, etc. Aunque este modelo de rail no es el único empleado en el mercado, sí que es el más representativo.

En el caso de la FN-P9-17, sus accesorios tienen su contraparte del rail (Figura 3-12), con forma inversa al de la pistola. De esta manera, el accesorio se inserta por el rail hasta la posición deseada alineando los huecos del rail del arma con los del accesorio. Finalmente se inserta un pasador o un conjunto tornillo-tuerca por el hueco evitando que el accesorio se mueva de su posición.

Como veremos más adelante, este rail será usado para fijar el soporte del *Vive Tracker 3* al pistolete. Para incluirlo se creó un boceto del perfil del rail bajo el pistolete, se extruyó, y mediante otros bocetos se eliminaron los huecos que le dan esa forma aserrada.

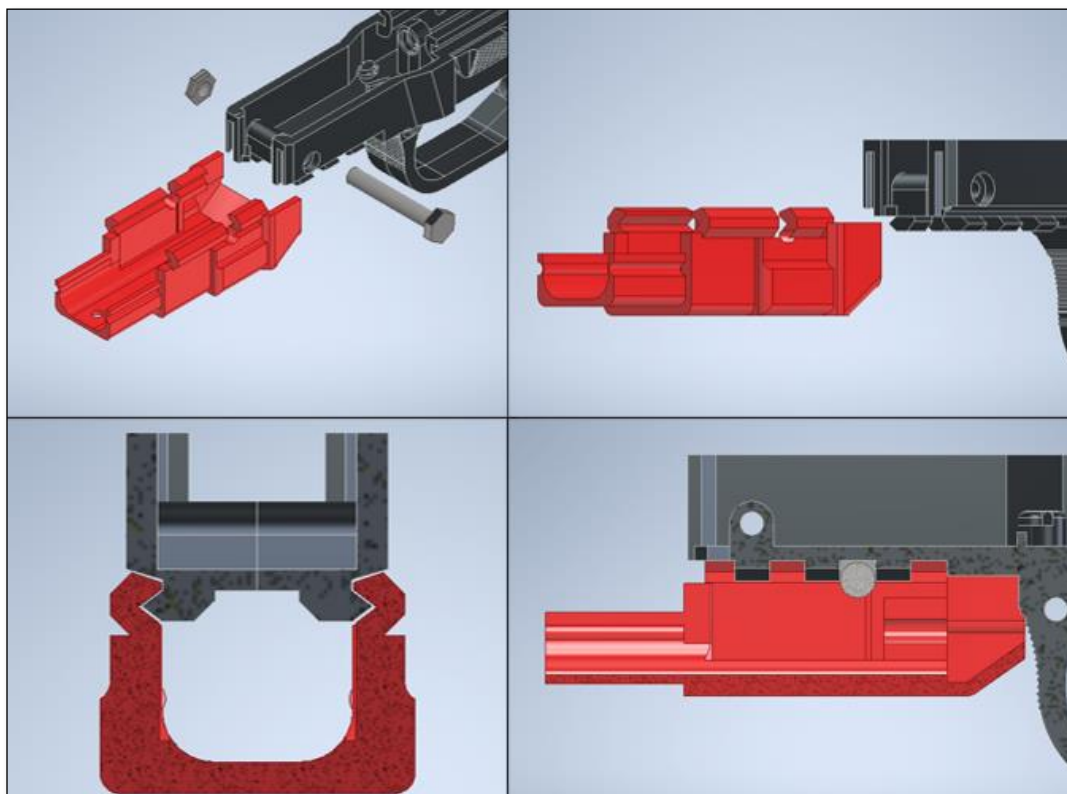


Figura 3-12 - Vistas y secciones del acople de un accesorio mediante el rail

Otro elemento a destacar es la retenida de la corredera delantera (RD). Como se mencionó previamente (apartado 3.2.7), esta no tiene utilidad directa en la réplica, al ser el montaje distinto. Debido a ello no se ha incluido su mecanismo, pero, debido a ser un elemento muy reconocible del arma, sí que se ha esculpido (en su posición por defecto) en el cuerpo del pistolete derecho. Se ha buscado que tanto su forma como sus dimensiones sean las mismas que en el arma real.

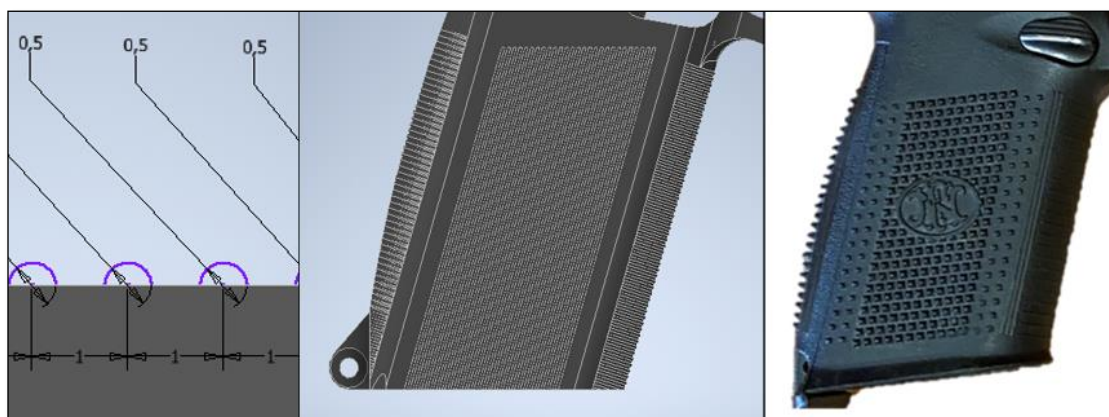


Figura 3-13 Corrugado de la réplica y del arma real

Además, tanto en la RD como en el mango del cuerpo del pistolete u otros elementos (como la retenida trasera de la corredera), ha realizado un corrugado para mejorar la sujeción del arma. Dicho corrugado está presente en la FN-P9-17 en los mismos elementos que la réplica. No obstante, para agilizar el diseño del arma, el corrugado en la réplica se ha simplificado respecto a la del arma real, en la que consiste en un mallado de puntos sobresalientes.

En la réplica se han creado semicírculos de radio 0,5mm separados 1mm hasta cubrir la curva de la superficie a corrugar. Finalmente, mediante la operación de barrido se ha añadido dicho corrugado sobre la superficie correspondiente (Figura 3-13). Este método ha sido el empleado para todas las piezas en las que haya corrugado.

Finalmente, en la parte delantera del cuerpo del pistolete se ha creado un canal de sección rectangular de 5x7mm (Figura 3-14). Por este pasarán los seis cables de los *Microswitch 12* (uno por sensor y el de tierra) y se soldarán a un conector hembra. Este canal se ensancha al llegar al final para permitir una distribución más sencilla de los mismos para conectar con el conector. Del circuito eléctrico hablaremos con más detalle en la sección 3.4.2.

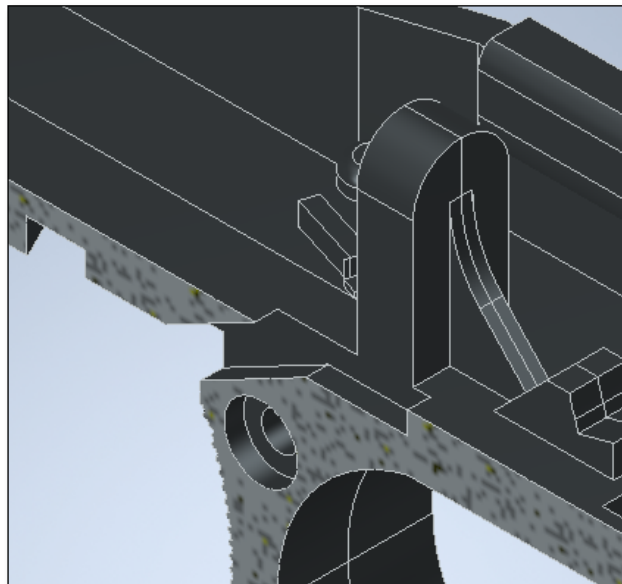


Figura 3-14 - Vista isométrica de la sección del canal de paso de cables

- **Separación del cuerpo del pistolete**

Como veremos en el apartado 3.7, hay muchos elementos que deben ser montados dentro del cuerpo del pistolete (martillo, cola del disparador, muelles, etc.). Dicho montaje es muy complicado si el cuerpo del pistolete es una sola pieza. Además, la impresión también sería muy compleja. Debido a ello hemos decidido cortarla por la mitad de manera longitudinal para crear dos piezas del cuerpo del pistolete: el izquierdo y el derecho.

Para unir ambas mitades se han situado tres tornillos M3 de distintas longitudes en los puntos más alejados del cuerpo del pistolete. Se ha añadido un cuarto en la zona central de este para asegurar la unión en la zona donde hay más elementos. De esta manera se facilita el montaje y, una vez atornilladas ambas piezas, se comporta como un sólo elemento. Finalmente, se han añadido los huecos necesarios para que las cabezas de los tornillos y las tuercas correspondientes no sobresalgan del cuerpo del pistolete.

Para ello, y una vez finalizado el diseño del cuerpo del pistolete, se ha creado en *Inventor* un boceto en el plano medio de la pieza, con un boceto que abarcaba la totalidad de la pieza. Dicho boceto se ha extruido para eliminar el lado inverso de la pieza y así crear las dos mitades. De esta manera logramos facilitar que el montaje de todo el conjunto.

3.4.1.2 Corredera y miras

- Descripción de las piezas

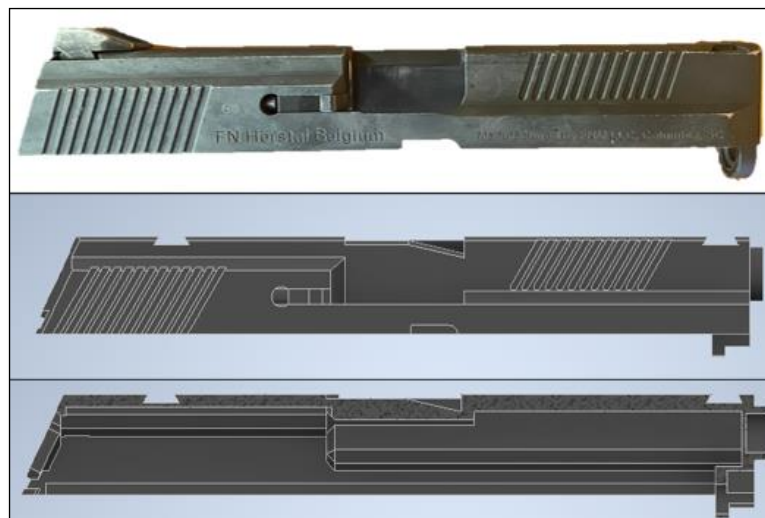


Figura 3-15 - Corredera real (con mira trasera), corredera 3D y sección transversal de esta

Para diseñar la corredera se ha creado el perfil correspondiente a la FN-P9-17, extruyéndose hasta la longitud total (Figura 3-15). Mediante bocetos se ha añadido o eliminado los detalles externos de esta pieza. Se han respetado todos los elementos externos del arma real que el usuario puede identificar de manera visual, como las hendiduras laterales o las aperturas para las distintas retenidas de la corredera. El grosor de las paredes de la pieza es de 3mm en casi la totalidad de la pieza. Las únicas excepciones son las zonas donde elementos individuales (como las hendiduras laterales) han reducido su espesor. No obstante, a nivel estructural, dichas zonas son despreciables.

Respecto a las miras, se han diseñado estas de manera individual tal que puedan acoplarse a la corredera mediante una cola de milano (Figura 3-16). El motivo es que dota a la réplica de una mayor flexibilidad, al dar la opción de modificar las miras en un futuro o de acoplar cualquier otro elemento mediante dichas colas de milano en caso de que fuere necesario. Además, el arma real funciona de manera idéntica.

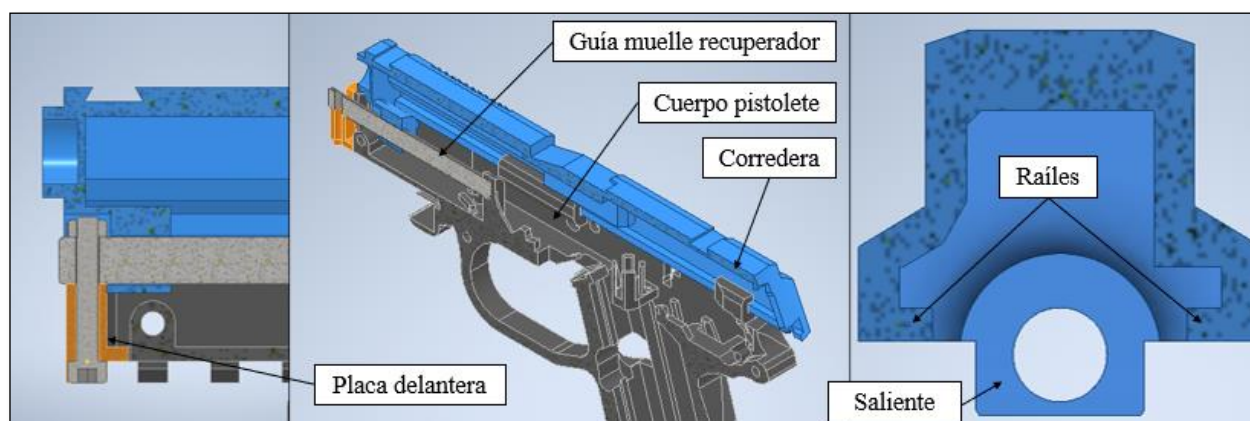


Figura 3-16 - Relación de la corredera (azul) con otros elementos y sus guías

Respecto a la recámara, como vimos previamente, en el arma real esta forma parte del cañón, que es una pieza aparte. En el caso de la réplica, esta no tiene cañón ni recámara. No obstante, esta última es visible por el tirador, por lo que su forma externa ha sido incluida como parte de la corredera de la réplica, de manera que visualmente se corresponda al arma. Respecto al cañón, se ha extruido un

cilindro para simularlo, no obstante, está tapado en su interior para generar una mayor resistencia estructural.

La corredera se desplaza linealmente sobre el cuerpo del pistolete. Para guiar este movimiento cuenta con dos carriles (uno a cada lado) y la guía del muelle recuperador. Los raíles de la corredera tienen la sección indicada en la Figura 3-16 y son pasantes por la parte trasera de esta. Para la guía del muelle recuperador se ha realizado un saliente en la parte frontal de la corredera, en el cual hay un agujero circular pasante por el que irá la guía del muelle recuperador. La posición de este agujero coincide con su homólogo en el arma real.

Dicho saliente tiene la triple función de recorrer el muelle recuperador, guiando el desplazamiento de la corredera; contraer el muelle recuperador y su platillo (Figura 3-18); y servir de tope frontal para el desplazamiento de la corredera. Para ello, el cilindro está ligeramente por detrás de la Placa delantera del cuerpo del pistolete, de manera que, al chocar con esta, ambas piezas (placa delantera y corredera), queden perfectamente alineadas.

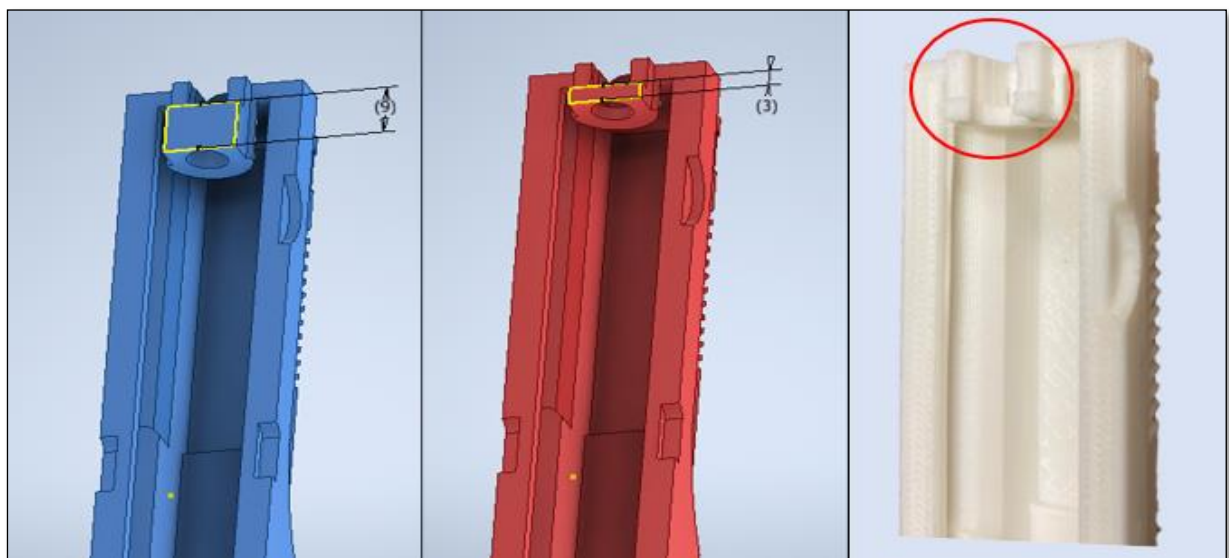


Figura 3-17 – Comparación de los grosores del saliente durante el desarrollo

Durante las pruebas realizadas en uno de los prototipos impresos se rompió el saliente debido a la fuerza del muelle recuperador. Debido a ello se decidió aumentar el grosor del saliente (de 3mm a 9mm), aguantando así mejor los esfuerzos cortantes. Se puede ver en la Figura 3-17, donde la pieza azul es tras la modificación, la roja antes y la blanca es un prototipo roto tras las pruebas.

En el interior de la corredera no se alojarán sensores ni mecanismos. Por el contrario, será dentro de la corredera donde se colocarán la gran mayoría de lastres de la réplica, detallándose posteriormente en la sección 3.6.

- **Alojamiento en el pistolete**

Para el guiado de la corredera se han situado raíles a ambos lados de la parte superior del cuerpo del pistolete tal y como se ve en la Figura 3-16.

3.4.1.3 Muelle recuperador, guía y platillo

- **Descripción de las piezas**

El muelle recuperador es el encargado de devolver la corredera a su posición original cuando esta retroceda. Se compone de dos muelles de compresión de 9.5mm de diámetro, uno de 19mm de longitud y el otro de 35mm. Cuando hablemos de “muelle recuperador” nos referiremos al conjunto de los dos muelles. Se ha elegido estos dos muelles concretos ya que cubren perfectamente la longitud de

la guía, desplazando a la corredera todo el recorrido necesario, sin ser tan fuertes como para crear esfuerzos o fatigas excesivos que piezas de resina o plástico no puedan soportar.

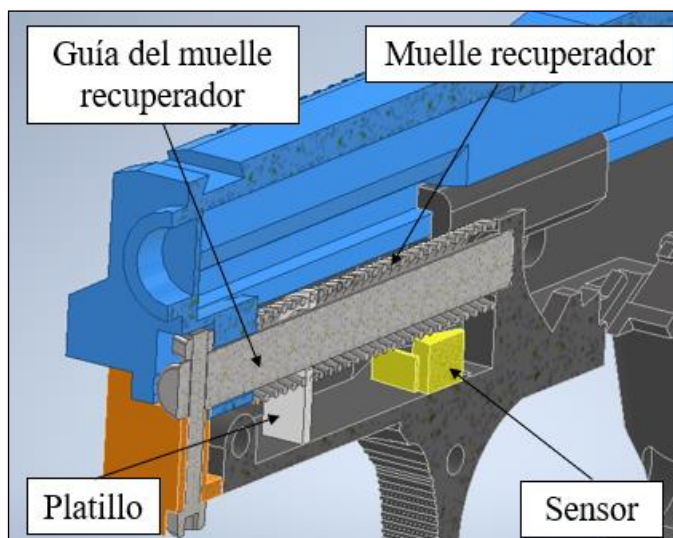


Figura 3-18 - Detalle del muelle recuperador, su guía y el platillo

Dicho muelle va montado sobre una barra cilíndrica de diámetro 6mm y longitud 66mm. Esta barra sirve de guía para el movimiento del muelle y es lo que denominaremos “guía del muelle recuperador” (Figura 3-18). En uno de sus extremos tiene un agujero pasante de 3,3mm, por cuyo interior pasa un tornillo M3. La función de este es fijar la barra a la placa delantera del cuerpo del pistolete e impedir que la barra se desplace. Por su parte trasera, la guía se aloja en un saliente del cuerpo del pistolete, de manera que gracias a este saliente y al tornillo, no se sea posible su movimiento.

Entre los dos muelles del muelle recuperador se encuentra una placa que denominaremos “platillo”. Este platillo tiene forma de rectángulo, redondeado en su extremo superior. En dicho extremo tiene un agujero circular pasante por el que pasa la guía del muelle recuperador. El extremo cuadrangular toca con el cuerpo del pistolete e impide que el platillo gire respecto a este. La función del platillo es ser arrastrado hacia atrás por la corredera, activando uno de los sensores que se encuentra sobre el cuerpo del pistolete e indicando que la corredera ha retrocedido.

- **Alojamiento en el pistolete**

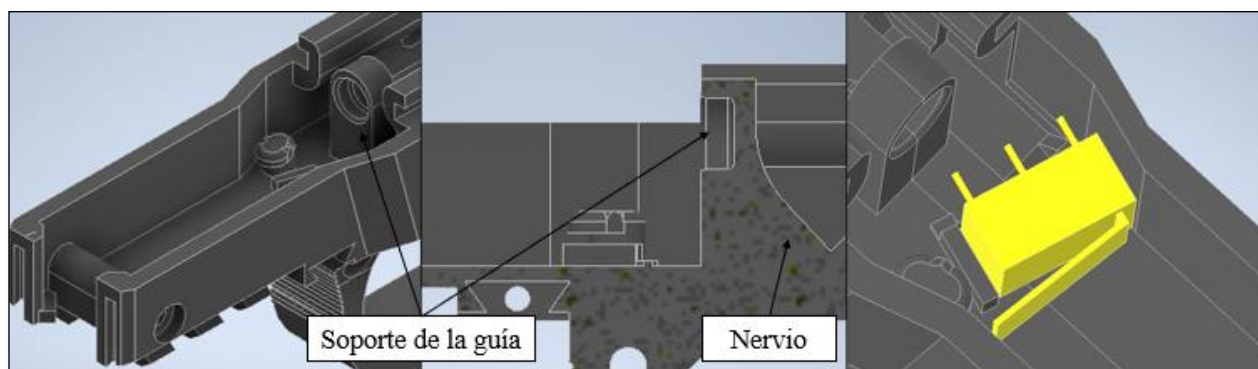


Figura 3-19 - Soporte de la guía del muelle recuperador y alojamiento de su sensor

En la parte central del cuerpo del pistolete sobresale un elemento poliédrico curvado en la parte superior (Figura 3-19). Este elemento, que es el soporte de la guía del muelle recuperador, tiene un agujero no pasante de sección circular y diámetro 6,8mm en cuyo interior se aloja la guía del muelle

recuperador. Este soporte tiene como función secundaria detener el recorrido de la corredera hacia atrás, al chocar esta con el soporte. Debido a ello, por la parte trasera tiene un nervio que le ayuda a aguantar los esfuerzos de los impactos con la corredera.

- **Alojamiento del Microswitch 12**

Este sensor es el encargado de detectar que la corredera se ha echado hacia atrás al montar el arma. Se encuentra centrado en la superficie horizontal del cuerpo del pistolete, enfrente del soporte de la guía del muelle recuperador. De esta manera, al retroceder la corredera, esta arrastra el platillo hacia atrás, activando el sensor.

Para fijarlo en su posición se emplea la pared del cuerpo del pistolete izquierdo y un saliente a su derecha, que también impide el movimiento hacia atrás. Para mayor fijación, se ha empleado un adhesivo para pegar el sensor al cuerpo del pistolete derecho.

3.4.1.4 Placa delantera del cuerpo del pistolete

- **Descripción de las piezas**

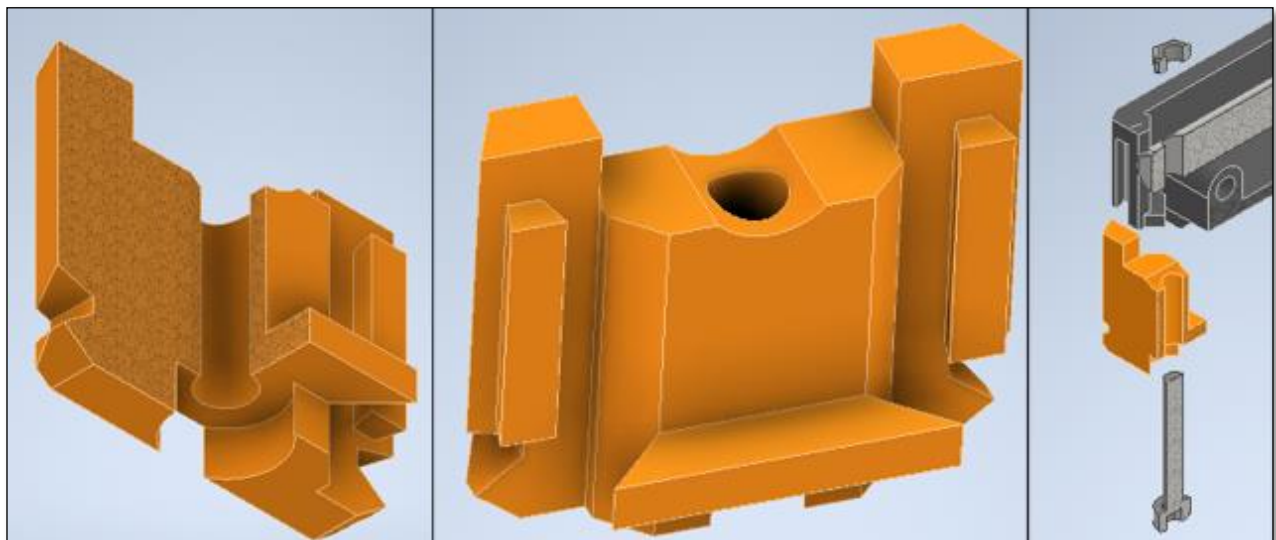


Figura 3-20 - Geometría de la placa delantera del cuerpo del pistolete y explosionado de su montaje

La placa delantera es un elemento cuya principal función es fijar la posición de la guía del muelle recuperador. Además, sirve como elemento de unión entre las dos mitades del cuerpo del pistolete. Originalmente, la placa delantera era parte del cuerpo del pistolete (como ocurre en la FN-P9-17 original). No obstante, las dificultades del montaje de la réplica hicieron necesario que pasara a ser una pieza aparte.

Para crearla se creó un poliedro con las dimensiones de la parte frontal del cuerpo del pistolete, y mediante bocetos y extrusiones se le dio la forma adecuada para que encajara con el cuerpo. Para montarse en este cuenta con tres colas de milano: una a cada lado y otra en la parte inferior. Estas tienen el doble objetivo de servir de guías para el montaje de la placa y soportar los esfuerzos que causará el impacto de la corredera, cuando esta vuelva a su posición. Estos esfuerzos causaron la ruptura de las colas de milano laterales en uno de los prototipos impresos, motivo por el cual se añadió la inferior.

Además, en su parte superior la placa permite el alojamiento de la guía del muelle recuperador y del saliente de la corredera (Figura 3-20). Por último, la placa consta de un agujero pasante de diámetro 3,3mm por el cual pasa el tornillo que hace firme la guía del muelle recuperador a la placa. De esta manera quedan fijos la placa delantera y la guía del muelle recuperador.

- **Alojamiento en el pistolete**

Para alojar la placa delantera se han practicado las colas de milano hembra correspondientes. Las laterales no son pasantes. Ambas partes de colas de milano (Figura 3-21) tienen un juego de 0,3mm, ya que al imprimir los prototipos se comprobó que con 0,2mm la precisión de la impresora no era suficiente y muchas veces la cola de milano no deslizaba de manera fluida.

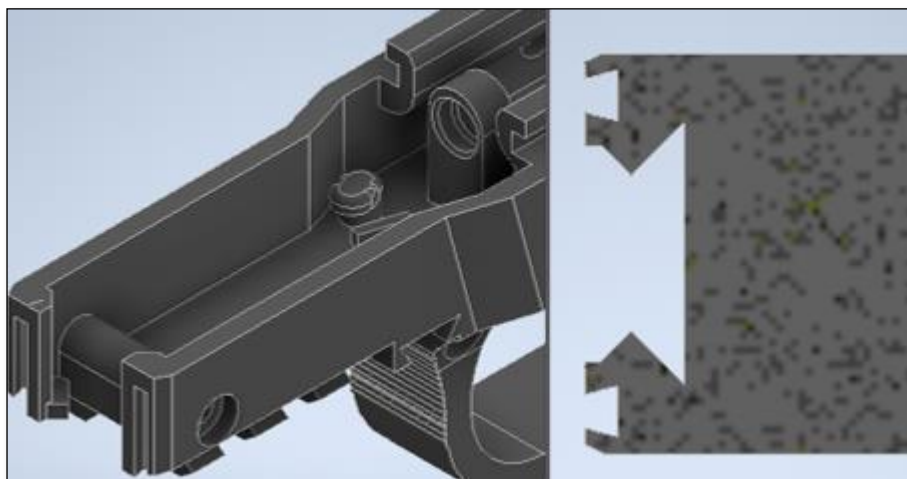


Figura 3-21 - Detalles de la parte frontal del pistolete y sección de las colas de milano

3.4.1.5 Martillo

- **Descripción de la pieza**

El martillo es el elemento encargado de golpear la aguja percutora en la FN-P9-17, provocando la explosión del fulminante y, a raíz de esta, el disparo del proyectil. En el caso de la réplica, al no existir esta secuencia, no es necesario un martillo. No obstante, se ha decidido mantener al ser un elemento característico del arma, ya que su ausencia sería fácilmente detectada por el usuario.

Para diseñarlo se ha hecho un boceto según las dimensiones del martillo real y se ha extruido. En su zona inferior se ha hecho un agujero pasante de 3,5mm de diámetro, por el que pasa el eje de giro del martillo. Este eje es parte del cuerpo del pistolete. Finalmente, se ha colocado un saliente en su cara frontal, en el cual se engancha un muelle de tracción de 5,5mm de diámetro y 25,5mm de longitud. Este muelle se hace firme por su otro extremo a un saliente del pistolete, traccionando hacia delante el martillo, de manera que vuelva a su posición original cuando la corredera vuelva hacia delante.

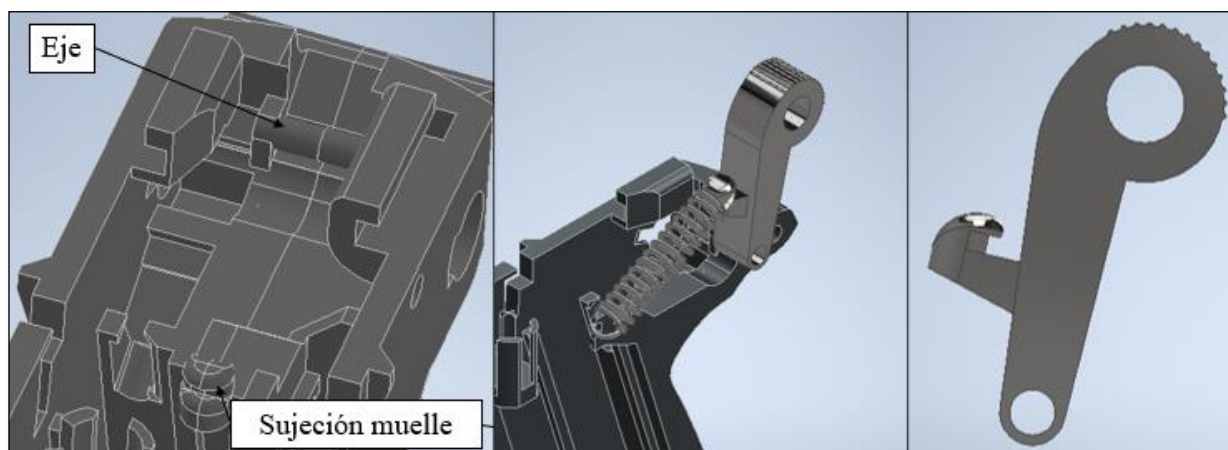


Figura 3-22 - Elementos del martillo y su alojamiento

- **Alojamiento en el pistolete**

El alojamiento del martillo consiste en un sencillo eje en la parte trasera del cuerpo del pistolete. En la parte trasera de este, y al igual que en el arma real, se ha eliminado la parte que impediría al martillo inclinarse hacia atrás al ser empujado por la corredera. Además, más adelante, y centrado, hay un saliente que sujeta uno de los extremos del muelle de tracción del martillo (Figura 3-22).

3.4.1.6 Cola del disparador

- **Descripción de la pieza**

La cola del disparador es la pieza que el tirador debe apretar para desencadenar el disparo. En el arma real, todo el mecanismo desde que se presiona la cola hasta que se abre fuego es mecánico, no obstante, en la réplica es electrónico. La cola del disparador rotará sobre su eje hasta tocar un sensor *Microswitch 12* que transmitirá la señal al simulador (a través del *Vive Tracker 3*) de que se ha abierto fuego.

La pieza diseñada recrea la geometría de su homólogo real para que su tacto y estética sean tan parecidos como sea posible. Respecto a su parte interna, la cola del disparador se compone de un eje que se inserta en cada una de las partes del cuerpo del pistolete. En el lado derecho del eje tiene un saliente en el cual se engancha un muelle de tracción de 5,5x25mm cuyo extremo opuesto está unido a la parte frontal del cuerpo del pistolete derecho, mediante otro saliente (Figura 3-23). Este saliente ha sido diseñado de manera que dificulte la salida del muelle de su posición.

De esta manera, el muelle tracciona la cola del pistolete forzándola a quedar en su posición original. Para facilitar el montaje del muelle, se ha recortado la figura de la cola del disparador en la zona cercana al saliente, sin que esto sea apreciable por el tirador, ya que dicho recorte está dentro del cuerpo del pistolete.

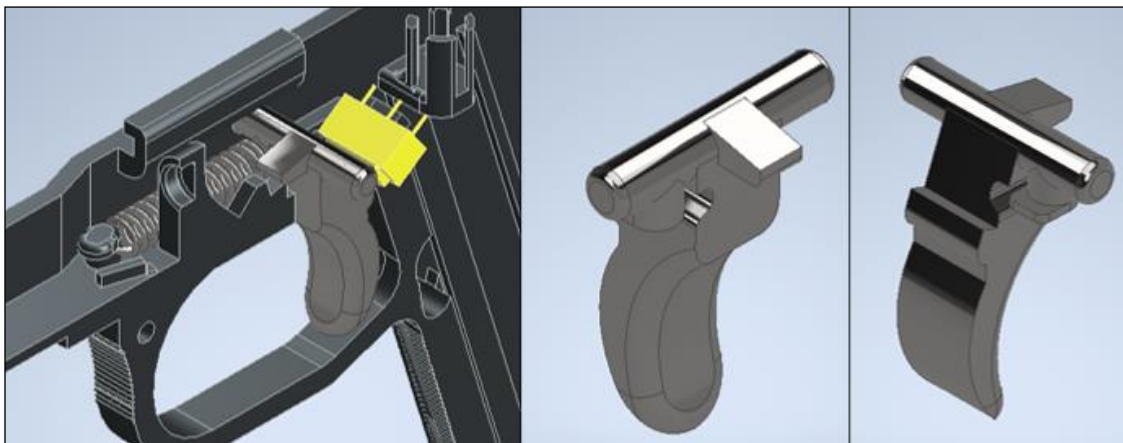


Figura 3-23 - Geometría de la cola del disparador y disposición en el conjunto

Finalmente, la cola del pistolete tiene un saliente en su zona delantera-superior cuya función es detener el movimiento de la pieza cuando esta haya recorrido el ángulo necesario para provocar el disparo.

- **Alojamiento en el pistolete**

Para alojar la cola del disparador se ha hecho un hueco en la zona central del cuerpo del pistolete, por el que sale dicha cola. Además, como se puede ver en la Figura 3-24, hay un agujero circular no pasante en cada lado del cuerpo del pistolete, por el que se inserta el eje de la cola del pistolete y respecto al que rota.

En el lado derecho del cuerpo del pistolete, por delante del soporte de la guía del muelle recuperador hay un saliente cuya función es sujetar uno de los extremos del muelle de tracción que

devuelve la cola del disparador a su posición central tras cada disparo. Dicho saliente se agranda en su parte superior para impedir que el muelle se salga de su posición.

Además, la apertura que traspasa el cuerpo del pistolete y por la que discurre la parte inferior de la cola del disparador (con la que interacciona el usuario para accionar el tiro) tiene su cara frontal plana de manera que detiene el giro de la cola del disparador cuando, al terminar de ser accionada, se libera y el muelle que tiene a su derecha la devuelve a su posición original.

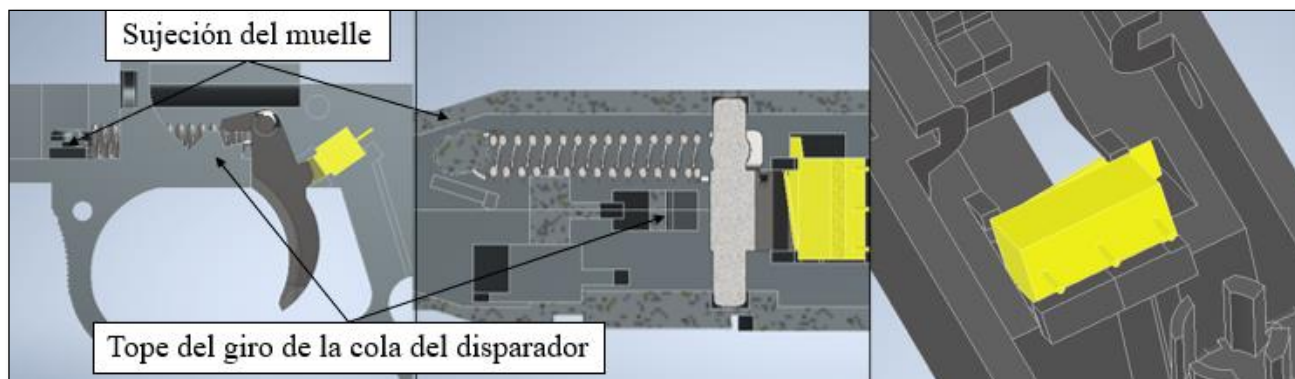


Figura 3-24 - Elementos del alojamiento de la cola del disparador y su sensor

- **Alojamiento de su sensor *Microswitch 12***

Para alojar este sensor se ha abierto un agujero justo detrás de la posición de la cola del disparador. Dicho agujero está inclinado tal que la plaquita del sensor del metal sea perpendicular al movimiento de la cola del disparador cuando esta lo presione. Además, se ha ampliado este agujero en el lado derecho del pistolete para permitir pasar a la placa metálica. El sensor queda inmovilizado en su posición por las paredes laterales de dicho agujero, unos soportes en la parte frontal y una rebaba en la parte posterior que impide que salga hacia atrás. Para impedir cualquier tipo de movimiento, se ha empleado un adhesivo que lo une al cuerpo del pistolete.

3.4.1.7 Seguro

- **Descripción de las piezas**

El seguro es el encargado de evitar que el arma se dispare cuando el usuario no lo desee, a pesar de que se pulse la cola del disparador. Como explicamos previamente (apartado 3.2.5), en la FN-P9-17 el seguro no impide que se mueva la cola del disparador, si no que inhibe los efectos de ese acto. De esta manera, nuestra réplica funciona similar: no obstaculiza mecánicamente el movimiento de la cola del disparador si no que inhibe el disparo de manera electrónica. Para ello pulsará un sensor cuando esté desactivado (permitiendo el disparo).

Al igual que el seguro del arma original, el seguro de la réplica tiene sólo dos posiciones: desactivado (dispara) y activado (impide el disparo). En la primera la palanca selectora está en posición horizontal y deja ver un círculo rojo. En la segunda la palanca pivota 25° hasta tapar dicho círculo.

Se ha prestado especial atención a que dicho ángulo sea el mismo que en la FN-P9-17 y que la geometría y dimensiones exteriores de la palanca selectora sean idénticos para que el usuario no note diferencia respecto al arma real. De esta manera, el seguro de la réplica se puede accionar de manera ambidiestra, al igual que el del arma real.

El seguro consta de dos piezas: el selector derecho (sólo la palanca selectora) y el selector izquierdo (que incluye palanca selectora, eje de unión con el otro selector y el pulsador del sensor). Por “palanca selectora” nos referimos a la parte externa de la pieza, con la que interactúa el tirador. El “eje

de unión” es el cilindro que sale de la palanca selectora y que se inserta en el cuerpo del pistolete correspondiente. Y el “pulsador” es la barra que sale del selector izquierdo y que acciona el sensor.

Las palancas selectoras tienen el mismo diseño que en el arma real y es con lo que interactuará el tirador. De ambas sale un eje sobre el que pivota la palanca y un saliente que restringe el giro dentro de los 25° que hablamos previamente.

De la palanca izquierda sale un eje con lados rectos que se inserta en la palanca izquierda, de manera que ambas giren solidariamente (Figura 3-25 y Figura 3-26). De dicho eje sale el pulsador. Al comienzo del diseño el pulsador era parte del selector derecho, pero el montaje era muy complicado al hacer falta un giro muy concreto para introducirlo en el pistolete. Dicho giro acabaría dañando la pieza con los sucesivos montajes y desmontajes. De esta manera, el pulsador se ha colocado en el extremo del eje del pulsador izquierdo que, al ser más largo, facilita su montaje.

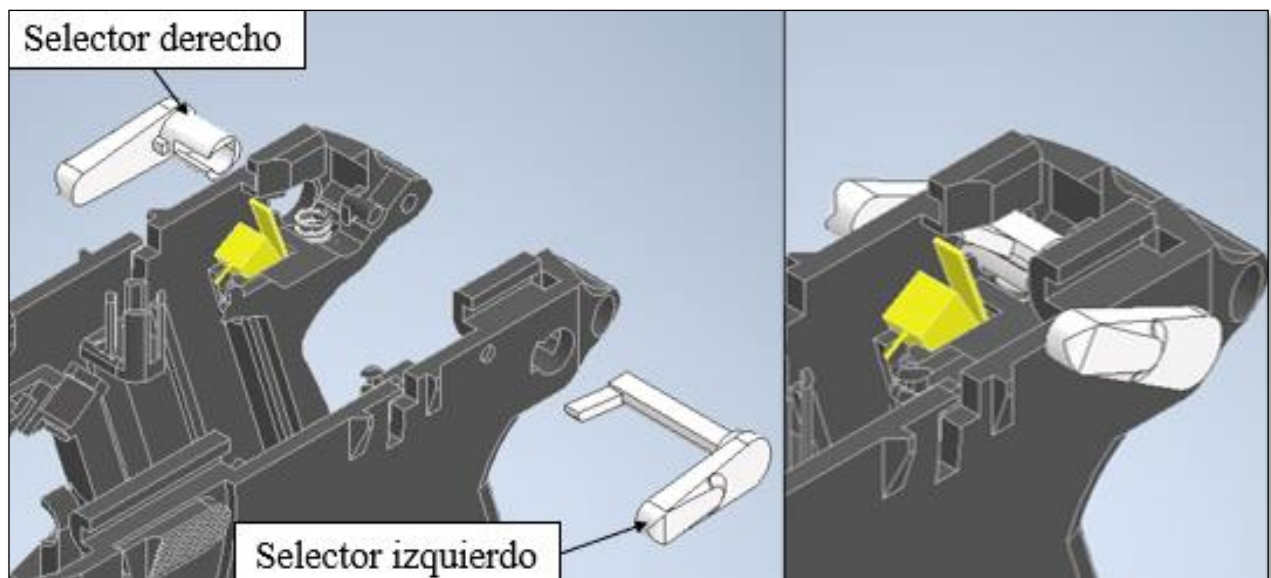


Figura 3-25 - Explosionado y ensamble del conjunto del seguro

El pulsador derecho tiene dos caras planas con una orientación de 25° entre sí. Estas bloquean el seguro en la posición en la que esté al ser presionadas por un muelle de 5,5mm de diámetro y 3mm de longitud. Dicho muelle está fijado en el cuerpo del pistolete.

- **Alojamiento en el pistolete**

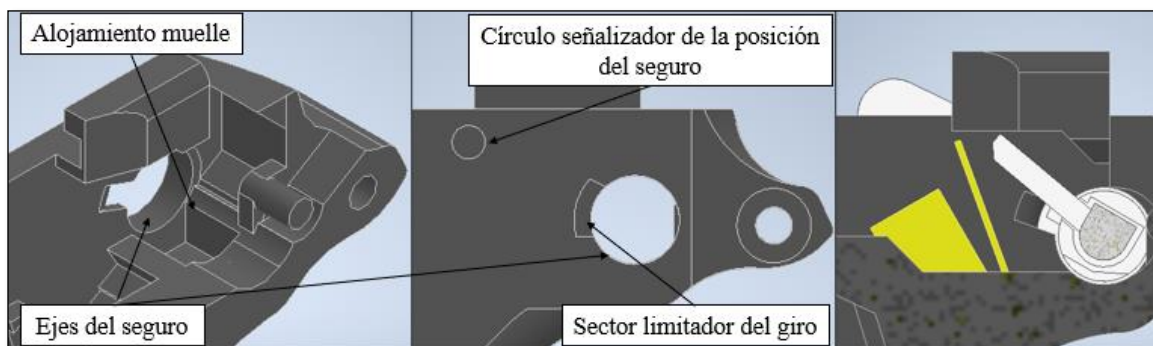


Figura 3-26 - Elementos del alojamiento del seguro⁴

⁴ En la imagen central, dentro del eje del seguro se ve sobresalir un elemento. Este es el eje del martillo. Como el eje del seguro reduce su sección al pasar las paredes del cuerpo del pistolete, dicho eje del martillo no obstaculiza ni el montaje ni el movimiento del seguro (y viceversa).

Para alojar el seguro en el pistolete se ha practicado un agujero pasante del diámetro del eje del seguro (Figura 3-26). Además, en ambas partes del pistolete, y sin atravesar las paredes del cuerpo del pistolete, se ha rebajado un sector dentro del cual va el saliente de la palanca selectora correspondiente, limitando el giro del seguro a los 25° mencionados. En las caras externas del pistolete también se han eliminado dos círculos correspondientes a los círculos rojos de la FN-P9-17.

Así mismo, hizo falta eliminar parte del rail trasero-derecho de la corredera para que no impidiera el giro del pulsador del seguro. Finalmente, en el lado derecho del cuerpo del pistolete, debajo de donde se aloja el eje del selector derecho del seguro, hay un agujero no pasante en el que se aloja el muelle de 5,5mm de diámetro y 3mm de longitud que presiona dicho selector para impedir que cambie de posición.

- **Alojamiento su sensor *Microswitch 12***

Para alojar el sensor se ha creado una cavidad en el lado derecho del cuerpo del pistolete. Esta permite colocar el sensor tal que la placa metálica de este esté perpendicular al pulsador del selector izquierdo del seguro. El sensor está aprisionado en su sitio por las paredes de la cavidad y, a mayores, por un adhesivo.

Por la parte frontal de su cavidad se ha abierto una ranura para que salgan los pines del sensor (Figura 3-27). Esta se ha tenido que ampliar durante el desarrollo ya que originalmente era demasiado pequeña para dejar pasar el cableado.

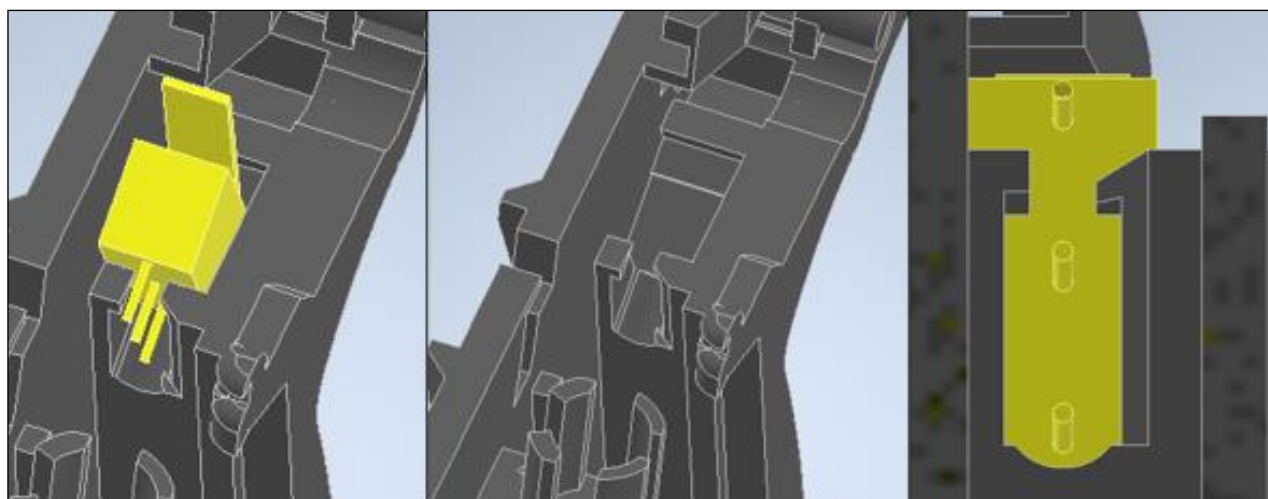


Figura 3-27 - Detalle del alojamiento del sensor del seguro de la ranura para sus pines

3.4.1.8 Retenida de la corredera

- **Descripción de las piezas**

Como explicamos previamente (apartado 3.2.7) la retenida de la corredera de la réplica no ejercerá ninguna función mecánica ya que, al no retroceder la corredera tras cada disparo, no puede retenerla al quedar el cargador vacío. No obstante, consideramos importante que el tirador pueda “liberar la corredera” de manera digital cada vez que municione el arma, ya que este es el método más utilizado.

La pieza consiste en los dos botones que el tirador puede apretar (uno a cada lado). Estos tienen las mismas dimensiones y geometrías que sus contrapartes de la FN-P9-17. Están unidos en una sola pieza, de manera que se pueda activar de manera ambidiestra. En el arma real dichos botones se mueven de manera vertical.

Para simular ese movimiento hay un eje en el extremo opuesto a los botones de la pieza respecto a los que estos rotan. Al ser un eje largo (30mm) frente a una rotación pequeña (10°, unos 5mm en

vertical), dicha rotación se percibe como el mismo movimiento vertical que en el arma real. Esto se ha comprobado en los distintos prototipos fabricados y se ha visto que el movimiento es satisfactorio.

En el eje previamente mencionado se ha eliminado la parte central. Esto permite presionar ambos extremos para flexar la pieza y lograr montarla en los huecos correspondientes del cuerpo del pistolete. En el lado izquierdo de la retenida, hacia la parte trasera de la pistola, sobresale el pulsador del sensor correspondiente.

Finalmente, en el lado derecho de la pieza sobresale una cruz (Figura 3-28). Esta está presionada por un muelle de 6,5mm de diámetro y 10mm de longitud que empuja la pieza hacia arriba. De esta manera, tras pulsar los botones para “liberar la corredera”, la pieza vuelve a su posición superior. La subida de la retenida de la corredera está limitada por un pequeño saliente en la parte superior del más largo de los dos railes de los que hemos hablado previamente.

Durante las pruebas realizadas a los prototipos se comprobó que un sólo eje uniendo ambos botones hacía la pieza muy endeble, pues al pulsar los botones flexaba y el otro botón no bajaba. Para remediarlo se puso otro eje en la zona media de la pieza.

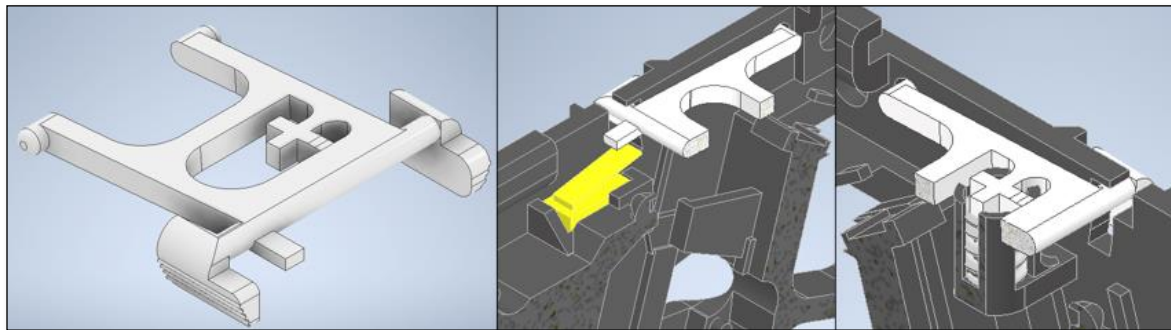


Figura 3-28 - Geometría de la retenida del cargador y secciones de su ensamblaje

• Alojamiento en el pistolete

Para alojar la retenida se han practicado un agujero no pasante en cada lado el cuerpo del pistolete en el que se alojará el eje de dicha pieza.

Más atrás, en la posición correspondiente de la FN-P9-17, se ha eliminado un perfil con forma de zigzag. El lado más alargado de dicho perfil (el delantero) es el recorrido que hacen los botones de la retenida de la corredera al bajar. Tiene un tope en la parte superior de este rail para impedir que dicha retenida se salga por acción del muelle. El lado izquierdo del perfil, el más corto, sirve para facilitar el montaje de la retenida (como se verá en el apartado 3.7).

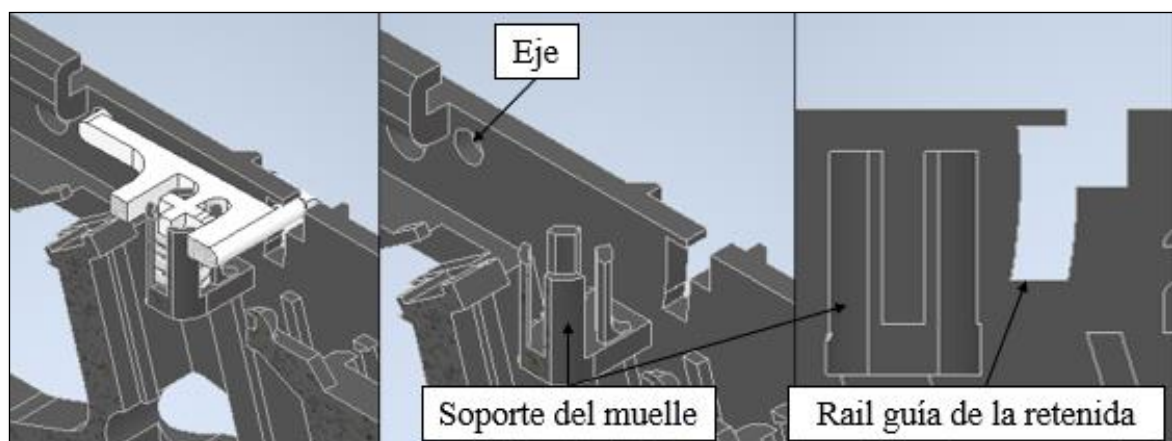


Figura 3-29 - Elementos del alojamiento de la retenida de la corredera

Finalmente, en el lado derecho del cuerpo del pistolete, entre el rail previamente mencionado y el eje de la retenida se ha extruido una plataforma de la que, hacia arriba sobresalen cuatro placas (Figura 3-29). Estas delimitan un cilindro en el que se introduce el muelle de 10mm de altura y 6,5mm de diámetro que presiona la retenida de la corredera hacia arriba.

- **Alojamiento de su sensor *Microswitch 12***

Para alojar el sensor se ha colocado un paralelepípedo rectangular en el lado izquierdo del pistolete, cuyas paredes mantienen el sensor inmóvil. En la parte inferior tiene una ranura por la que sobresalen sus pines (Figura 3-30). Ha sido necesario aumentar el grosor de esa ranura durante el desarrollo para facilitar la conexión de los pines con el cableado. Al igual que el resto de sensores, este se ha pegado al cuerpo del pistolete mediante adhesivos.

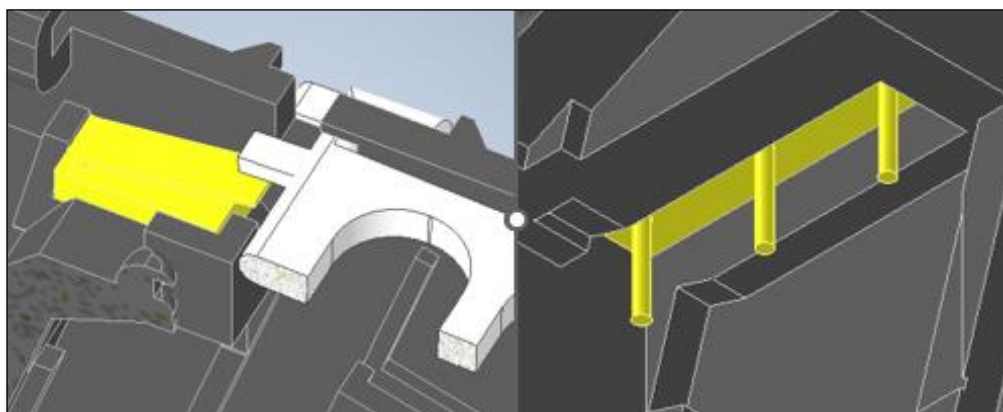


Figura 3-30 - Detalle del alojamiento del sensor de la retenida de la corredera

3.4.1.9 Cargador

- **Descripción de la pieza**

A diferencia del arma real, en la réplica el cargador no portará munición. En cambio, su principal función será portar lastres y activar un sensor que indicará que el cargador está puesto. La geometría y dimensiones del cargador es similar a la de su contraparte real a excepción de su altura.

La principal diferencia es que la réplica es más corta que el real, debido a que este último debe llegar a la altura de la corredera, para situar los cartuchos a esa altura y que así se introduzcan en la recámara. Los primeros diseños del cargador réplica eran similares, pero al haber poco espacio, fue necesario recortar la altura del cargador para que cupieran el resto de los mecanismos.

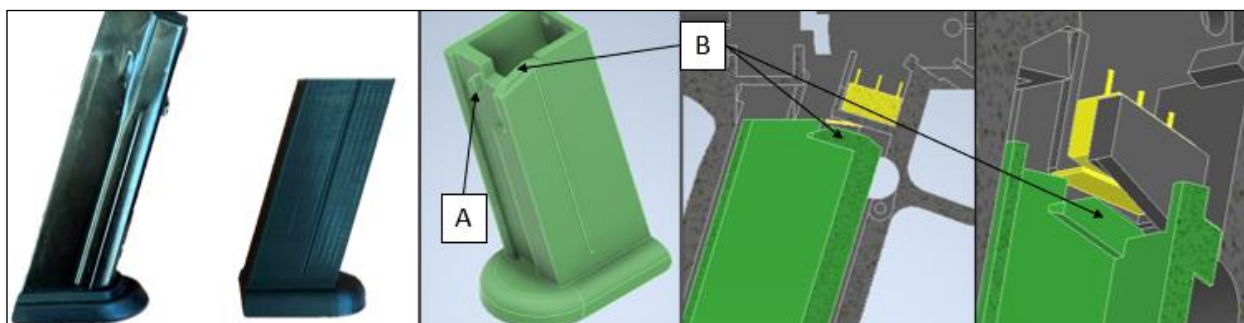


Figura 3-31 - Comparación cargador real y réplica y elementos de este

El cargador es un paralelepípedo vaciado en su interior para que quepan los lastres. Sobre su cara frontal se ha rebajado un carril por el que pasará la pieza central de la retenida de la corredera. En la parte superior de la cara frontal hay un saliente (A) que es el que interactuará con la retenida del

cargador para permitir la liberación del cargador. En el lado izquierdo superior tiene un saliente (B) que es el encargado de presionar el sensor, que está alejado en el pistolete.

En la cara posterior del cargador están los mismos agujeros que en el cargador real, a través de los cuales se podría ver la munición restante. En la réplica se mantienen ya que son un elemento estético fácilmente reconocible por el usuario del simulador.

- **Alojamiento en el pistolete**

Para alojar el cargador en el pistolete se ha vaciado el mango del cuerpo del pistolete dejando una sección rectangular un poco más grande que el cargador. Se han extruido dos railes en cada cara de dicha apertura para que guíen la subida del cargador manteniéndolo centrado.

- **Alojamiento de su sensor *Microswitch 12***

Para colocar el sensor se ha extruido un paralelepípedo rectangular en el lado izquierdo del cuerpo del pistolete, en la parte superior del mango. Este se ha vaciado dejando una cavidad en la cual se introduce el sensor con la placa metálica hacia abajo. Para esta se ha abierto una ranura en la base del soporte del sensor. Dicho soporte está inclinado según la orientación del movimiento del cargador para que el saliente de este incida perpendicularmente sobre la placa del sensor (Figura 3-31). El *Microswitch 12* está pegado mediante un adhesivo al cuerpo del pistolete derecho para impedir su movimiento.

3.4.1.10 Retenida del cargador

- **Descripción de las piezas**

La retenida del cargador es el elemento encargado de mantener el cargador en el arma hasta que, al pulsar la retenida, este se libere. Las dimensiones y geometría de los elementos externos de la retenida (los botones) son iguales a los del arma real, para permitir un adiestramiento de calidad del tirador. Al igual que la retenida real, es de uso ambidiestro y su funcionamiento, aunque no idéntico, es muy similar.

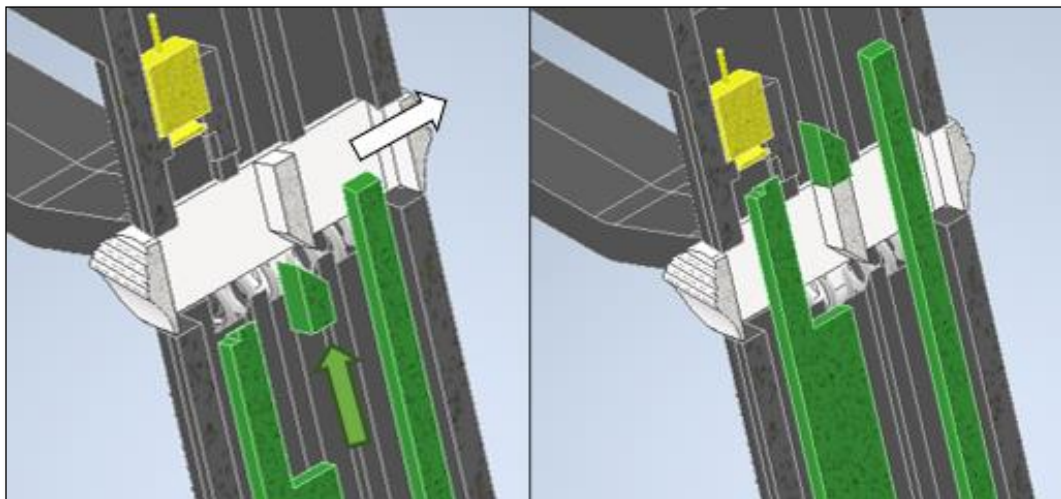


Figura 3-32 - Funcionamiento del cargador (verde) y de su retenida (blanco)

Se compone de tres piezas (botones izquierdo y derecho y pieza central) que se ensamblan entre sí para comportarse como un sólo elemento. La razón para dividir la retenida en tres partes es facilitar el montaje.

Los botones tienen el mismo diseño, pero invertido, en el que se ha procurado que sean idéntico a que los del arma real. Se insertan en la pieza central mediante una ranura que cuenta con una cara plana de manera que se comporten solidariamente.

La pieza central es un semicírculo extruido al que se le ha hecho un agujero no pasante con forma de semicírculo en el que se insertan las dos piezas laterales. En la parte inferior, y centrado, se ha extruido un semicírculo que es el encargado de presionar dos muelles de diámetro 5,5mm y longitud 7mm, uno a cada lado. Estos muelles se encuentran alojados en el cuerpo de pistolete y son los encargados de situar la retenida del cargador en el punto medio.

En la cara plana hay un saliente que, al estar la retenida centrada por efecto de los muelles, choca con el saliente homólogo del cargador e impide que este se libere. Al presionar cualquiera de los lados de la retenida, el saliente central de la retenida se desplaza, dejando salir al cargador. Cuando se introduce el cargador, debido a las caras oblicuas de los dos salientes, desplaza la retenida permitiendo que el cargador se introduzca del todo. En cuanto el saliente del cargador rebasa su contraparte de la retenida, este último vuelve a su posición inicial impidiendo que salga (Figura 3-32).

- **Alojamiento de en el pistolete**

Esta pieza está alojada en la parte superior frontal del mango del cuerpo del pistolete. Consiste en un agujero pasante de sección semicircular ligeramente más grande que la de la pieza central de la retenida del cargador (juego de 0,2mm). Justo debajo se ha eliminado material para permitir el alojamiento de los dos muelles de 5,5x7mm de la retenida, uno a cada lado. Estos muelles se han fijado a su lado mediante adhesivos para impedir que se muevan de su posición si la réplica se sacude bruscamente.

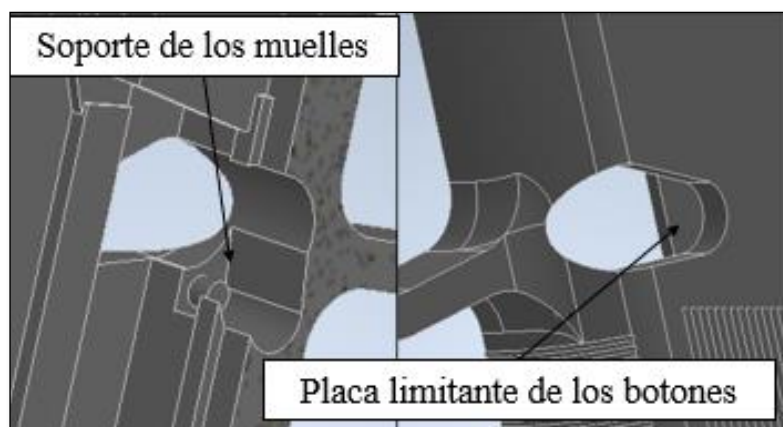


Figura 3-33 - Elementos del alojamiento de la retenida del cargador

Además, en la parte trasera del agujero correspondiente a los botones se ha mantenido una placa de material de 1mm de grosor que es la encargada de limitar el movimiento de los botones hacia dentro de la réplica (Figura 3-33).

3.4.1.11 Soporte Vive Tracker 3

El *Vive Tracker 3*, como explicamos previamente, es el sensor encargado de situar la réplica espacialmente en el simulador y de registrar sus movimientos. Además, nos permite transmitir las señales de los *Microswitch 12* al simulador. Por otro lado, el *Tracker*, al ser un elemento pesado (en relación con el resto de elementos de la pistola) influirá en la posición del centro de gravedad de esta. Debido a ello la posición, así como la conexión del *Tracker* a los sensores *Microswitch 12*, es de gran importancia en el desarrollo del proyecto. Ambas cuestiones se solucionarán mediante un adecuado soporte para el *tracker*.

- **Posicionamiento del *Vive Tracker 3***

Uno de los primeros problemas que nos planteamos fue cuál era la posición adecuada del *tracker*. Debemos tener en cuenta que, al funcionar el simulador con un sensor óptico (apartado 2.4.3) la orientación del *tracker* puede impedir que sea correctamente detectado. De esta manera, dicha

orientación es crucial. Además, como hemos mencionado, su posición puede afectar al centro de gravedad y equilibrio de la réplica. Finalmente, la posición del *tracker* debe permitir un manejo del arma cómodo y realista al tirador, sin impedir los movimientos que haría con el arma real.

De esta manera, se contemplaban tres opciones (Figura 3-34):

- A) **Encima de la réplica:** la principal ventaja de esta opción es que maximiza la capacidad del *Tracker* de ser detectado por el simulador. De hecho, es la posición más empleada en este tipo de aplicaciones [22]. Además, es la que permite situar el *tracker* lo más cercano posible al centro de gravedad del arma real, favoreciendo que el equilibrio de la réplica sea el mismo que el de la FN-P9-17.

Sin embargo, dicha posición impide que el tirador manipule la réplica de manera natural, ya que obstaculizaría el agarre de la corredera para montar el arma. Esto acabaría por completo con la capacidad de dar un entrenamiento realista al usuario, por lo que el sensor no puede montarse en esta posición.

- B) **Debajo de la réplica:** la principal ventaja de esta posición es que el *tracker* estaría posicionado en el mismo lugar en el que se suelen colocar accesorios (como linternas, láseres, etc.) en las armas reales, aprovechándose el rail frontal del pistolete de manera adecuada. De esta manera, tanto el montaje como el empleo del arma serían muy familiares para un usuario acostumbrado a estos accesorios. Además, el *tracker* está relativamente cerca del centro de gravedad, lo que favorece un equilibrio adecuado.

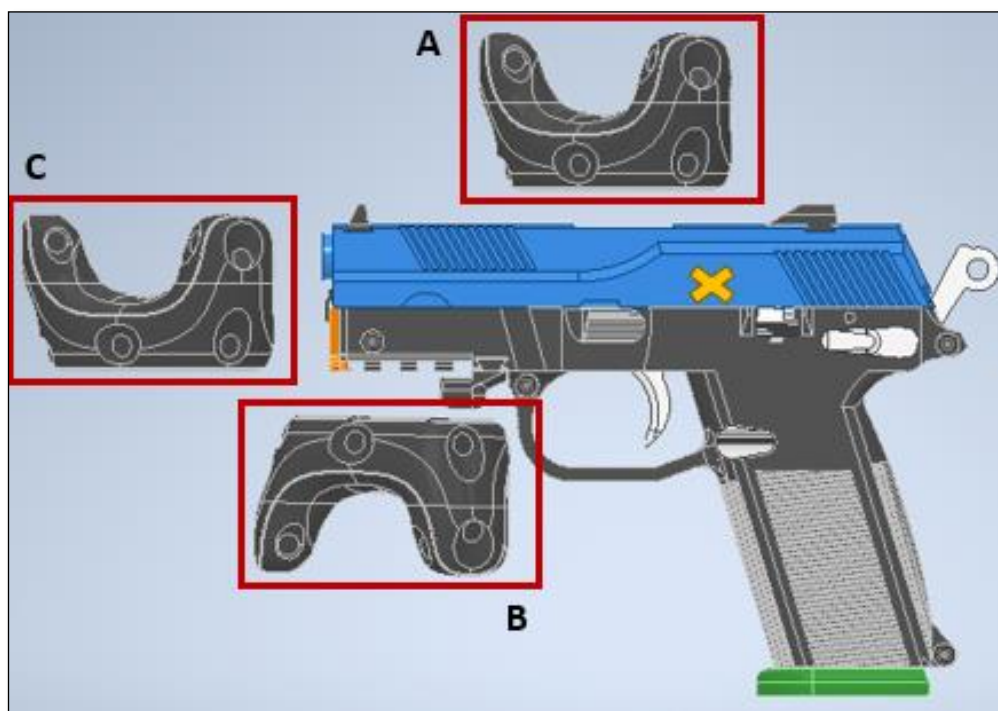


Figura 3-34 - Alternativas del posicionamiento del tracker y CDG estimado del arma real

Sin embargo, al estar el *tracker* invertido (mirando hacia abajo), con el arma encima y el tirador tapando la parte trasera, era muy sencillo que se apantallara el sensor y que este no fuese detectado por el simulador. Pruebas realizadas durante el desarrollo del proyecto demostraron que, en efecto, se producía dicho apantallamiento. De esta manera, al impedir que la réplica conectara con el simulador, esta posición fue descartada.

- C) **Delante de la réplica:** la última posición buscaba que el sensor fuese detectable por el simulador (lo cual se logra al estar boca arriba y alejada del tirador) y que permitiese la adecuada manipulación del arma (lo cual se consigue al no interferir con el montaje del arma

ni de ninguno de sus mecanismos). De esta manera, y al permitir el empleo adecuado de la réplica en el simulador, ha sido la posición escogida para el *tracker*.

La desventaja de esta posición es que es la más alejada del centro de gravedad. De esta manera, desvía este hacia la parte frontal de la réplica. El soporte, que también estaría delante del CDG, aumentaría este efecto. No obstante, esta desventaja no es crítica como las de las otras opciones, pues permite el uso efectivo del simulador, aunque el equilibrio no sea el adecuado. Desarrollaremos más este efecto en el apartado 3.6.

- **Descripción de las piezas**

El soporte del *tracker* es un conjunto que se compone de tres piezas: el soporte macho del *tracker*, el soporte hembra del *tracker* y la tapa del soporte hembra del *tracker*. El motivo es que la conexión del soporte macho del *tracker* con el rail correspondiente del cuerpo del pistolete debe ser muy precisa. De esta manera, era probable tener que hacer varias modificaciones a dicha unión. Para evitar tener que imprimir varias veces una pieza tan voluminosa, se decidió separar el soporte en las dos piezas mencionadas.

Como veremos próximamente, dentro del soporte hembra del *tracker* pasa cableado y es necesario trabajar con él dentro de la pieza. Para hacer más accesibles esas operaciones desde el exterior se decidió separar la cara inferior de esta pieza y hacer con ella una tapa.

De esta manera, pasamos a desarrollar dichas piezas:

- **Soporte macho del *tracker*:** es la pieza encargada de portar los conectores macho a los cuales se conecta el *Vive Tracker 3*. Tiene forma de paralelepípedo rectangular el cual se ha vaciado para dejar paso a los cables.

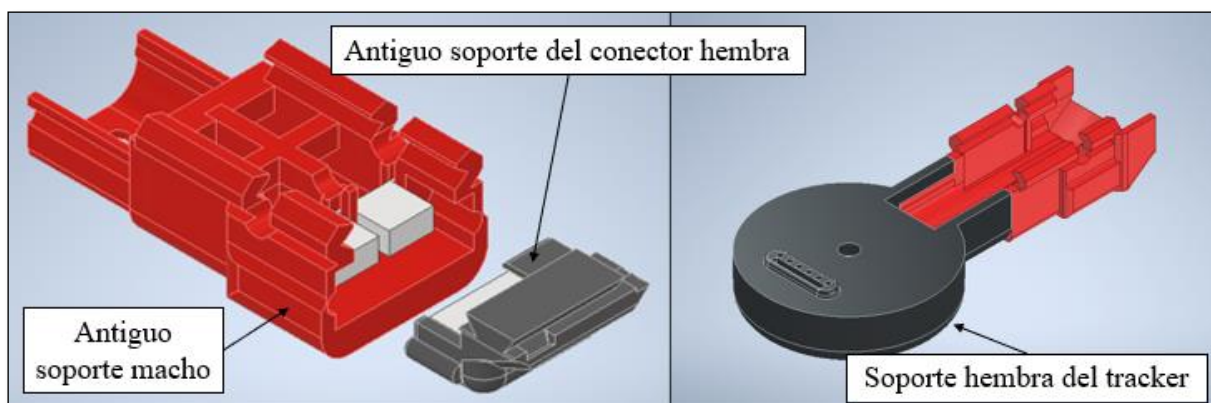


Figura 3-35 – Antiguo soporte del conector hembra y elementos del soporte macho del *tracker*

Dentro de esta pieza va un conector macho de seis pines. Estos irán conectados al cableado proveniente del *tracker*, a través del soporte hembra del *tracker*.

Además, esta pieza es la encargada de unir el conjunto del soporte del *tracker* al pistolete. Para ello tiene el rail de tipo *picattini* inverso al del cuerpo del pistolete. Se introduce por dicho rail y, mediante un tornillo y una tuerca de M5, se fija en dicho rail (Figura 3-12) El agujero dejado para el tornillo es también de 5mm, con el objetivo de que haya un ligero apriete en dicha unión y así el *tracker* no sufra vibraciones que puedan distorsionar la simulación.

Finalmente, para unir esta pieza al soporte hembra del *tracker* simplemente se ha extruido parte de la estructura de la pieza. Dicho elemento extruido es el que se inserta en el soporte hembra del *tracker*. Para asegurar que esta unión sea precisa, también se han añadido unos railes circulares a este elemento. A dicho saliente se le ha practicado un orificio para que un tornillo M3 asegure dicha unión.

Durante el desarrollo del proyecto se consideró emplear una pieza extra que fuese unida al pistolete y que albergara el conector hembra (Figura 3-35). Con ello se pretendía agilizar la conexión de los conectores.

No obstante, en esta pieza no había el espacio suficiente como para albergar todos los cables y soldarlos a los conectores, así que finalmente se eliminó y el conector hembra, soldado directamente a los cables que salen del pistolete, no tendrá un soporte específico.

- **Soporte hembra del *tracker* y tapa**

El soporte hembra del *tracker* es la pieza encargada albergar de manera directa el *tracker*. Para su diseño se ha extruido el perfil del soporte macho del *tracker*, vaciándose su parte posterior de manera que encaje con el elemento extruido soporte macho. Se ha cuidado que por su interior quepan los conectores que emplearemos posteriormente.

En la parte frontal se ha extrusionado un círculo de diámetro similar al de la base del *tracker*. En su punto medio (coincidiendo con la rosca del *tracker*), se ha hecho un agujero de por el que pasará un tornillo M6, fijando el *tracker* al soporte.

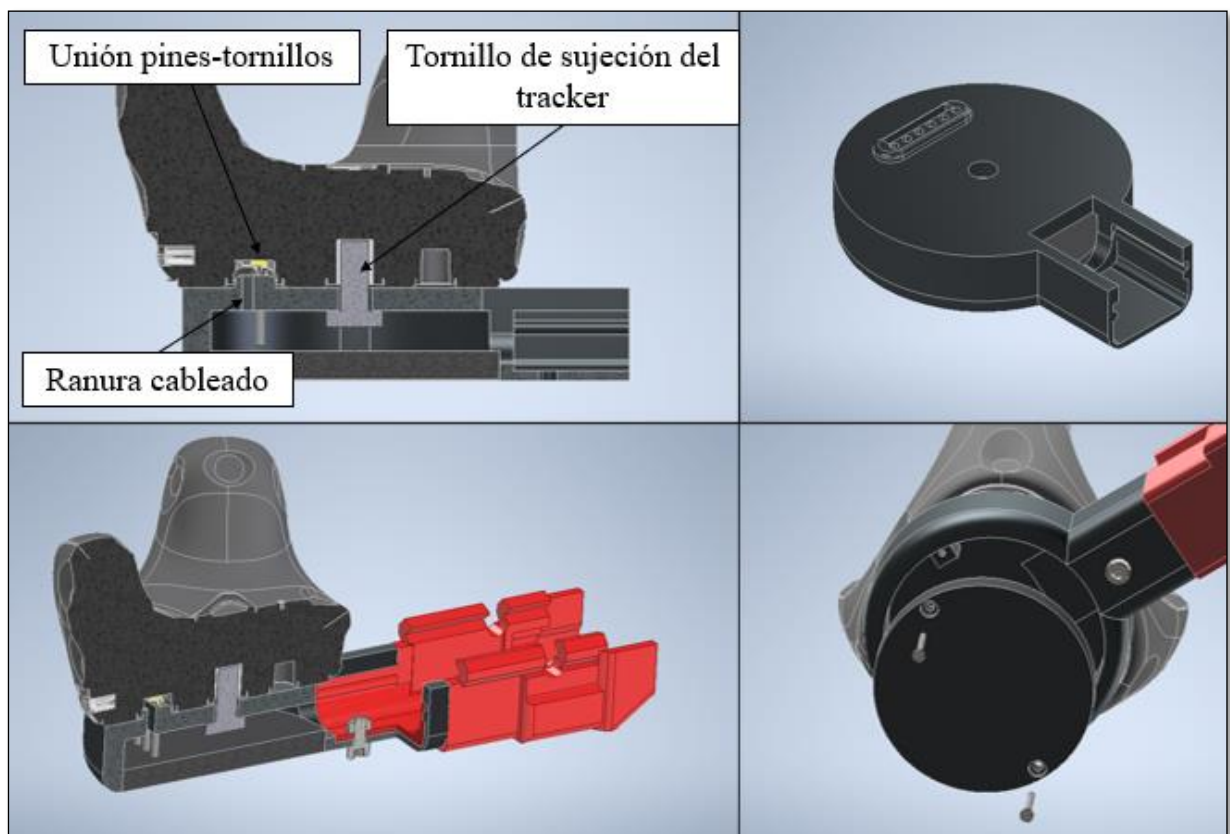


Figura 3-36 - Elementos del soporte hembra del *tracker* y su tapa

Delante de ese círculo se ha realizado una extrusión hacia arriba sobre la cual se han hecho seis taladros pasantes de diámetro 1,5mm separados 3,5mm entre sí (Figura 3-36). Esta extrusión coincide en posición y forma con la apertura que tiene el *tracker* para los pines. Por estos taladros se han introducido tornillos M2, que serán los encargados de hacer contacto con los pines del *tracker*, tal y como se explicará en el apartado 3.7. Para asegurar la conexión eléctrica, se limpiará cualquier tipo de esmalte de los tornillos.

El interior del cilindro se ha vaciado para permitir el paso de los cables y para reducir el peso del soporte, ya que este está muy alejado del centro de gravedad deseado. Finalmente, para poder introducir los cables por dentro del soporte y por su ranura, y para roscar el *tracker*

con el tornillo correspondiente, se ha abierto una tapa en la parte inferior de este soporte. Esta tapa irá atornillada en el soporte mediante tornillos M2x12mm.

3.4.2 Elementos electrónicos

Los elementos electrónicos empleados en la réplica son cinco sensores *Microswitch 12*, dos conectores de seis pines (macho y hembra) y el cableado necesario.

- ***Microswitch 12***

Estos sensores detectan cuando algún elemento presiona la plancha metálica que tienen en su cara superior. Del *Microswitch* salen tres pines. Uno de ellos es la conexión a tierra (marcado con la “C” de “Closed”), Otro transmite corriente siempre que no se pulse la plancha (marcado con “NC” de “Normally Closed”). El último transmite señal cuando sí se pulsa la plancha (“NO” de “Normally Open”). De esta manera, el pulsar la plancha esta pulsa un botón que abre el circuito NC y cierra el circuito NO.

Hemos conectados cables al pin de C de todos los sensores, y dichos cables los hemos unido a un sólo cable de tierra. Todos los *Microswitch 12* llevarán otro cable conectado al NO, de manera que:

- Sensor del seguro: transmitirá mientras el seguro esté desactivado (se pueda abrir fuego).
- Sensor del cargador: transmitirá mientras el cargador esté introducido.
- Sensor de la cola del disparador: transmitirá mientras esté pulsada.
- Sensor de la corredera: transmitirá cuando se eche hacia atrás la corredera.
- Sensor de la retenida de la corredera: transmitirá cuando se pulse el botón.

De esta manera, para abrir fuego será necesario que los cables provenientes de los NO de los tres primeros sensores estén transmitiendo. Cuando se monte el arma inicialmente se deberá activar el NO del sensor de la corredera y, tras recargar, deberán transmitir los NO del sensor de la corredera o de la retenida de la corredera. No hemos conectado ningún cable a los pines de NC, ya que con la configuración previamente indicada el funcionamiento de arma es el deseado.

- **Cableado y conectores**

De esta manera, por el pasante de los cables creado en el cuerpo del pistolete pasan seis cables (cinco de los NO y uno de tierra) que conectarán con los pines del conector hembra. Se acoplará al conector macho que hay en el soporte macho del *tracker* y, mediante cableado, irá conectado a los seis tornillos M2 del soporte hembra del *tracker*, haciendo estos contacto con los *pogo pin* del *tracker*.

Todas las uniones entre cables (para pasar de cinco cables de tierra a uno sólo) o de cables a pin se hicieron mediante soldadura, para asegurar la integridad de dichas conexiones durante el empleo de la réplica. También se aplicó adhesivo entre los cables y entre estos y la réplica en los puntos que se consideró necesario para obtener un producto más ordenado y evitar movimientos internos durante el empleo de la pistola.

- ***Vive Tracker 3***

El *Vive Tracker 3* transmitirá la posición, orientación y movimientos de la réplica al simulador. Además, transmitirá las señales de los cinco sensores anteriormente mencionados. Para ello cuenta con seis *pogo pin* en su base por los cuales les llegará corriente en los casos mencionados transmitiendo al simulador la información binaria encendido/apagado de cada pin. Posteriormente, en el software de simulación se podrá configura para que dichas conexiones tengan los efectos deseados.

En la imagen y en la tabla que hay a continuación se pueden ver los pines en los que se van a conectar los cables provenientes de cada sensor y el cable de tierra. Así mismo, a cada cable se le ha asignado un color de manera que en todas las conexiones, el cable que originalmente parte de un mismo sensor *Microswitch 12* mantenga el mismo color y se eviten confusiones en el montaje.



Figura 3-37 - Numeración de los pines de los elementos electrónicos⁵

Conexión	Elemento	Color
1	Retenida de la corredera	Negro
2	Tierra	Rojo
3	Corredera	Gris
4	Cargador	Blanco
5	Cola del disparador	Amarillo
6	Seguro	Verde

Tabla 1 - Relación de conexiones eléctricas

3.5 Fabricación

Las piezas de la réplica (a excepción del *Vive Tracker 3*, los Microswitch 12, el cableado, los tornillos, los muelles y la guía del muelle recuperador) han sido fabricadas por impresión 3D. Para ello se han empleado los servicios de impresión del CUD.

Como veremos a continuación, las piezas han sido impresas en tanto mediante FDM como SLA. Para el FDM se han empleado los archivos STL exportados directamente de Inventor, los cuales se han laminado mediante el software *Ultimaker Cura* para luego ser usados en una impresora *Creality Ender-5*. El material empleado ha sido PLA de color negro.

Para el SLA se ha empleado la impresora *Elegoo Saturn* del laboratorio de materiales del CUD (Figura 3-38). Los archivos STL para la impresión han sido obtenidos directamente de *Inventor* y

⁵El *Vive Tracker 3* está visto desde abajo, y los conectores desde arriba.

posteriormente procesados mediante el software *Chitubox*. El material empleado ha sido *ABS-Like Resin Pro* de la marca Anycubic [28].

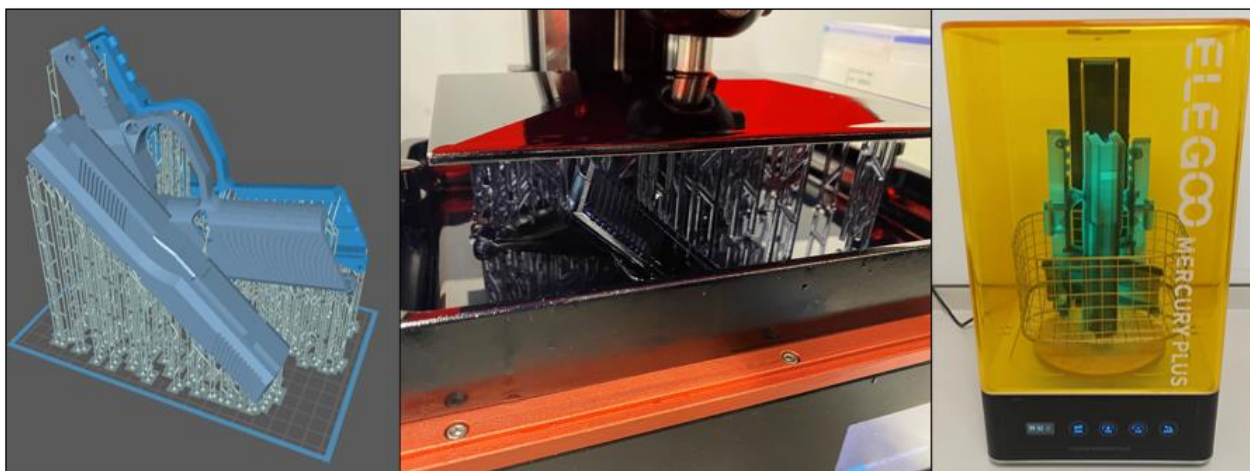


Figura 3-38 – Impresión y curación de piezas mediante SLA

Originalmente se pretendía fabricar la totalidad de las piezas mediante FDM, pero a medida que imprimimos prototipos observamos que la resolución que dicha técnica proporciona no era suficiente para algunos detalles de las piezas, como se puede ver en la Figura 3-39. Concretamente, muchas de las uniones entre piezas (como las colas de milano, ejes, etc.) no eran funcionales con dicha precisión.

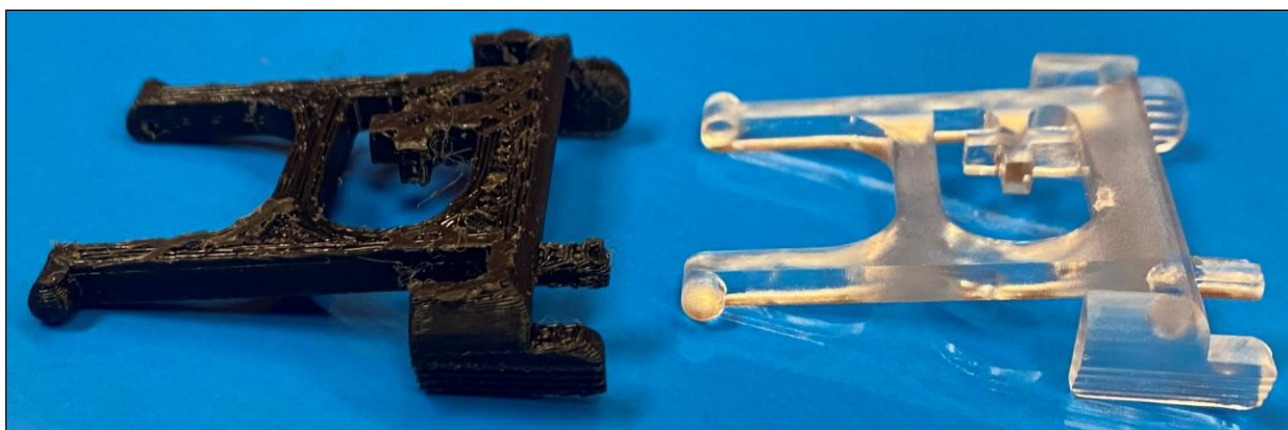


Figura 3-39 - Comparación de la retenida de la corredera impresa mediante FDM y SLA

Debido a ello se decidió emplear SLA para el fabricado del modelo. Gracias a ello decidimos imprimir la corredera y ambas partes del cuerpo del pistolete una resina translúcida que, aplicándole laca, se vuelve transparente. Con ello logramos que los mecanismos interiores fueran observables desde el exterior.

No obstante, tras la impresión de prototipos mediante SLA, pudimos observar que las piezas de resina tenían una rigidez notablemente inferior a las obtenidas mediante FDM (al ser la resina de la que disponíamos especialmente flexible). Esto es importante en piezas de accionamiento ambidiestro como el seguro o la retenida de la corredera. Estas, al poder accionarse desde un lado y tener que actuar en el contrario, en caso de imprimirse con resina, podían torsionar o flexar y, de esta manera, no lograr el efecto deseado.

Como ejemplo, en la imagen posterior podemos ver cómo, al pulsar la retenida de la corredera en el lado derecho, la pieza de FDM consigue pulsar el sensor mientras que la pieza de SLA, aunque se posa sobre el sensor, al flexar, no logra pulsarlo.

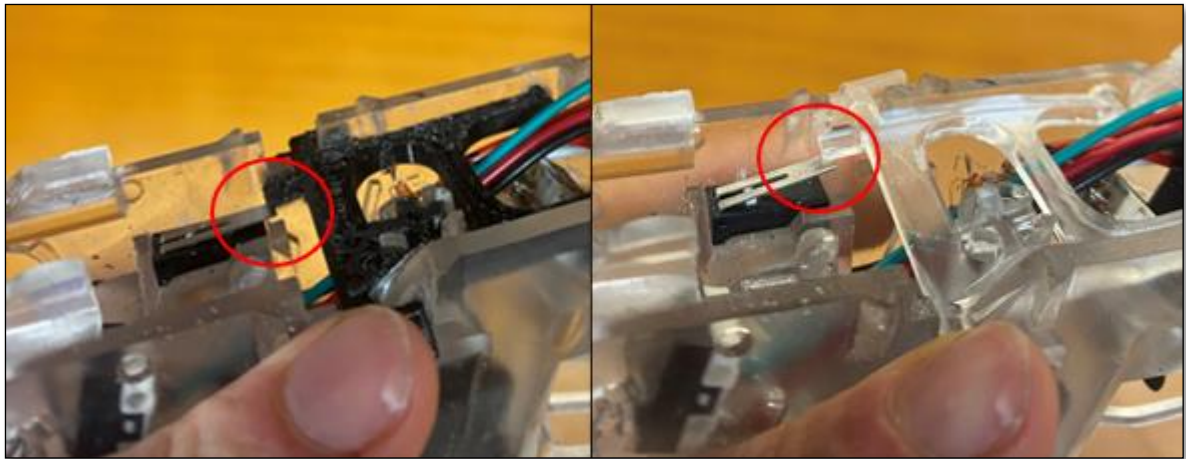


Figura 3-40 – Comparación del desempeño de piezas de SLA frente a FDM

Debido a ello, el material empleado para cada pieza ha sido el siguiente:

- PLA (FDM)
 - Mira delantera
 - Mira trasera
 - Cola del disparador
 - Martillo
 - Pieza central de la retenida del cargador
 - Botón derecho de la retenida del cargador
 - Botón izquierdo de la retenida del cargador
 - Seleccionador seguro derecho
 - Seleccionador seguro izquierdo
 - Placa delantera del cuerpo del pistolete
 - Platillo del muelle recuperador
 - Retenida de la corredera
 - Cargador
 - Soporte hembra del *tracker*
 - Soporte macho del *tracker*
- *ABS-Like Resin Pro* (SLA)
 - Cuerpo del pistolete derecho
 - Cuerpo del pistolete izquierdo
 - Corredera

El criterio empleado es que las piezas pequeñas o que sufren una carga (por que las acciona el usuario o por acción de un muelle) han sido impresas mediante FDM, obteniendo así una mayor resistencia a la deformación. Sin embargo, las piezas de mayor tamaño o donde la precisión es primordial han sido impresas mediante SLA.

De esta manera, y como se puede ver en la lista anterior, solo las dos partes del cuerpo del pistolete y la corredera se harán mediante SLA. El resto de las piezas, de menor tamaño y exigencia dimensional se fabricarán mediante FDM.

Además, para la fabricación de la guía del muelle recuperador se ha comprado una varilla de acero de 6mm de diámetro. Esta se ha cortado para que tenga la longitud establecida y en uno de sus extremos se ha realizado el taladro pasante correspondiente.

Finalmente, y tras la impresión final de todas las piezas, se ha comprobado individualmente la precisión dimensional de estas y que las tolerancias eran las deseadas, siendo esta comprobación satisfactoria.

3.6 Lastrado de la réplica

Uno de los objetivos en el diseño de la réplica es que tenga el mismo equilibrio que la FN-P9-17. Para ello es necesario que el peso y la posición del centro de gravedad sean la misma en la réplica y en la pistola real. Como mencionamos previamente (apartado 3.3.2), debido a las limitaciones de material y espacio, se trata de una tarea desafiante.

Así mismo, anteriormente deducimos la posición del CDG y que este produce un momento hacia adelante en la mano del tirador (sección 3.2.8).

3.6.1 Elementos de lastrado

Los elementos que van a afectar al peso y equilibrio de la réplica van a ser:

- Piezas impresas en impresora 3D
- Guía del muelle recuperador (acero)
- Sensores *Microswitch 12* y conectores
- Cableado
- Muelles.
- Tornillos.
- *Vive Tracker 3*⁶
- Lastres

Como hemos visto durante el desarrollo del proyecto, la mayoría de los elementos de la pistola han sido impresos. Para ello hemos usado *ABS-Like Resin Pro* de la marca Anycubic, con una densidad de 1,15 g/cm³ y PLA, con una densidad de 1,24 g/cm³. Sin embargo, la gran parte de los elementos de la FN-P9-17 son metálicos. Esto causa que la réplica sea bastante más ligera que el arma real y, por lo tanto, que sea necesario usar pesos para paliar esta situación.

Para lastrar hemos empleado piezas de hierro de 12x19x3mm empleadas para el equilibrado de ruedas (Figura 3-43). Estas tienen un peso de 5g. La razón es que su pequeño tamaño permite introducirlas en espacios reducidos como la corredera o el cargador. Además, estos lastres cuentan con una capa de adhesivo en una de sus caras, facilitando su montaje en la réplica. No ha sido posible emplear lastres más pesados (de plomo, por ejemplo) ya que, por motivos de tardanza en el envío, no fue posible conseguirlos a tiempo.

Para asegurar que quedan bien adheridas, tras ponerlas en su sitio se aplicó una capa extra de *epoxi*. Estos adhesivos, así como los empleados en el cableado y en los sensores, no han sido tenidos en cuenta en el lastrado, por considerar su peso despreciable en comparación con el resto de elementos. Así mismo, los *Microswitch 12*, conectores y muelles también se han considerado despreciables al estar distribuidos por toda la réplica y tener un peso bajo. De esta manera, consideramos que no afectarán sensiblemente al centro de gravedad de la réplica.

3.6.2 Distribución de los lastres

Para diseñar el lastrado de la réplica, y antes de la impresión de las piezas, usamos *Inventor*, conociendo los materiales y sus características, para determinar el peso estimado de la réplica y la posición de su centro de gravedad. El peso estimado de la réplica (sin lastres) era de 451g.

Respecto al CDG de la pistola sin lastrar, y como se puede ver en la imagen posterior, se encuentra adelantado y bajo respecto al CDG de la pistola real. Esto se debe a que en la parte frontal del arma se agrupan el *Vive Tracker 3*, la guía del muelle recuperador y múltiples tornillos, además del soporte del *tracker*. Estos elementos tienen un alto componente metálico, al contrario que el resto de la réplica, por lo que su mayor densidad desplaza el CDG conforme a lo que observamos en la imagen.

⁶ Peso de 75g [37]

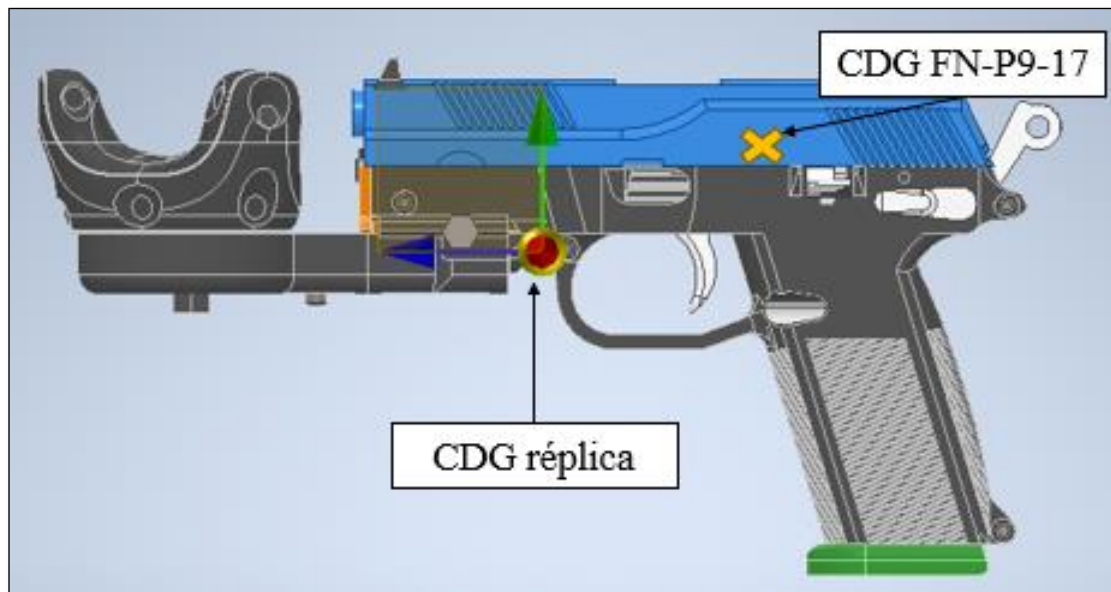


Figura 3-41 - CDG de la réplica sin lastrar

Para intentar remediar esta situación, y como hemos explicado previamente, situaremos los lastres mencionados en la corredera y en el cargador. Con ello pretendemos retrasar y elevar el CDG.

Para el lastrado de la corredera, y como se puede ver en la Figura 3-42, en la corredera se han establecido los lastres formando capas en el interior de esta. Como se puede observar, en la parte frontal y central de la corredera se han puesto tres capas de lastres, mientras que en la parte trasera de esta apenas se ha puesto una capa. Esto es para favorecer el tránsito del martillo por la parte interna de la corredera, que pasará deslizando sobre los lastres. En total se han puesto 16 lastres dentro de la corredera, incrementando el peso en 80g.

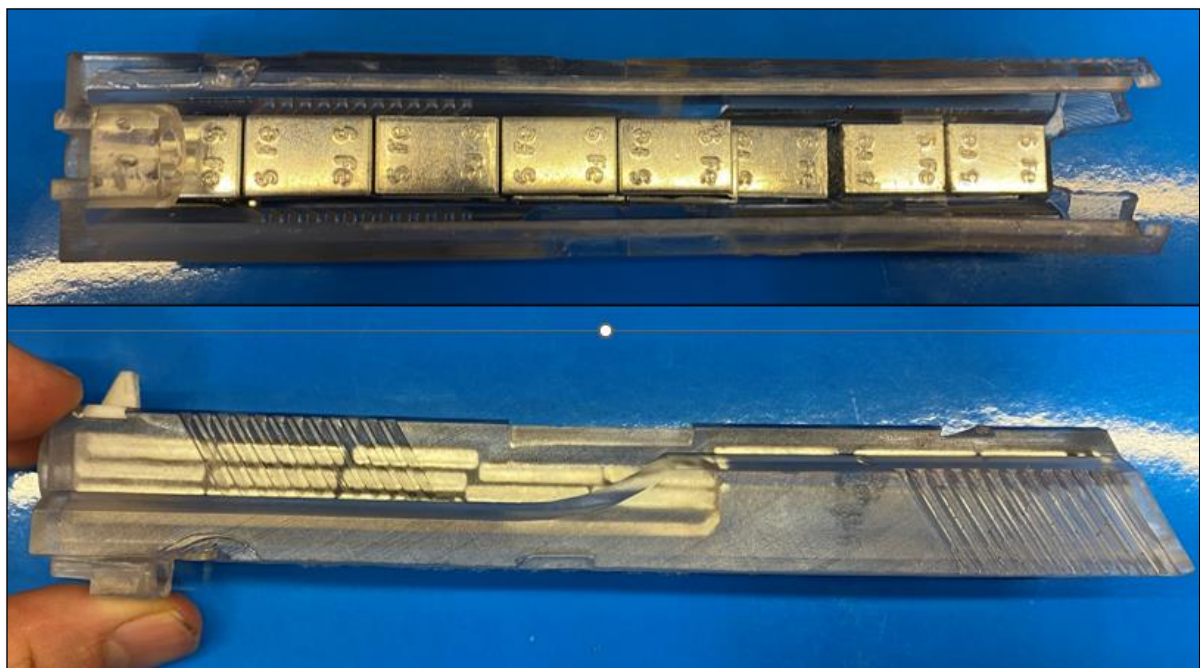


Figura 3-42 – Lastrado de la corredera

En cargador los lastres se distribuyeron en varias capas, las cuales seguían el patrón que se puede observar en la Figura 3-43. En total, en el cargador se introdujeron 30 lastres de 5g, lo que añadió 150g a la réplica.

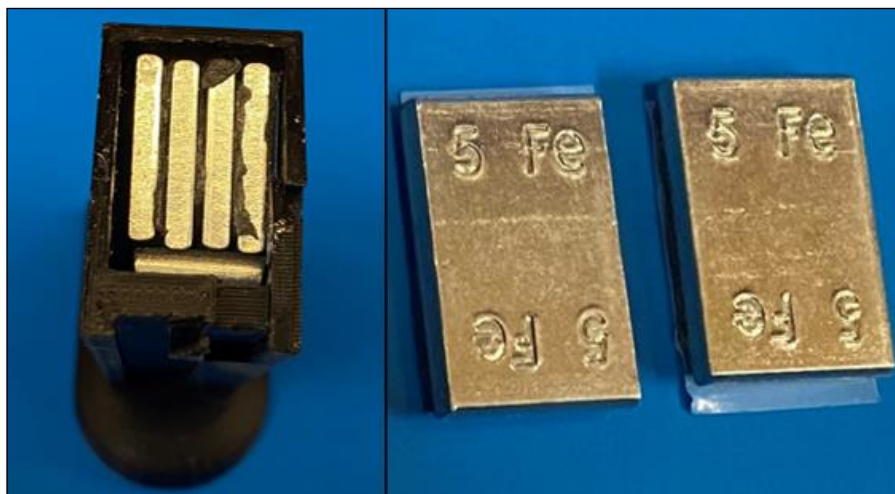


Figura 3-43 – Lastrado del cargador (izquierda) y lastres empleados

3.7 Montaje y construcción de la réplica

Comenzamos⁷ soldando los elementos cables a los *Microswitch*. Con el fin de evitar confusiones, se asignó un código de colores a los cables. Se añadió un punto de epoxi a los tramos pelados de los cables para evitar que se quebraran durante el montaje y la manipulación de la pistola. A continuación, se introdujeron los sensores en sus respectivos emplazamientos, pegándose a estos mediante epoxi (Figura 3-44).

También se pegaron uno de los extremos de cada muelle, para mantenerlos fijos durante el resto del montaje y así facilitar este. Se pusieron el martillo, la cola del disparador (enganchado a su muelle) y la pieza central y el botón derecho de la retenida del cargador en sus huecos correspondientes del lado derecho del pistolete (Figura 3-44).



Figura 3-44 - Montaje de los elementos eléctricos y de elementos del cuerpo derecho del pistolete

A continuación, se juntaron las dos partes del cuerpo del pistolete, atornillándose de la manera correspondiente. Una vez juntos ambos lados, se distribuyó el cableado de manera adecuada, uniéndose todos los cables de tierra en uno sólo, y sacándose los seis (el de tierra y el de cada uno de los cinco sensores) por el canal del lado izquierdo del cuerpo del pistolete. Tras esto se enganchó el muelle al martillo, se montó la retenida de la corredera y se colocaron ambas piezas del seguro (Figura

⁷ Para el montaje de la réplica se partió de la corredera y el cargador lastrados tal y como se ha visto en el apartado interior.

3-45). Comprobándose después todos los mecanismos internos de la réplica, y su correcto funcionamiento.

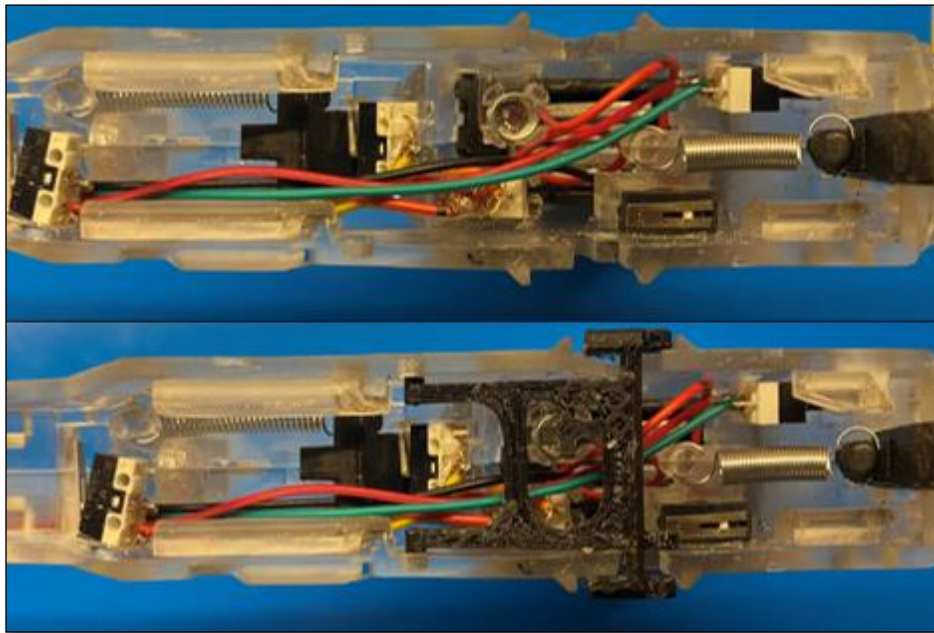


Figura 3-45 – Detalle de la disposición de los elementos internos del pistolete

Posteriormente, se procedió a montar los elementos del muelle recuperador y la corredera (Figura 3-46). Los pasos necesarios se ven en la Figura 3-47. Primero se puso la guía del muelle recuperador sobre su soporte del cuerpo del pistolete, introduciéndose sobre esta guía sendos muelles del muelle recuperador y su platillo (paso 1). A continuación, se pasó la corredera por los carriles guía del cuerpo de pistolete, pasándose la guía del muelle recuperador por el saliente de la corredera y echando la corredera lo más atrás posible (paso 2). Entonces se pasó la placa delantera del cuerpo del pistolete por sus colas de milano, introduciéndose el tornillo correspondiente y atornillando la placa delantera a la guía del muelle recuperador, momento en el que se liberó la corredera (paso 3).



Figura 3-46 - Elementos del montaje del muelle recuperador y la corredera

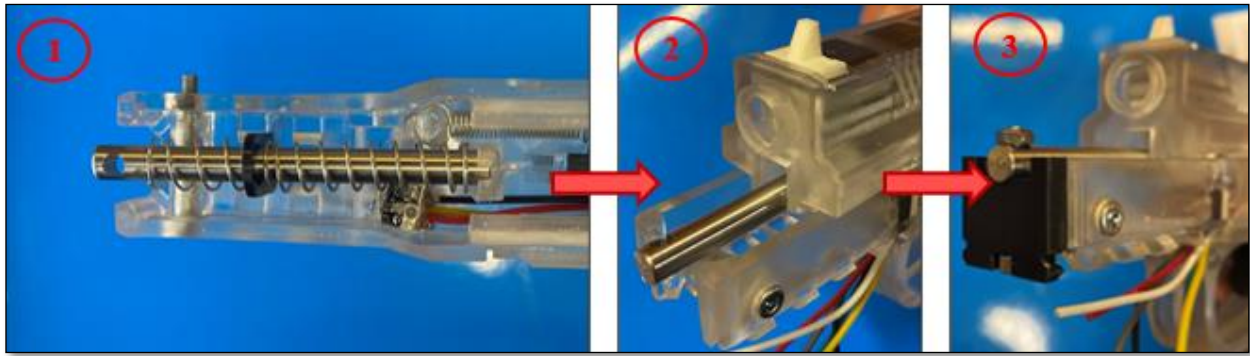


Figura 3-47 - Paso del montaje del muelle recuperador y la corredera

A continuación, se soldaron los cables provenientes de los *Microswitch 12* al conector hembra y se conectó este al macho. Tras esto se colocó el soporte macho del *tracker* en el pistolete, colocando el tornillo correspondiente y se engancharon los soportes hembra y macho del *tracker* (uniéndose mediante el tornillo correspondiente).

Luego se unieron los cables provenientes de los conectores machos a los tornillos que hacen contacto con los *pogo pin* del *tracker* (Figura 3-48). Durante el montaje se encontraron dificultades soldar los cables a los tornillos y para evitar cortocircuitos no deseados. Se solucionó colocando tornillos M2 de 8mm y 12mm de longitud de manera alterna, con la cabeza de los de 12mm dentro del soporte hembra y las cabezas de los de 8mm hacia arriba.

Los cables van apretados por la cabeza de los tornillos de 8mm y con una tuerca a los tornillos de 12mm. Se ha empleado una pieza separadora entre las cabezas de los tornillos de 8mm y el cuerpo de los tornillos de 12mm y fundas retráctiles en los de 12mm para evitar contactos no deseados.

Gracias a esta disposición se logra un contacto satisfactorio del montaje con los *pogo pin* evitando cualquier cortocircuito indeseado, así como un fácil montaje y desmontaje.

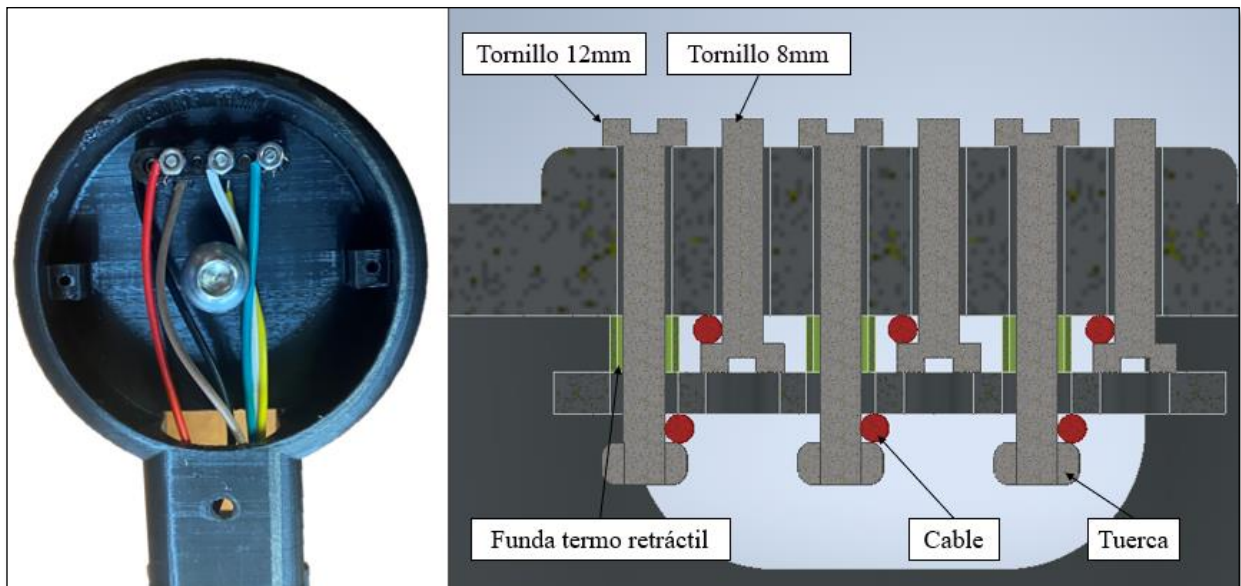


Figura 3-48 – Montaje de la conexión eléctrica con los *pogo pin*

Gracias a este montaje se ha evitado emplear adhesivos como epoxi para fijar estos elementos. Gracias a ello se posibilita un fácil desmontaje en caso de precisarse mantenimiento.

Finalmente, este se fijó a su soporte mediante el tornillo y se cerró la tapa del soporte hembra, finalizándose el montaje de la réplica.

3.8 Conexión al software de simulación

Finalmente, como último paso del desarrollo del proyecto se procedió a conectar la réplica al simulador y comprobar que este detectaba las acciones que nosotros ejercíamos. Para ello se debe instalar la plataforma que permite conectar con el *Vive Tracker 3*, para a continuación configurar su uso en *Steam V*. Para realizar este proceso se ha empleado como referencia la Guía del desarrollador *Vive Tracker 3*, disponible en el Anexo V: Guía del desarrollador del *Vive Tracker*.

La conexión del *Vive Tracker 3* al ordenador personal se realiza mediante el *Dongle* que incluye el tracker, que se conecta al ordenador mediante un puerto USB (Figura 3-49). El *Dongle* debe estar al menos a 45cm del ordenador y en un lugar en el que no vaya a moverse. En ese momento, y una vez arrancado el software de *Steam VR*, aparecerá en la ventanita de este el icono del *tracker* en azul y verde, indicando que se ha conectado al simulador satisfactoriamente.



Figura 3-49 – Diagrama de conexión del *Dongle* (izquierda) y ventana de *Steam VR*

En ese momento pulsaremos en el botón superior izquierda de la ventana de *Steam VR*, despliegan su menú y, manteniendo el ratón en la opción de “Dispositivos”, se desplegará un submenú en el que seleccionaremos “Ajustes de mando”. Tras esto se desplegará la pantalla que podemos ver en la Figura 3-50 en la que seleccionaremos la opción “Probar mando”.

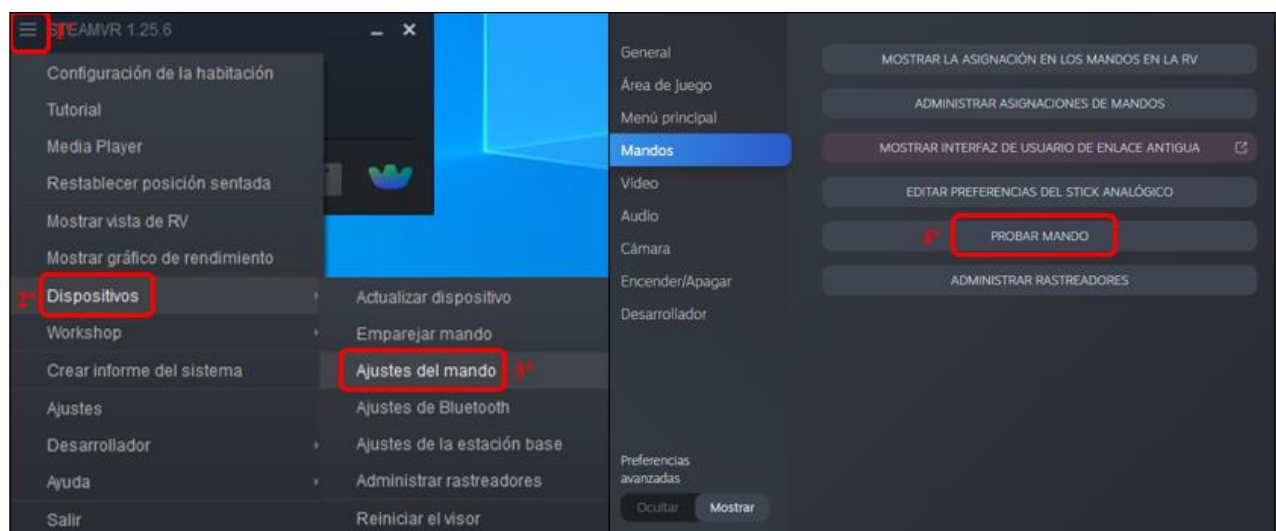


Figura 3-50 – Menús desplegables de *Steam VR* y menú de “ajustes de mando”

De esta manera, aparecerá el menú que vemos en la Figura 3-51. Es importante asegurarnos de que tenemos seleccionado el *VR Tracker 3* en la pestaña inferior izquierda. En el lado izquierdo de la pantalla vemos el nombre de los cinco *pogo pin* disponibles en el *tracker*. A pesar de que su nombre no se corresponda con los que nosotros les hemos dado, al activar uno de los mecanismos de la pistola,

el *Microswitch 12* correspondiente debería transmitir la señal al *tracker* iluminándose de azul la esfera de al lado del botón que corresponde.

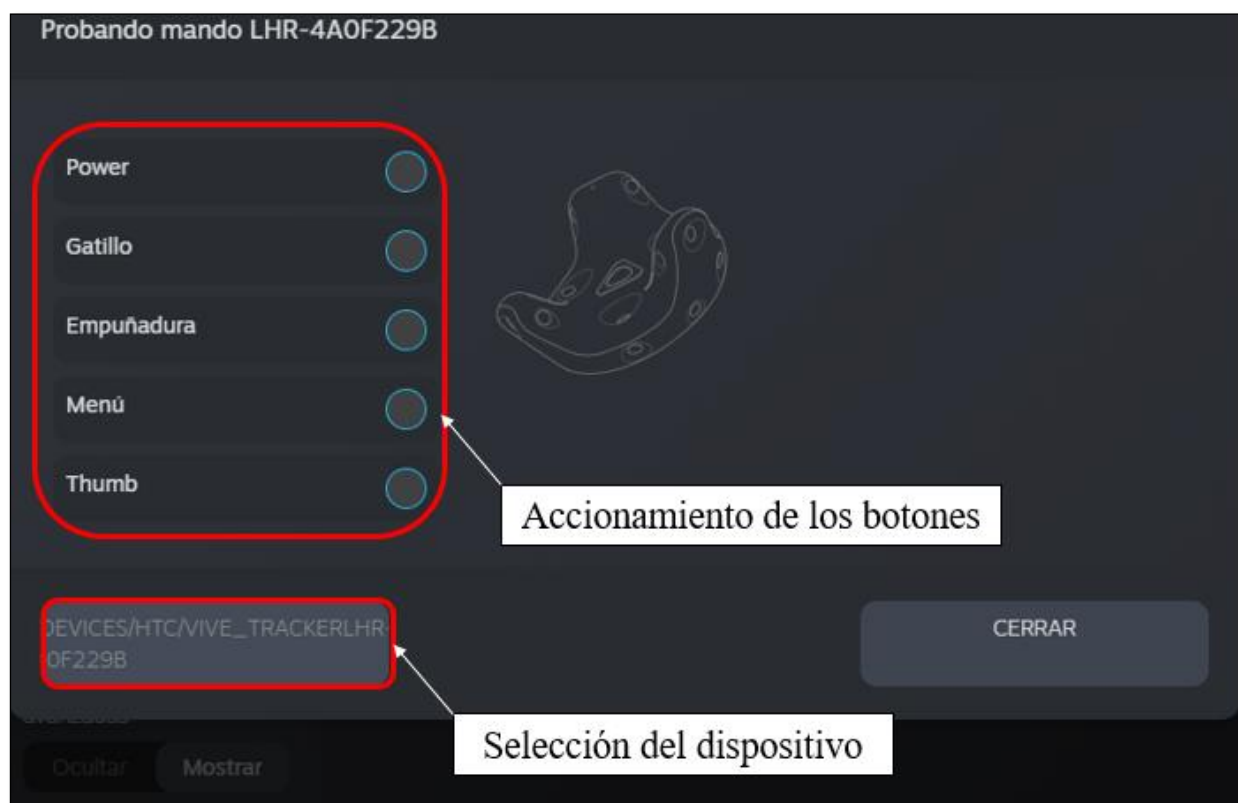


Figura 3-51 – Menú de “probar mando” de *Steam VR*

Como se explicará en el apartado 4.5, se ha logrado de manera satisfactoria conectar los sensores del arma al *tracker* y, de esta manera implementar la réplica en el simulador.

4 RESULTADOS

4.1 Descripción del apartado

En los anteriores apartados se ha descrito el proceso de diseño, fabricación y montaje de la réplica. En el presente se presentarán los productos obtenidos de dicho proceso, tanto físicos como digitales, para su empleo en el simulador.

4.2 Diseño y planimetría



Figura 4-1 – Renderizado de la réplica

El principal producto de este proyecto es la creación del modelo 3D de una réplica de la FN-P9-17 para su empleo en un simulador de realidad virtual. De esta manera, mediante el software CAD de *Inventor* de Autocad, hemos obtenido los modelos de la réplica de la pistola (Figura 4-1) y de los elementos necesarios para el soporte del *Vive Tracker 3*. Con estos modelos se pueden obtener la geometría y dimensiones precisas de la réplica.

Mediante *Inventor* pueden ser exportados a múltiples formatos que permiten obtener los planos de las distintas piezas de manera sencilla, así como su impresión 3D o su empleo de otros softwares.

El diseño ha buscado que una réplica fiel del arma real, de manera que sus geometrías y dimensiones sean casi idénticas y el tirador apenas pueda encontrar diferencias entre ambas tanto visualmente como durante su utilización. Esto se ha logrado a la vez que permite que la réplica sea desmontable para facilitar el mantenimiento o la reparación de esta.

Además, se han añadido mecanismos que permiten que la manipulación de la réplica sea muy similar a la del arma real. Concretamente, la réplica permite cargar y descargar el arma, montarla en el primer disparo (o al cambiar el cargador), emplear el seguro y abrir fuego con ella. Gracias a ello, los movimientos y manipulaciones que realice el usuario sobre la réplica serán un fiel reflejo de las que realizaría con el arma real. De esta manera, se logra un mayor nivel de inmersión y una mayor profundidad y realismo en el adiestramiento del tirador.

Finalmente, el diseño de la pieza permite el montaje de cinco sensores *Microswitch 12* y la conexión de estos al *Vive Tracker 3*, mediante los cuales la pistola podrá ser utilizada en simuladores de realidad virtual.



Figura 4-2 – Renderizado de sección transversal de la réplica

4.2.1 Planimetría

A continuación, se mostrarán los planos de la réplica y de sus piezas. Estos, realizados con el escalado pertinente, serán planos descriptivos de la réplica, sin llegar a ser constructivos. Esto se debe a que, al ser una réplica fiel de un arma real, buscamos mantener la confidencialidad acerca de sus dimensiones detalladas, motivo por el cual no se acotarán estos planos. No obstante, se dispone de los archivos de *Inventor* de sus elementos, posibilitando la reconstrucción fiel de todas las piezas, así como la creación de los planos constructivos en caso de ser necesario.

La planimetría del proyecto se organizará de general a particular. Para ello comenzaremos con una vista isométrica de la totalidad de la réplica ensamblada, tanto a color como en línea (planos 1 y 2). Tras esto vendrán planos de las vistas principales del ensamblaje de la réplica (tanto a color como en línea, planos 3 y 4 respectivamente) y un plano a color de las secciones de la pistola (plano 5).

A continuación, procederemos con el explosionado completo de la pistola y el explosionado de conjuntos de esta (planos 6 y 7), en los cuales se respetarán los movimientos de las piezas durante el

montaje/desmontaje de la réplica. En el explosionado de conjuntos los diferentes conjuntos de la réplica (conjunto del seguro, de la retenida del cargador, del soporte del *tracker* y de la corredera) no se explosionarán. Será esta la numeración de este último plano la utilizada como referencia en el resto de planos.

Posteriormente se desarrollarán los planos de los conjuntos. En estos se comenzará con el explosionado del subconjunto. Este tendrá en la esquina inferior izquierda un plano mosca del explosionado de conjuntos, en el que se identificará el elemento que se está tratando. A continuación, vendrá el ensamblaje de cada conjunto en el que se verá la posición relativa de las piezas cuando el conjunto está montado. Finalmente, se procederá con los planos de despiece de cada una de las piezas del conjunto. En estos últimos planos, así como en el ensamblaje de la pieza, se dispondrá de un plano mosca en la esquina inferior izquierda del explosionado del conjunto, en el que se identificará en el conjunto la pieza concreta que se está tratando.



Figura 4-3 – Perfil de la réplica con elementos transparentes

Por último, se vendrán los planos de despiece de las piezas que no pertenecen a un subconjunto. En estas, en la esquina inferior izquierda habrá un plano mosca del explosionado de conjuntos identificando la pieza desarrollada en dicho plano.

Tanto los planos de despiece como los explosionados y los ensambles de los conjuntos estarán representados a línea. En ellos estarán detalladas las vistas necesarias para permitir la comprensión de las particularidades de la pieza. Así mismo, se hará uso de detalles en aquellos elementos en los, por su tamaño reducido, con el escalado del plano no sea posible apreciarlos de manera adecuada.

Los tornillos, tuercas y muelles, al ser elementos normalizados (que se pueden ver en la Figura 4-3), no tendrán planos de despiece individuales. Así mismo, los sensores *Microswitch 12* y *Vive Tracker 3*, al ser elementos adquiridos de fabricantes externos y no haber sido diseñados para el proyecto, tampoco se desarrollarán.

Todos estos elementos sólo serán recogidos en los explosionados correspondientes. Además, los elementos eléctricos (cableado y conectores) no serán reflejados en los planos. Esto se debe a que la

posición precisa de dichos elementos dependerá de las particularidades del montaje de esa réplica en concreto, por los que no están definidas en los planos.

Finalmente, los lastres empleados en la réplica tampoco están reflejados en los planos. El motivo de esto es que, al igual que los elementos eléctricos, su posición exacta en la réplica depende del montaje. No obstante, su posición general será en la corredera y el cargador.

Esto, así como su ordenamiento dentro de estas piezas ha sido conforme al apartado 3.6.2. Además, al ser elementos comprados a un distribuidor externo no se realizarán planos de despiece de los lastres empleados en el presente proyecto.

Así pues, los planos adjuntados a continuación se organizan de la siguiente manera:

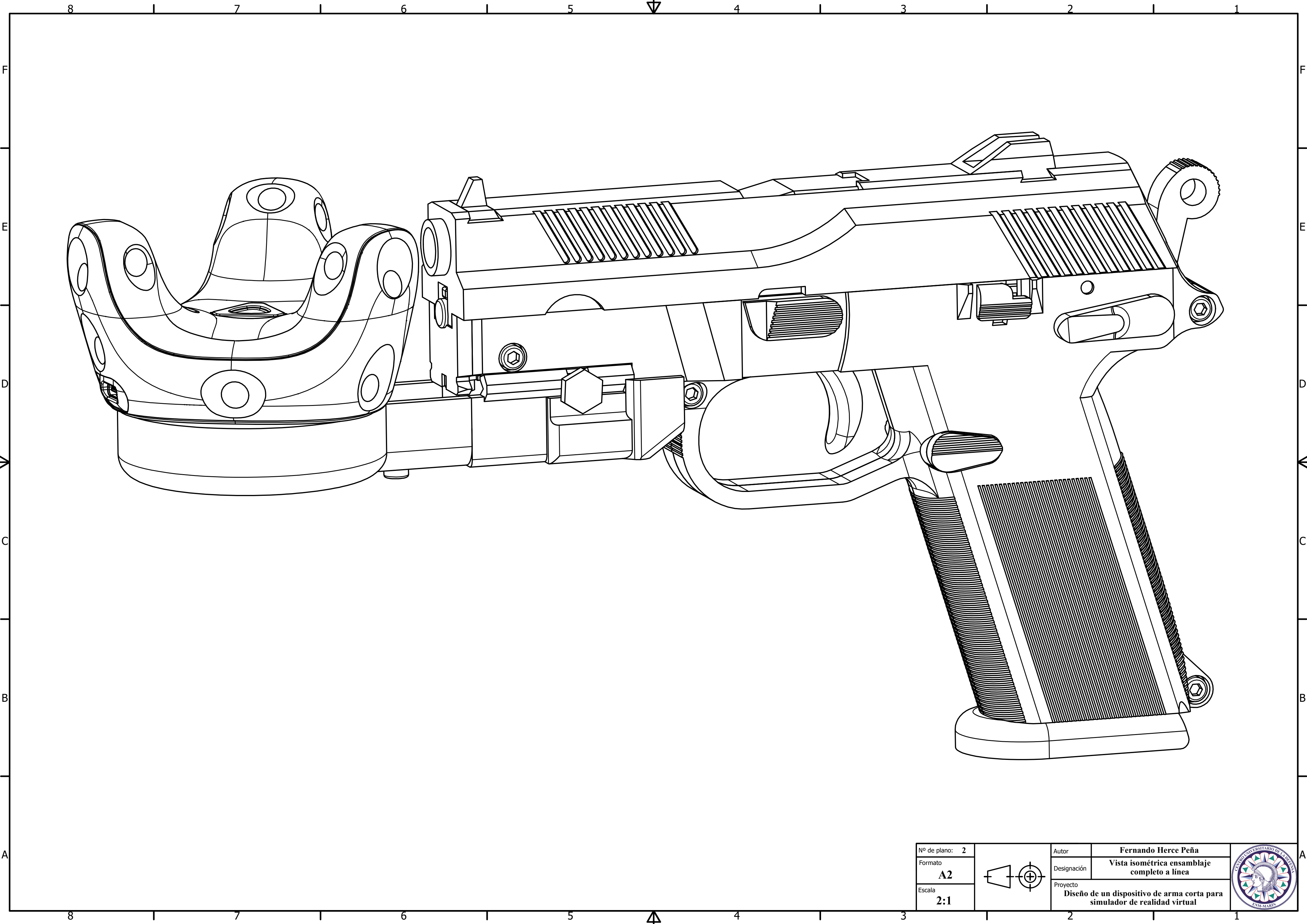
1. Vista isométrica ensamblaje completo a color.
2. Vista isométrica ensamblaje completo a línea.
3. Vistas principales ensamblaje completo a color.
4. Vistas principales ensamblaje completo a línea.
5. Sección del ensamblaje completo.
6. Explosionado completo.
7. Explosionado de conjuntos.
8. Explosionado del conjunto del soporte del *tracker*.
 - 8.1. Ensamblaje del conjunto del soporte del *tracker*.
 - 8.2. Despiece de la tapa del soporte hembra del *tracker*.
 - 8.3. Despiece del soporte hembra del *tracker*.
 - 8.4. Despiece del soporte macho del *tracker*.
 - 8.5. Despiece de la placa separadora.
9. Explosionado del conjunto de la corredera.
 - 9.1. Ensamblaje del conjunto de la corredera.
 - 9.2. Despiece de la corredera.
 - 9.3. Despiece de la mira delantera.
 - 9.4. Despiece de la mira trasera.
10. Explosionado del conjunto de la retenida del cargador.
 - 10.1. Ensamblaje del conjunto de la retenida del cargador.
 - 10.2. Despiece del botón derecho de la retenida del cargador.
 - 10.3. Despiece del botón izquierdo de la retenida del cargador.
 - 10.4. Despiece de la pieza central de la retenida del cargador.
11. Explosionado del conjunto del seguro.
 - 11.1. Ensamblaje del conjunto del seguro.
 - 11.2. Despiece de la pieza izquierda del seguro.
 - 11.3. Despiece de la pieza derecha del seguro.
12. Despiece del platillo del muelle recuperador.
13. Despiece de la guía del muelle recuperador.
14. Despiece del cargador.
15. Despiece de la retenida de la corredera.
16. Despiece de la cola del disparador.
17. Despiece de la placa delantera del cuerpo del pistolete.
18. Despiece del martillo.
19. Despiece del cuerpo del pistolete derecho.
20. Despiece del cuerpo del pistolete izquierdo.

En el Anexo III: Modelo digital interactivo se adjunta un modelo digital interactivo para mejor comprensión de la geometría y caracterización del trabajo realizado. Se adjuntan diferentes vistas: realista, transparente, ilustración, trama y corte.



Nº de plano: 1		Autor	Fernando Herce Peña
Formato A2		Designación	Vista isométrica ensamblaje completo a color
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual

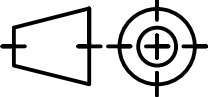




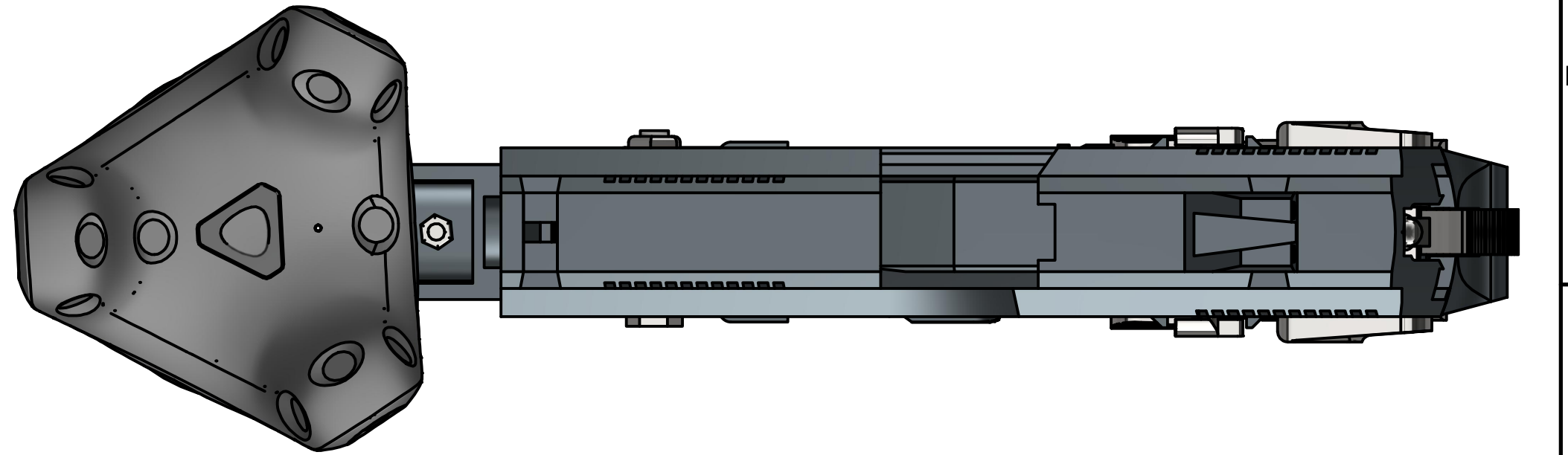
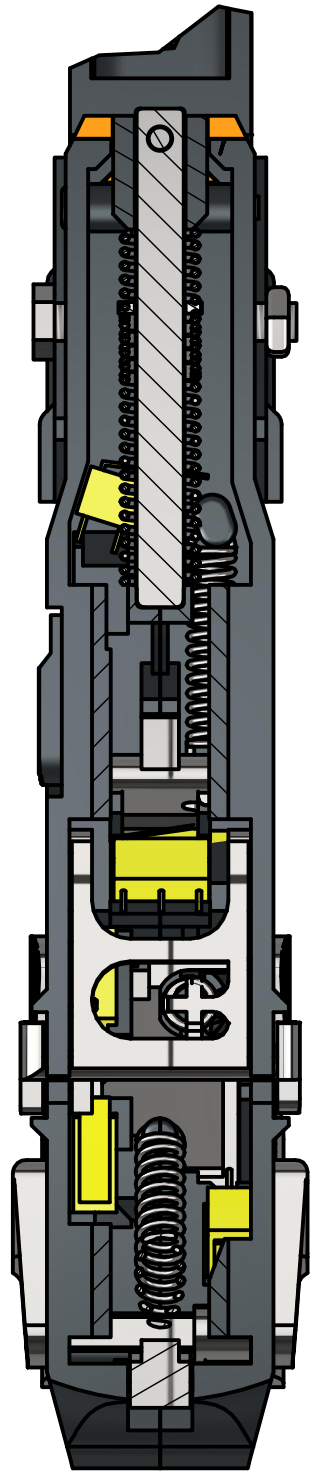
Nº de plano: 2		Autor	Fernando Herce Peña
Formato A2		Designación	Vista isométrica ensamble completo a línea
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual



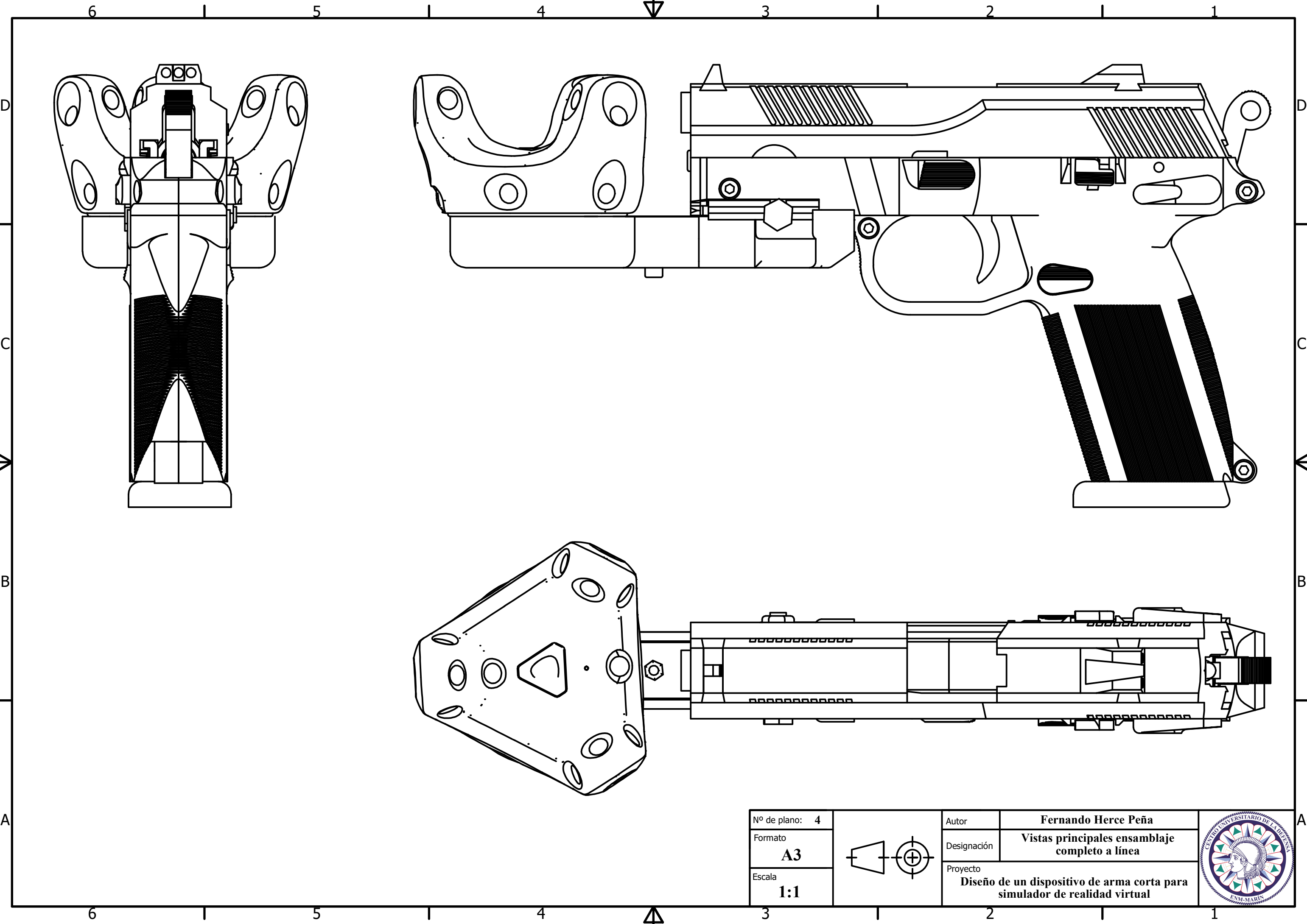


Nº de plano: 3		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Vistas principales ensamblaje completo a color	
Escala 1:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

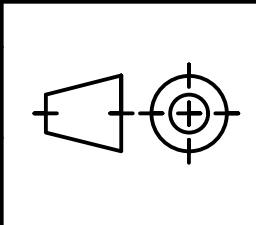
A-A (1 : 1)



Nº de plano: 3		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato		Designación	Ensamblaje completo a color	
Escala		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	
A3				
1:1				

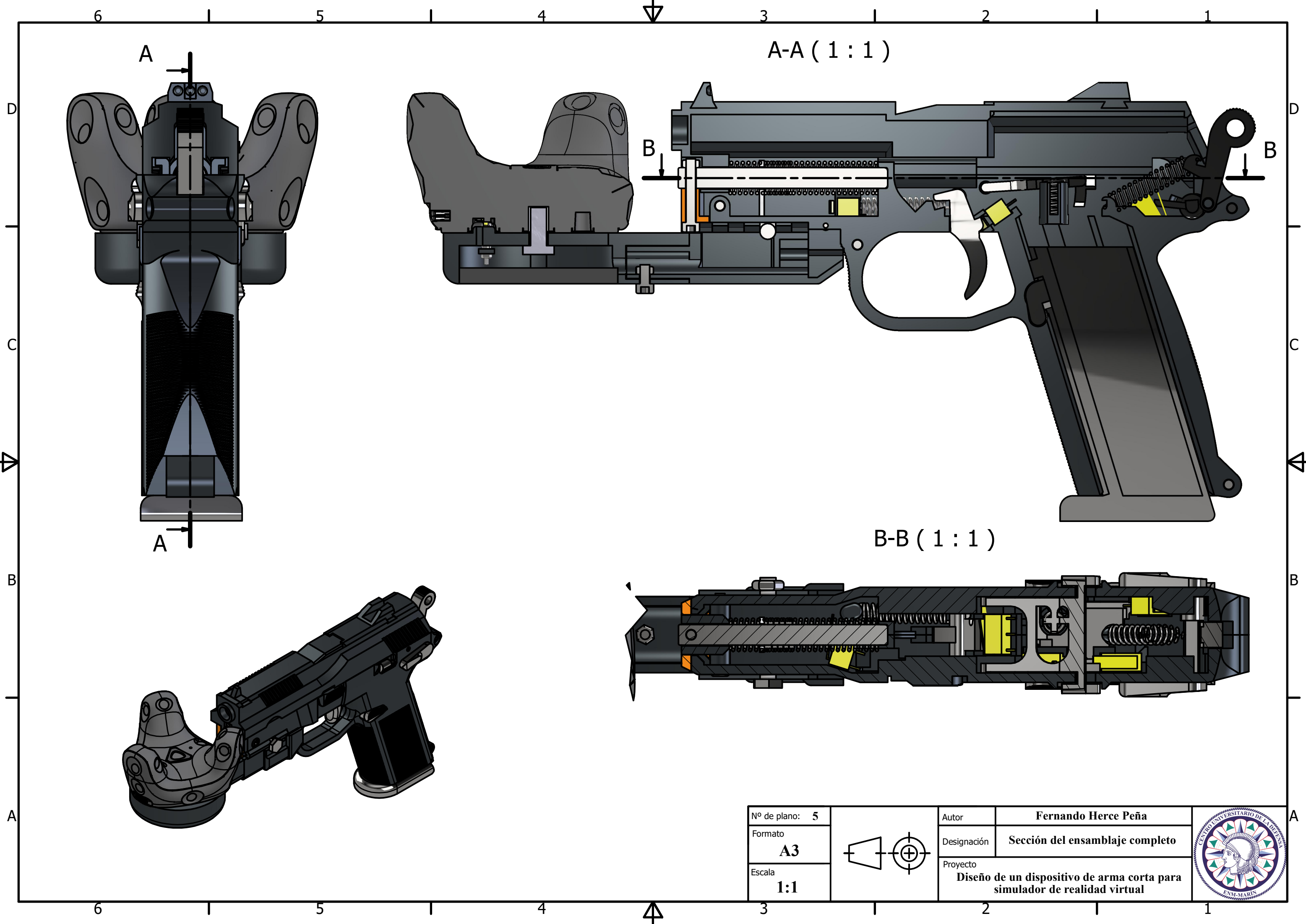


Nº de plano:	4
Formato	A3
Escala	1:1



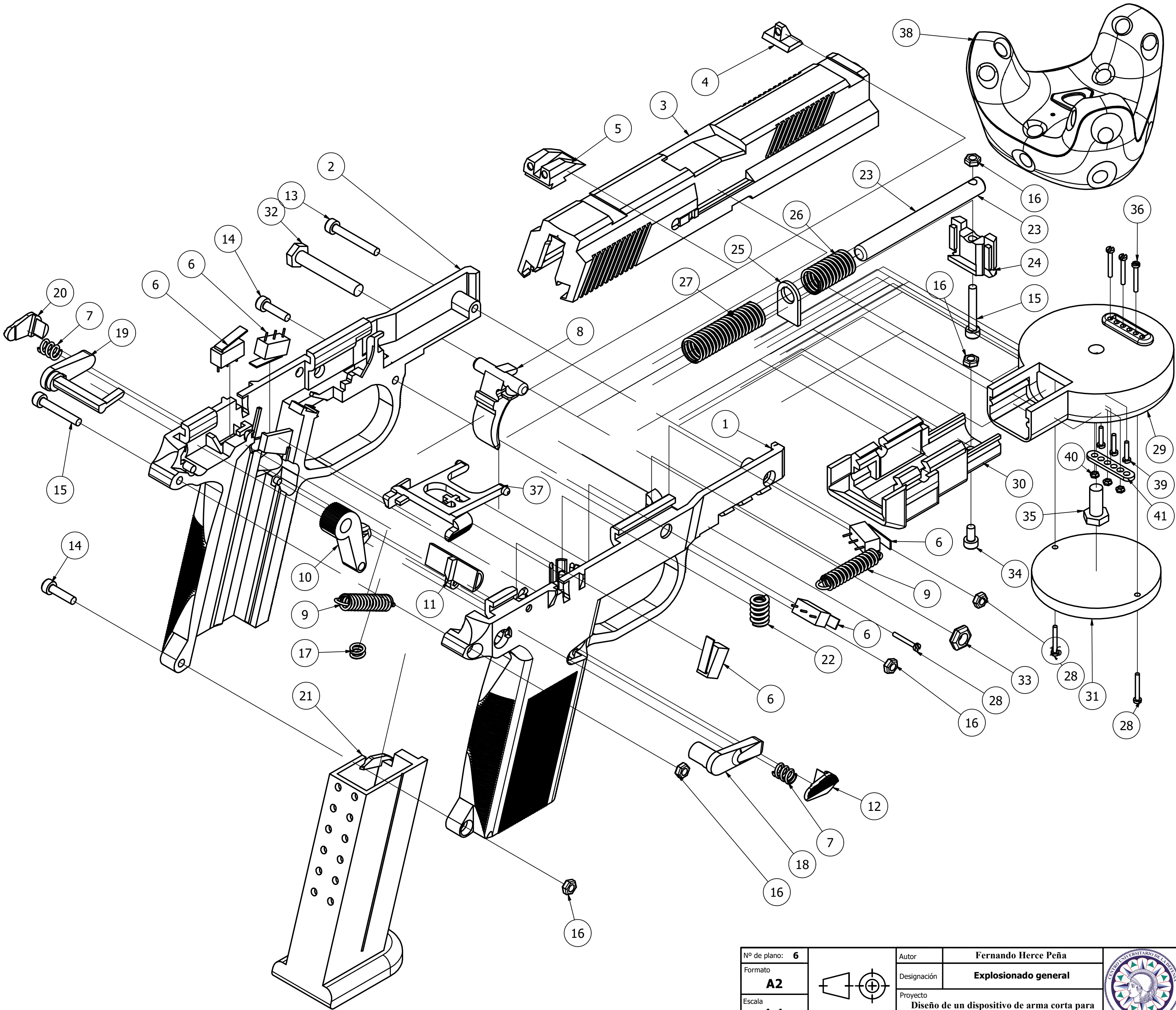
Autor	Fernando Herce Peña
Designación	Vistas principales ensamblaje completo a línea
Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual





Nº de plano: 5		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Sección del ensamblaje completo	
Escala 1:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

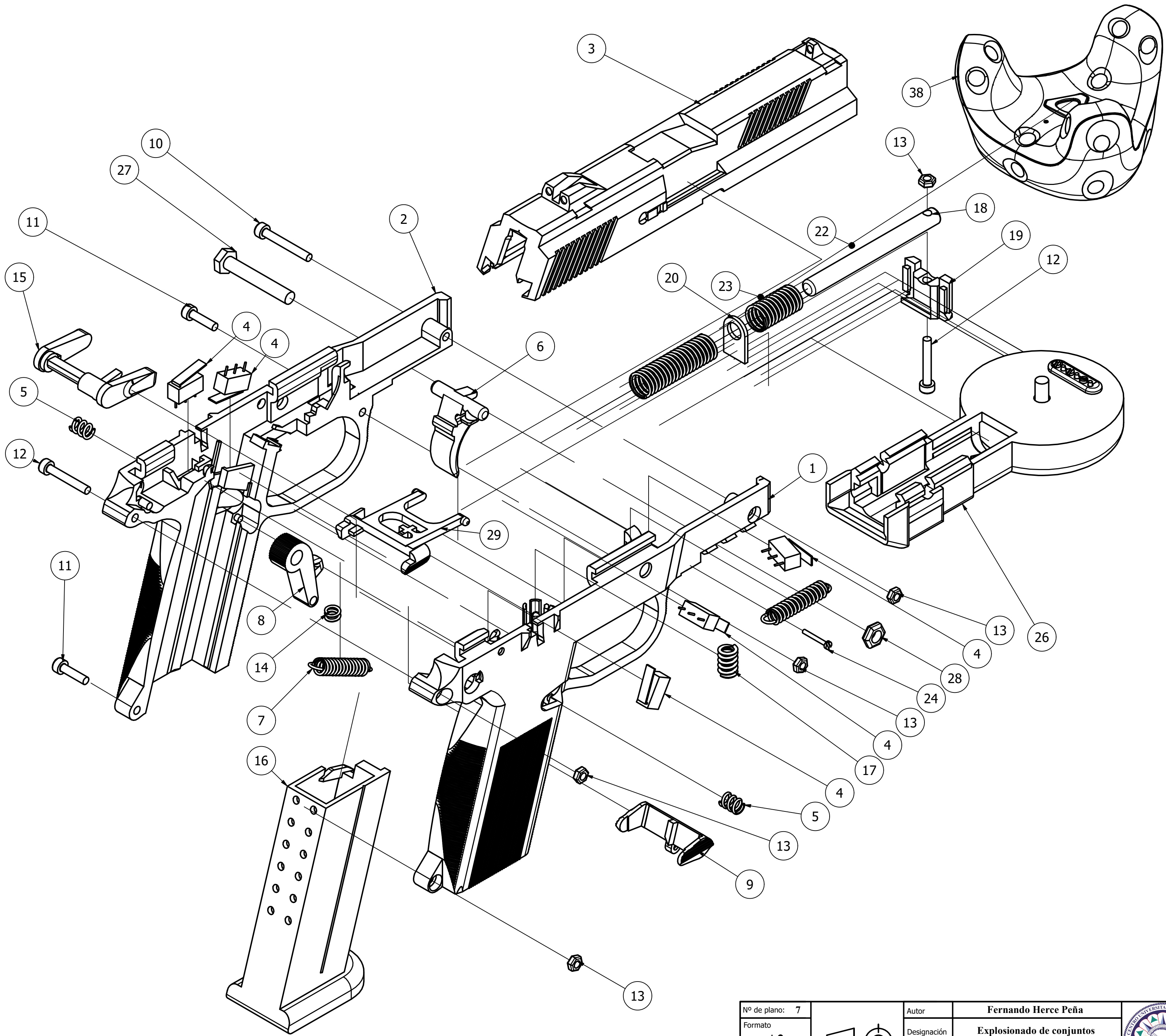
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Cuerpo del pistolete derecho
2	1	Cuerpo del pistolete izquierdo
3	1	Corredera
4	1	Mira delantera
5	1	Mira trasera
6	5	Microswitch 12
7	2	Muelle 5,5x7
8	1	Cola de disparador
9	2	Muelle 5,5x25,5
10	1	Martillo
11	1	Pieza central retenida del cargador
12	1	Botón derecho retenida del cargador
13	1	Tornillo M3x25
14	2	Tornillo M3x11
15	2	Tornillo M3x20
16	6	Tuerca M3
17	1	Muelle 5,5x4
18	1	Seleccionador seguro derecho
19	1	Seleccionador seguro izquierdo
20	1	Botón derecho retenida del cargador
21	1	Cargador
22	1	Muelle 6,5x10
23	1	Guía muelle recuperador
24	1	Placa delantera cuerpo pistolete
25	1	Platillo muelle recuperador
26	1	Muelle 9,5x19
27	1	Muelle 9,5x35
28	3	Tornillo M2x8
29	1	Soporte hembra del tracker
30	1	Soporte macho del tracker
31	1	Tapa soporte hembra del tracker
32	1	Tornillo M5x32
33	1	Tuerca M5
34	1	Tornillo M3x6
35	1	Tornillo M5x12
36	3	Tornillo M2x12
37	1	Retenida de la corredera
38	1	Vive Tracke 3
39	3	Tornillo M2x8
40	3	Tuerca M2
41	1	Placa separadora



Nº de plano: 6		Autor	Fernando Herce Peña
Formato A2		Designación	Explosionado general
Escala 1:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual



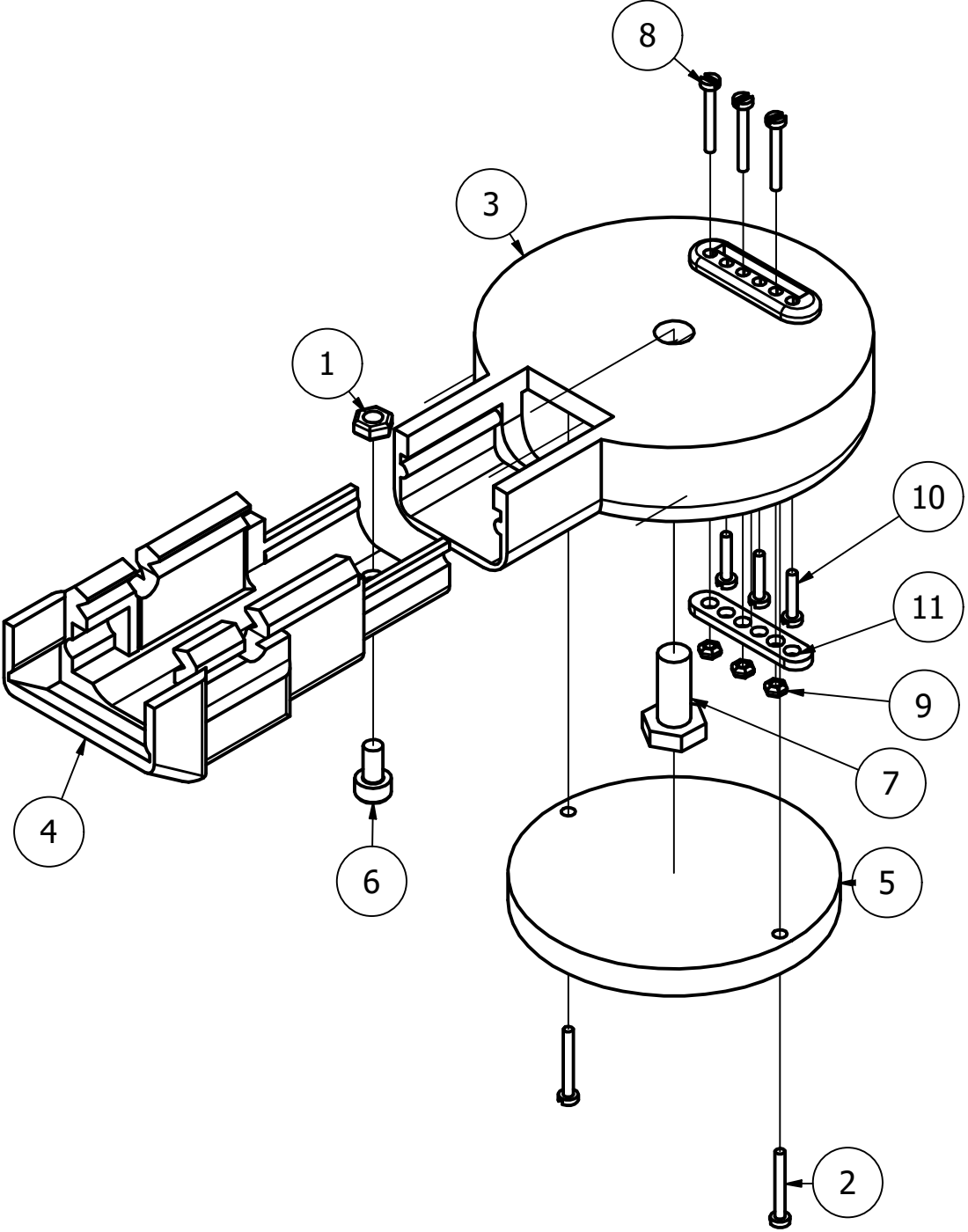
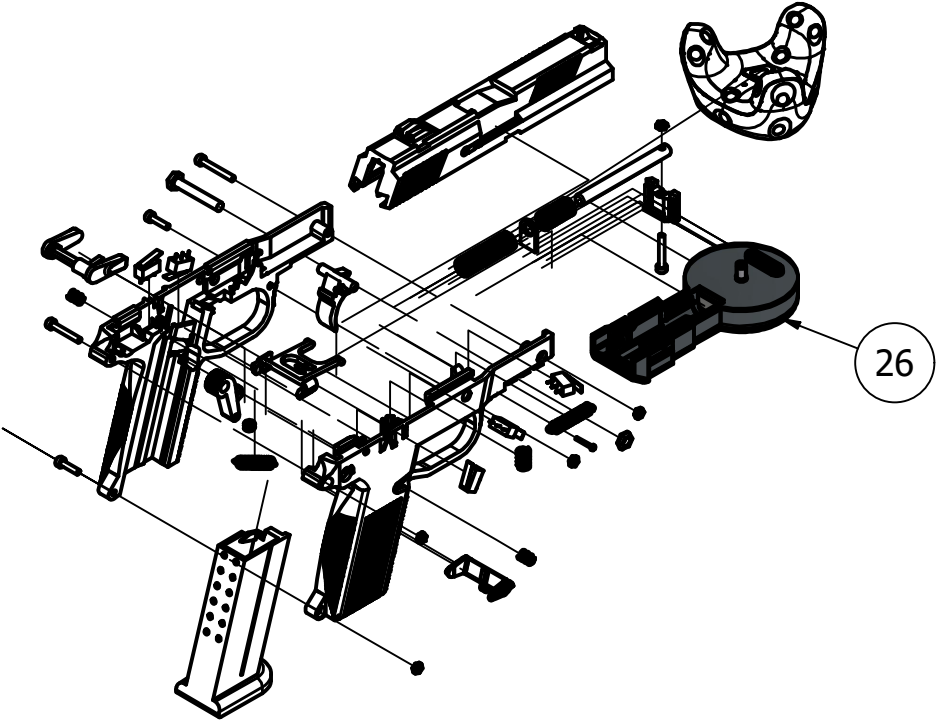
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Cuerpo del pistolete derecho
2	1	Cuerpo del pistolete izquierdo
3	1	Conjunto de la corredera
4	5	Microswitch 12
5	2	Muelle 5.5x7
6	1	Cola de disparador
7	2	Muelle 5.5x25.5
8	1	Martillo
9	1	Conjunto retenida del cargador
10	1	Tornillo M3x25
11	2	Tornillo M3x11
12	2	Tornillo M3x20
13	6	Tuerca M3
14	1	Muelle 5.5x4
15	1	Conjunto del seguro
16	1	Cargador
17	1	Muelle 6.5x10
18	1	Guía muelle recuperador
19	1	Placa delantera cuerpo pistolete
20	1	Platillo muelle recuperador
22	1	Muelle 9.5x19
23	1	Muelle 9.5x35
24	3	Tornillo 6 M2x8
26	1	Conjunto soporte del tracker
27	1	Tornillo M5x32
28	1	Tuerca M5
29	1	Retenida corredera
38	1	Vive Tracker V3
39	3	Tornillo M2x8
40	3	Tuerca M2
41	1	Placa separadora



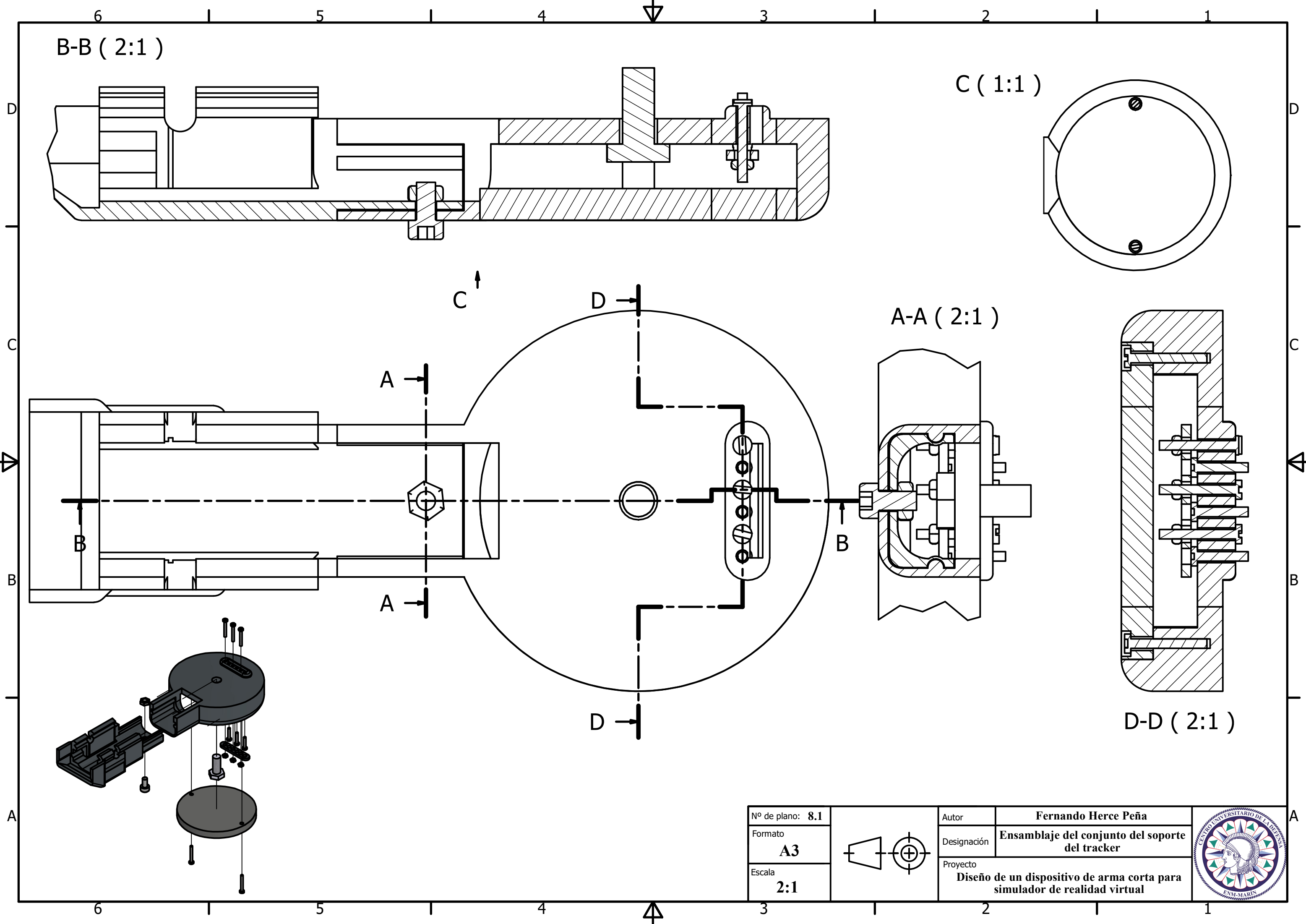
Nº de plano: 7		Autor	Fernando Herce Peña
Formato A2		Designación	Explosionado de conjuntos
Escala 1:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual



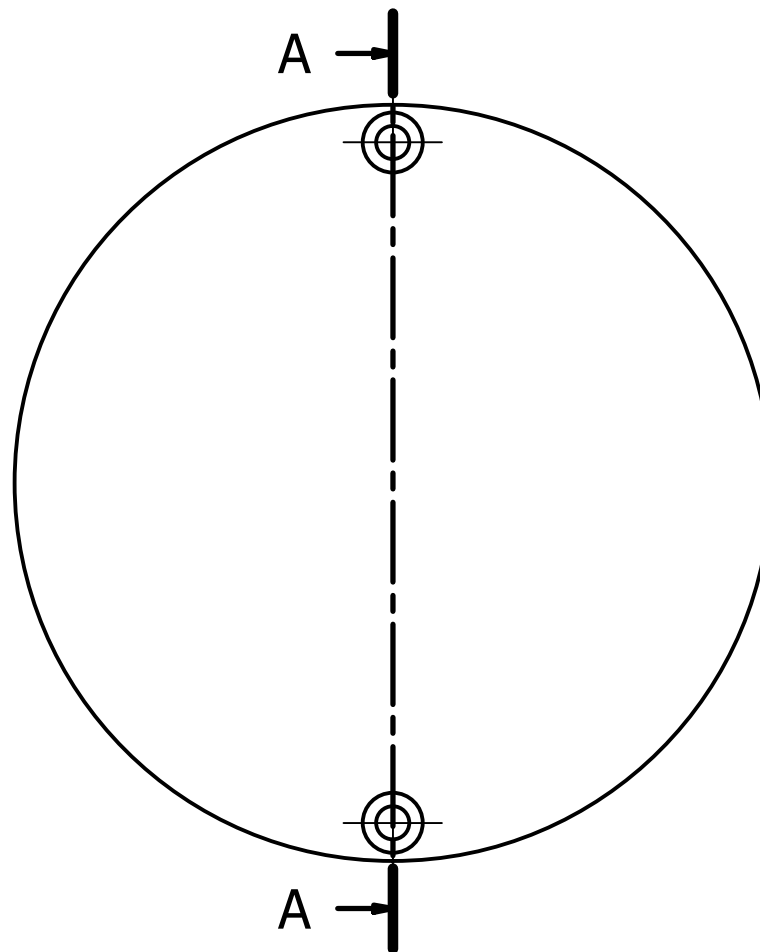
LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Tuerca M3
2	2	Tornillo M2x8
3	1	Soporte hembra del tracker
4	1	Soporte macho del tracker
5	1	Tapa soporte hembra del tracker
6	1	Tornillo M3x6
7	1	Tornillo M5x12
8	3	Tornillo M2x12
9	3	Tuerca M2
10	3	Tornillo M2x8
11	1	Placa separadora



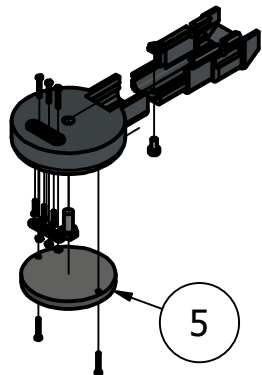
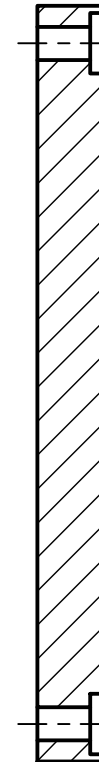
Nº de plano: 8		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Explosionado del conjunto del soporte del tracker	
Escala 1:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



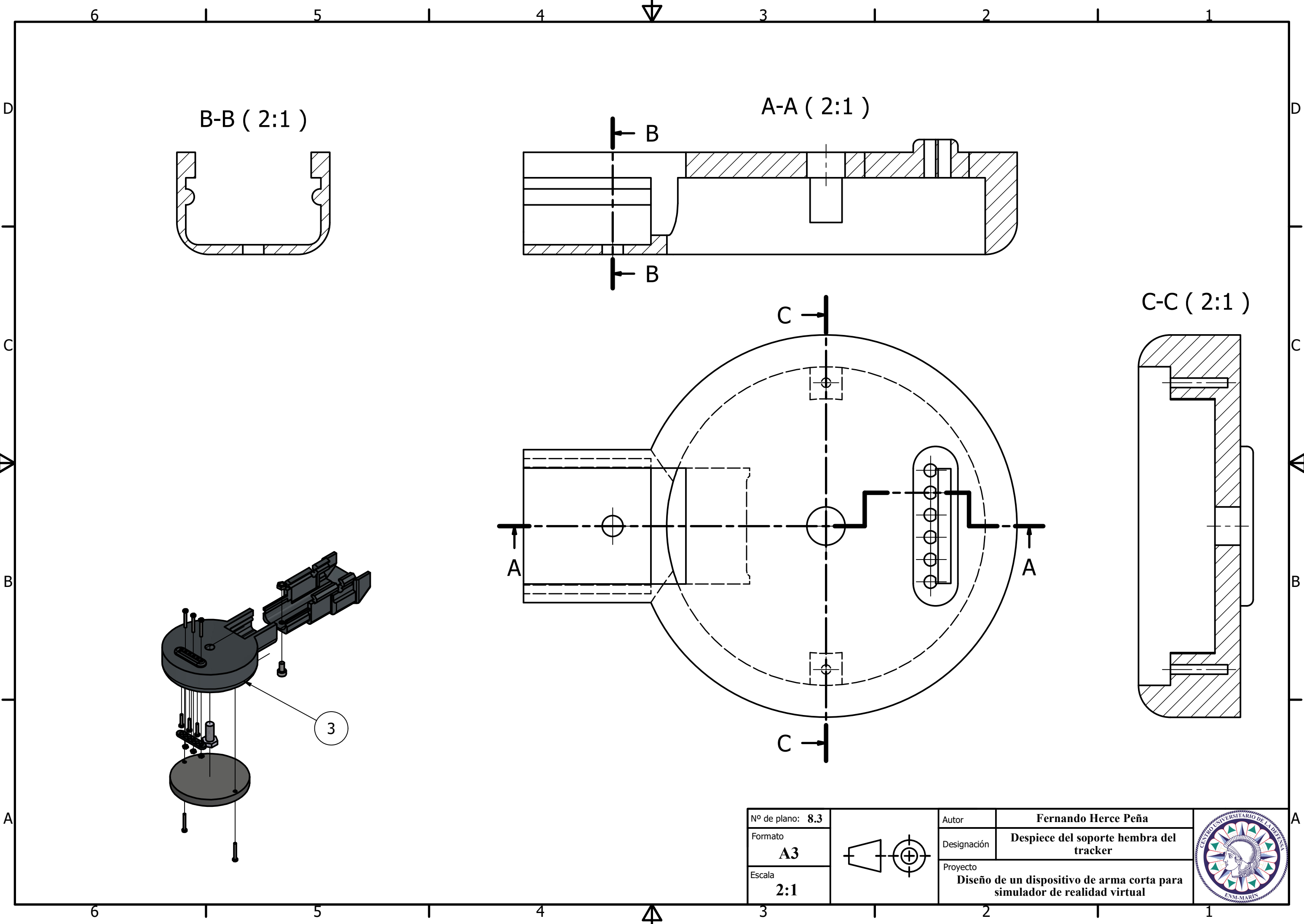
Nº de plano: 8.1		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Ensamblaje del conjunto del soporte del tracker	
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

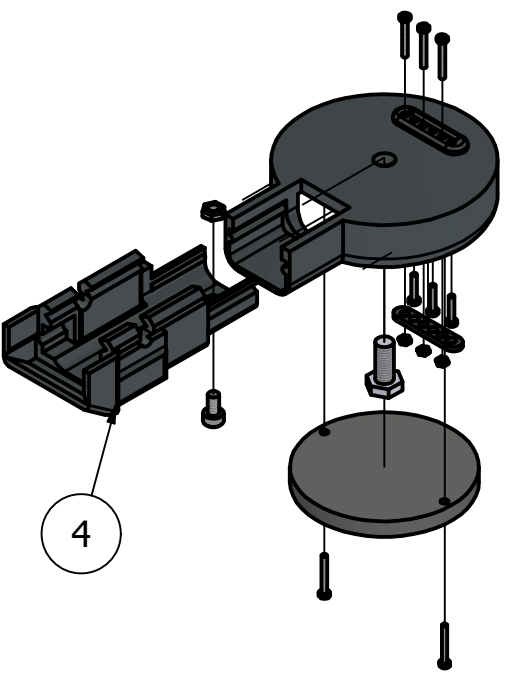
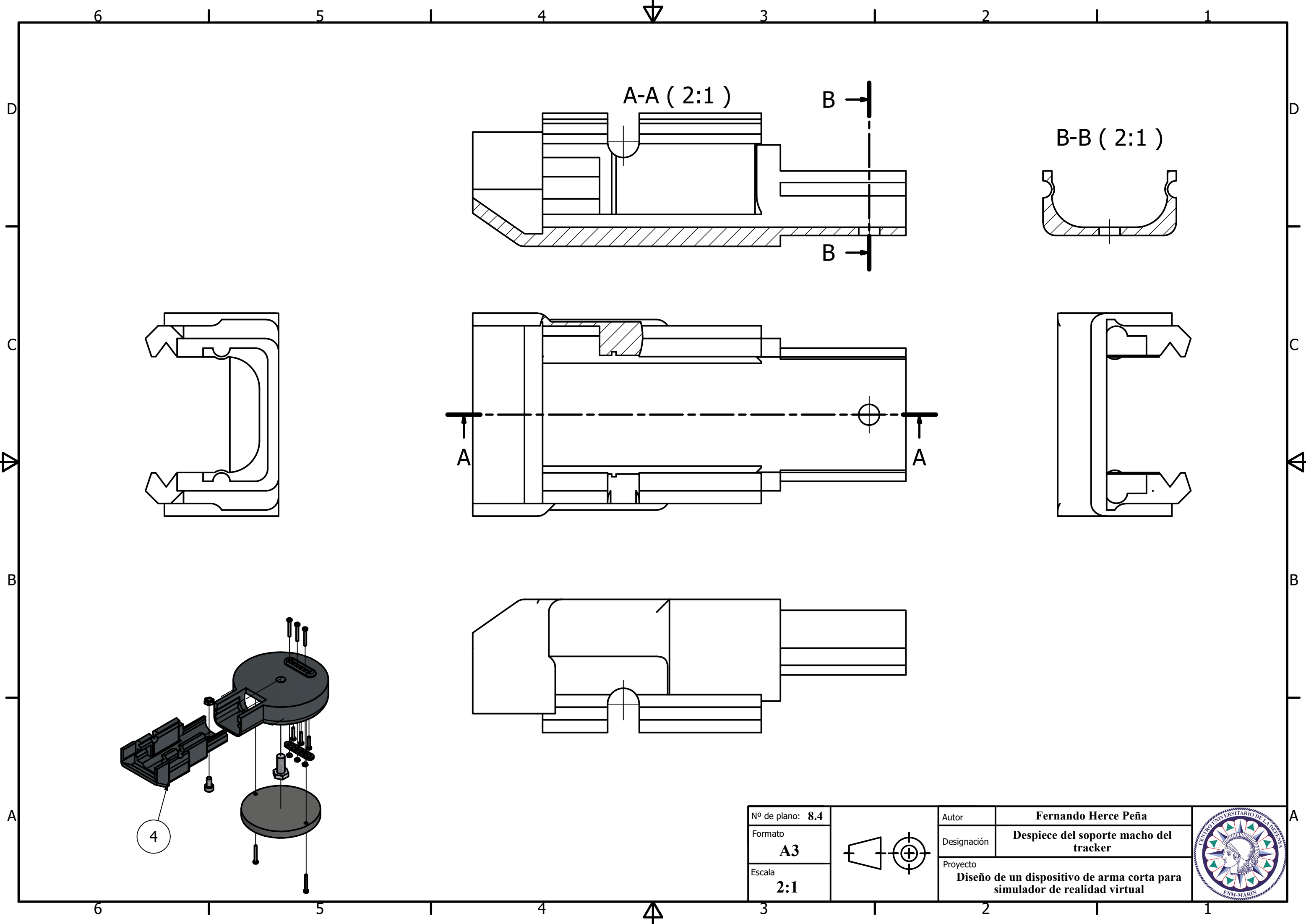


A-A (2:1)



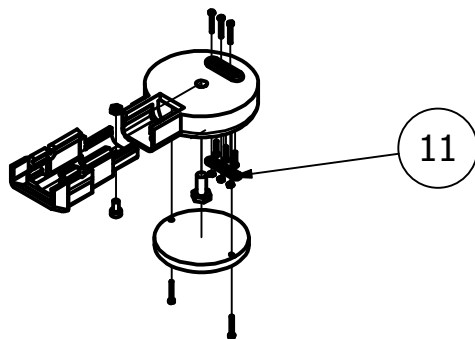
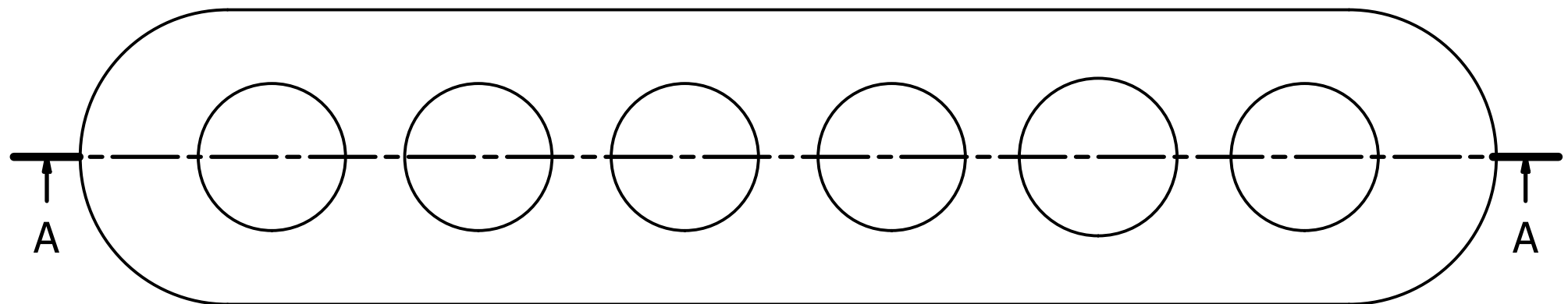
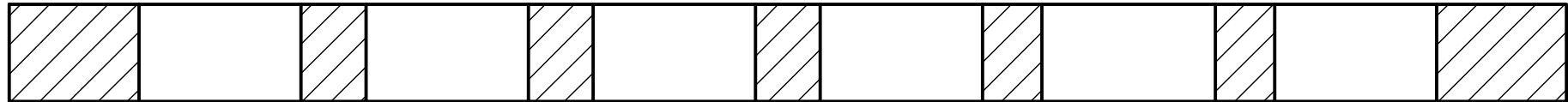
Nº de plano: 8.2		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la tapa del soporte hembra del tracker	
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	





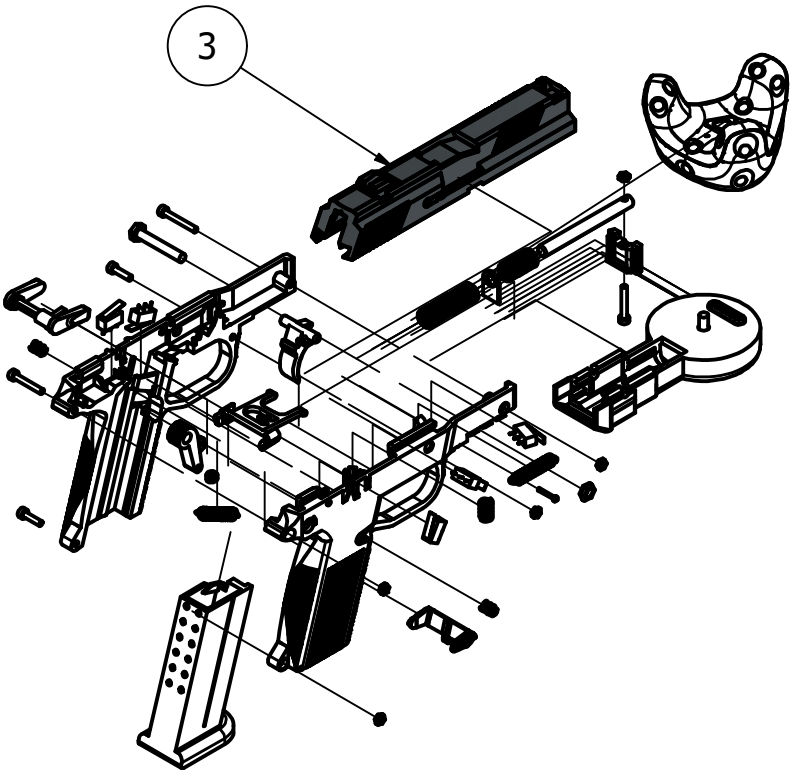
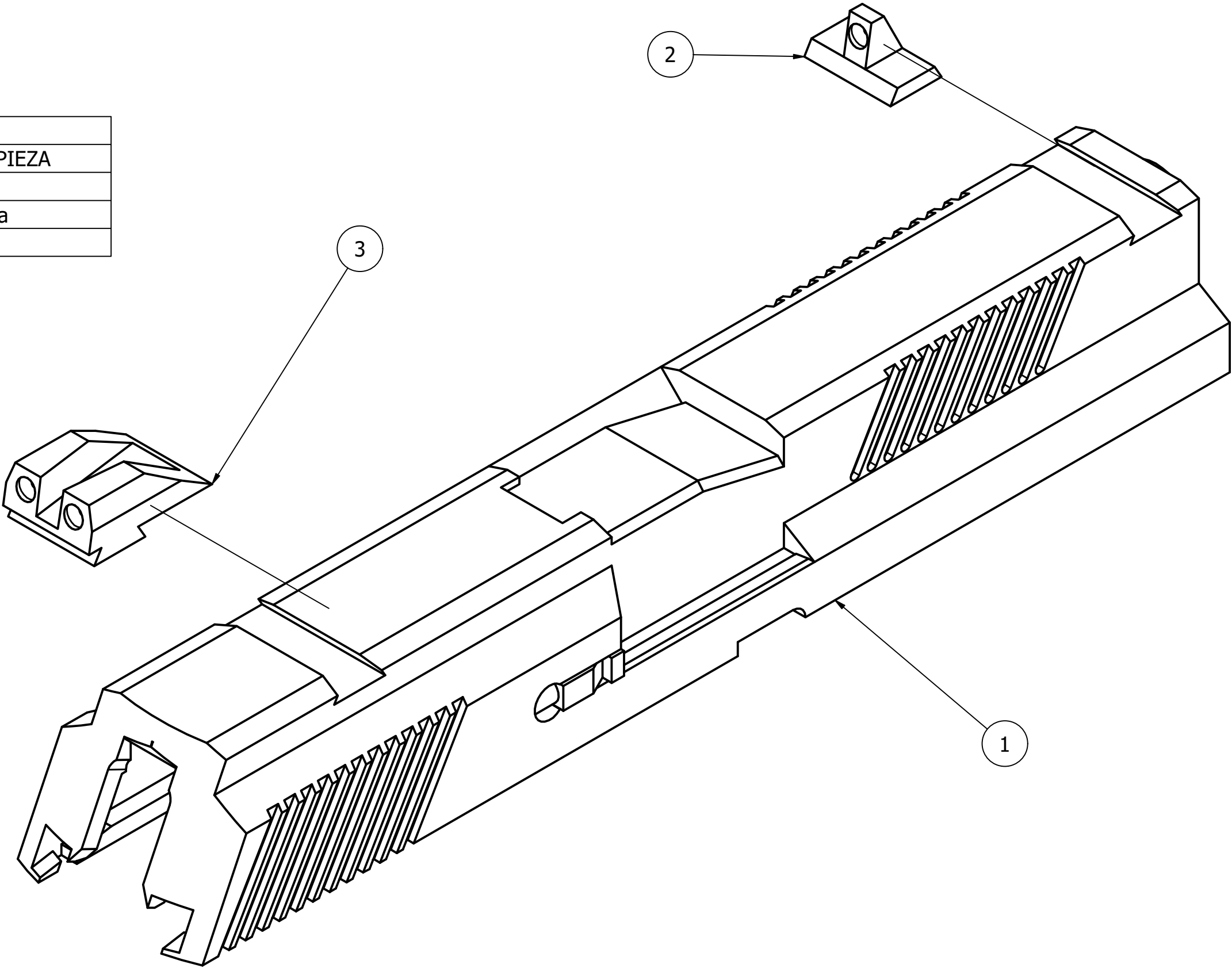
Nº de plano: 8.4		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Despiece del soporte macho del tracker	
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

A-A (10 : 1)

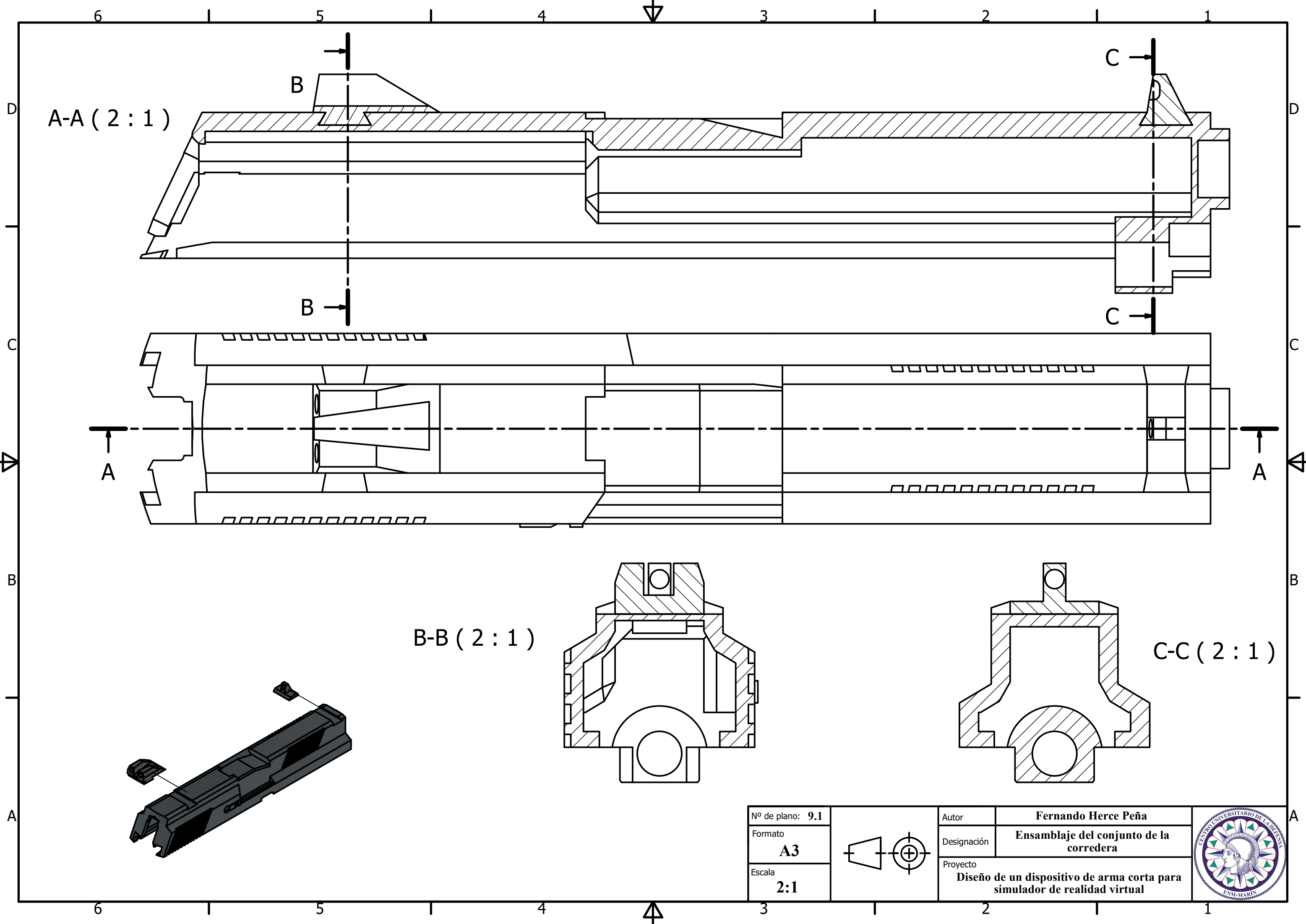


Nº de plano: 8.5		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la placa separadora	
Escala 10:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

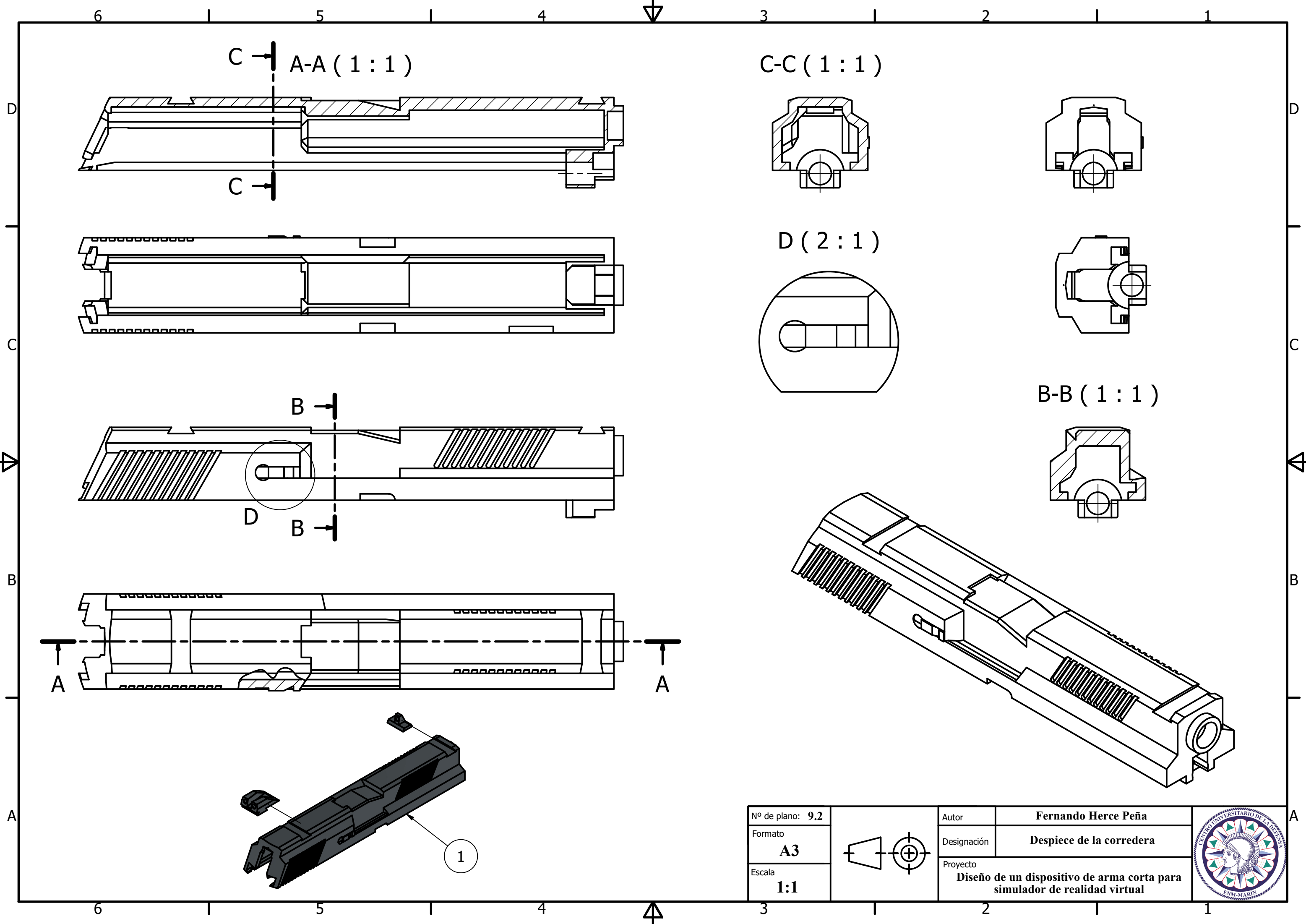
PARTS LIST		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Corredera
2	1	Mira delantera
3	1	Mira trasera



Nº de plano: 9		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Explosionado del conjunto de la corredera	
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

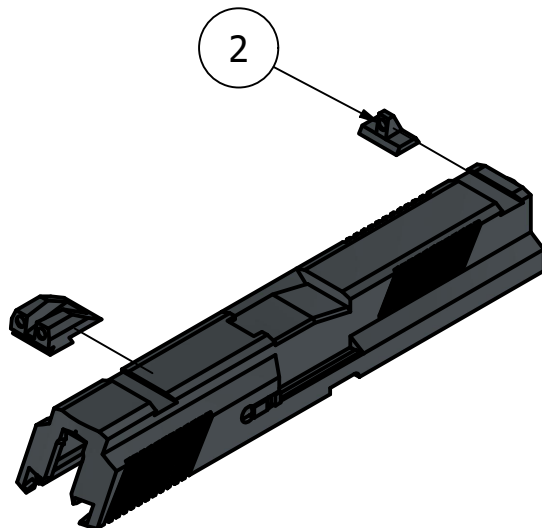
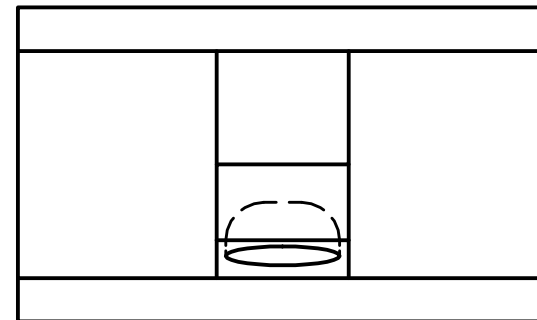
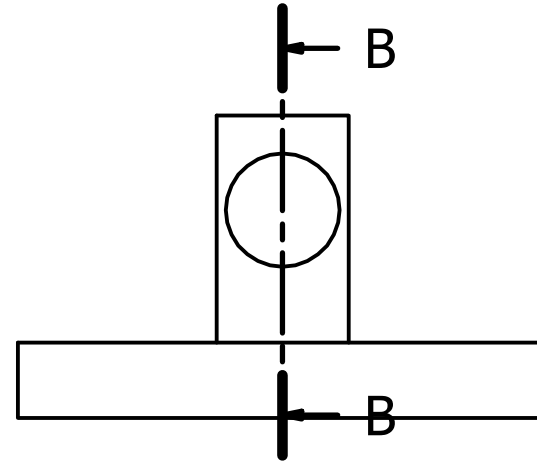
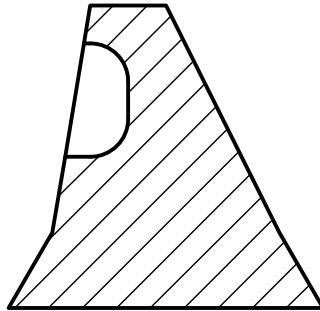


Nº de plano: 9.1		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Ensamblaje del conjunto de la corredera	
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



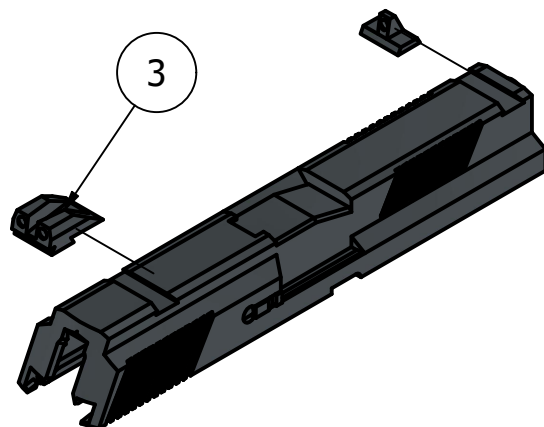
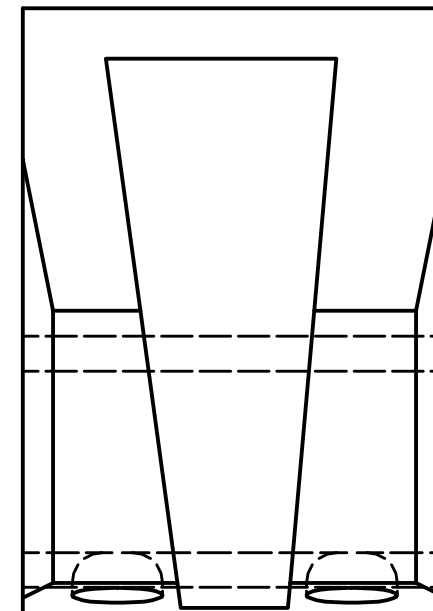
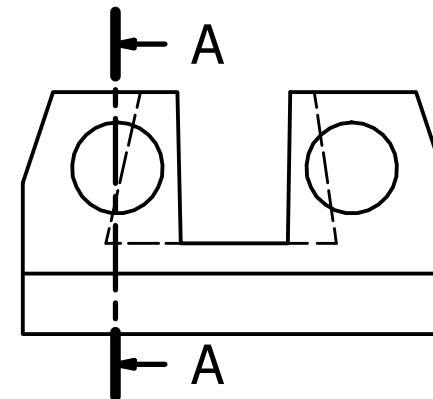
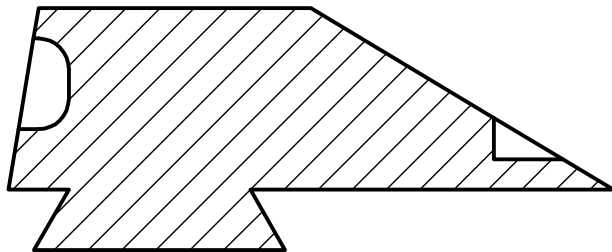
Nº de plano: 9.2		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Despiece de la corredera	
Escala 1:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

B-B (5 : 1)



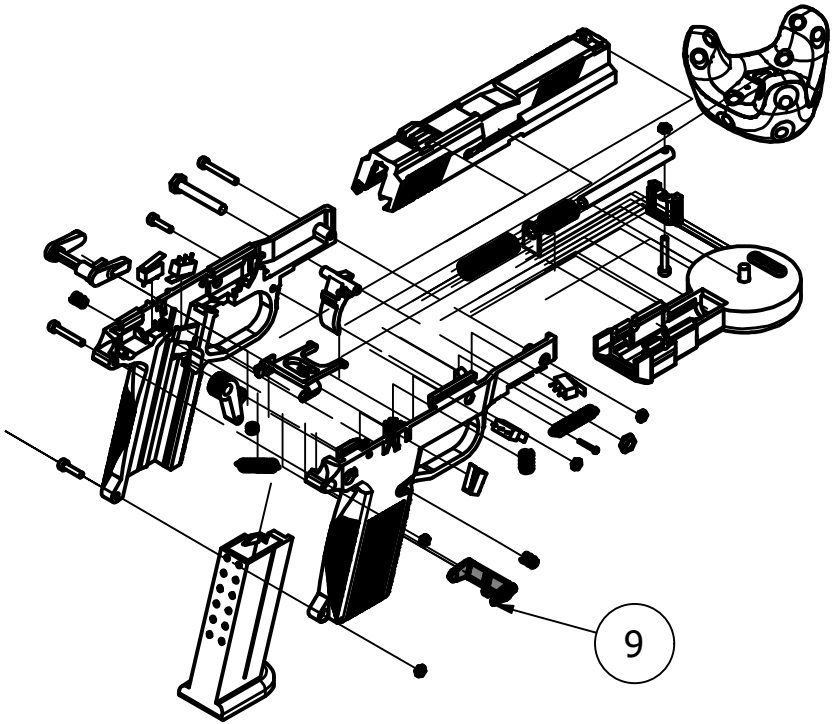
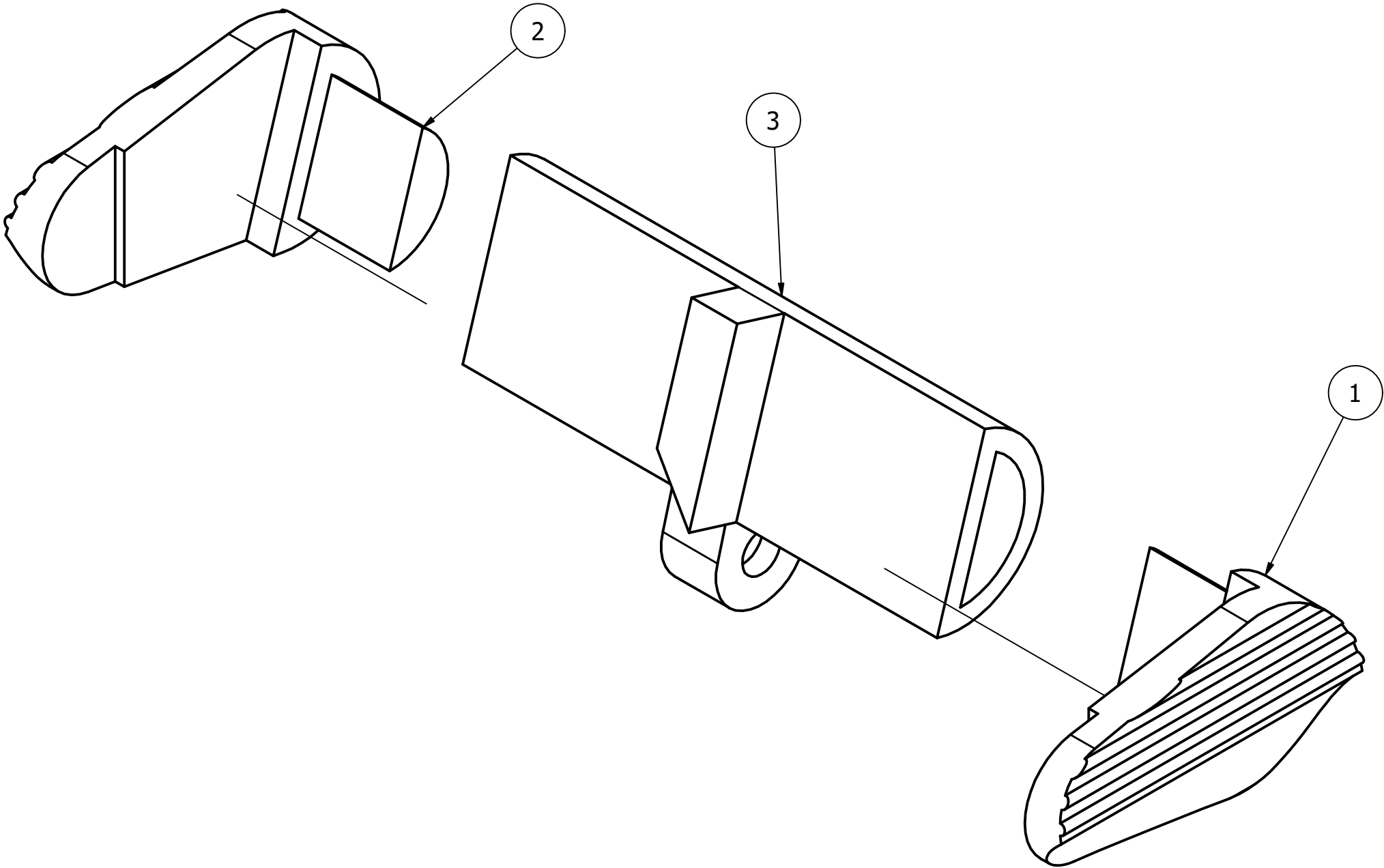
Nº de plano: 9.3		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la mira delantera	
Escala 5:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

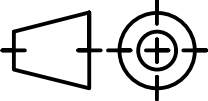
A-A (4 : 1)

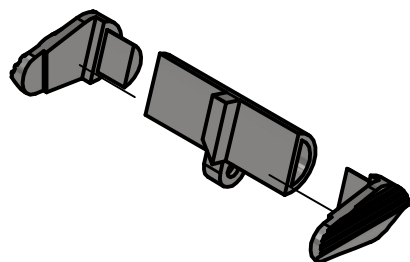
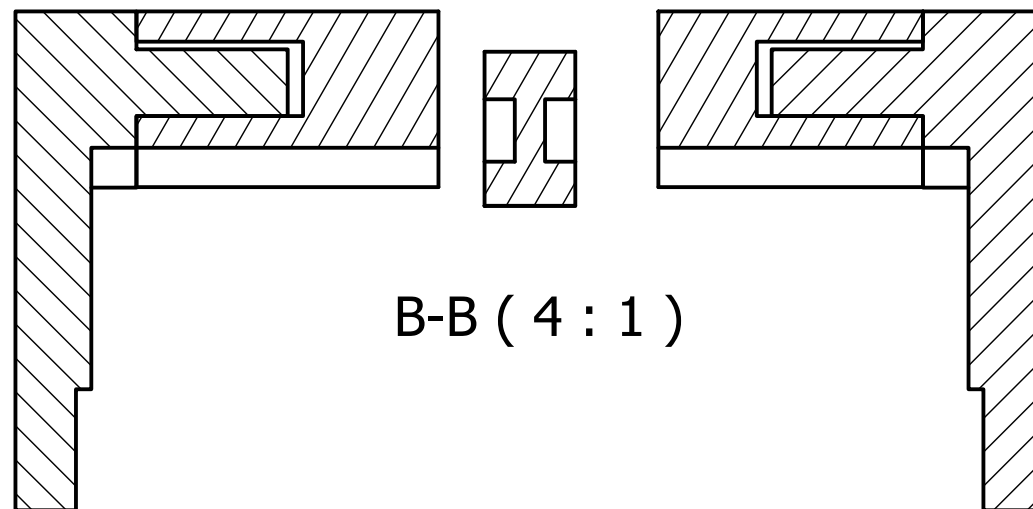
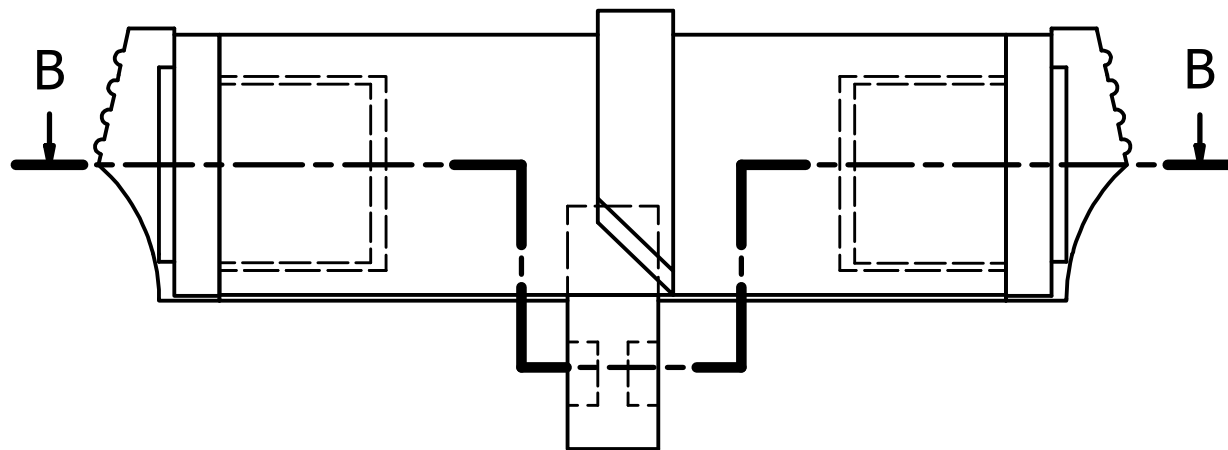
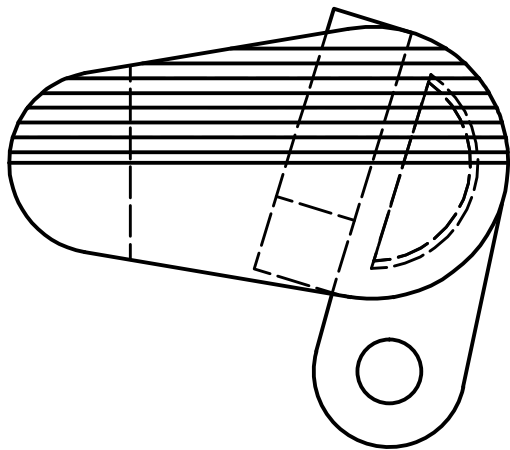


Nº de plano: 9.4		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la mira trasera	
Escala 4:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

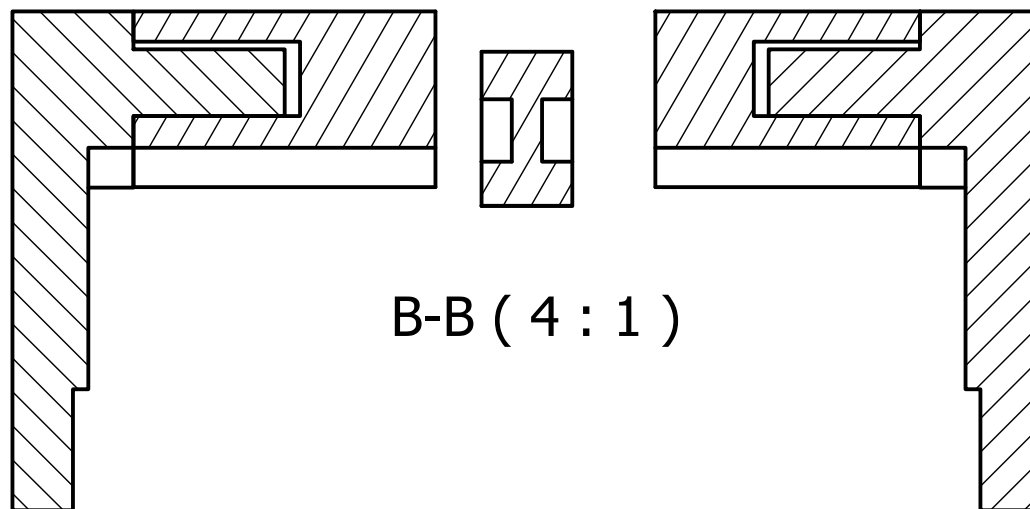
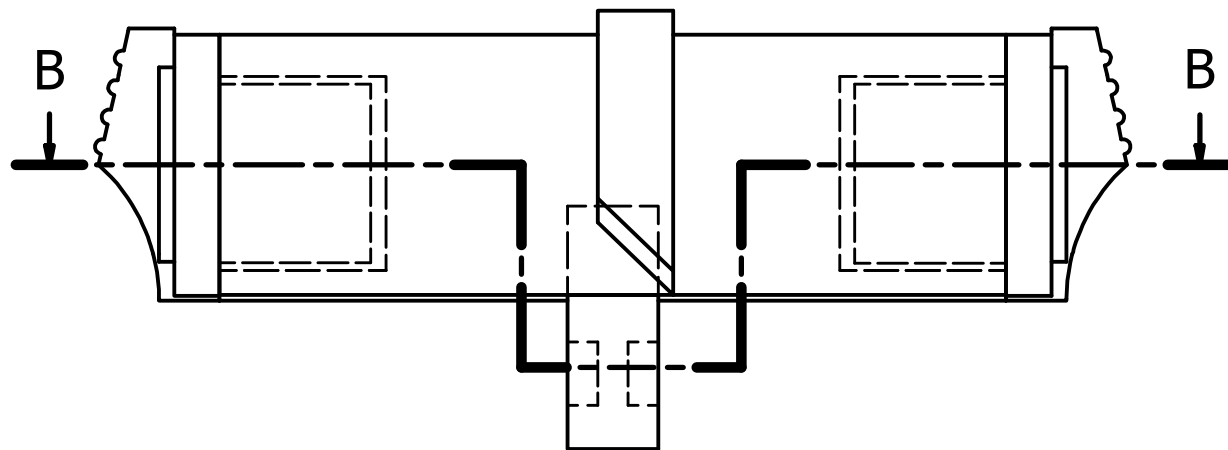
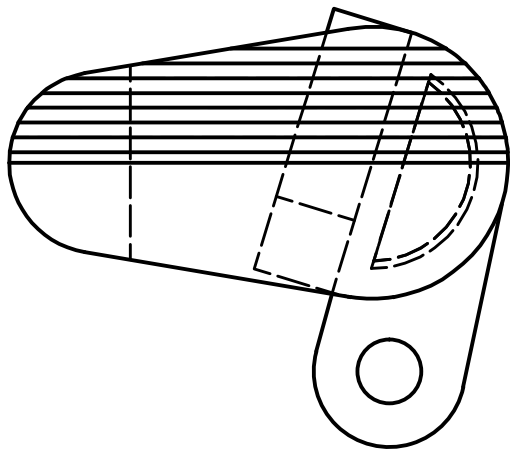
PARTS LIST		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Botón derecho retenida del cargador
2	1	Botón izquierdo retenida del cargador
3	1	Pieza central retenida del cargador



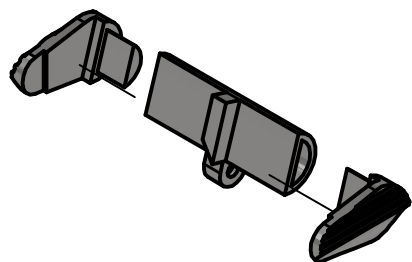
Nº de plano: 10		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Explosionado retenida del cargador	
Escala 5:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



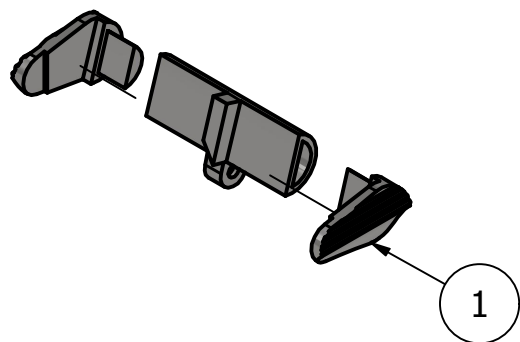
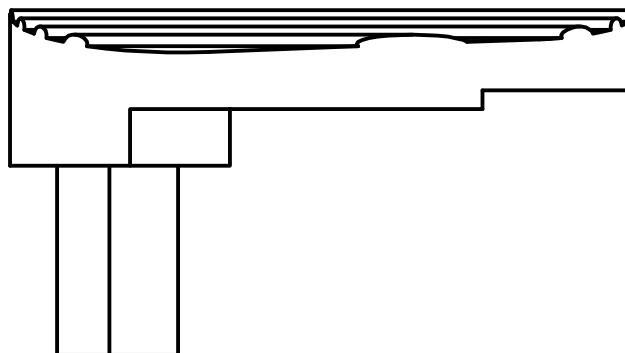
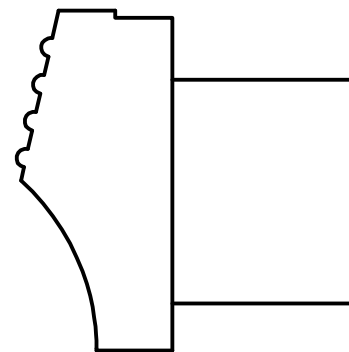
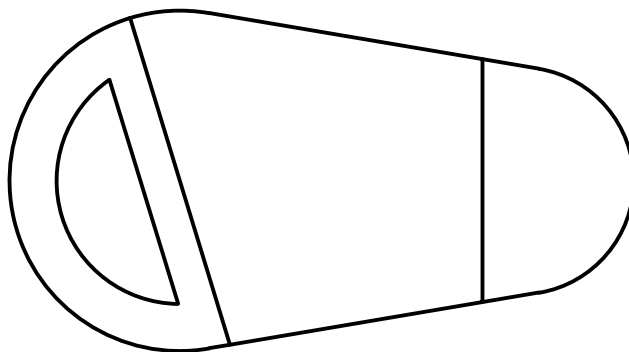
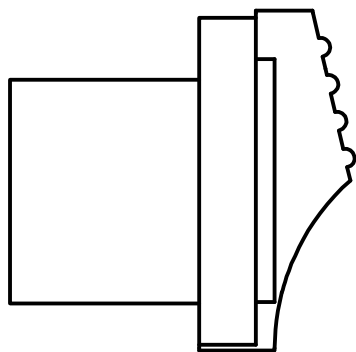
Nº de plano: 10.1		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Ensamblaje del conjunto de la retenida del cargador	
Escala 4:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



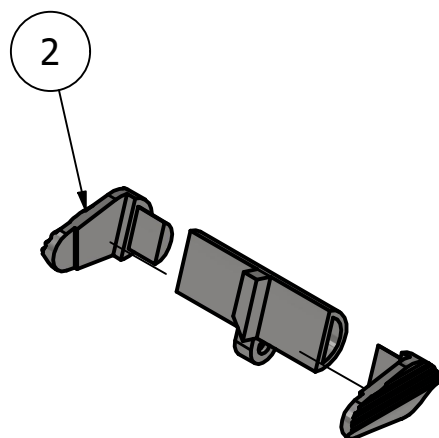
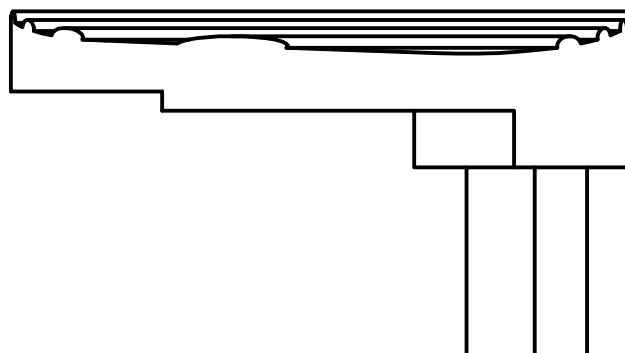
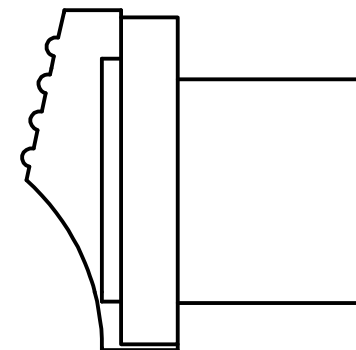
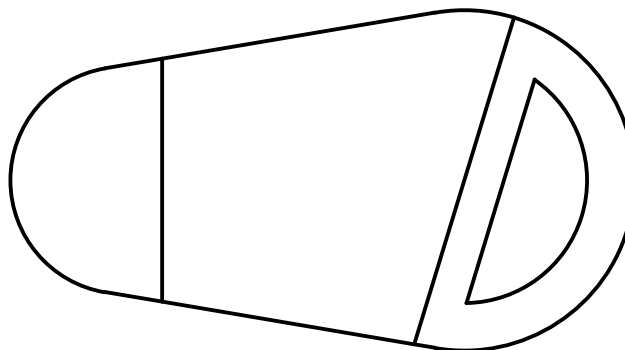
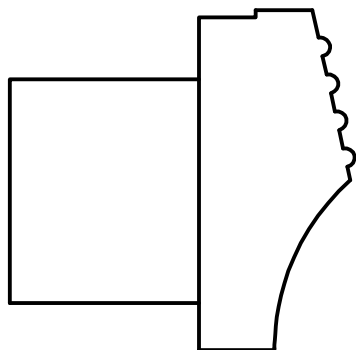
B-B (4 : 1)



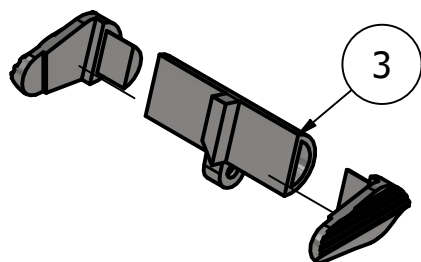
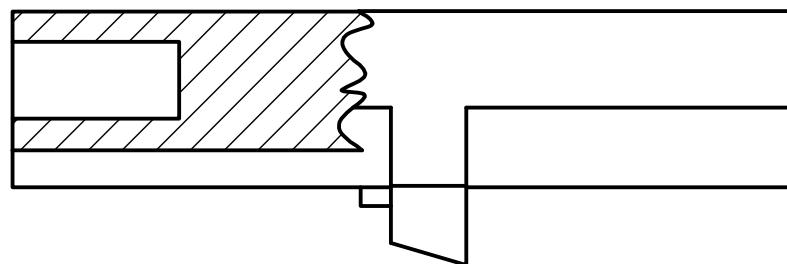
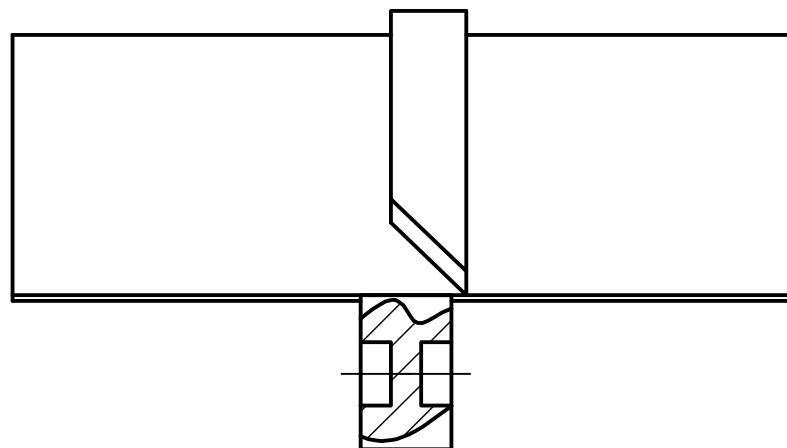
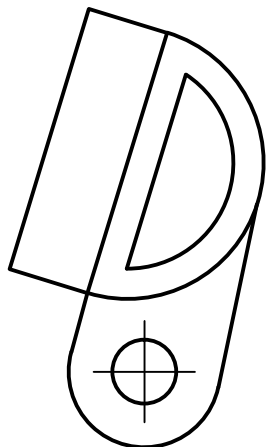
Nº de plano: 10.1		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Conjunto de la retenida del cargador	
Escala 4:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



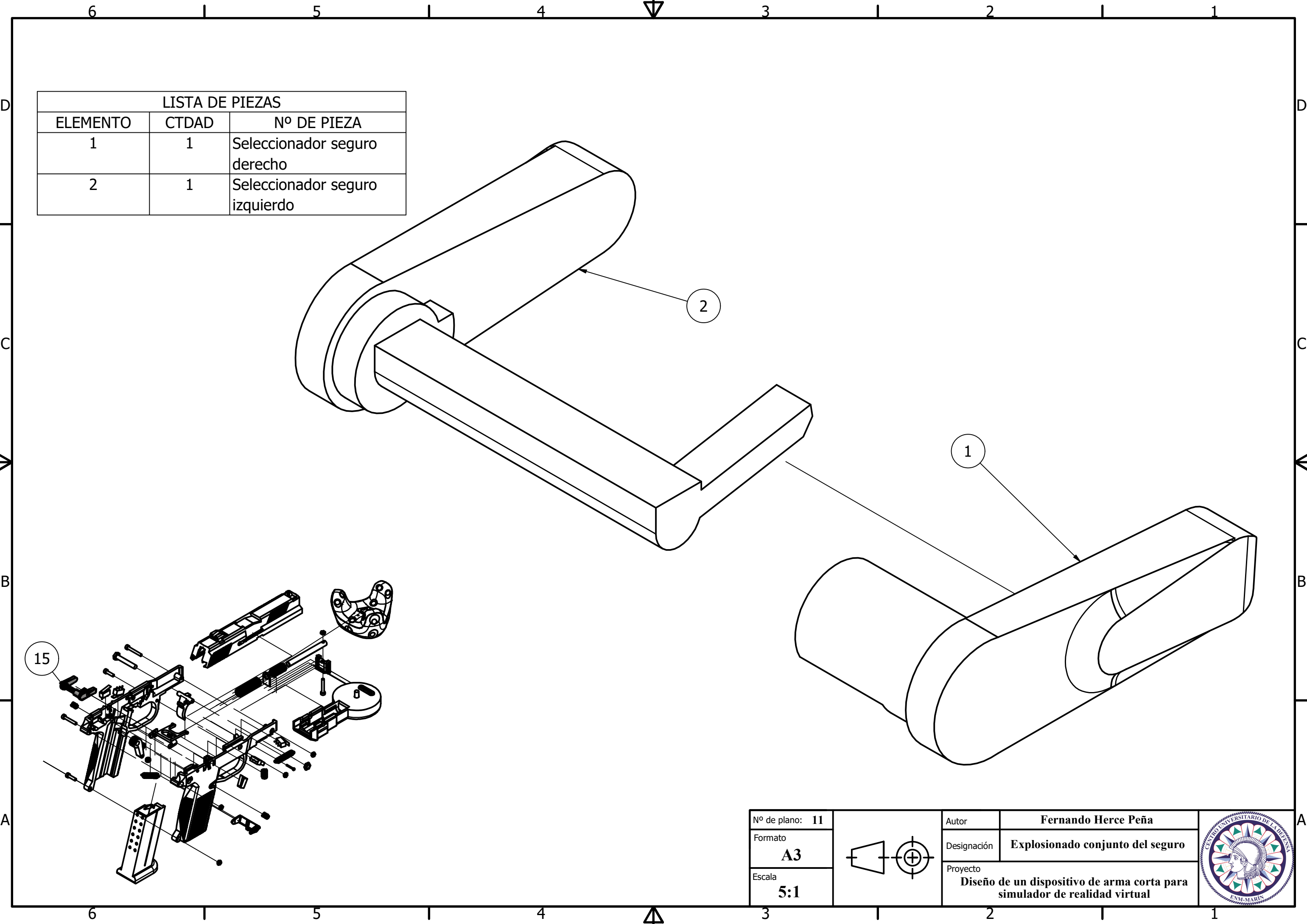
Nº de plano: 10.2		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato		Designación	Despiece del botón derecho de la retenida del cargador	
Escala		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	
A4				
5:1				



Nº de plano: 10.3		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece del botón izquierdo de la retenida del cargador	
Escala 5:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



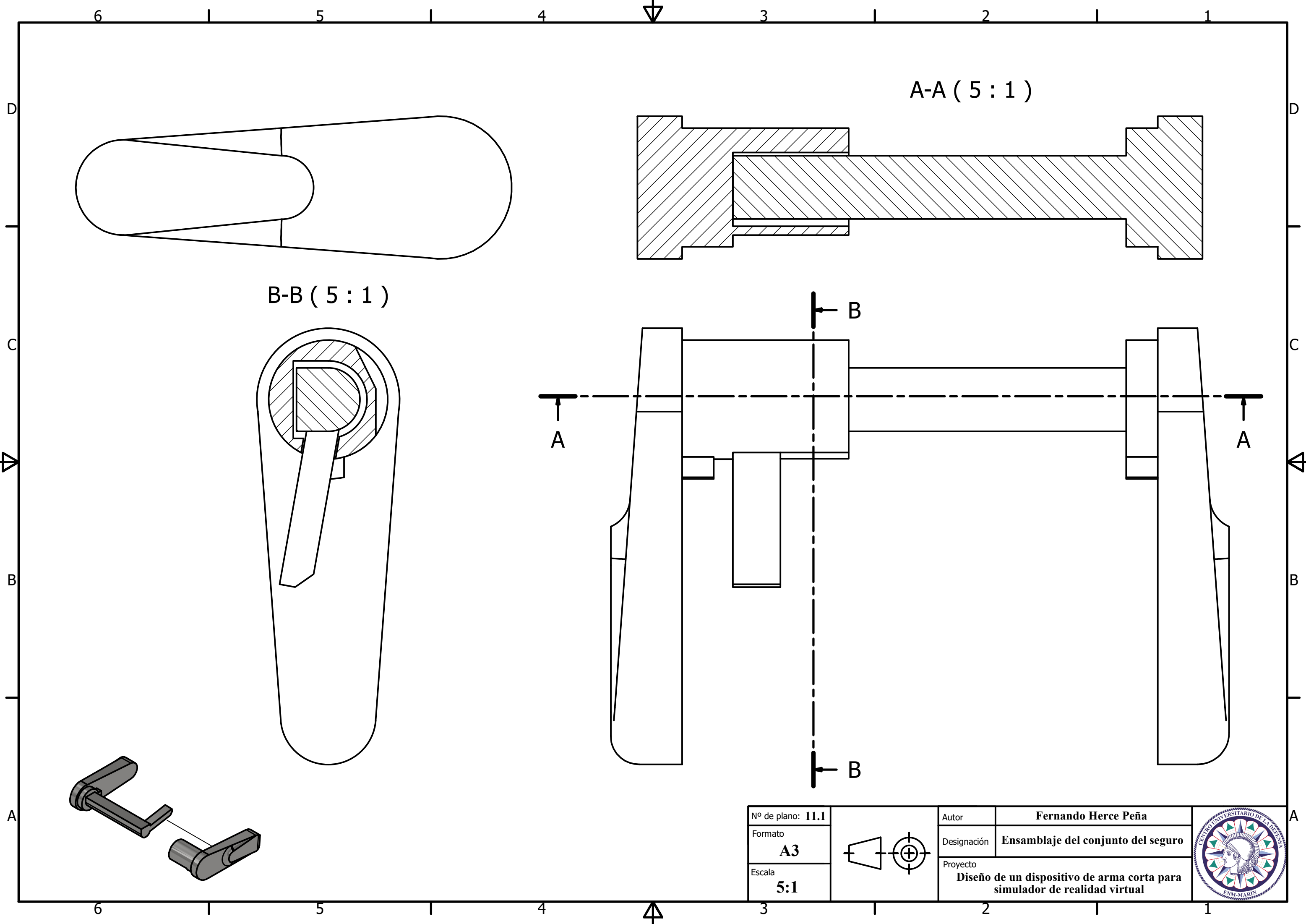
Nº de plano: 10.4		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la pieza central de la retenida del cargador	
Escala 4:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº DE PIEZA
1	1	Seleccionador seguro derecho
2	1	Seleccionador seguro izquierdo

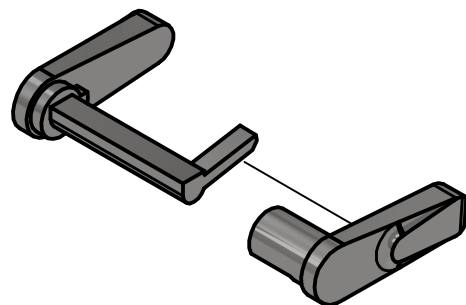
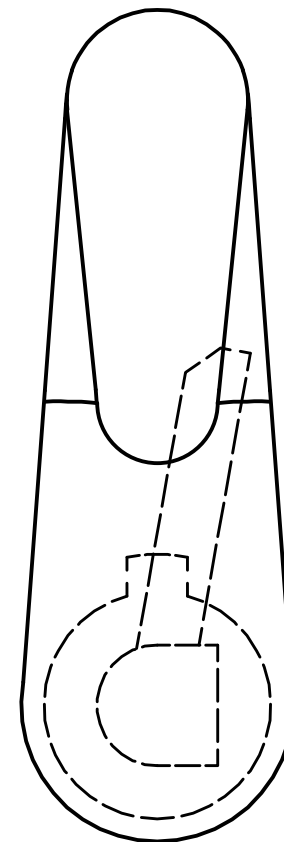
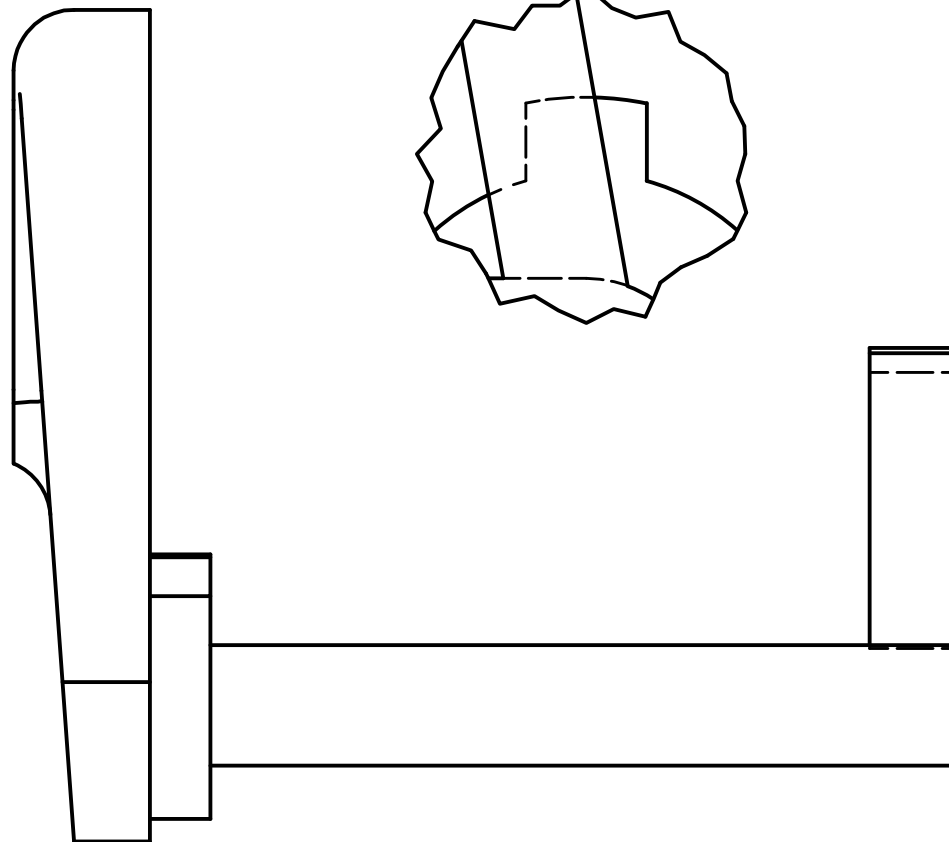
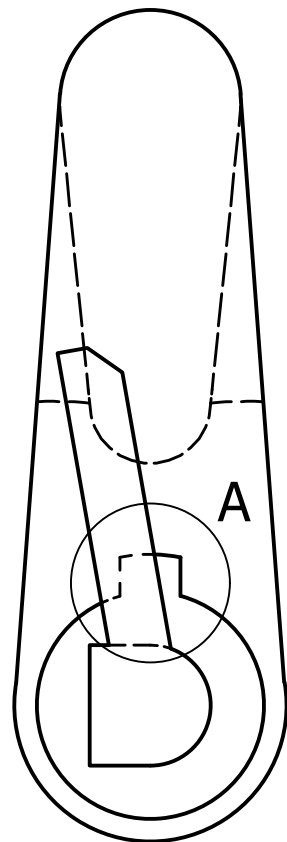
Nº de plano: 11		Autor	Fernando Herce Peña
Formato A3		Designación	Explosionado conjunto del seguro
Escala 5:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual





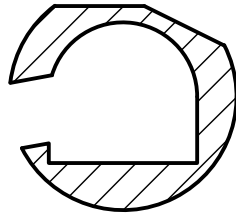
Nº de plano: 11.1		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Ensamblaje del conjunto del seguro	
Escala 5:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

A (8 : 1)

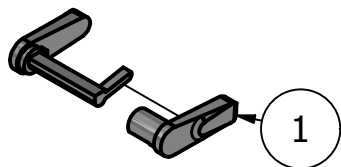
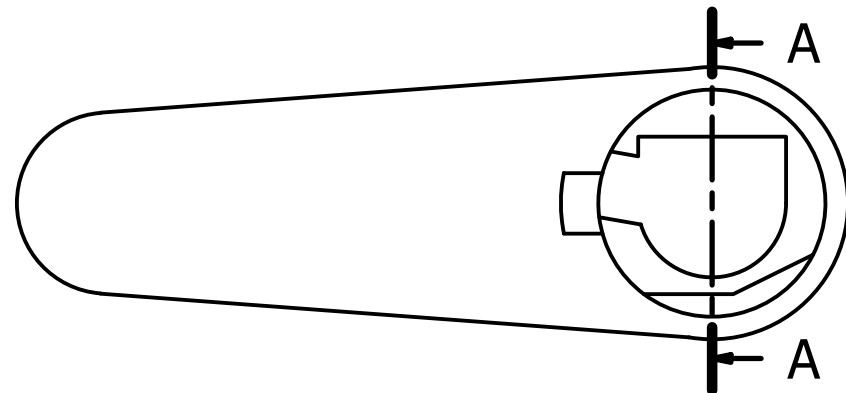
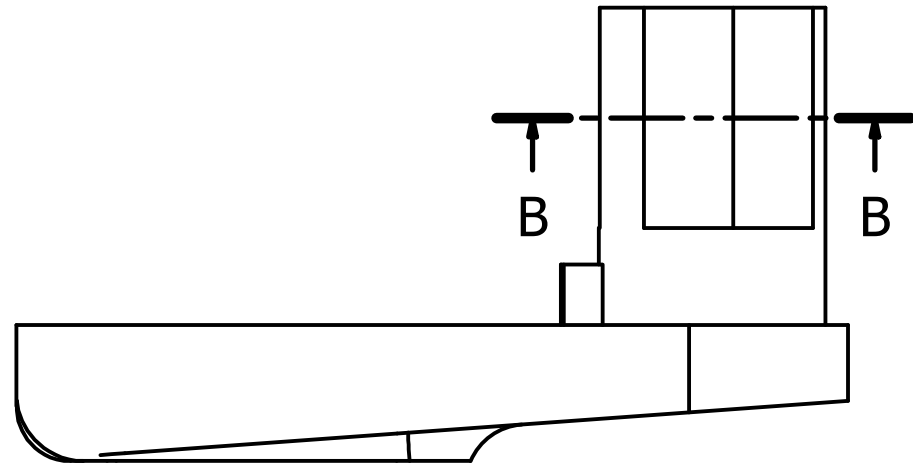
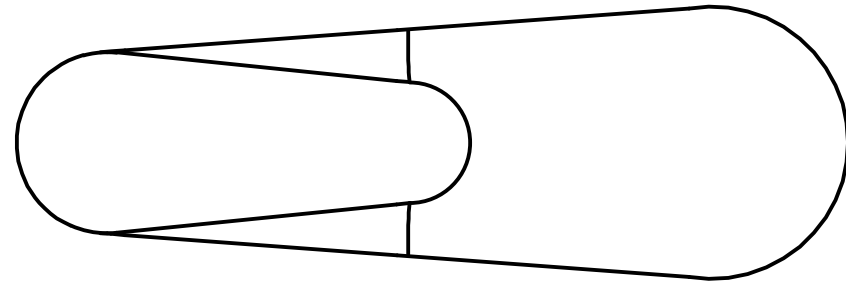
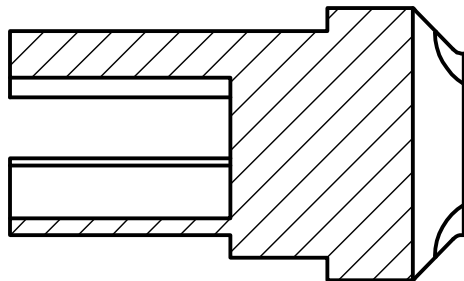


Nº de plano: 11.2		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la pieza izquierda del seguro	
Escala 4:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

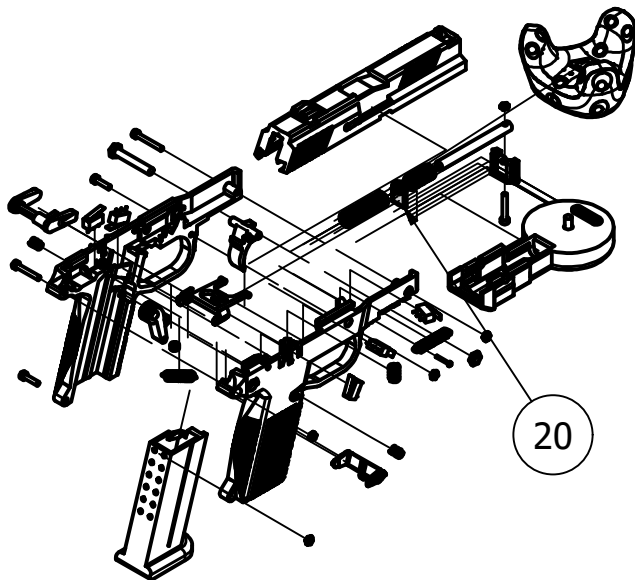
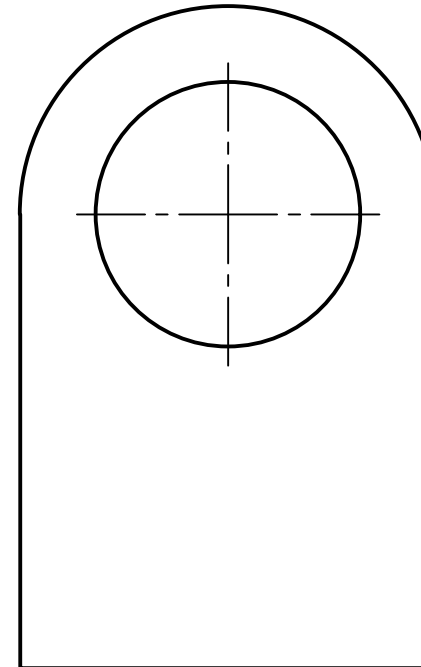
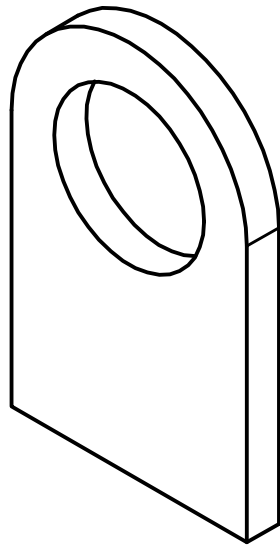
B-B (4 : 1)



A-A (4 : 1)

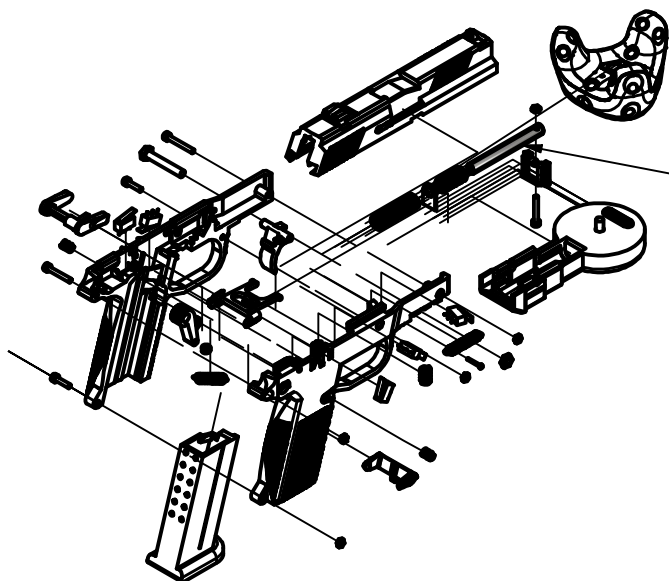
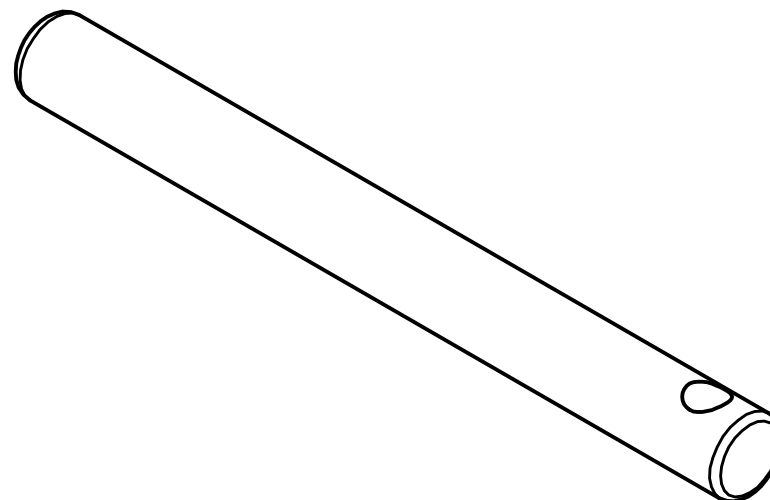
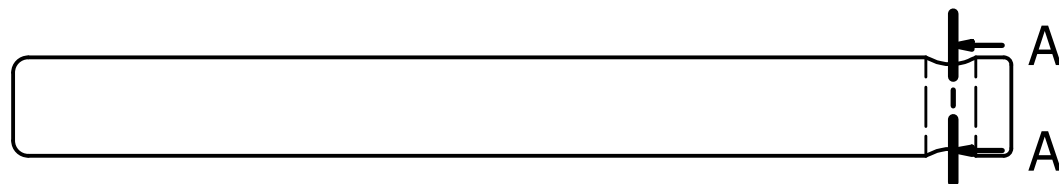
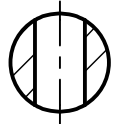


Nº de plano: 11.3		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la pieza derecha del seguro	
Escala 4:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



Nº de plano: 12		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece del platillo del muelle recuperador	
Escala 5:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	

A-A (2 : 1)



18

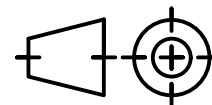
Nº de plano: 13

Formato

A4

Escala

2:1



Autor

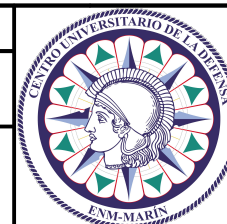
Fernando Herce Peña

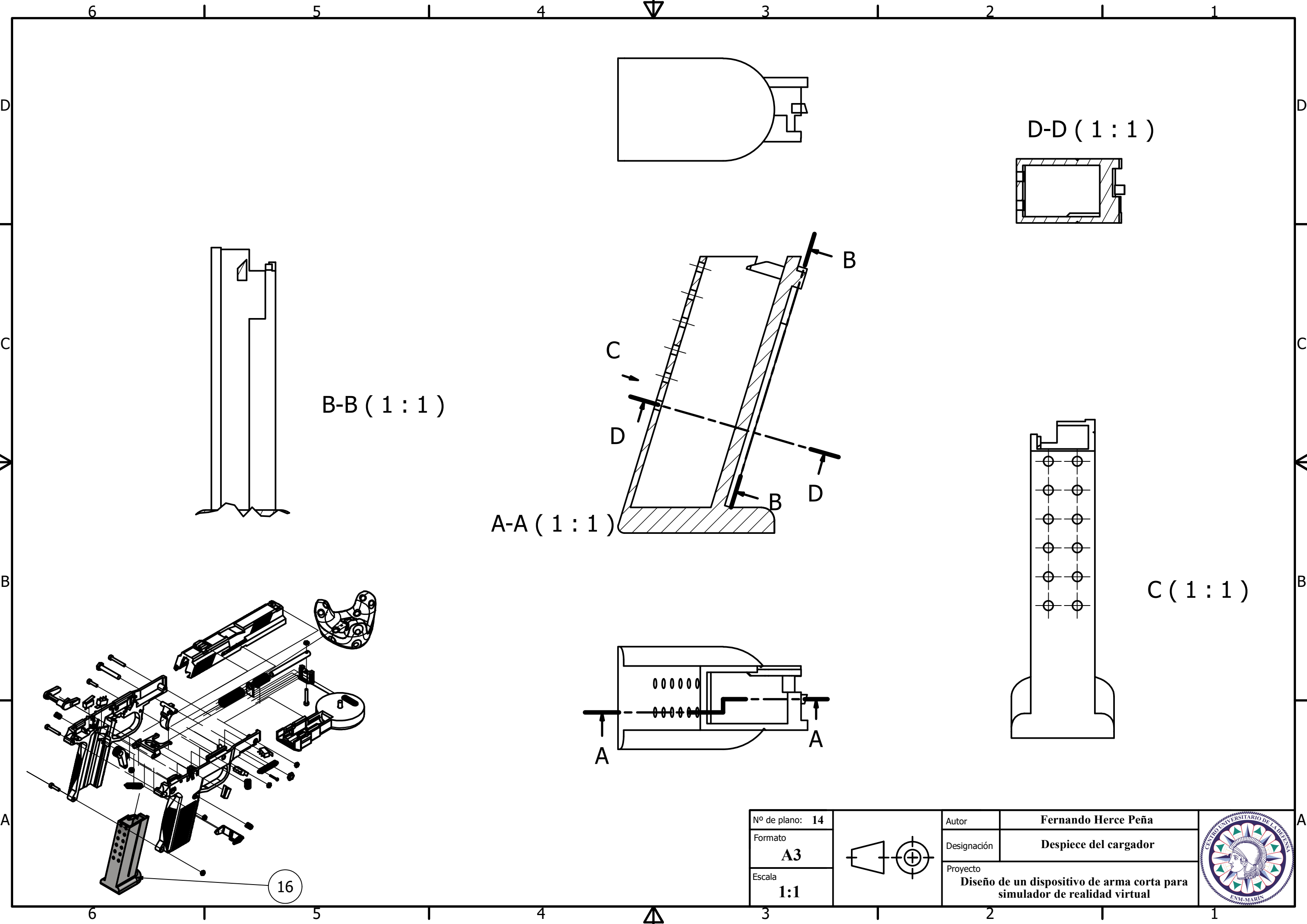
Designación

Despiece de la guía del muelle
recuperador

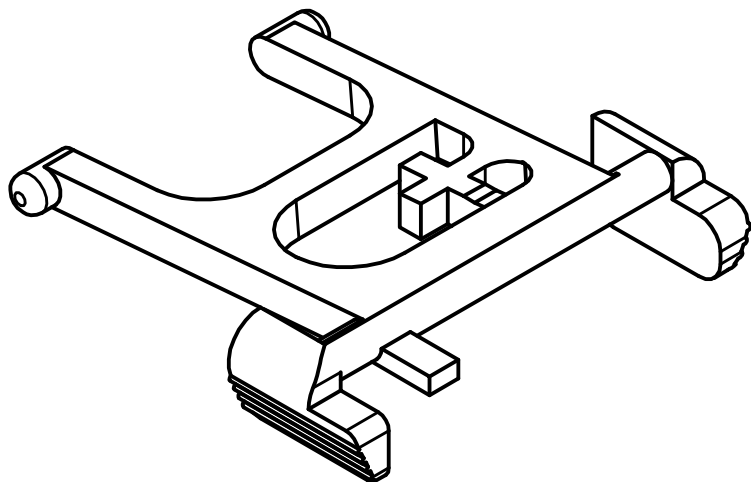
Proyecto

Diseño de un dispositivo de arma corta para
simulador de realidad virtual

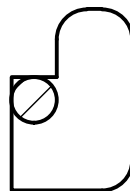




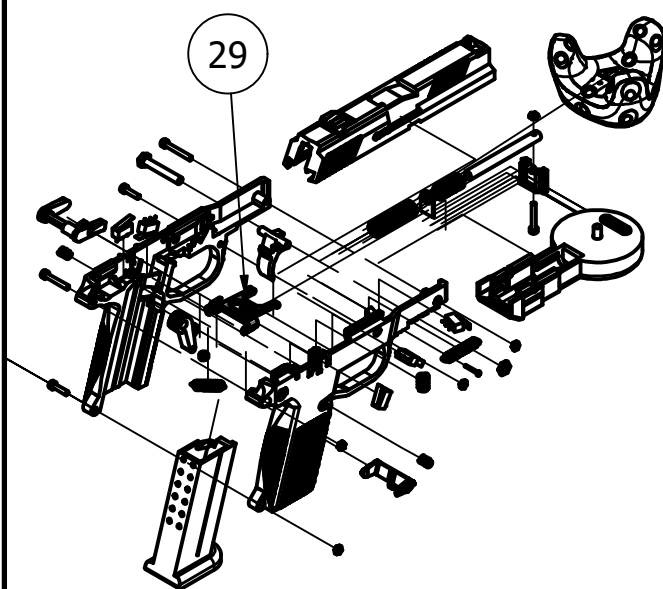
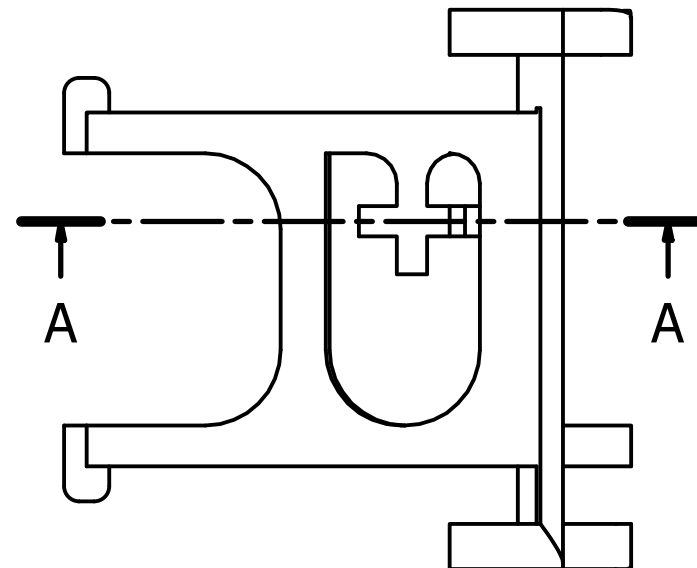
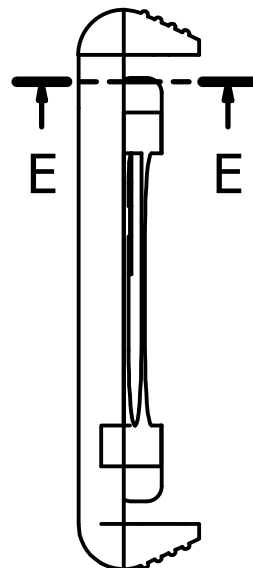
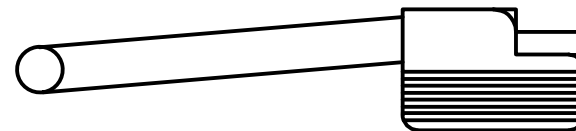
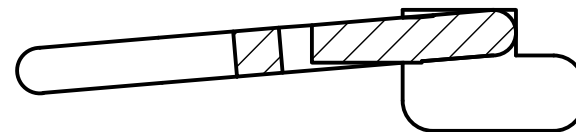
Nº de plano: 14		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A3		Designación	Despiece del cargador	
Escala 1:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



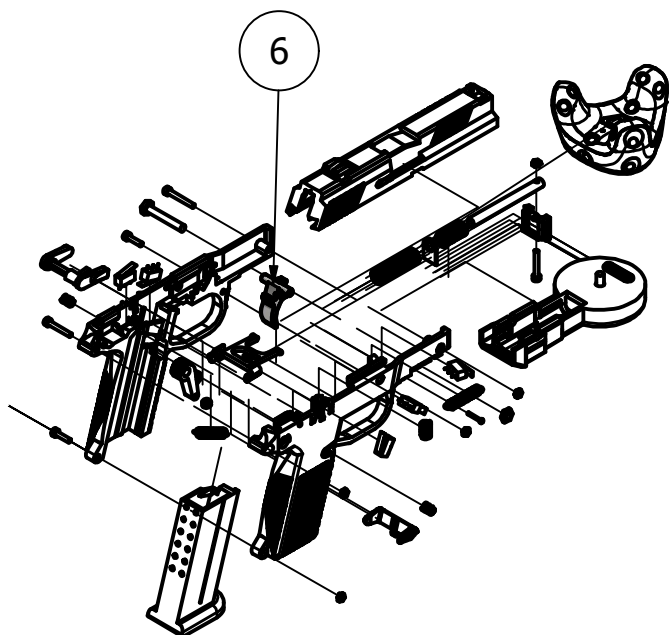
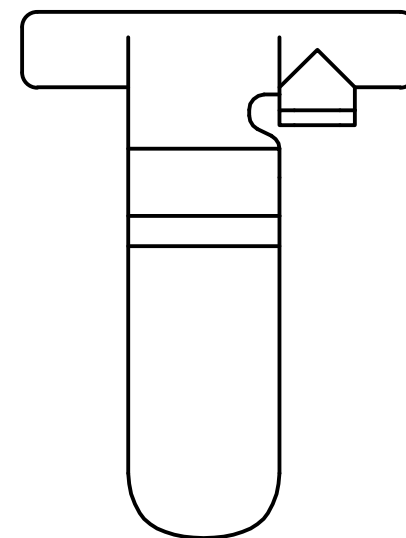
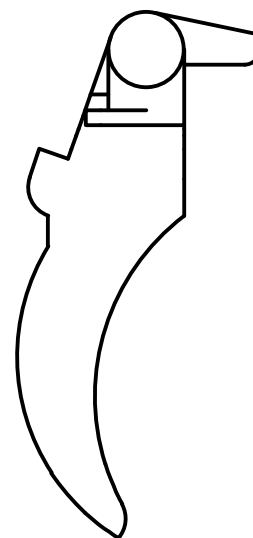
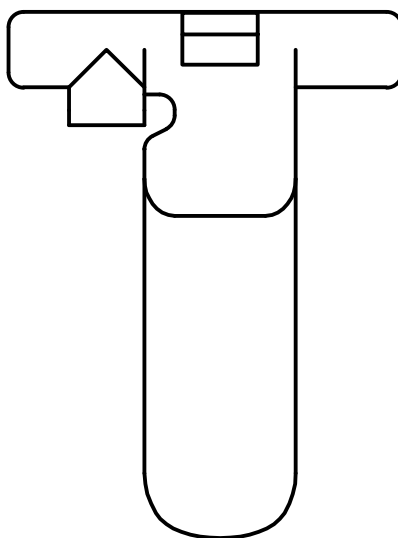
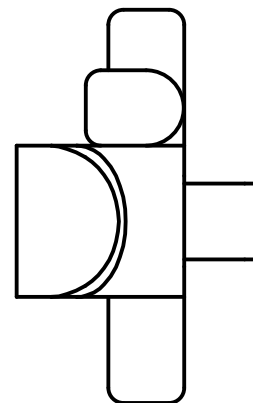
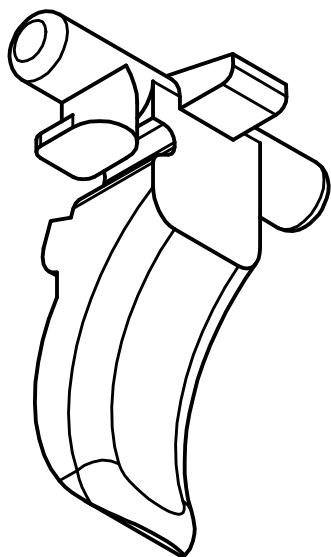
E-E (2 : 1)



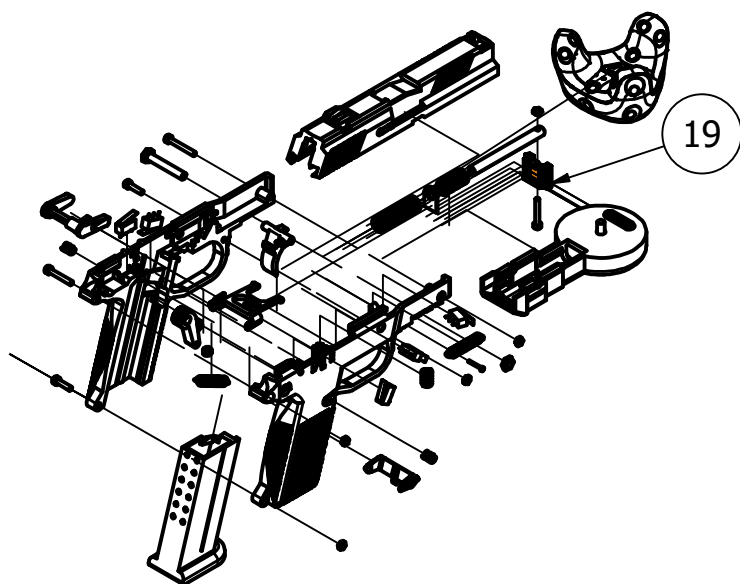
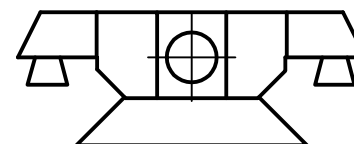
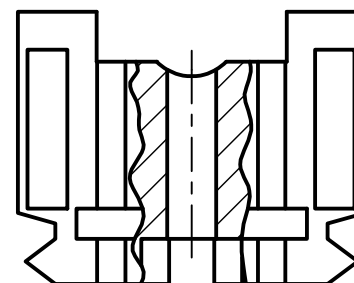
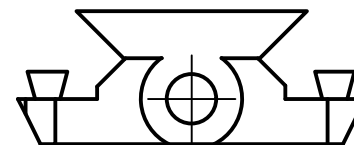
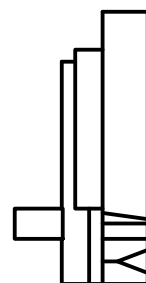
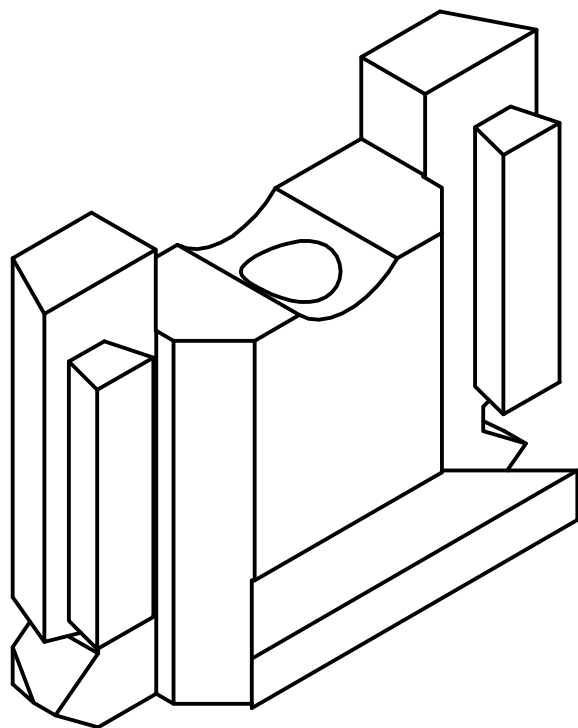
A-A (2 : 1)



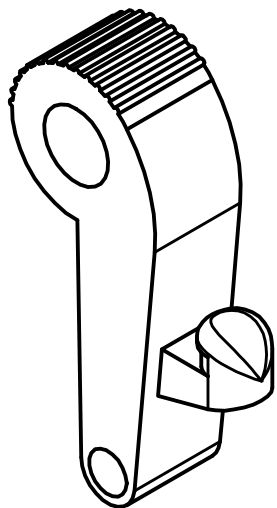
Nº de plano: 15		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la retenida de la corredera	
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



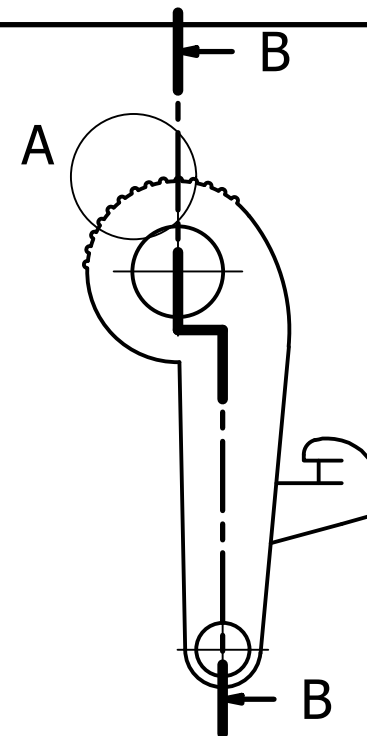
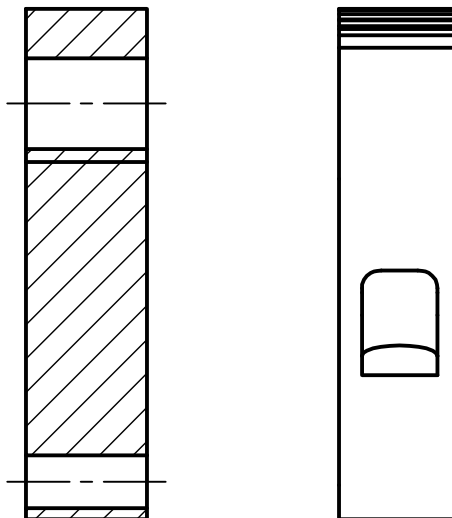
Nº de plano: 16		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la cola del disparador	
Escala 2.1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



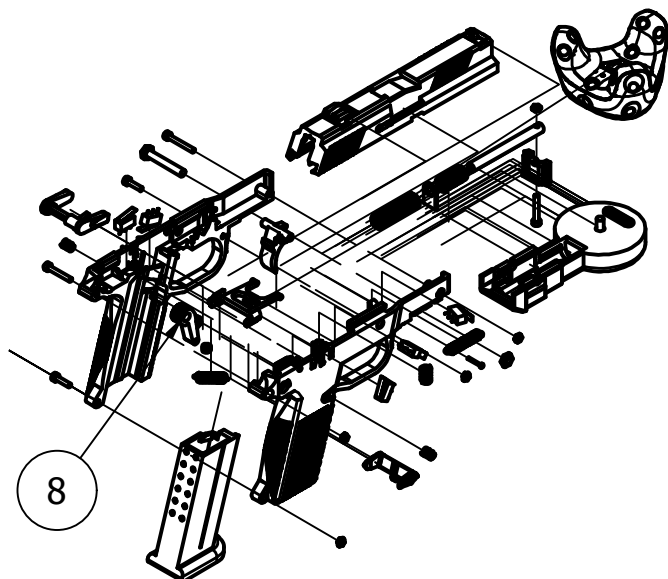
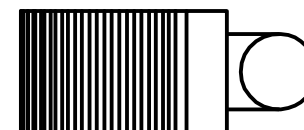
Nº de plano: 17		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece de la placa delantera del cuerpo del pistolete	
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



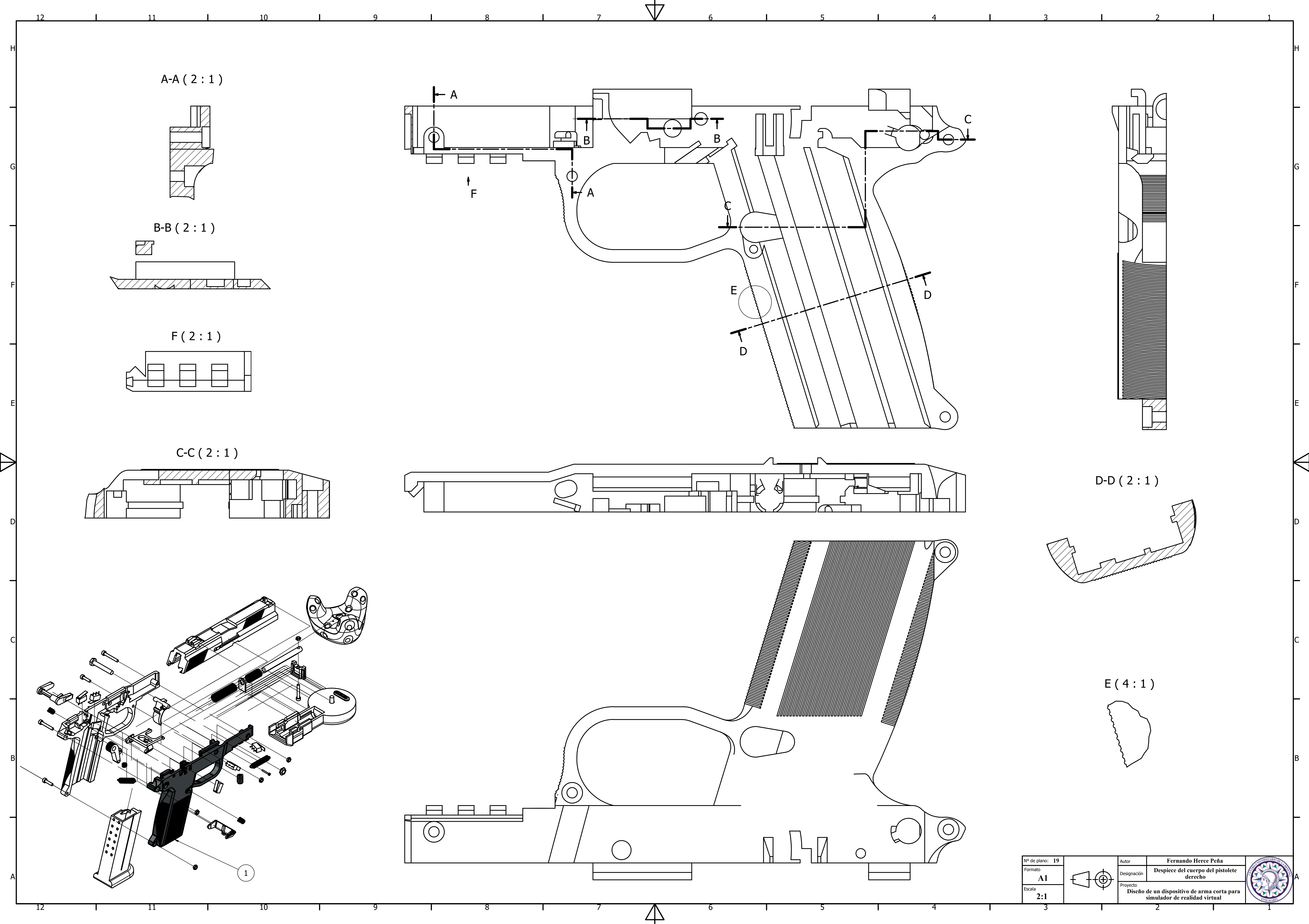
B-B (2 : 1)



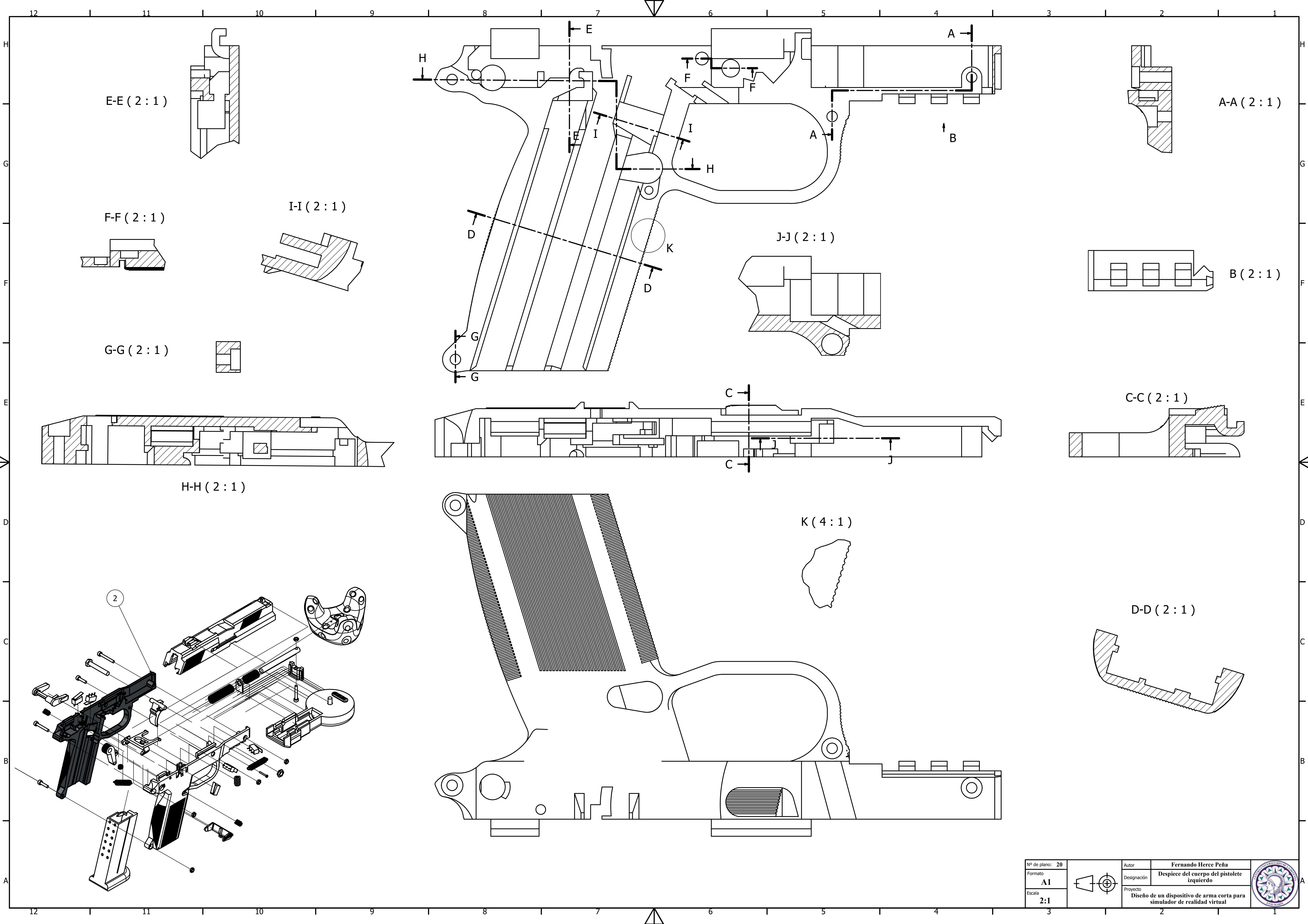
A (4 : 1)



Nº de plano: 18		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato A4		Designación	Despiece del martillo	
Escala 2:1		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	



Nº de plano: 19		Autor	Fernando Herce Peña	
Formato		Designación	Despiece del cuerpo del pistolete derecho	
Escala		Proyecto	Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual	
A1				
2:1				



4.3 Fabricación y montaje

Tras el diseño de la réplica, otro de los frutos obtenidos es la fabricación de un modelo físico de la pistola. Para ello se han impreso las piezas diseñadas mediante impresión 3D con las técnicas, impresoras y materiales especificados en el apartado 3.5.

Tras la impresión de las piezas se ha comprobado que se ajustaban a las dimensiones y tolerancias del diseño de manera satisfactoria. Para ello se han medido la longitud y la altura de la réplica y del arma real ya que, al ser las principales medidas de estas, son aquellas en las que el posible error acumulado del diseño de múltiples piezas se vería más marcado.



Figura 4-4 - Comparación entre la longitud de la FN-P9-17 (izquierda) y la de la réplica (derecha)

Como se puede ver en la Figura 4-4, la FN-P9-17 tiene una longitud total de 190mm mientras que la réplica tiene una longitud total de 186mm. De esta manera, el error en longitud es de 4mm, que supone una fiabilidad del 97,89% en dicha dimensión.

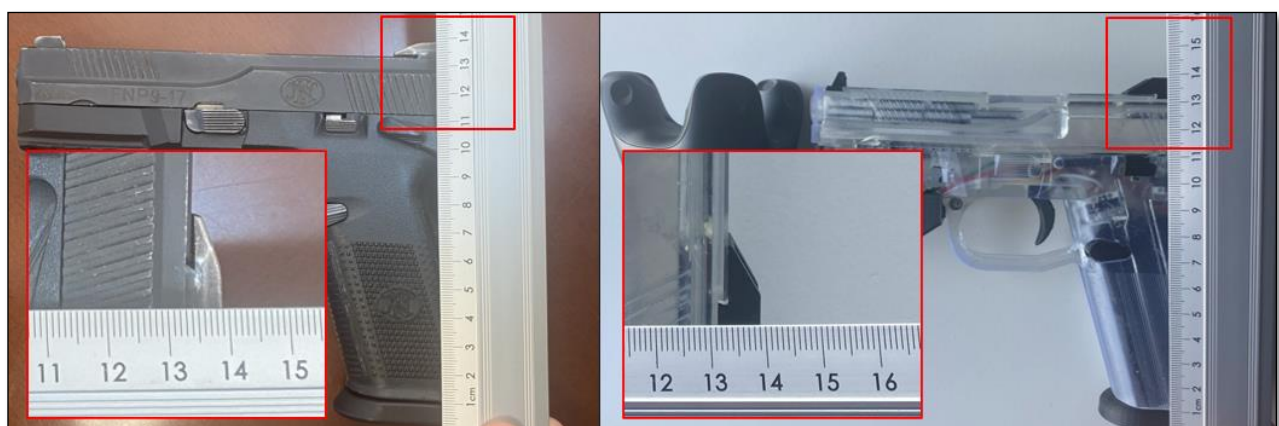


Figura 4-5 – Comparación entre la altura de la FN-P9-17 (izquierda) y la de la réplica (derecha)

En este caso, se puede ver (Figura 4-5) que tanto la pistola real como la réplica tienen una altura de 139mm, con lo que en este caso la fiabilidad dimensional es cercana al 100%. De esta manera, se puede comprobar que se trata de una réplica fiel al modelo original dimensionalmente. Esto se ha logrado principalmente a la precisión obtenida al imprimir las piezas de mayor tamaño (cuerpo del pistolete y corredera) en SLA, caracterizada por su gran resolución.

Tras ello se ha procedido al montaje e instalación de los elementos eléctricos (Figura 4-6) y a la posterior comprobación de su correcto funcionamiento mediante un polímetro. Para aumentar la durabilidad de los elementos eléctricos, se reforzaron las soldaduras con puntos de epoxi.

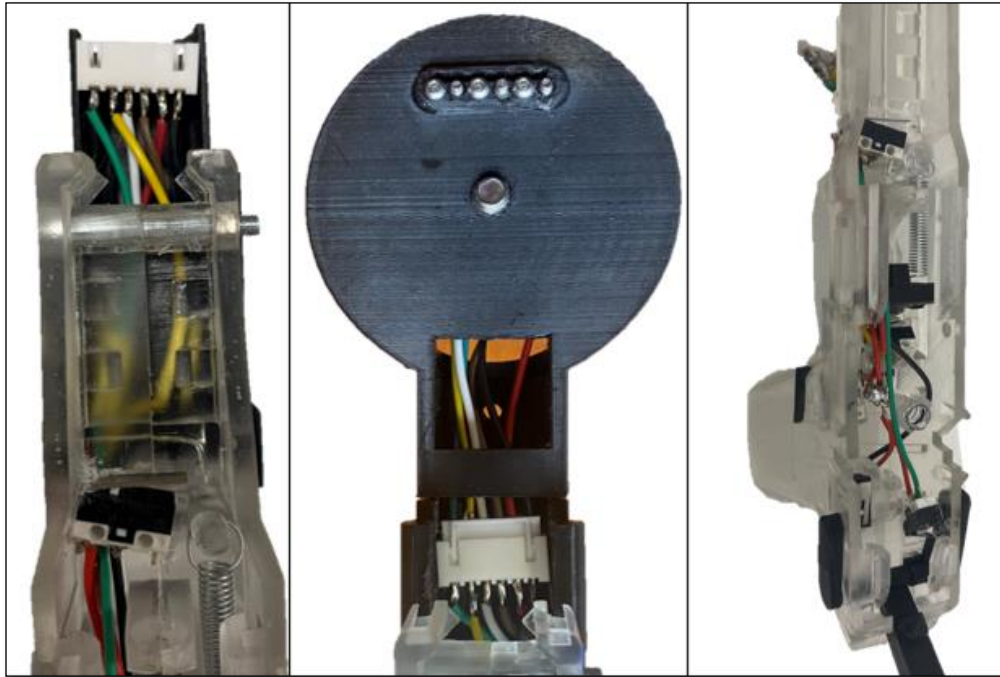


Figura 4-6 – Detalles de la instalación eléctrica en el soporte del *tracker* y en el pistolete

4.3.1 *Peso y centro de gravedad de la réplica*

Finalmente, y previamente a terminar el montaje de la pieza, se instalaron los lastres en la corredera y el cargador tal y como viene indicado en el apartado 3.6, tras lo cual se procedió a pesar la réplica con todos sus componentes.

Tanto para el pesaje como para el cálculo del centro de gravedad se incluyó el tracker ya que este estará presente cuando el tirado haga uso de la réplica, afectando a la sensación que el usuario reciba durante la simulación.



Figura 4-7 – Pesaje de la réplica

Como se puede ver en la Figura 4-7, la réplica final pesa 544,5g frente a los 907g del arma original con munición. Por lo tanto, no se ha logrado dotar a la réplica del peso de la pistola, siendo 362,5g más ligera, o lo que es lo mismo, siendo el peso del dispositivo igual al 60,04% del peso del arma original.

Para comprobar si este resultado es satisfactorio, hemos creado en *Inventor* el modelo 3D del negativo de la corredera y el cargador y, haciendo que el material sea acero (como el de nuestros lastres). Haciendo un ensamble de dichos negativos con sus piezas respectivas hemos visto que la corredera al 100% de ocupación pesaría 223g y que el cargador pesaría 188g. Hemos pesado las versiones impresas de estas piezas ya lastradas (Figura 4-8 y Figura 4-9), obteniendo pesos de 121,5g para la corredera y 165g para el cargador. Esto nos otorga porcentajes de ocupación del 54,48% para la corredera y del 87,76% para el cargador.

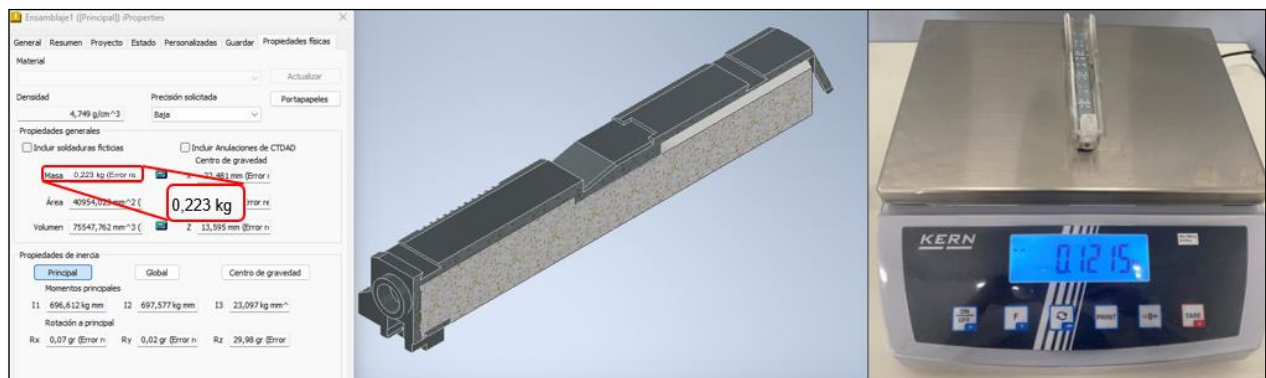


Figura 4-8 – Comparación lastrado de la corredera frente al 100% de ocupación de esta

De esta manera, podemos establecer que el porcentaje de ocupación del espacio disponible medio para el lastrado de la pieza ha sido del 71,12%. La principal razón de que este número no sea mayor es la presencia de múltiples mecanismos en la réplica (como el martillo) que han impedido la ocupación total de la corredera. No obstante, con una ocupación del 100% se habría logrado un peso total de 669g, inferior al del arma real. De esta manera, se puede observar la dificultad de lograr el lastrado adecuado con los materiales de los que disponemos.

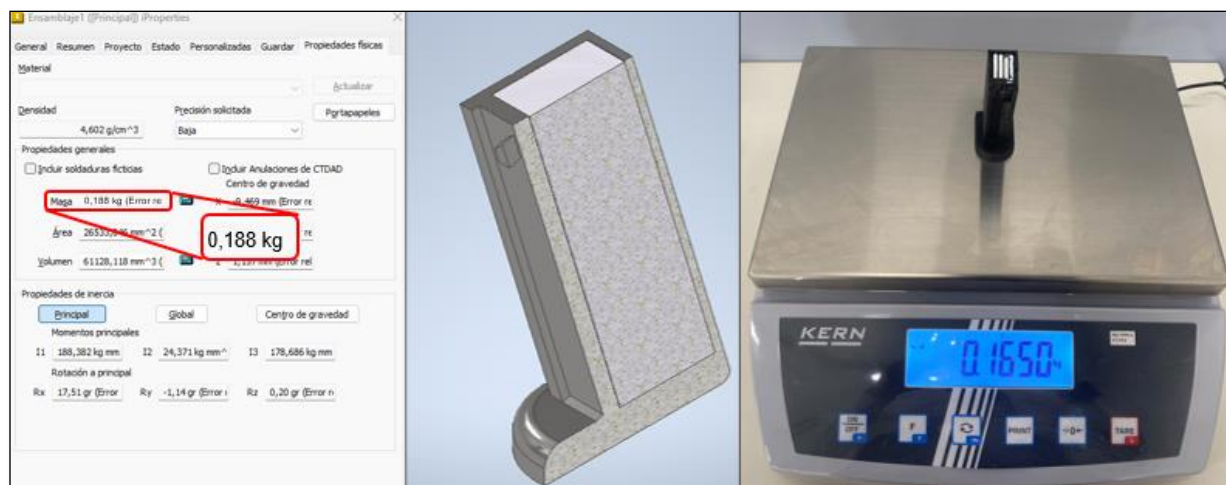


Figura 4-9- Comparación del lastrado del cargador frente al 100% de la ocupación de este

Respecto a la comparación de la posición del centro de gravedad, se ha realizado colgando el arma real y la réplica de un cabo fino en su posición de equilibrio y midiendo la posición de este respecto a la boca del cañón. No se ha calculado la posición del CDG respecto a la profundidad ya que consideramos que la distribución de los pesos es prácticamente simétrica y que el desvío del CDG respecto al plano longitudinal es despreciable tanto en el arma como en la réplica.

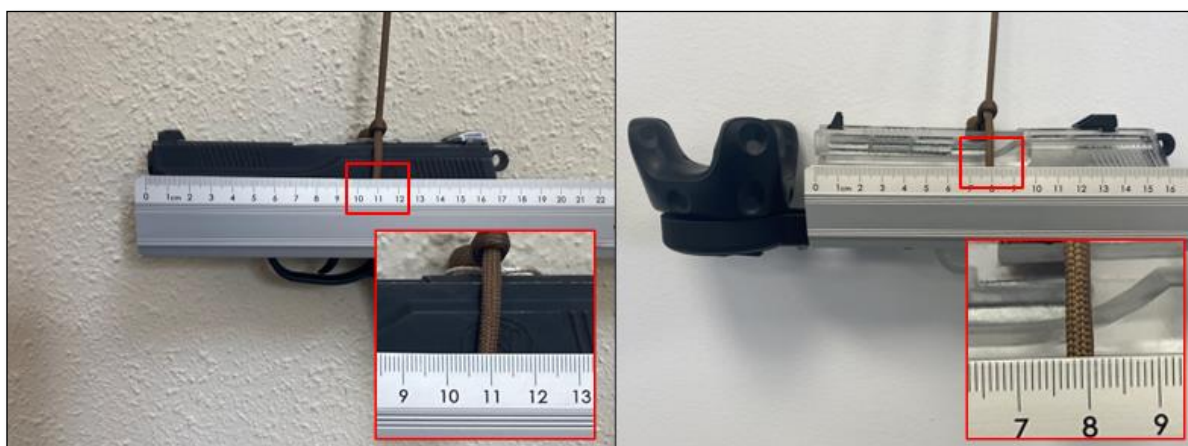


Figura 4-10 – Comparación de la posición del CDG en la FN-P9-17 frente a la réplica

Como se puede ver en la Figura 4-10, el CDG se encuentra aproximadamente a 11cm de la boca del cañón en la FN-P9-17 y a 8cm aproximadamente en la réplica. Esta diferencia de 3cm supone una fiabilidad del 84,21% al compararla con la longitud total de 19cm del arma. Aunque la precisión de este método es baja, basta para cerciorar que el CDG de la réplica se encuentra desplazado sensiblemente hacia delante respecto a la del arma real, provocando que el equilibrio del tirador no sea exactamente el mismo con ambos dispositivos.

La razón de esta diferencia radica en que en la acumulación de pesos en la zona frontal de la réplica. Ahí se agrupan un gran número de tornillos y muelles, así como la guía del muelle recuperador (que es metálica), componentes eléctricos y, sobre todo, el *tracker* y los elementos que lo sustentan, muy alejados estos de la posición del CDG del arma original.

A continuación, podemos ver múltiples imágenes en las cuales se aprecia la similitud en las formas entre el arma real y la réplica:



Figura 4-11 – Comparación visual de la réplica frente a la FN-P9-17

Como se puede ver en la imagen, ambos dispositivos guardan una gran similitud. La mayor diferencia radica en la presencia del *tracker* y su soporte. No obstante, estos, al ser necesarios para la conexión con el simulador, no han podido ser obviados. Respecto a la pistola en sí, guardan un gran

parecido, siendo las mayores diferencias la curvatura de la empuñadura y aspectos estéticos como el patrón del corrugado o la presencia del logo de FN y los números de serie del arma distribuidos a lo largo de la FN-P9-17.



Figura 4-12 - Vista lateral de la réplica y la pistola real

Así mismo, cabe destacar el parecido tanto en la posición como en dimensión y funcionalidad de la mayoría de mecanismos de la pistola real. No obstante, hay que recordar que se ha decidido no reproducir el funcionamiento de la retenida delantera de la corredera por los motivos explicados en el apartado 3.2.7, siendo esta, en la réplica, parte del cuerpo del pistolete.

4.4 Coste de fabricación

En este apartado se detallarán el presupuesto asociado a la fabricación de la réplica. El gasto definitivo se estimará a partir del coste los materiales de impresión, el gasto de la electricidad empleado por las impresoras y los materiales necesarios para completar el montaje.

En el caso de las piezas impresas, se ha calculado su gasto basándose en el material necesario para imprimirlas y el gasto de la electricidad asociado al tiempo de impresión necesario para cada pieza individual. Se ha estimado el precio del PLA en 25€/kg [29], el de la *ABS-Like Resin Pro* en 44€/kg [28] y el precio de la electricidad en 0,11751 €/kWh⁸. En el resto de las piezas, el gasto es simplemente aquel debido a su adquisición.

Para un desglose más detallado, consulte el Anexo IV: Presupuesto detallado.

Gastos de fabricación:		
Diseño de un dispositivo de arma corta para simulador de realidad virtual		
Potencia impresora	<i>Elegoo Saturn</i>	300W
	<i>Creality Ender-5</i>	480W
Coste por unidad	<i>PLA</i>	25€/kg
	<i>ABS-Like Resin Pro</i>	44€/kg
	Electricidad	0,11751 €/kWh

Tabla 2 - Gastos de fabricación

⁸ Se ha tomado como referencia el precio medio de la luz de febrero de 2023 [40].

Nº Ref	Nombre pieza	Uds.	Peso (g)	Tiempo de impresión (h)
1	Tapa soporte hembra del <i>tracker</i>	1	17	1,73
2	Soporte hembra del <i>tracker</i>	1	38	5,32
3	Soporte macho del <i>tracker</i>	1	18	3,43
4	Corredera	1	38	1
5	Mira delantera	1	2	0,12
6	Mira trasera	1	3	3,17
7	Botón derecho retenida del cargador	1	2	0,18
8	Botón izquierdo retenida del cargador	1	2	0,18
9	Pieza central retenida del cargador	1	3	0,25
10	Pieza izquierda del seguro	1	4	0,4
11	Pieza derecha del seguro	1	3	0,58
12	Platillo del muelle recuperador	1	1	0,05
13	Cargador	1	32	6,97
14	Retenida de la corredera	1	6	0,58
15	Cola del disparador	1	4	0,62
16	Placa delantera del cuerpo del pistolete	1	3	0,4
17	Martillo	1	4	0,55
18	Cuerpo del pistolete derecho	1	71	1
19	Cuerpo del pistolete izquierdo	1	72	1
20	Placa separadora	1	1	0,05
Cantidad:		20	324	27,58

Tabla 3 - Desglose de características de las piezas impresas

Resumen de gastos:

Concepto	Euros
Capítulo 1: Gasto en material de impresión	10,27
Capítulo 2: Gasto de la electricidad por pieza	1,27
Capítulo 3: Gasto en materiales de uso y montaje	176,03
GASTO TOTAL:	187,57

Tabla 4 - Resumen de gastos

El presupuesto total asciende a la cantidad expresada de CIENTO OCHENTA Y SIETE EUROS con CINCUENTA Y SIETE CÉNTIMOS.

4.5 Implementación

En la etapa final del trabajo se ha trabajado con el software de *Steam VR* para lograr la conexión entre la réplica y el simulador, familiarizándose el alumno con dicho software.

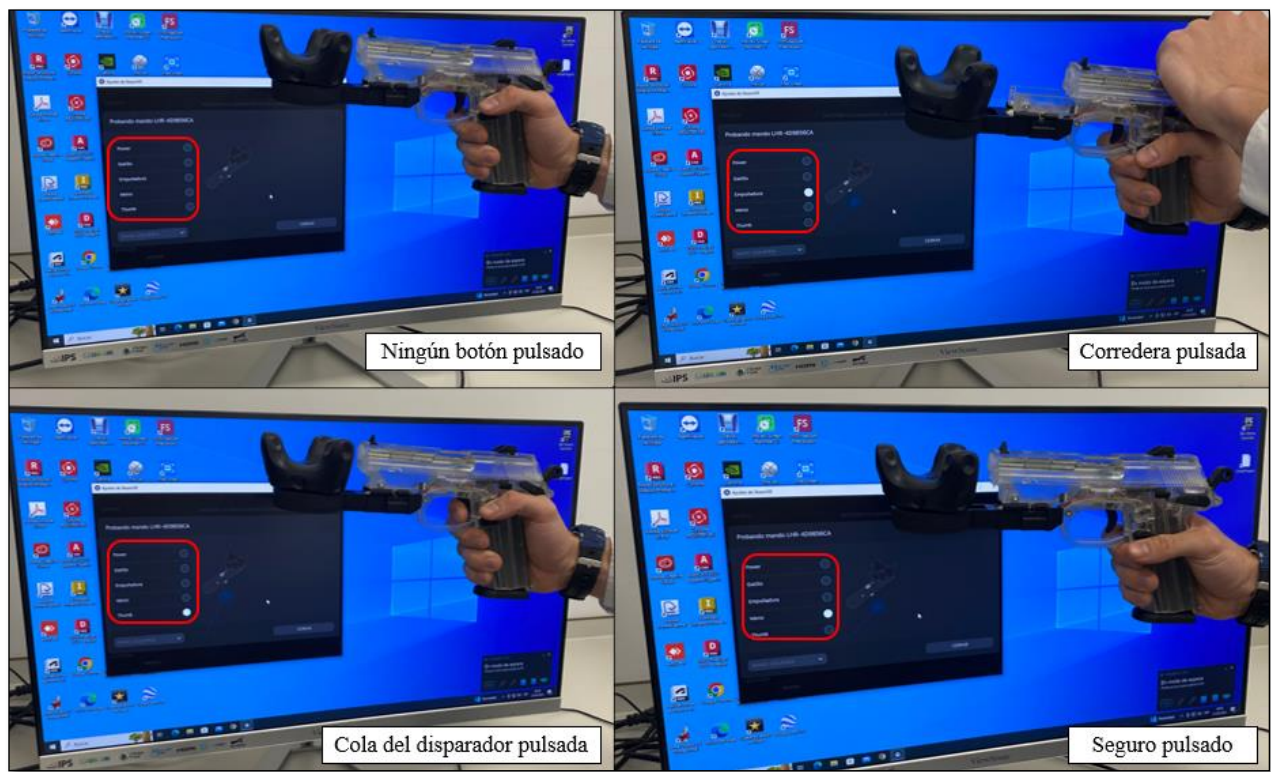


Figura 4-13 – Comprobación de la integración de la réplica en el simulador

Como se puede ver en la Figura 4-13, al no haber ningún mecanismo activado, no se ilumina ningún botón del *Steam VR*. No obstante, al accionarse cualquiera de los *Microswitch 12*, la señal se retransmite satisfactoriamente al simulador, reflejándose en la pantalla. El resultado es satisfactorio en todos los mecanismos de la réplica, no obstante, se han incluido los que aparecen en la imagen a modo de ejemplo.

Por lo tanto, se ha logrado vincular de manera satisfactoria la réplica al simulador de realidad virtual del CUD, cumpliendo así el objetivo último de servir para el adiestramiento individual de combate de los alumnos de la Escuela Naval Militar.

5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

5.1 Descripción del apartado

En este apartado se analizarán los resultados a la vista de los objetivos iniciales del proyecto (apartado 1.4). Después se expondrán brevemente las posibles líneas futuras que continúen las líneas de investigación del presente trabajo.

5.2 Conclusiones de los objetivos iniciales

5.2.1 *Objetivo principal: diseño*

Mediante métodos manuales, se han dimensionado los elementos de la FN-P9-17 que pueden ser reconocibles por el tirador o con los que este interactúa. Mediante ingeniería inversa se ha reproducido un modelo digital de dicha arma la cual, una vez impresa, ha demostrado ser fiel dimensionalmente a la pistola real, con una fiabilidad del 97,89% en la longitud y cercana al 100% en la altura (las dimensiones con un mayor error acumulado).

Además, se ha logrado replicar fielmente las características estéticas y geométricas del arma, siendo fácilmente reconocible el dispositivo como una réplica de la FN-P9-17. Destaca la presencia del *tracker* y su soporte, los cuales son ajenos al arma real.

Respecto al peso, no se ha logrado que la réplica reproduzca el peso exacto del arma, siendo nuestro dispositivo diseñado 365,2g más ligero que la pistola real. Así mismo, el centro de gravedad de la réplica se encuentra aproximadamente 3cm por delante de su homólogo en la FN-P9-17. Todo esto provoca que las sensaciones en el empleo del dispositivo no sean exactamente iguales que las del arma real. Las principales razones, explicadas en profundidad en el apartado 4.3.1 son la limitación materiales y espacio y la acumulación del peso en la zona frontal del arma (principalmente por la presencia del *tracker* y sus elementos).

Por último, se ha logrado que el dispositivo replique el funcionamiento de varios de los mecanismos del arma real. De esta manera, cuenta con sistemas básicos como la cola del disparador, o el cargador y su retenida y el seguro. No obstante, además de estos se han implementado el movimiento de la corredera y la retenida de la misma. Esto permite un mayor realismo al cargar el arma, así como posibilita adiestramientos avanzados como la solución de fallos de fuego.

De esta manera, se considera cumplido satisfactoriamente el objetivo del proyecto de diseñar una réplica funcional de la FN-P9-17 para un simulador de realidad virtual. Además, una vez cumplido el objetivo principal propuesto, se ha continuado el desarrollo y se han cumplido los dos objetivos complementarios planteados en el apartado 1.4.

5.2.2 Objetivo complementario: fabricación y montaje

Se ha logrado fabricar la totalidad de las 20 piezas diseñadas, de las cuales todas menos una han sido creadas mediante impresión 3D. Además, se ha logrado adecuar el método de impresión y el material a las vicisitudes de cada pieza, lográndose una alta precisión dimensional en las mismas.

Respecto al montaje, se ha logrado un diseño que posibilita el montaje y desmontaje sencillo de la misma, facilitando las labores mantenimiento y reparación que fueran necesarias. Para ello se ha empleado una variedad de elementos normalizados. El proceso de montaje ha sido crucial durante el desarrollo del producto y, de esta manera, ha condicionado la forma final de la totalidad de los mecanismos de la pistola.

Finalmente, se han instalado cinco sensores *Microswitch 12* que recogen las manipulaciones que el tirador hace en el arma. Se ha realizado la instalación eléctrica necesaria para que las señales de dichos sensores lleguen al *Vive Tracker 3*.

De esta manera, se ha logrado fabricar un modelo físico y funcional de la réplica, en el cual todos los mecanismos diseñados funcionan correctamente y que permiten el montaje del circuito eléctrico correspondiente, cumpliendo así el primer objetivo complementario del proyecto.

5.2.3 Objetivo complementario: conectividad

Finalmente, se ha logrado integrar el *Vive Tracker 3* en el diseño del arma de manera satisfactoria, de manera que las señales de los sensores de la réplica llegaran adecuadamente a este. Se ha enlazado el *tracker* con el software de simulación *Steam VR* adecuadamente y que las señales de los *Microswitch 12* lleguen a dicho software adecuadamente.

De esta manera, se ha conseguido conectar la réplica a *Steam VR*, cumpliendo el segundo objetivo complementario del proyecto.

Así pues, se ha logrado diseñar una réplica funcional de la FN-P9-17, la cual ha sido fabricada e conectada satisfactoriamente al software del entorno virtual. Gracias a ello se ha logrado dotar a la Armada de un medio funcional de adiestramiento para el combate con arma corta para los alumnos de la ENM, quedando cumplimentados todos los objetivos (principales y complementarios) del presente trabajo de fin de grado.

5.3 Líneas futuras

Para lograr un mejor adiestramiento del tirador mediante una experiencia más inmersiva y real en el simulador, se han determinado estas líneas futuras como continuación del presente proyecto:

- Lastrado: como se ha visto en el apartado 4.3.1, no se ha logrado recrear de manera exacta el peso ni la posición del centro de gravedad del arma, en gran medida por las limitaciones de los materiales. De esta manera, la primera línea de desarrollo consistiría en lograr un adecuado lastrado de la réplica, así como una buena distribución de este. Para ello se podrían emplear materiales distintos a los usados en el presente proyecto o incluso fabricar la corredera de metal, tal y como ocurre en el arma real.
- Retroceso: pese a que la réplica cuenta con corredera móvil, no se ha logrado generar el retroceso de la corredera en cada disparo. De esta manera, realizar dicho movimiento de manera realista sería una de las grandes mejoras del presente proyecto. Esto un mayor realismo al permitir al tirador adiestrarse un mejor agarre del arma y el control de esta entre disparo y disparo, elemento fundamental del adiestramiento en armas de fuego.
- Compatibilidad con accesorios del arma real: el uso de las pistolas en el mundo militar está definido de manera determinante por los accesorios de este tipo de armas cortas, como pueden ser las pistoleras, la primera línea, etc. De esta manera, la modificación de la réplica para hacerla compatible con estos elementos permitiría al tirador hacer uso de su

equipo personal en el simulador, logrando así una experiencia mucho más cercana a las experiencias reales que afrontará.

- Creación del modelo digital del arma: una de las grandes trabas que actualmente afronta la réplica en su integración en el simulador es que carece de un modelo digital específico. El desarrollo debería buscar que las interacciones que actualmente el dispositivo posibilita (como montar el arma) se vean reflejadas en la realidad virtual, logrando una mayor inmersión del usuario.

6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. E. Benavides, «Impresión 3D en buques de la Armada,» *Revista General de Marina*, vol. 281, nº 5, pp. 969-974, Diciembre 2021.
- [2] J. L. G. Benavides, «La simulación militar en España (1),» 26 Diciembre 2022. [En línea]. Available: <https://www.revistaejercitos.com/2022/12/26/la-simulacion-militar-en-espana-i-el-ejercito-de-tierra/>.
- [3] Rapid Direct, «What Is CMM Machine: Components, Uses, and Benefits,» 13 Marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.rapiddirect.com/blog/what-is-cmm-machine/>. [Último acceso: 08 Febrero 2023].
- [4] J.-F. Emmrich, «What Is Structured Light Scanning?,» [En línea]. Available: <https://blog.medit.com/medit/what-is-structured-light-scanning>. [Último acceso: 08 Febrero 2023].
- [5] Asociación clúster de automoción de Navarra, «La industria 4.0: Tecnologías habilitadoras,» [En línea]. Available: <https://clusterautomocionnavarra.com>. [Último acceso: 24 Enero 2023].
- [6] ITCL, «Aplicaciones de sistemas de simulación en la industria,» 4 Septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://itcl.es/blog/para-que-sirven-los-sistemas-de-simulacion/>. [Último acceso: 24 Enero 2023].
- [7] University of the West Indies, «UWI-Ramphal Cardiac Simulator,» [En línea]. Available: <https://www.mona.uwi.edu/mori/content/uwi-ramphal-cardiac-simulator>. [Último acceso: 30 Enero 2023].
- [8] F. H. Tomasa Centella, «Entrenamiento basado en la simulación: un cambio necesario en la formación de nuestra especialidad,» Elsevier, Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.elsevier.es>. [Último acceso: 30 01 2023].
- [9] K. T. Ed Himma, «Virtual reality and computer simulation,» 2008. [En línea]. Available: <https://ris.utwente.nl>. [Último acceso: 2023 Enero 2023].
- [10] A. B. Samčović, «Serious games in military applications,» Julio 2018. [En línea]. Available: <https://www.researchgate.net/publication>. [Último acceso: 2 Febrero 2023].
- [11] Dirección General de Armamento y Material, «Jornada tecnológica: simulación en el ámbito de

defensa,» de *Monografías del SOPT*, 2018.

- [12] P. A. Rogers, «Force-on-Force Training With LMS Defense,» *Survivor! Weapons And Tactics*, [En línea]. Available: <https://www.swatmag.com/article/force-on-force-training-with-lms-defense/>. [Último acceso: 2023 Febrero 01].
- [13] Instalaza, «Entrenamiento en Aula y en Campo para todos los sistemas de Instalaza,» Instalaza, [En línea]. Available: <https://instalaza.com/producto/sistemas-de-entrenamiento/>. [Último acceso: 1 Febrero 2023].
- [14] Chano shooting, «Simuladores de tiro Scatt,» [En línea]. Available: <https://chanoshooting.com/simuladores-de-tiro-scatt/>. [Último acceso: 02 Febrero 2023].
- [15] Real Academia Española, «Enclave de Ciencia,» Ministerio de Ciencia e Innovación, [En línea]. Available: <https://enclavedeciencia.rae.es>. [Último acceso: 31 Enero 2023].
- [16] Iberdrola, «Virtual reality: another world within sight,» [En línea]. Available: <https://www.iberdrola.com/innovation/virtual-reality>. [Último acceso: 31 Enero 2023].
- [17] ST Engineering Antycip, «VR CAVE: Virtual reality,» [En línea]. Available: <https://steantycip.com/vr-cave/>. [Último acceso: 06 Febrero 2023].
- [18] X. Y. Oluleke Bamodu, «Virtual Reality and Virtual Reality System Components,» Staffordshire University, 2013.
- [19] Thrilluwu, 30 Mayo 2022. [En línea]. Available: <https://twitter.com/Thrilluwu>. [Último acceso: 25 Febrero 2023].
- [20] KAT-VR, «KAT Walk C 2,» [En línea]. Available: <https://www.kat-vr.com/products/kat-walk-c2>. [Último acceso: 6 Febrero 2023].
- [21] Meta, «Meta Quest Pro,» [En línea]. Available: <https://www.meta.com/es/en/quest/quest-pro/>. [Último acceso: 07 Febrero 2023].
- [22] B. Lang, «Vive Tracker Capabilities Detailed in Developer Documentation,» Road to Vr, 31 Enero 2017. [En línea]. Available: <https://www.roadtovr.com/vive-tracker-capabilities-detailed-developer-documentation/>. [Último acceso: 07 Febrero 2023].
- [23] Formlabs, «Guía definitiva sobre impresión 3D por estereolitografía (SLA),» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/guia-definitiva-estereolitografia-sla-impresion-3d/>. [Último acceso: 09 Febrero 2023].
- [24] Formlabs, «Guía de impresión 3D mediante sinterizado selectivo por láser (SLS),» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/que-es-sinterizado-selectivo-laser/>. [Último acceso: 10 Febrero 2023].
- [25] Formlabs, «Comparación de tecnologías de impresión 3D: FDM, SLA o SLS,» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/fdm-sla-sls-como-elegir-tecnologia-impresion-3d-adeuada/>. [Último acceso: 10 Febrero 2023].
- [26] EIMGAF, FN HERSTAL P9-17 DA/SA.
- [27] FN Herstal, «FNP9-M owner's manual,» 2005.
- [28] Anycubic, «Anycubic Resina ABS Pro,» [En línea]. Available: <https://www.anycubic.es/products/anycubic-resina-abs-pro>.

- [29] Impresoras3d.com, «PLA 850 Sakata 3D Negro,» [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/filamento/pla/x>.
- [30] Ministerio de Salud de Argentina, «Programa Nacional de Enfermedades Poco Frecuentes,» Argentina.gob.ar, [En línea]. Available: <https://www.argentina.gob.ar/salud/pocofrecuentes/definicion>. [Último acceso: 30 01 2023].
- [31] Vive, «SteamVR Base Station 2.0,» [En línea]. Available: <https://www.vive.com/eu/accessory/base-station2/>. [Último acceso: 07 Febrero 2023].
- [32] Ingenieros asesores, «Ingeniería inversa: concepto y aplicaciones,» 26 Julio 2022. [En línea]. Available: <https://ingenierosasesores.com/actualidad/ingenieria-inversa-concepto-aplicaciones/>. [Último acceso: 07 Febrero 2023].
- [33] Impresoras 3D.com, «Breve Historia de la impresión 3D,» 1 Enero 2018. [En línea]. Available: <https://www.impresoras3d.com/breve-historia-de-la-impresion-3d/>. [Último acceso: 09 Febrero 2023].
- [34] Acelera Pyme, «Usos y ventajas de la impresión 3D,» 17 Octubre 2022. [En línea]. Available: <https://acelerapyme.gob.es/novedades/pildora/usos-y-ventajas-de-la-impresion-3d>. [Último acceso: 09 Febrero 2023].
- [35] Instituto geográfico nacional, «¿Qué es la fotogrametría?,» [En línea]. Available: <https://www.ign.es>. [Último acceso: 08 Febrero 2023].
- [36] P. F. C. R. B. J. Á. Eduardo Cuesta, «Aplicaciones metrológicas de los láseres por triangulación,» 2005. [En línea]. Available: <https://digibuo.uniovi.es>. [Último acceso: 08 Febrero 2023].
- [37] I. T. Morales, «Diseño e impresión 3D de un dispositivo físico para simulación,» Centro Universitario de la Defensa (Marín), 2022. [En línea]. [Último acceso: 2023].
- [38] D. Wang, «Haptic display for virtual reality: progress and challenges,» 26 Enero 2019. [En línea]. Available: <https://www.sciencedirect.com/science>. [Último acceso: 3 Febrero 2023].
- [39] R. Brown, «VR-Compare: HTC Vive Tracker 3.0,» VR-Compare, [En línea]. Available: vr-compare.com/accessory/htcvivetracker3.0. [Último acceso: 03 Marzo 2023].
- [40] VIVE, «Using the dongle,» 2018. [En línea]. Available: www.vive.com.
- [41] OCU.org, «El precio de la luz repunta en febrero,» 01 Marzo 2023. [En línea]. Available: <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/gas-luz/informe/precio-luz>.

ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, ECONÓMICAS, Y AMBIENTALES

En el presente proyecto se ha tratado el diseño y fabricación de una réplica de la pistola de dotación de la Armada para su uso en simuladores de realidad virtual. De los beneficios generales de la simulación en las fuerzas armadas se ha hablado extensivamente en el apartado 2.3.1.

No obstante, las posteriores secciones del proyecto se han centrado en la definición técnica del diseño y fabricación de la réplica, sin dar pie a las implicaciones sociales, económicas y ambientales del mismo al implicar el tratar estas un paréntesis al desarrollo del trabajo. No obstante, en el presente anexo se desarrollarán dichas implicaciones

- **Implicaciones sociales**

La principal y más evidente implicación social de este proyecto es que facilita el adiestramiento de los miembros de las fuerzas armadas en el uso de armamento individual. Estas, como principal garante de la seguridad de nuestra sociedad ante amenazas externas, tienen el deber de entrenarse en su empleo de la manera más similar posible a una situación de combate. Al estar diseñada para su empleo en un simulador de realidad virtual, la réplica resultante del presente proyecto ofrece un medio magnífico para que el combatiente se adiestre en toda clase de escenarios inmersivos, facilitando en última instancia la protección y seguridad de los ciudadanos de nuestra sociedad. Además, el uso de la réplica no tiene por qué limitarse a los miembros de la milicia, si no que puede ser empleada por el resto de cuerpos y fuerzas de seguridad del estado.

Su uso también podría ser aplicado al mundo civil, como un primer contacto con las armas de fuego del ciudadano de a pie. De esta manera, las personas que quisieran emplear un arma podrían usar esta réplica para conocer el funcionamiento del arma real y aprender los conceptos básicos de empleo de estas, como las normas de seguridad. De esta manera, el usuario tendría la opción de dar sus primeros pasos en el empleo de armas cortas sin correr ninguno de los riesgos que el empleo de estas implica. Así pues, este dispositivo podría ser empleado como elemento principal de un hipotético curso de formación en el empleo de armas de fuego para aquellos que, sin experiencia militar o policial previa, quisieran comprar una.

Finalmente, la memoria del presente proyecto resume el proceso estudio y diseño mediante ingeniería inversa, fabricación montaje y conectividad de un objeto real. De esta manera, el presente documento puede servir de apoyo para aquellos embarcados en un proyecto similar, favoreciendo el aprendizaje de las futuras generaciones.

- **Implicaciones económicas**

El empleo de la simulación también trae múltiples ventajas económicas. La primera de ella es que el coste de la réplica, estimado en 187,57€ es menor que la gran mayoría de las armas cortas reales, que no suele descender de los 250€. De esta manera, esta réplica es una alternativa más económica al empleo de armas reales en el adiestramiento del personal.

Además, el empleo de armas reales implica el consumo de munición de guerra o de fogeo, con los costes que esto implica. Esto se cumple también para la gran mayoría de réplicas que pueden ser empleadas en el adiestramiento de tiradores (como es el caso de las réplicas de *airsoft*). Sin embargo, en el caso de esta réplica no es necesario ningún tipo de consumible para ejercitarse en el tiro, de manera que los gastos asociados a esta terminan al finalizar la fabricación de sus piezas.

Finalmente, al ser empleada en un simulador de realidad virtual, el presente dispositivo permite adiestrarse en una gran variedad de situaciones y escenarios de gran realismo y complejidad sin los costes asociados que implicarían realizar los mismos ejercicios con armas reales (edificaciones específicas, personal, transporte, etc).

- **Implicaciones ambientales**

Por último, el presente proyecto también conlleva ciertas implicaciones ambientales. La primera de ellas es que evita que se dispare munición real. De esta manera, se evita la deflagración de los

materiales químicos de la carga de propulsión, impidiendo la liberación de gases y sustancias nocivas al medioambiente. Además, los disparos también generan contaminación lumínica y sonora que pueden afectar a la fauna local y que se evitan al emplearse un simulador de tiro.

Además, no se generan los desechos que comúnmente se asocian a ejercicios de tiro, como pueden las vainas o los proyectiles disparados. Estos, al estar compuestos de metales y aleaciones, son un objeto extraño a los ecosistemas comunes, por lo que el adiestramiento alternativo en un simulador ayuda a reducir nuestra huella en el medio ambiente.

Por otro lado, los campos de tiro son superficies extensas cuyas dimensiones deben contemplar un margen de seguridad para evitar cualquier posible accidente debido a un disparo perdido. Además, en estos terrenos se tala la flora local, para denegar la posibilidad de que se genere un incendio por accidente. Por el contrario, el adiestramiento mediante simulación puede realizarse en prácticamente cualquier habitación interior sin necesidad de afectar la fauna y la flora local de grandes extensiones.

Finalmente, no todo es perfecto en el proyecto actual. Los materiales empleados son principalmente de origen artificial y no son reciclables. No obstante, el avance en las tecnologías de impresión 3D facilitan que próximamente puedan emplearse materiales biodegradables para la fabricación del arma, logrando así una total implicación con el medioambiente, el cuidado de la fauna y la flora local, y la lucha contra el cambio climático.

ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES

Como se ha detallado en el anexo anterior, las consecuencias sociales de la simulación han sido tratadas en el apartado 2.3. No obstante, no ha sido posible seguir desarrollándolas en las siguientes secciones al implicar un alto en el desarrollo del proyecto, de naturaleza puramente técnica. No obstante, en el presente anexo se desarrollará someramente las consecuencias ético-sociales que este proyecto puede implicar.

En primer lugar, este proyecto aporta su granito de arena en la instrucción y adiestramiento de los miembros de las fuerzas armadas y de los cuerpos y fuerzas de seguridad del estado. Gracias a ello, humildemente contribuye que los defensores de nuestra sociedad estén más capacitados para actuar en situaciones demandantes, contribuyendo de manera última a la seguridad de nuestra sociedad.

Además, esta réplica puede ser empleada como el primer contacto con un arma para aquellos grupos sociales que tradicionalmente han estado más alejados del uso de las armas, como pueden ser los ancianos o el proletariado. De esta manera, mediante el uso de este dispositivo, integrado en un entorno de simulación, se puede lograr que aquellas personas que ven las armas con miedo o recelo aprendan las normas de seguridad asociadas de manera segura de manera que, conservando el respeto a las armas de fuego, puedan perder el miedo que originalmente tenían.

Este concepto puede continuarse en el ámbito de la enseñanza en entornos externos a los cuerpos y fuerzas de seguridad del estado. De esta manera, esta réplica puede emplearse en cursos de formación para aquellos ciudadanos que se planteen usar un arma. Mediante la simulación, se les puede impartir un curso previo de manera totalmente segura, y examinarles antes de la adquisición para así cerciorar que la venta de ese arma se está realizando a una persona capacitada.

En conclusión, aunque el dispositivo creado en este proyecto no contribuya de manera directa a las grandes causas sociales de nuestro tiempo, sí que aporta su granito de arena a que es la causa social más importante para aquellos que hemos elegido la carrera de las armas: la seguridad de nuestros conciudadanos. Además, podría ser empleado para favorecer el empoderamiento de aquellos que, sin experiencia previa, deseen adquirir su primera arma.

ANEXO III: MODELO DIGITAL INTERACTIVO



TÍTULO FN P9 3D

N.º DE PIEZA S/N

REVISIÓN CONFIRMADA

DISEÑADOR FERNANDO HERCE PEÑA

INGENIERO XAVIER NÚÑEZ NIETO

NOTAS

Modelo digital interactivo con diferentes vistas de caracterización proyectiva: realista, transparente, boceto, corte a la mitad y trama oculta. Pinchando con el ratón encima del modelo se puede manejar libremente en todas las dimensiones.

VISTAS DE MODELO

☐ Imprimir vistas seleccionadas

Por defecto

☐

LISTA DE PIEZAS		↑	↓	
NÚMERO DE PIEZ	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD		
Cuerpo de	N/A	1		
Cuerpo de	N/A	1		
Retenida	N/A	1		
Retenida	N/A	1		
Retenida	N/A	1		
Seleccion	N/A	1		
Seleccion	N/A	1		
Cola de d	N/A	1		
Soporte m	N/A	1		
Martillo	N/A	1		
Placa del	N/A	1		
MOSTRAR TODO	AISLAR	OCULTAR	MOSTRAR	APLICAR ZOOM

LA INFORMACIÓN O LOS MATERIALES DE ESTE DOCUMENTO SON PROPIEDAD E INFORMACIÓN RESTRINGIDA O MATERIALES DEL AUTOR. ESTA INFORMACIÓN NO SE PUEDE UTILIZAR, REPRODUCIR, PUBLICAR O REVELAR A TERCEROS SIN AUTORIZACIÓN POR ESCRITO. DEBE UTILIZARSE SOLO PARA LA FABRICACIÓN DE LOS ELEMENTOS ESPECIFICADOS EN EL DOCUMENTO.

ANEXO IV: PRESUPUESTO DETALLADO

Capítulo 1: Gasto en material de impresión

Nº Ref	Descripción	Uds.	Peso (g)	Precio por unidad (€)	Importe (€)
1	Tapa soporte hembra del <i>tracker</i>	1	17	0,31	0,31
2	Soporte hembra del <i>tracker</i>	1	38	0,70	0,70
3	Soporte macho del <i>tracker</i>	1	18	0,33	0,33
4	Corredera	1	38	1,60	1,60
5	Mira delantera	1	2	0,04	0,04
6	Mira trasera	1	3	0,06	0,06
7	Botón derecho retenida del cargador	1	2	0,04	0,04
8	Botón izquierdo retenida del cargador	1	2	0,04	0,04
9	Pieza central retenida del cargador	1	3	0,06	0,06
10	Pieza izquierda del seguro	1	4	0,07	0,07
11	Pieza derecha del seguro	1	3	0,06	0,06
12	Platillo del muelle recuperador	1	1	0,02	0,02
13	Cargador	1	32	0,59	0,59
14	Retenida de la corredera	1	6	0,11	0,11
15	Cola del disparador	1	4	0,07	0,07
16	Placa delantera del cuerpo del pistolete	1	3	0,06	0,06
17	Martillo	1	4	0,07	0,07
18	Cuerpo del pistolete derecho	1	71	2,98	2,98
19	Cuerpo del pistolete izquierdo	1	72	3,02	3,02
20	Placa separadora	1	1	0,04	0,04
Cantidad:		20	324	10,27	
Precio total:					10,27

Tabla 5 - Gasto en material de impresión

Capítulo 2: Gasto de la electricidad por pieza

Nº Ref	Descripción	Uds.	Tiempo de impresión (h)	Precio por unidad (€)	Importe (€)
1	Tapa soporte hembra del <i>tracker</i>	1	1,73	0,20	0,20
2	Soporte hembra del <i>tracker</i>	1	5,32	0,63	0,63
3	Soporte macho del <i>tracker</i>	1	3,43	0,40	0,40
4	Corredera	1	1	0,12	0,12
5	Mira delantera	1	0,12	0,01	0,01
6	Mira trasera	1	3,17	0,37	0,37
7	Botón derecho retenida del cargador	1	0,18	0,02	0,02
8	Botón izquierdo retenida del cargador	1	0,18	0,02	0,02
9	Pieza central retenida del cargador	1	0,25	0,03	0,03
10	Pieza izquierda del seguro	1	0,4	0,05	0,05
11	Pieza derecha del seguro	1	0,58	0,07	0,07
12	Platillo del muelle recuperador	1	0,05	0,01	0,01
13	Cargador	1	6,97	0,82	0,82
14	Retenida de la corredera	1	0,58	0,07	0,07
15	Cola del disparador	1	0,62	0,07	0,07
16	Placa delantera del cuerpo del pistolete	1	0,4	0,05	0,05
17	Martillo	1	0,55	0,06	0,06
18	Cuerpo del pistolete derecho	1	1	0,12	0,12
19	Cuerpo del pistolete izquierdo	1	1	0,12	0,12
20	Placa separadora	1	0,05	0,01	0,01
Cantidad:		20	27,58	1,27	
Precio total:					1,27

Tabla 6 - Gasto de la electricidad por pieza

Capítulo 3: Gasto en materiales de uso y montaje

Nº Ref	Descripción	Uds.	Precio por unidad (€)	Importe (€)
1	<i>Microswitch 12</i>	5	1,2	6
2	<i>Vive Tracker 3</i>	1	169	169
3	Muelle 5,5x7mm	2	0,01	0,02
4	Muelle 5,5x25,5mm	2	0,05	0,1
5	Muelle 5,5x3mm	1	0,01	0,01
6	Muelle 6,5x10mm	1	0,05	0,05
7	Muelle 9,5x19mm	1	0,05	0,05
8	Muelle 9,5x35mm	1	0,05	0,05
9	Tornillo M3x25mm	1	0,04	0,04
10	Tornillo M3x12mm	2	0,04	0,08
11	Tornillo M3x20mm	2	0,04	0,08
12	Tornillo M3x6mm	1	0,04	0,04
13	Tornillo M5x32mm	1	0,04	0,04
14	Tornillo M5x12mm	1	0,04	0,04
15	Tornillo M2x12mm	2	0,04	0,08
16	Tuerca M3	6	0,02	0,12
17	Tuerca M5	1	0,02	0,02
18	Barra cilíndrica diámetro 6mm de acero	1	0,21	0,21
Cantidad:		31		
Precio total:				176,03

Tabla 7 - Gasto en materiales de uso y montaje

ANEXO V: GUÍA DEL DESARROLLADOR DEL *VIVE* *TRACKER 3*

VIVE Tracker (3.0) Developer Guidelines Ver. 1.0

Release Notes

Version no.	Release date	Content
1.0	2021.01.18	Initial public version for VIVE Tracker (3.0)

©2021 HTC Corporation. All Rights Reserved. HTC, the HTC logo, VIVE, the VIVE logo, and all other HTC product and services names are the trademarks or registered trademarks of HTC Corporation and its affiliates in the U.S. and other countries.

Table of Contents

Introduction.....	1
Use cases	1
Hardware requirements	3
Interface.....	3
Radio frequency (RF)	4
Power	5
Optics.....	5
Docking.....	6
Mechanical considerations	9
Apparel size	9
Main feature.....	10
Docking mechanism.....	11
Damping mechanism	12
Accessory design	13
Coordinate system	18
Software components	20
System requirements	20
Data formats.....	21
Accessory integration	24
Unity integration.....	28
VIVE Trackers and VIVE Roles.....	40
Tracker on Unity or Unreal	42
Firmware upgrade	42

Introduction

This document describes the development guidelines for VR accessory makers and content developers. It contains information on how to use the VIVE Tracker (3.0) to enable positional tracking and transmission of specific data (with or without the HTC VIVE VR system).

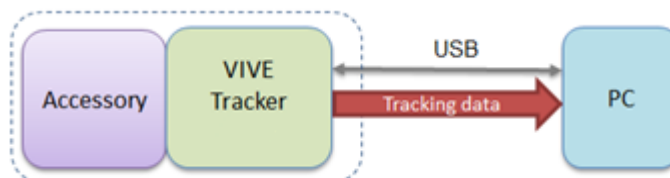
VIVE Tracker (3.0) can pair with HTC's wireless dongle or use its USB interface to transfer tracking data to a PC. An accessory attached to VIVE Tracker (3.0) can:

- Simulate buttons of the VIVE Controller through the underlying Pogo pin port.
- Send specific data to a PC through the USB interface of VIVE Tracker (3.0).

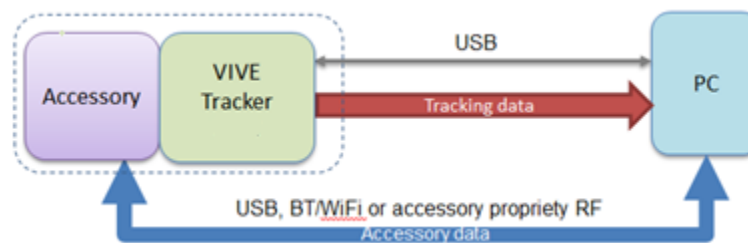
Use cases

There are five use cases supported by VIVE Tracker (3.0).

Use Case 1: Track passive objects through USB interface in VR. In this case, the dongle is not used. VIVE Tracker (3.0) is connected to the PC through USB to directly transfer tracking data.

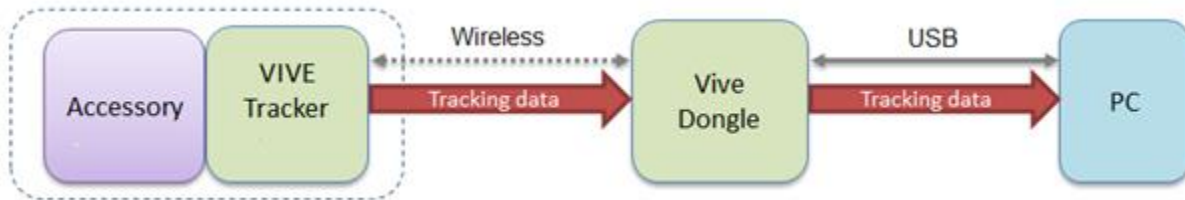


Use Case 2: Track passive objects through USB interface in VR, with the accessory passing data to a PC through USB, BT/Wi-Fi or propriety RF. This is similar to Use Case 1 but the accessory directly transfers the tracking data to a PC for a specific purpose based on its design.

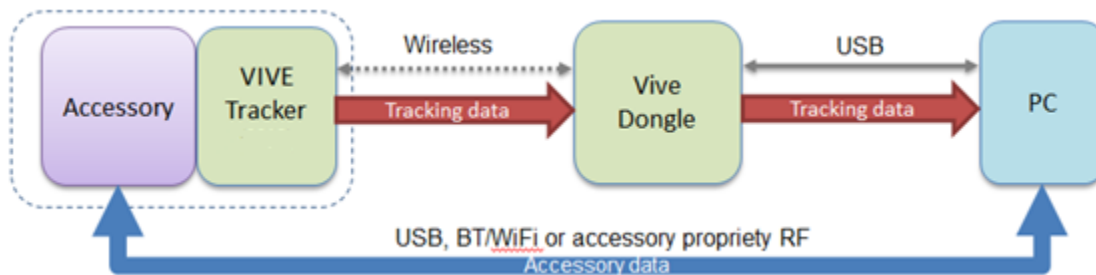


	VIVE Tracker (3.0) HTC Corporation	Developer Guidelines V1.0 12/16/2020
---	--	---

Use Case 3: Track moving objects by wireless interface in VR. In this case, the dongle is used to transfer tracking data from the VIVE Tracker (3.0) to a PC.



Use Case 4: Track moving objects using a wireless interface in VR, with the accessory passing data to a PC through USB, BT/Wi-Fi or propriety RF. This is similar to Use Case 3 but the accessory directly transfer the tracking data to/from a PC for a specific purpose based on its design.



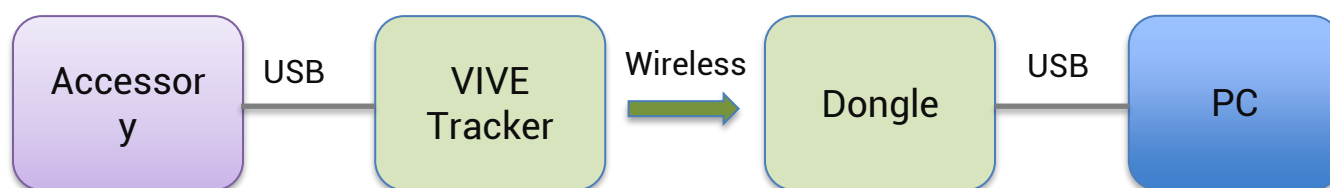
Use Case 5: Track moving objects using a wireless interface in VR, with the accessory simulating buttons of the VIVE Controller or passing data to a PC through the VIVE Tracker (3.0). This is similar to Use Case 3 but the accessory connects with the VIVE Tracker (3.0) to transfer a button event to a PC through the Pogo pins or USB interface.



Hardware requirements

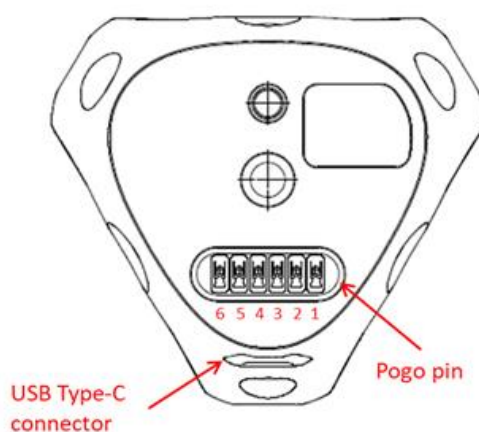
This section describes hardware requirements for accessories used with the VIVE Tracker (3.0) in order to enable positional tracking and input of specific data for the HTC VIVE VR system.

A compatible accessory can be attached to the VIVE Tracker (3.0) to send specific data to a PC through the USB interface of the VIVE Tracker (3.0). The VIVE Tracker (3.0) needs to be paired with the dongle first to be able to transfer an event to a PC. The figure below describes the conceptual architecture.



Interface

USB 2.0 full speed (client) from USB Type-C connector.



GPIO Pin Absolute Maximum Rating

Symbol	Parameter	Min	Max	Unit
V_I	Input voltage	- 0.3	3.6	V
V_{ESD}	Electrostatic discharge voltage , Human Body Model	--	4000	V

GPIO Pin Electrical Characteristics (Supply voltage VDD = 3.3 V)

Symbol	Parameter	Min	Typ	Max	Unit
V_{OH}	High-level output voltage	$VDD - 0.4$	--	--	V
V_{OL}	Low-level output voltage	--	--	0.4	V
V_{IH}	High-level input voltage	$0.7VDD$	--	--	V
V_{IL}	Low-level input voltage	--	--	$0.3VDD$	V
I_{OH}	High-level output current		--	2	mA
I_{OL}	Low-level output current		--	2	mA
I_{IH}	High-level input current	-1	0.5	1	nA
I_{IL}	Low-level input current	-1	0.5	1	nA

Radio frequency (RF)

To establish a stable wireless connection between the VIVE Tracker (3.0) and the dongle, the OTA performance of VIVE Tracker (3.0) cannot degrade to more than 3dB when an accessory is attached to the VIVE Tracker (3.0).

The following are recommendations for better RF performance.

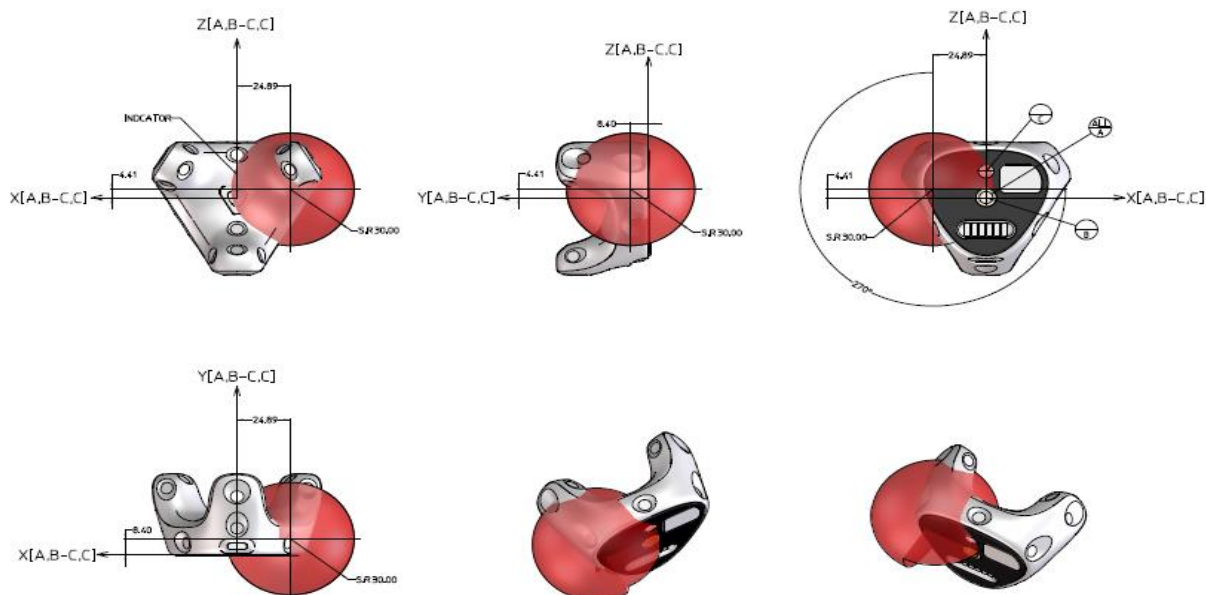


Figure: Illustrates the "keep out" area where only nonmetallic parts of the accessory should be inside (spherical radius = 30 mm with the center being the antenna feed point)

Except for essential parts, such as the 1/4" screw, electric connection pad (which connects with the Pogo pin), and related circuits of the electric connection pad, metal parts of the accessory should be separated from the antenna by at least 30mm to prevent OTA performance reduction when the accessory is attached to VIVE Tracker (3.0).

Power

USB-C Connector	Voltage requirement	Max. Charging current	Charging time (approx.)
AC	5V+/-5%	700 mA	2 hrs
PC		500 mA	3 hrs
Pogo Pin 3	Voltage requirement	Max. Charging current	Charging time (approx.)
PC	5V+/-5%	500 mA	3 hrs

Note

AC: D+ short to D-

PC: D+/D- communication

Optics

The field of view (FOV) of VIVE Tracker (3.0) is 240 degrees. Avoid obstructing the FOV of VIVE Tracker (3.0) as this will block responses from the tracker sensors.

If the parts of the docking extend beyond the recommended placement cone, additional views will be blocked.

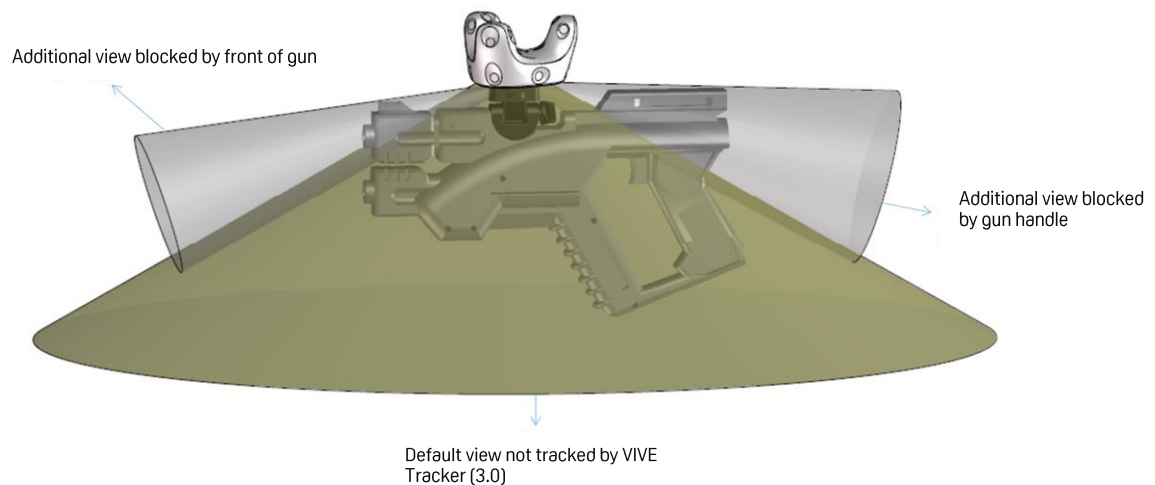


Figure: Part of dock extend beyond recommended placement cone

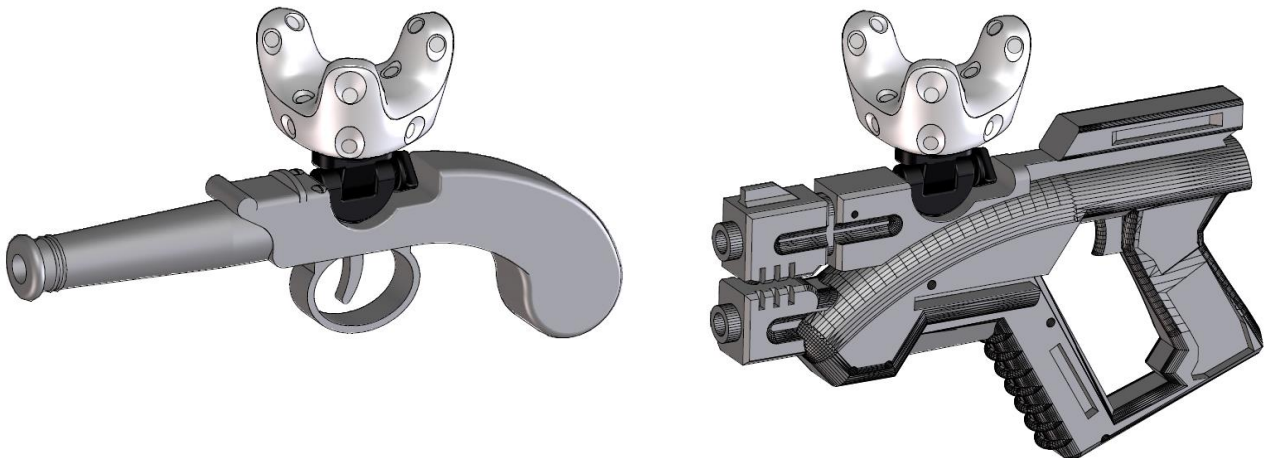
Docking

Requirements for docking compatibility:

- a. The docking design of VIVE Tracker (3.0) follows the ISO standard (ISO 1222:2010). Furthermore, VIVE Tracker (3.0) has some constraints such as the longer screws cannot be screwed all the way in.
- b. The user should be able to easily attach and detach VIVE Tracker (3.0) with two hands. One hand holds VIVE Tracker (3.0), and the other hand holds the accessory.
- c. The user should not be at risk of physical harm while attaching or detaching VIVE Tracker (3.0).
- d. The user should be comfortable while attaching and detaching VIVE Tracker (3.0).
- e. The accessory attached with VIVE Tracker (3.0) should be in the shape of a physical object to avoid hitting it while in use.
- f. VIVE Tracker (3.0) should not be blocked by the accessory and affect the tracking performance.
- g. It is strongly recommended that the accessory uses low reflection materials for its outer skin to avoid reflective interference with the tracking sensors, especially if the accessory needs to be placed inside the FOV of VIVE Tracker (3.0).

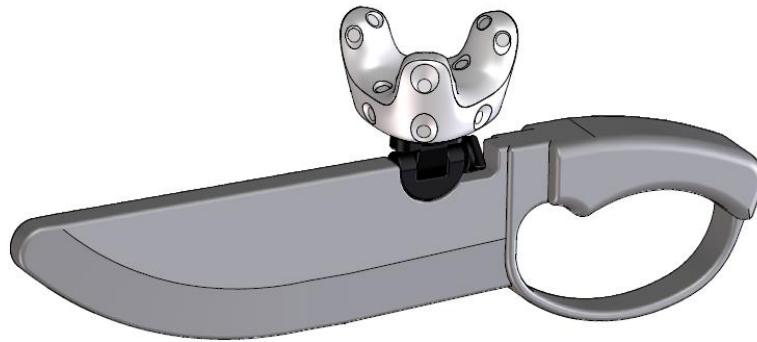
Docking embodiments

Gun



Sword

It is recommended to place the mounting mechanism close to where the sword is held. Also, it is recommended to set the sword length in the VR applications.



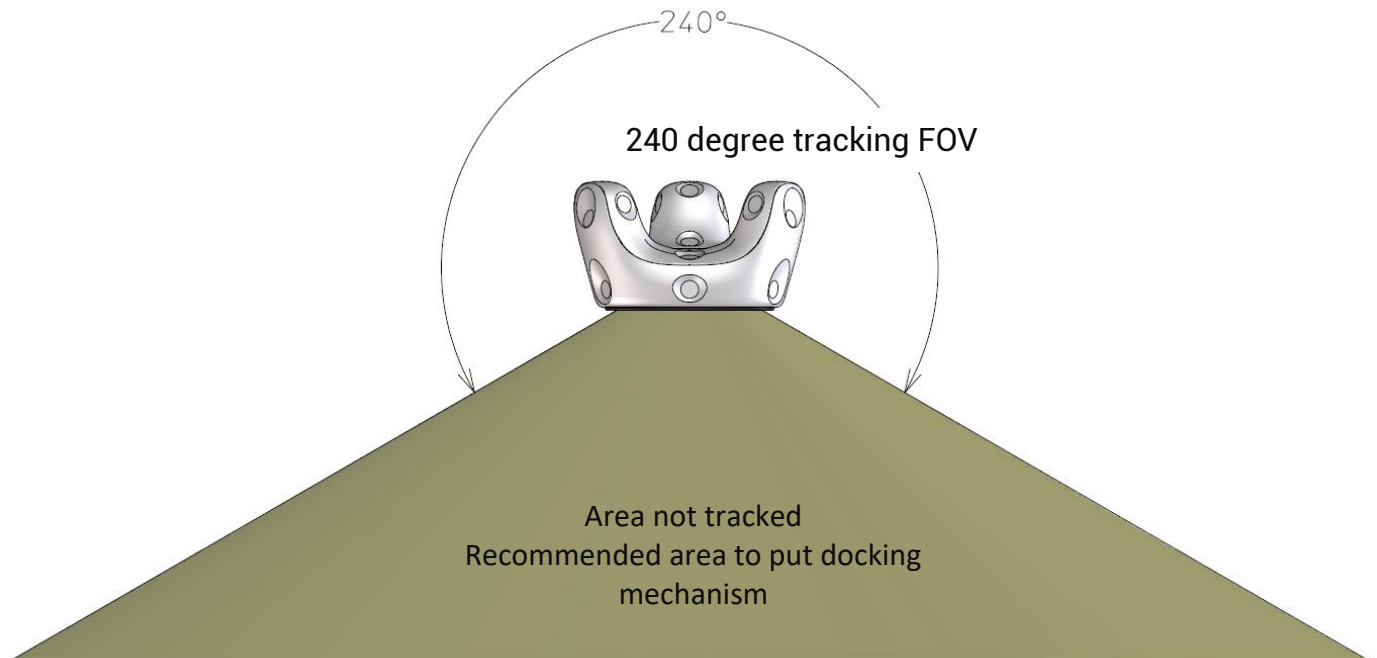
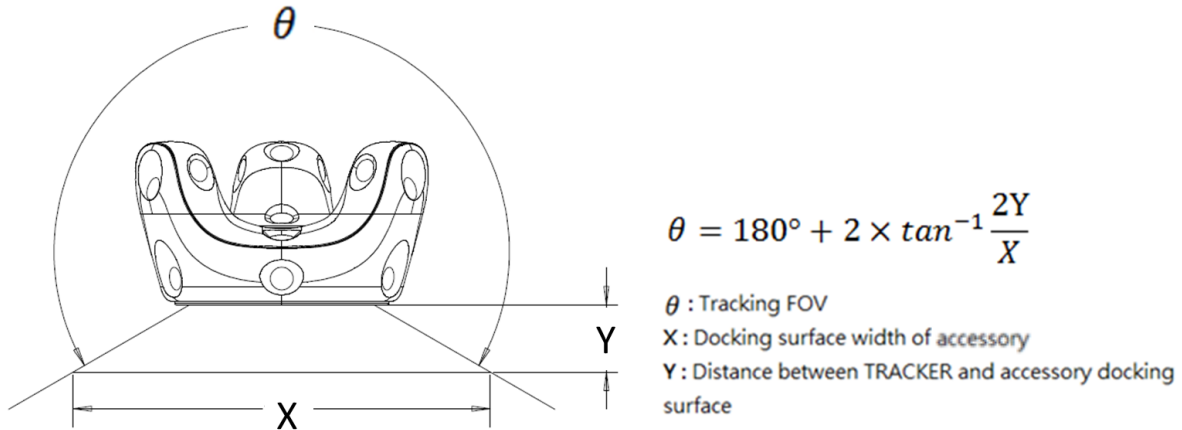
Multi-purpose docking base

Users can attach VIVE Tracker (3.0) to any object/surface that is intended to be tracked.

- If the object/surface is smooth and stiff, it is recommended to use a strong adhesive tape for attaching the docking base to the object/surface (ex. 3M VHB tape).
- If the object/surface is rough and soft, it is recommended to use a strap for tightening the docking base to the object/surface.



Improper placement of VIVE Tracker (3.0) may cause a part of the accessory to block the FOV of tracker and therefore affect the tracking performance. The mounting distance between tracking FOV and the related accessory size is shown below:

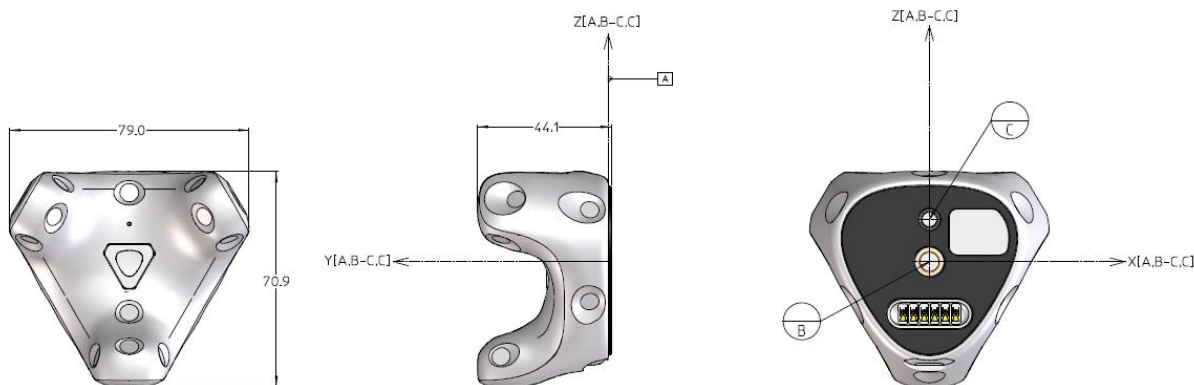


Mechanical considerations

This section describes the mechanical considerations for developers to build various accessories that are compatible to fit or mount with the VIVE Tracker (3.0).



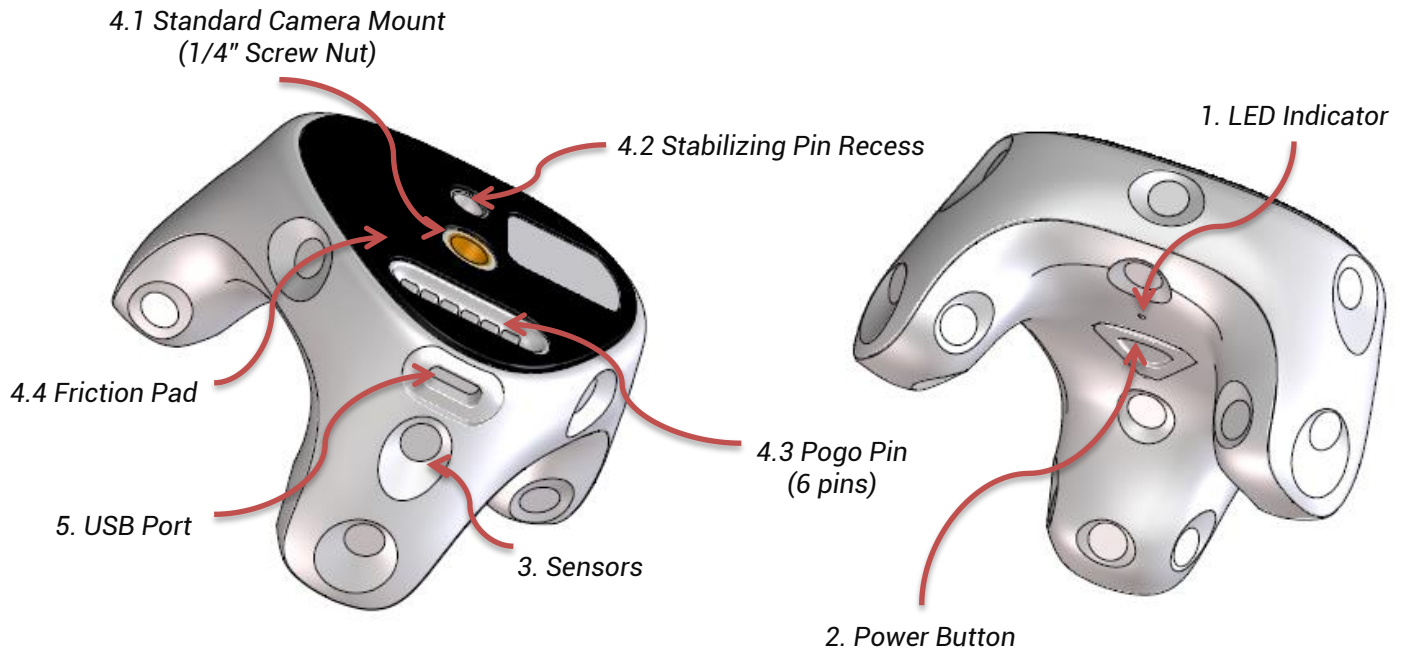
Dimension and weight



Different angles of VIVE Tracker (3.0)

Dimension: 79.0mm (L) x 70.9mm (W) x 44.1mm (H)
Weight: 75g

Main Features



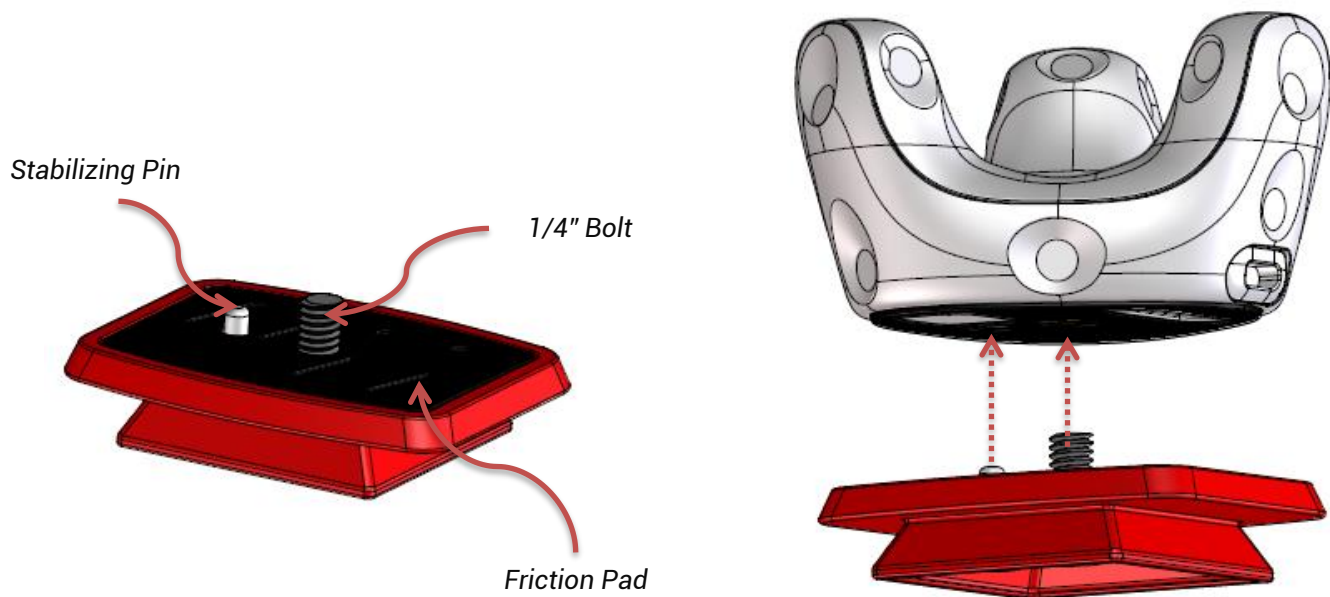
1. **LED Indicator:** Shows the status of VIVE Tracker (3.0).
2. **Power Button:** Used for powering on/off, BLE pairing, etc.
3. **Sensor:** Receives signals from the base stations. The VR system uses the received signals for computing the current location of VIVE Tracker (3.0). Accessories should minimize surface reflection (e.g. avoid white) since it may cause faulty signal and affect performance. Anti-reflective painting is recommended.
4. **Docking Mechanism:** Standard camera tripod docking method is used which is comprised of:
 - 4.1 1/4" Screw nut to fasten the accessory.
 - 4.2 Stabilizing pin recess for constraining the tracker from rotating.
 - 4.3 Pogo pin port (spring contact-type) for optional electrical connection to the accessory.
 - 4.4 Friction pad to provide a surface with friction between the accessory and VIVE Tracker (3.0)
5. **USB Port:** Used for electrical connection to the accessory through a USB Type-C cable

Docking Mechanism

VIVE Tracker (3.0) applies the general camera tripod docking method, which follows ISO standards (ISO 1222:2010).

The following are the schematic drawings of how Tracker (3.0) can mount on an accessory.

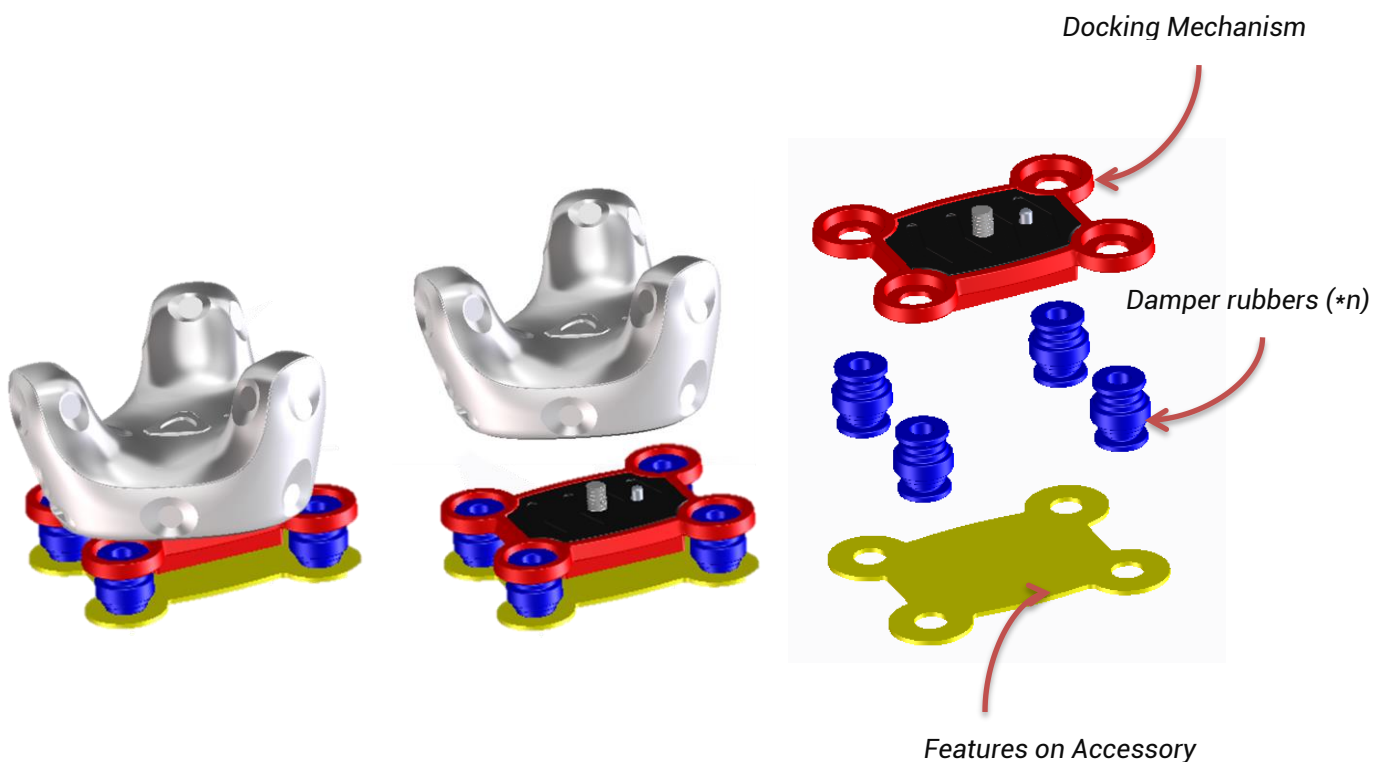
Docking with standard tripod cradle head



VIVE Tracker (3.0) can be mounted on the cradle head first, and then attached to the main body of the accessory (similar to how a camera is mounted on a tripod).

Damping mechanism

During research and actual usage, it has been observed that continuous vibration in VIVE Tracker (3.0) will affect the IMU performance, causing noticeable IMU drift. To address this, it is suggested to use a damping system with the docking mechanism. The illustration below is a reference for how existing damping rubbers (purchased as a drone accessory) can serve this purpose.



When considering the vibration scales that the VR content plans to adopt, among the factors that can be adjusted are the durometer of the damper rubber, the mounting distance/position, and the usage of damper rubbers.

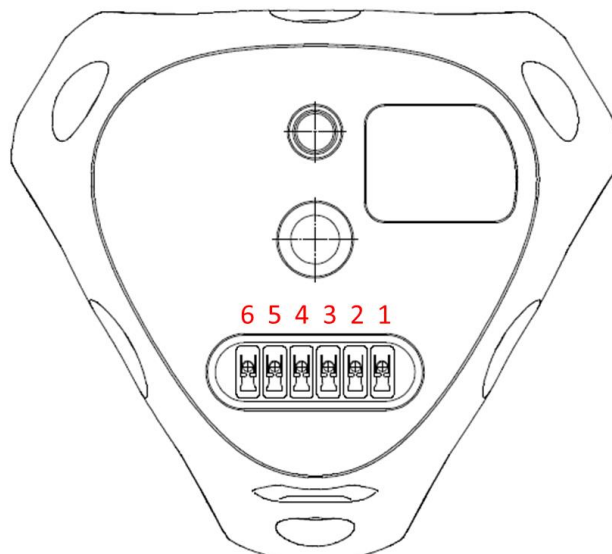
Accessory design

Below are the different accessory mechanisms that follow ISO standards:

- 1/4" bolt design
Please refer to ISO 1222-2010, Figure 1 on page 1.
- Stabilizing pin design
VIVE Tracker (3.0) leverages the design from ISO 1222-2010, Figure 5 on page 3. For details on dimensions and tolerances, please refer to pages 13-17. It is suggested to apply the stabilizing pin for better tracking performance.
- Screw thread design
The screw thread type that VIVE Tracker (3.0) uses 1/4" screw with 1.27 mm pitch. For detailed information, please refer to ISO 1222-2010, pages 3-5.

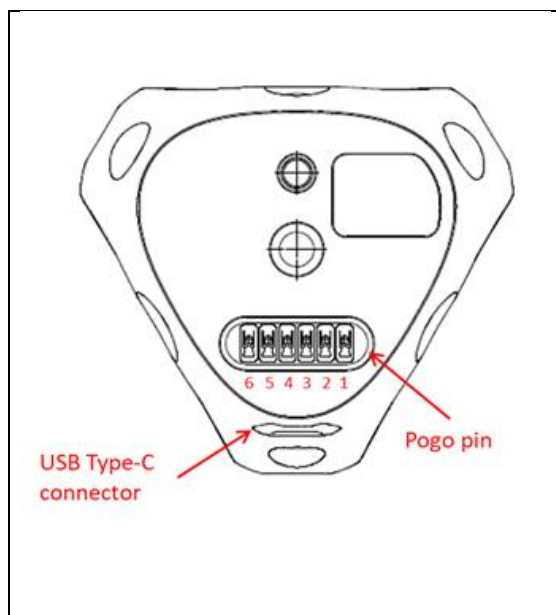
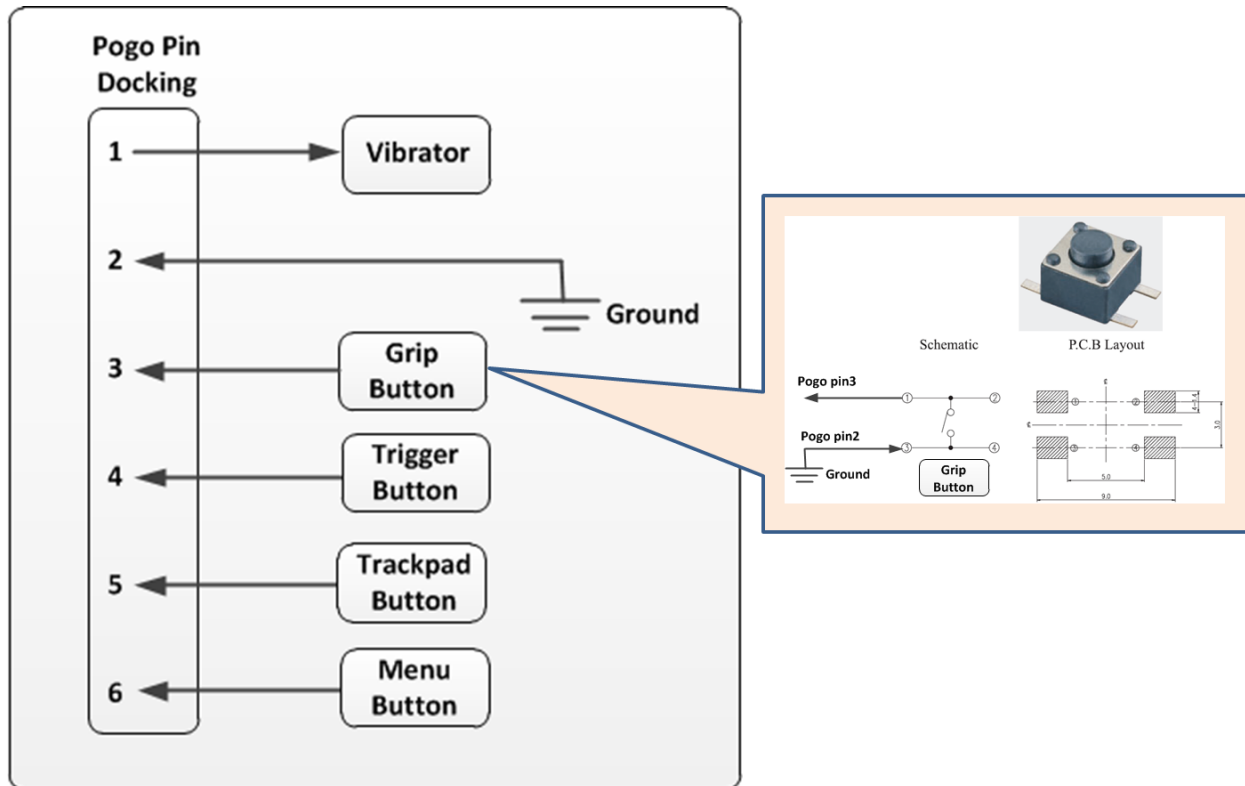
Pogo Pin design

- a. Pin definition of VIVE Tracker (3.0)



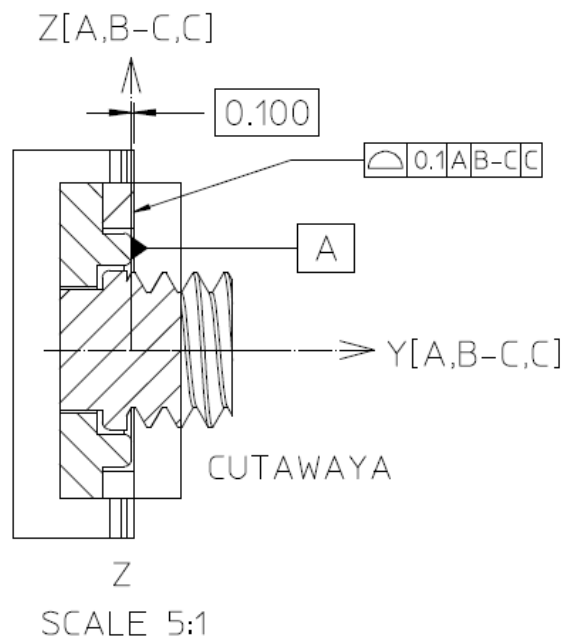
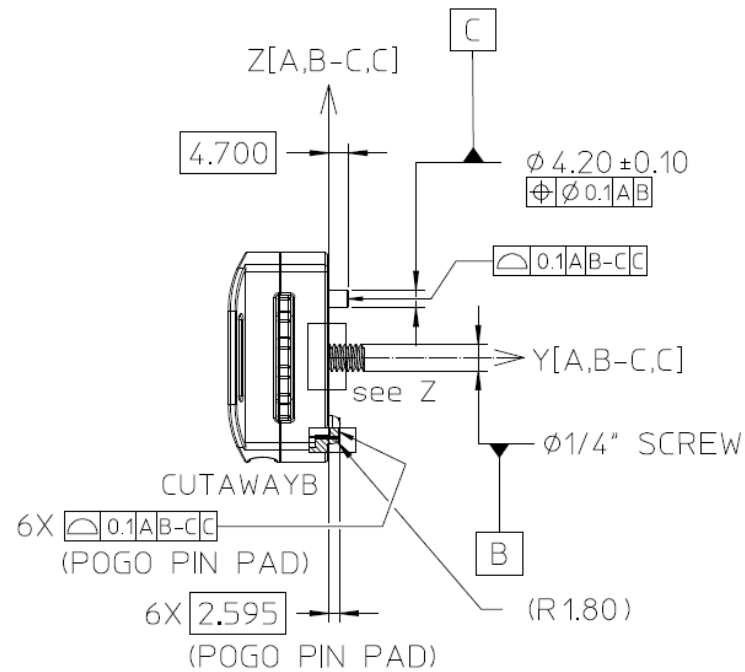
b. Pogo Pin reference design

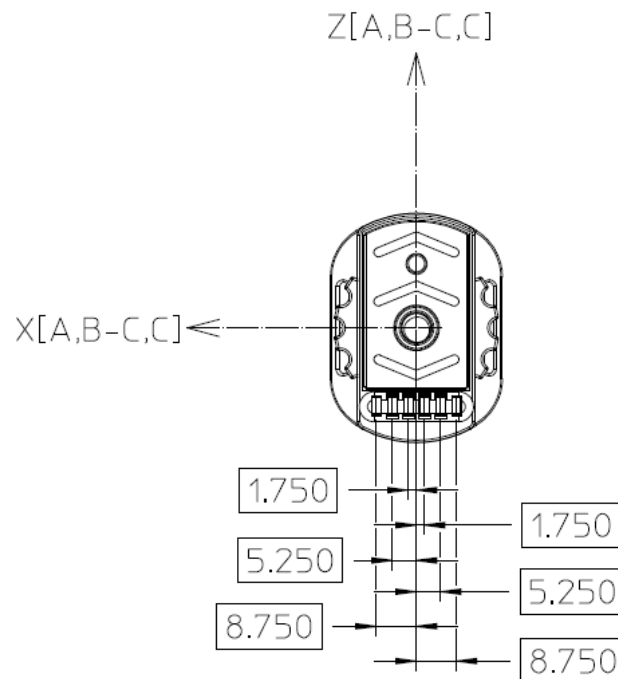
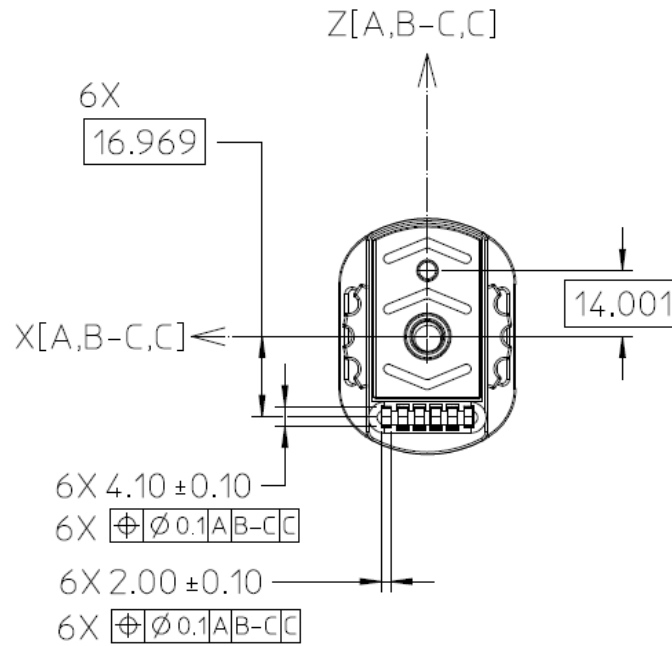
Electrical

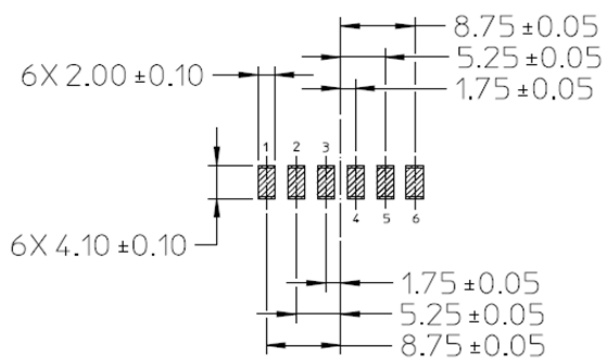
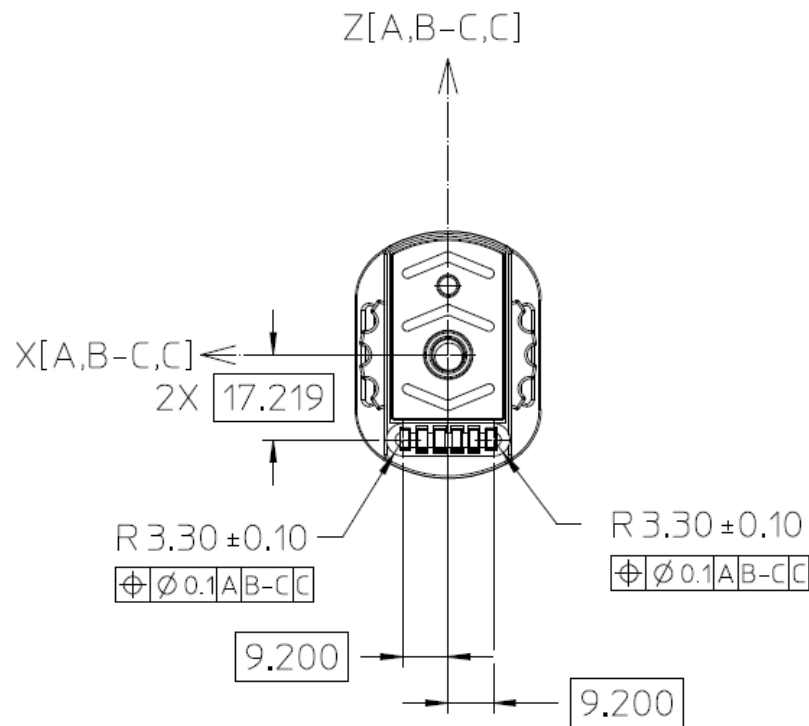


Pin no.	Type	Description
1	Digital output	General purpose output pin
2	GND	Ground
3	Digital/Power input	1. General purpose input pin: Internal pull up resistor to VDD, Active -low (Grip button) 2. Power input pin
4	Digital input	General purpose input pin: Internal pull up resistor to VDD, Active -low (Trigger button)
5	Digital input	General purpose input pin: Internal pull up resistor to VDD, Active -low (Trackpad button)
6	Digital input	General purpose input pin: Internal pull up resistor to VDD, Active -low (Menu button)

Mechanical







Contact Resistance :

30m Ω (Max) initial when measured at 20mV (Max) open circuit at 100mA.

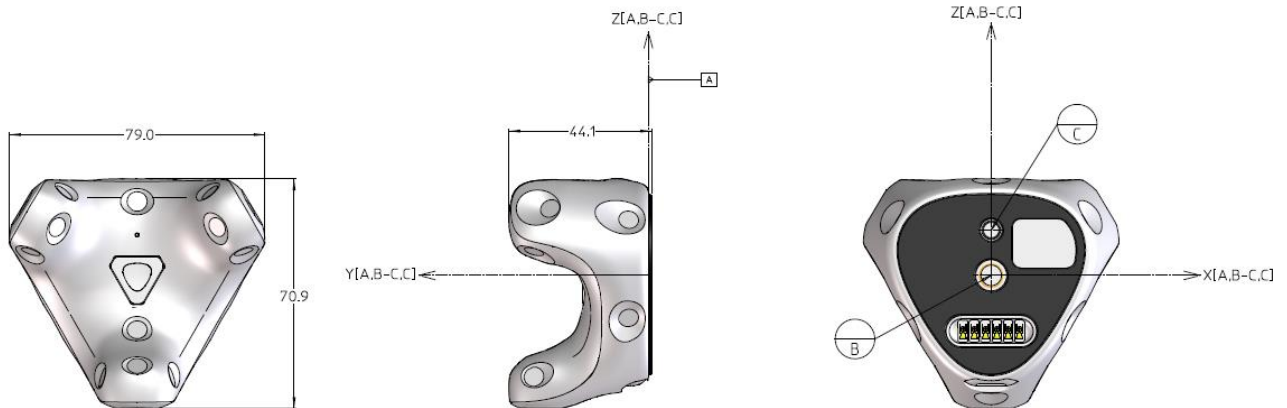
Contact Current Rating :

1.8A (Min)

Coordinate system

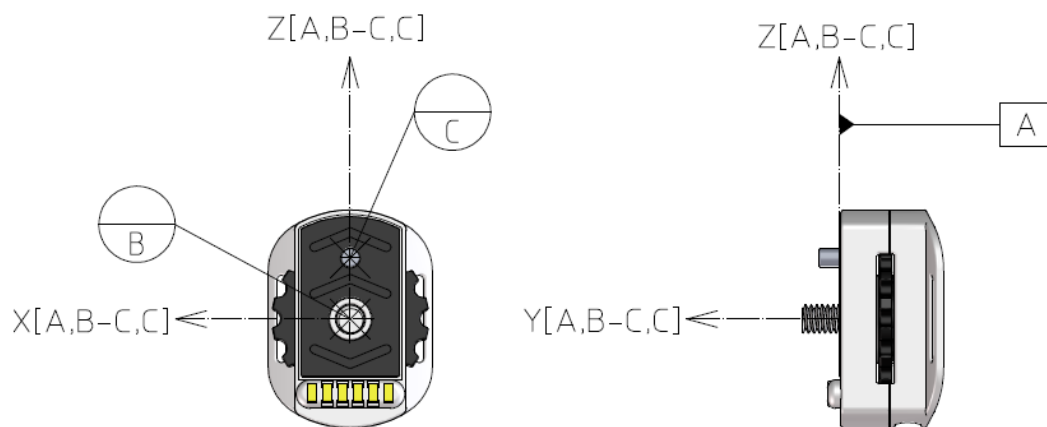
VIVE Tracker (3.0) uses the "**Right-handed coordinate system**".

- Datum A is set to be the top surface of the ring feature around the 1/4" Screw Nut.
- Datum B is set to be the intersection point between the centerline of Standard Camera Mount (1/4" Screw Bolt) and Datum A.
- Datum C is set to be the intersection point between the centerline of Stabilizing Pin Recess and Datum A.
- The coordinate system is constructed by the Datum frame of Datum A, the line of Datum B and Datum C, and Datum C itself.



Accessory:

- Datum A is set to be the top surface of the ring feature around the 1/4" Bolt.
- Datum B is set to be the intersection point between the centerline of 1/4" Screw and Datum A.
- Datum C is set to be the intersection point between the centerline of Stabilizing Pin and Datum A.
- The coordinate system is constructed by the Datum frame of Datum A, the line of Datum B and Datum C, and Datum C itself.



Software components

This section describes software components for the VIVE Tracker (3.0).

If you are an accessory maker, you can transfer a button event through the VIVE Tracker (3.0) Pogo pin port. You can refer to detailed data format transfer between an accessory and VIVE Tracker (3.0) in the [Data Formats](#) section.

If you are a content developer, refer to [Unity integration](#).

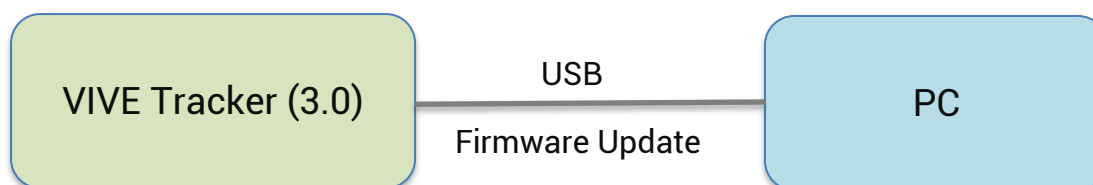
Accessory [integration](#).

When new firmware for VIVE Tracker (3.0) is released, you can update the firmware by connecting the tracker to the PC using a USB Type-C cable. Learn how to update the firmware in [Firmware update](#).

System requirements

For both content developers and accessory makers:

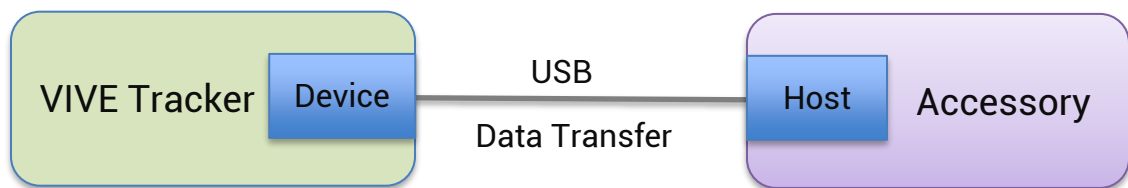
1. To test VIVE Tracker (3.0) with your content or accessory, you need to have HTC VIVE as well as the required hardware and software to run it.
2. You need to have a PC with at least one available USB 2.0 port to plug in the dongle (for use cases with the dongle mentioned in Use Cases) or VIVE Tracker (3.0) (to update firmware). This PC should also have SteamVR installed.



For accessory makers:

If your accessory needs to simulate buttons of the VIVE controller to a PC through VIVE Tracker (3.0), it must support the following interfaces:

- **Pogo pin:** Refer to hardware requirement section.
- **USB interface:** USB full speed host and HID class. The VIVE tracker (3.0) will act as a USB device to transfer data to/from the attached accessory.



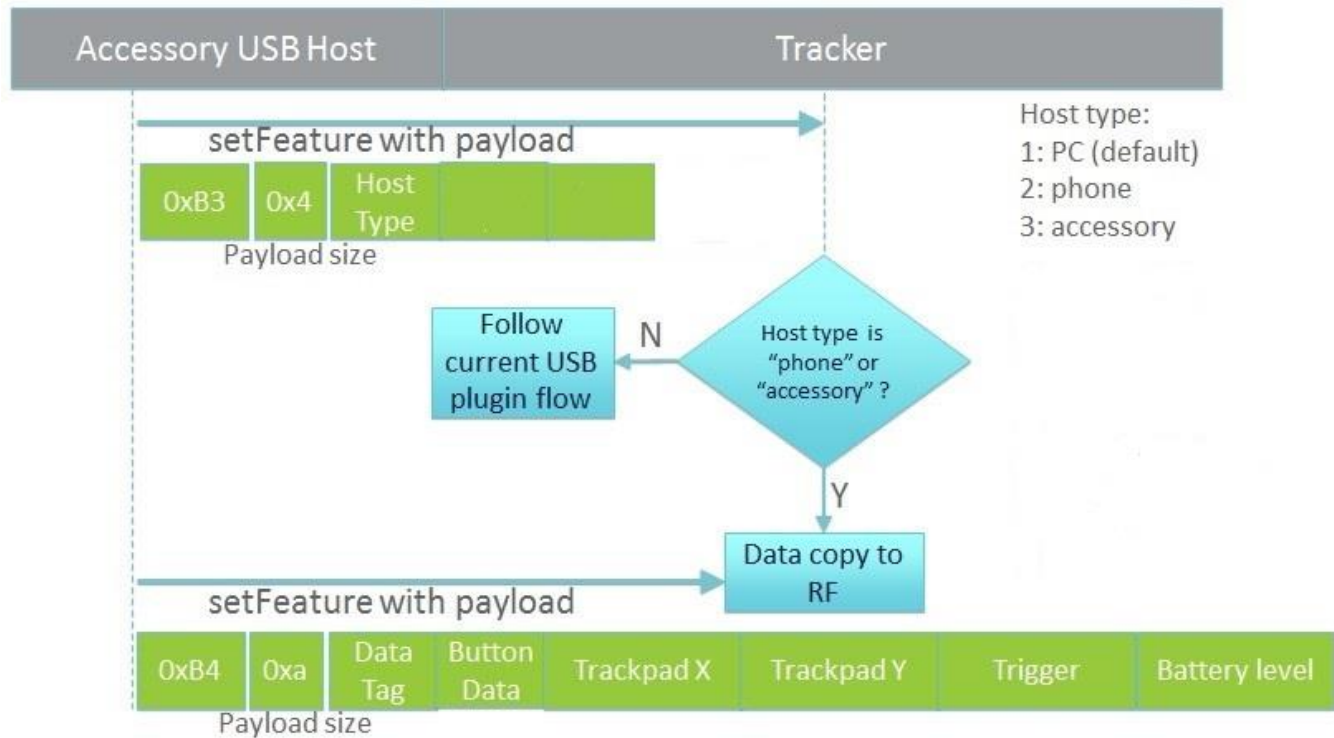
Data formats

This section describes the data formats that accessory makers can use to transfer data between the accessory and the PC through VIVE Tracker (3.0) when the USB interface is used.

The data format for transfer from an accessory to VIVE Tracker (3.0) is sent by a USB HID feature report. It is similar to the user interface of the VIVE controller. The interval to send data should be longer than 10 ms.

To learn more about the USB HID spec, please refer to information on the [official USB website](#). VIVE Tracker (3.0) will have three USB nodes when connected as a USB device to a PC. Use USB VID/PID as **28DE/2300** for VIVE Tracker (3.0), and check that the interface name changes to 'Controller'. Set the windex to **2** to send USB commands to VIVE Tracker (3.0).

Refer to the table below for the USB command flow between accessory and VIVE Tracker (3.0).



SetFeature 0xB3 data format

Byte Index	Data	Remark
0	Host Type	2 : phone 3 : accessory
1	N/A	Reserved
2	N/A	Reserved

SetFeature 0xB4 data format

Byte Index	Data	Remark
0	Tag Index	Indicates the version of the data being sent out. Default value is zero in this version of data format.
1	Button	TRIGGER 0x01 BUMPER 0x02 MENU 0x04 STEAM 0x08 PAD 0x10 PAD_FINGERDOWN 0x20 Reserved 0x40 Reserved 0x80

Byte Index	Data	Remark
2	Pad X value	Pad X value, value from -32768 to 32767 BYTE 2 is LSB
3		
4	Pad Y value	Pad Y value, value from -32768 to 32767 BYTE 4 is LSB
5		
6	Trigger Raw	Trigger Raw, value from 0 to 65535 BYTE 6 is LSB
7		
8	Battery Level	Battery Level, Reserved BYTE 8 is LSB
9		

Table: Data Format, Accessory to VIVE Tracker (3.0)

Sample code

Below are sample code to send the setFeature command to VIVE Tracker (3.0). However, you need to reference your system to have the correct API to send the USB setFeature command.

Visual Studio

```
buffer[0] = 0xB3;
buffer[1] = 0x03; // Length
buffer[2] = 0x03; // 1: PC, 2: Phone, 3: Accessory
buffer[3] = 0x01;
buffer[4] = 0x00;

if (!HidD_SetFeature(m_hDevice, buffer, sizeof(buffer))) {
    AfxMessageBox(L"Error: Failed to set feature.");
}
```

JAVA

```
// Take 0xB3 command for example
data1[0] = (byte) 179; //0xB3
data1[1] = 3; //Means there are 3 bytes follow
data1[2] = 3; //Host Type: ACCESSORY
data1[3] = 1; //Reserved
data1[4] = 1; //Reserved

int result = mDeviceConn.controlTransfer(0x21, 0x09, 0x0300, 2, data1,
data1.length, 0);
```

STM F4 series developer board

```
char buffer[64];
char *p_buffer = buffer;
unsigned int buffer_size = sizeof(buffer);
memset( (void *)p_buffer, 0, buffer_size );
p_buffer[0] = 0xB3; // Command
p_buffer[1] = 0x03; // Size of Data
p_buffer[2] = 0x03; // Host Type: ACCESSORY
p_buffer[3] = 0x01;
p_buffer[4] = 0x01;

// STM API
USBH_HID_SetReport(
    handle,
    0x03,          // Feature Report
    0,
    (uint8_t *)p_buffer,
    buffer_size );
```

Accessory integration

For Pogo out pin signal duration:

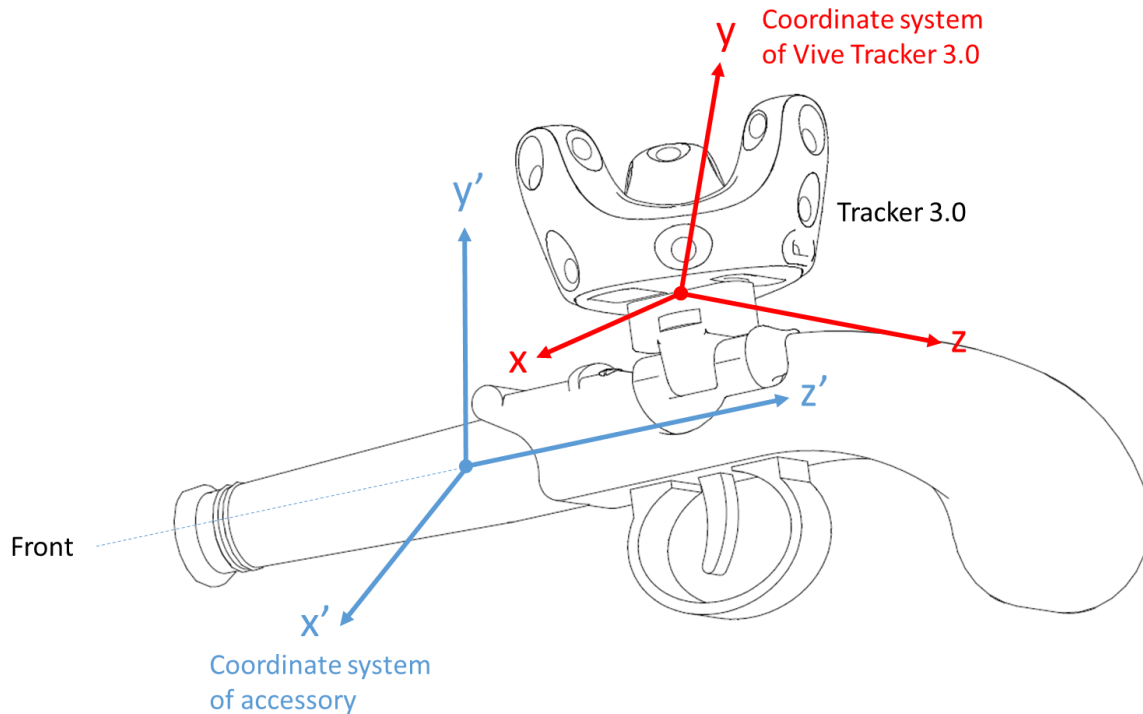
VIVE Tracker (3.0) receives haptic input value from the content, while the Pogo out pin will output HIGH with the duration value in "ms".

This section describes information on position transformation between an accessory and VIVE Tracker (3.0). Content developers can create the correct rotation and translation result of the content used with the attached accessory in a game engine such as Unity.

It is assumed that the local coordinate system of the accessory is that z-axis is facing the front (left-handed coordinate system), and VIVE Tracker (3.0) is attached in the accessory as in the example below. Rotation degree and translation distance of an accessory relevant to VIVE Tracker (3.0) are described in roll, yaw, pitch and D_x , D_y , D_z respectively during the integration.

After the center of an accessory has been decided during the design, the following degrees and distance of an accessory based on actual integration condition can be measured. For detailed information regarding the center of the VIVE Tracker (3.0), refer to guidelines related to the hardware and mechanical design.

An example of integrating a gun accessory is described with VIVE Tracker (3.0):



Pitch: Angle that rotates around x-axis.

Yaw: Angle that rotates around y-axis.

Roll: Angle that rotates around z-axis

D_x: Center distance of x-axis between accessory and tracker.

D_y: Center distance of y-axis between accessory and tracker.

D_z: Center distance of z-axis between accessory and tracker.

Content developers can collect the above information and transform Tracker pose to accessory pose.

Assume Tracker rotation matrix is $R_{Tracker}$, accessory rotation matrix $R_{Accessory} = R_{Pitch_Yaw_Roll} * R_{Tracker}$.

And accessory position $V_{Accessory} = V_{Tracker} + R_{Accessory} * Distance$

The following is a Unity sample code (reference):

```
public class Accessory : MonoBehaviour {

    const float dX = 0.0100224f;
    const float dY = -0.07616526f;
    const float dZ = 0.4884118f;

    const float roll = 10.854305f;
    const float yaw = 91.8736f;
    const float pitch = 78.805113f;

    void Update () {

        //Collect delta rotation and displacement between Tracker and
        Accessory
        Vector3 delta_displacement = new Vector3(dX, dY, dZ);
        Quaternion delta_rotation = Quaternion.Euler(roll, yaw, pitch);

        //Get current Tracker pose
        Vector3 tracker_position =
        SteamVR_Controller.Input(3).transform.pos;
        Quaternion tracker_rotation =
        SteamVR_Controller.Input(3).transform.rot;

        //Transform current Tracker pose to Accessory pose
        GameObject.Find("Accessory").transform.rotation =
        tracker_rotation * delta_rotation;
        GameObject.Find("Accessory").transform.position =
        tracker_position + (tracker_rotation * delta_rotation) *
        delta_displacement;

    }

}
```

Another Unity sample code shows how to transform the accessory by comparing vectors parallel to y-axis and z-axis of the VIVE Tracker (3.0) (AxisY_Tracker, AxisZ_Tracker in the example below) and the accessory (AxisY_Accessory, AxisZ_Accessory in the example below).

```
public class Accessory: MonoBehaviour {

    const Vector3 AxisY_Tracker = new Vectors(AxisY_Tracker_X,
AxisY_Tracker_Y, AxisY_Tracker_Z);
    const Vector3 AxisZ_Tracker = new Vectors(AxisZ_Tracker_X,
AxisZ_Tracker_Y, AxisZ_Tracker_Z);

    const Vector3 AxisY_Accessory = new Vectors(AxisY_Accessory_X, AxisY_
Accessory_Y, AxisY_Accessory_Z);
    const Vector3 AxisZ_Accessory = new Vectors(AxisZ_Accessory_X,
AxisZ_Accessory_Y, AxisZ_Accessory_Z);

    void Update () {

        //Calculate delta rotation by comparing vectors parallel to Y
axes of Tracker and the accessory
        Quaternion delta_rotY = Quaternion.FromToRotation(AxisY_Tracker,
AxisY_Accessory);
        AxisZ_Tracker = delta_rotY * AxisZ_Tracker;
        Quaternion delta_rotZ = Quaternion.FromToRotation(AxisZ_Tracker,
AxisZ_Accessory);

        //Collect delta rotation and displacement between Tracker and
Accessory
        Vector3 delta_displacement = new Vector3(dX, dY, dZ);
        Quaternion delta_rotation = delta_rotZ * delta_rotY;

        //Get current Tracker pose
        Vector3 tracker_position =
SteamVR_Controller.Input(3).transform.pos;
        Quaternion tracker_rotation =
SteamVR_Controller.Input(3).transform.rot;

        //Transform current Tracker pose to Accessory pose
        GameObject.Find("Accessory").transform.rotation = delta_rotation
* tracker_rotation;
        GameObject.Find("Accessory").transform.position =
tracker_position + (delta_rotation * tracker_rotation) *
delta_displacement;
    }
}
```

	VIVE Tracker (3.0) HTC Corporation	Developer Guidelines V1.0 12/16/2020
---	--	--

Unity integration

This section provides an example for content developers to enable VIVE Tracker (3.0) in their VR content by using the Unity game engine.

First, VIVE Tracker (3.0) needs to be detected by SteamVR. Assuming that you have 2 VIVE controllers connected the dongle and dongle cradle is connected to the PC, right-click on a controller icon. In the menu, click **Pair Controller**. Then, press the Power button on VIVE Tracker (3.0) for 2 seconds to enter pairing mode.



After VIVE Tracker (3.0) successfully pairs with the dongle, you will see the VIVE Tracker icon in the SteamVR window.



It is recommended that you use Unity version 2017.3 or newer (minimum version 5.4.6). You can download the latest one [here](#).

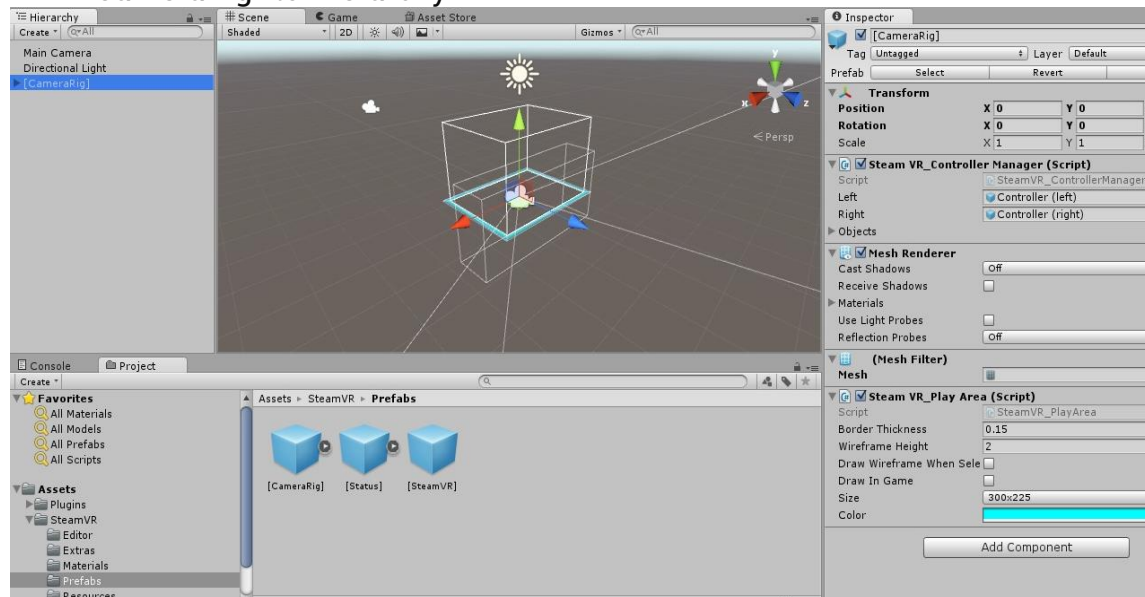
Using the SteamVR plugin

Import the SteamVR Plugin into your project. If you do not have the plugin, download it from the Unity Asset Store.

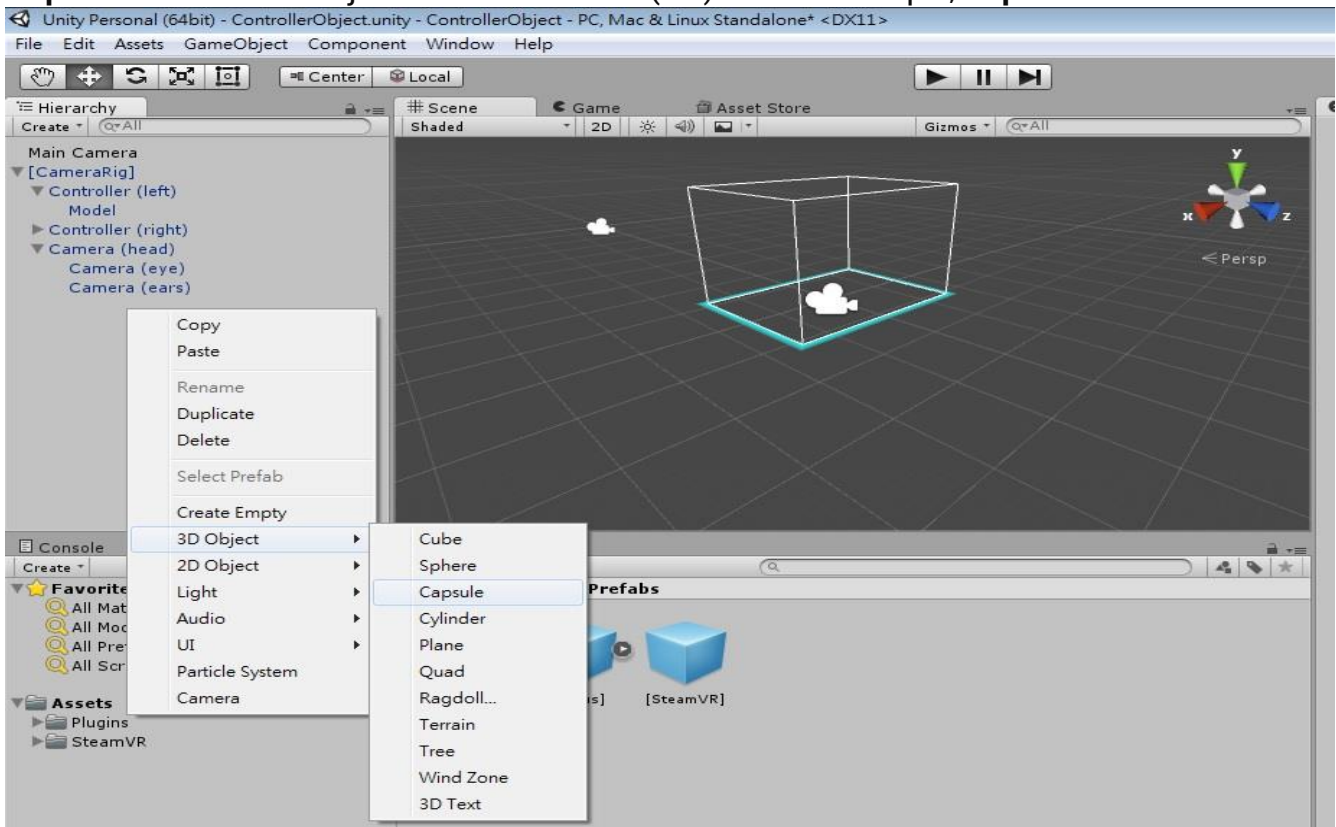


From the developer version of VIVE Tracker (3.0), it uses a similar approach and naming as when creating content for the VIVE controller. Follow these steps to create content for VIVE Tracker (3.0) in Unity.

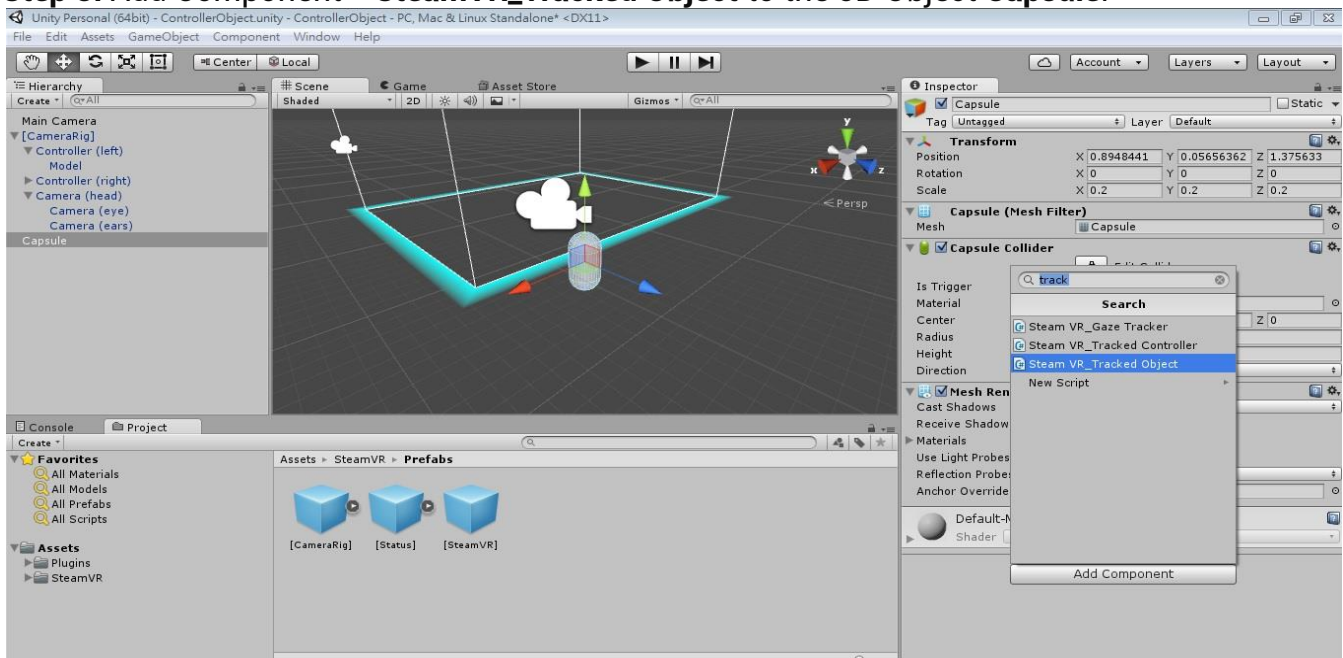
Step 1: Add "CameraRig" to Hierarchy.



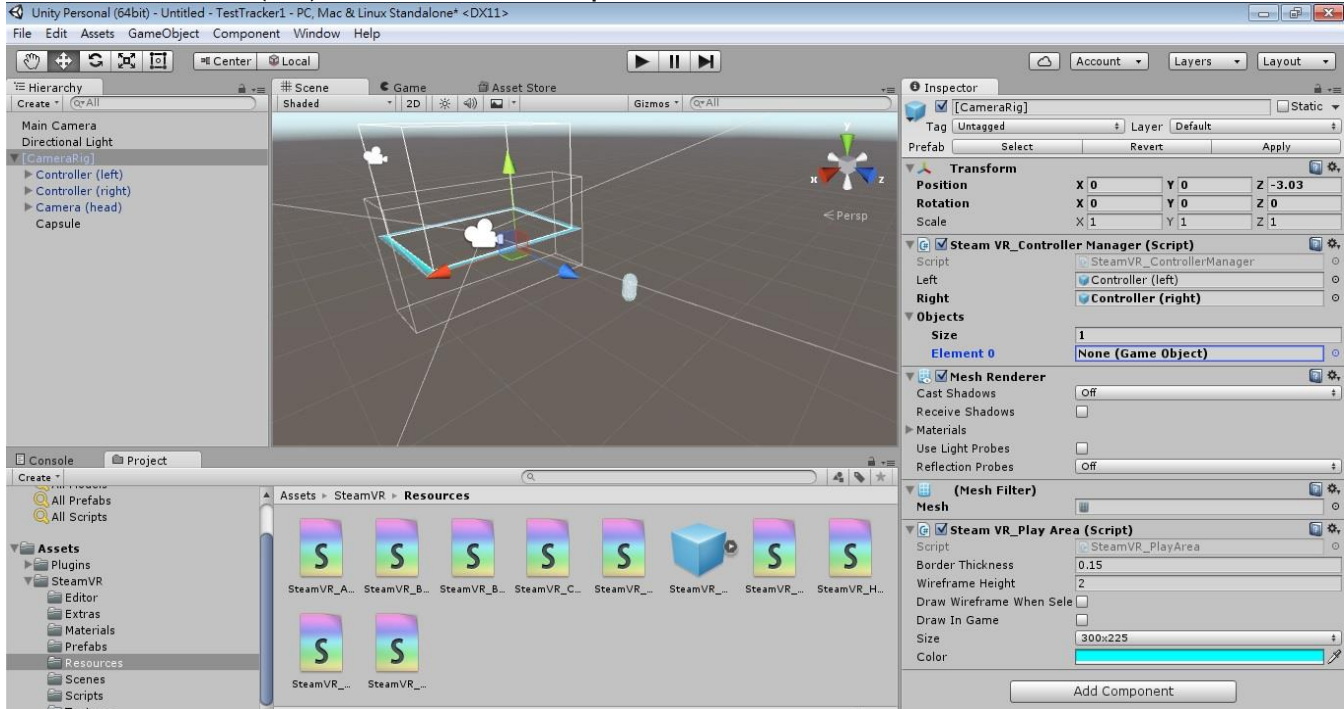
Step 2: Create the 3D Object for VIVE Tracker (3.0). In this example, **Capsule** is used.



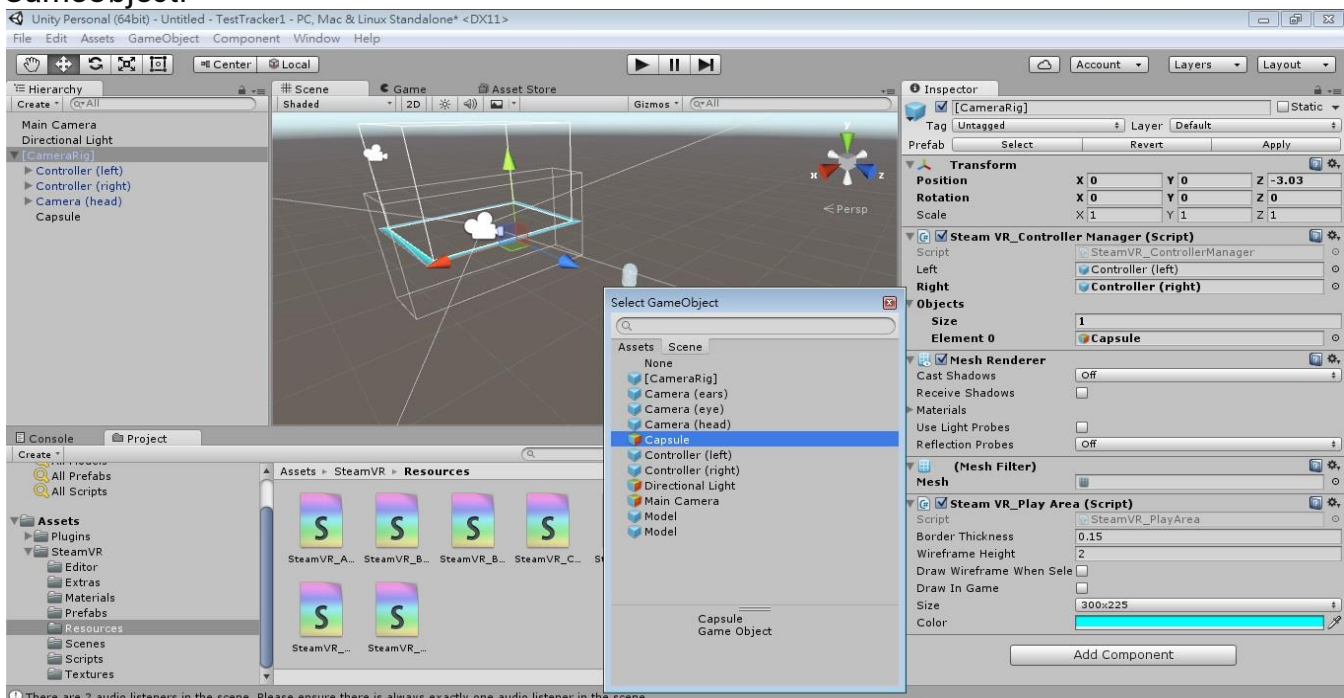
Step 3: Add Component > SteamVR_Tracked Object to the 3D Object Capsule.



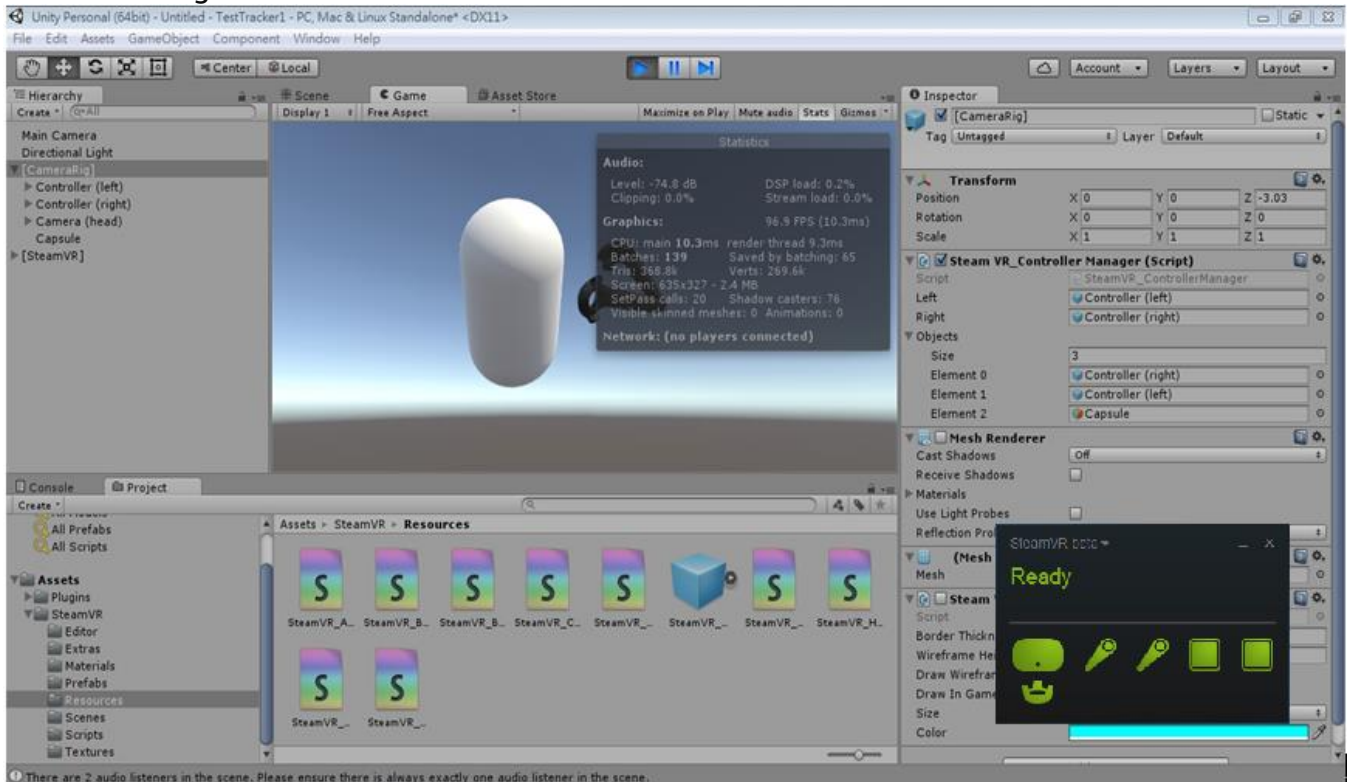
Step 4: Under **SteamVR Controller Manager**, set the size of the Objects item. In this example, one VIVE Tracker (3.0) is used in the setup.



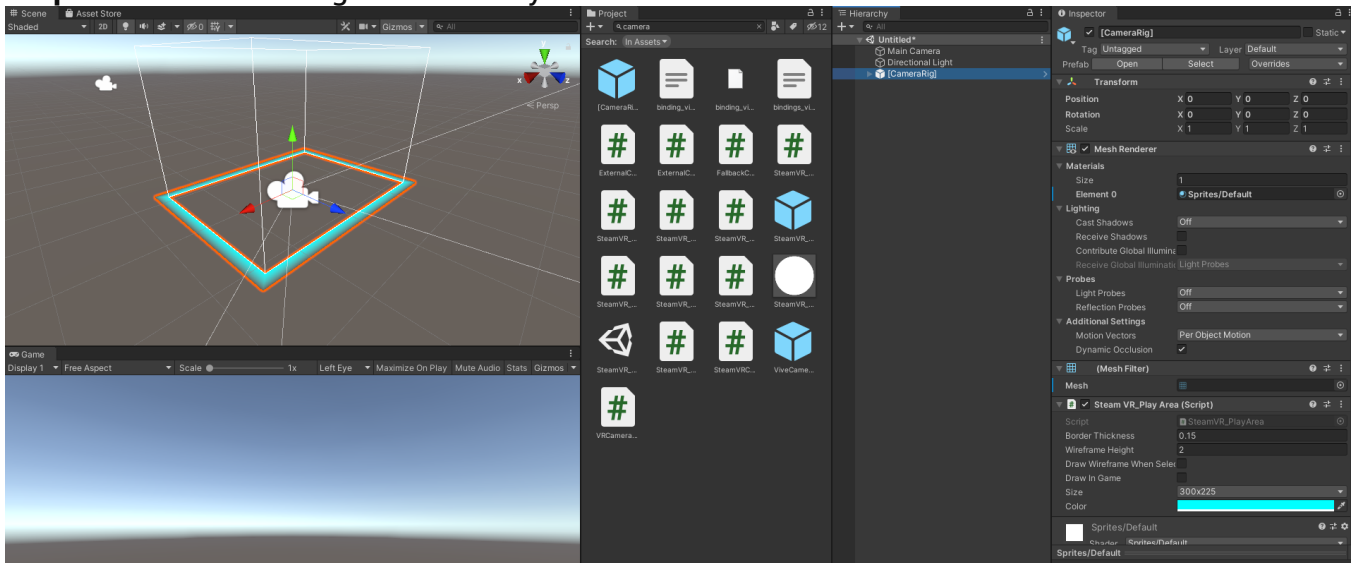
Step 5: Under **SteamVR Controller Manager**, in the **Element 0** field, select **Capsule** as the **GameObject**.



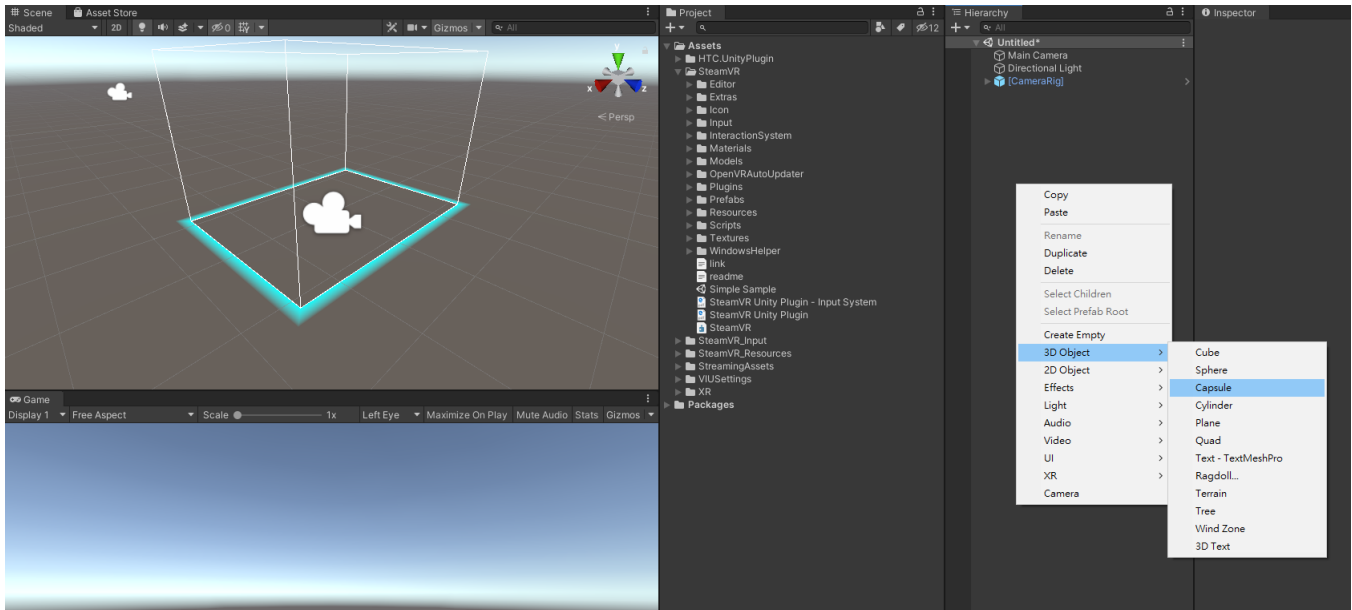
Step 6: In Unity, click **Run**. When you move VIVE Tracker (3.0), you will see the Capsule object is also moving in the content.



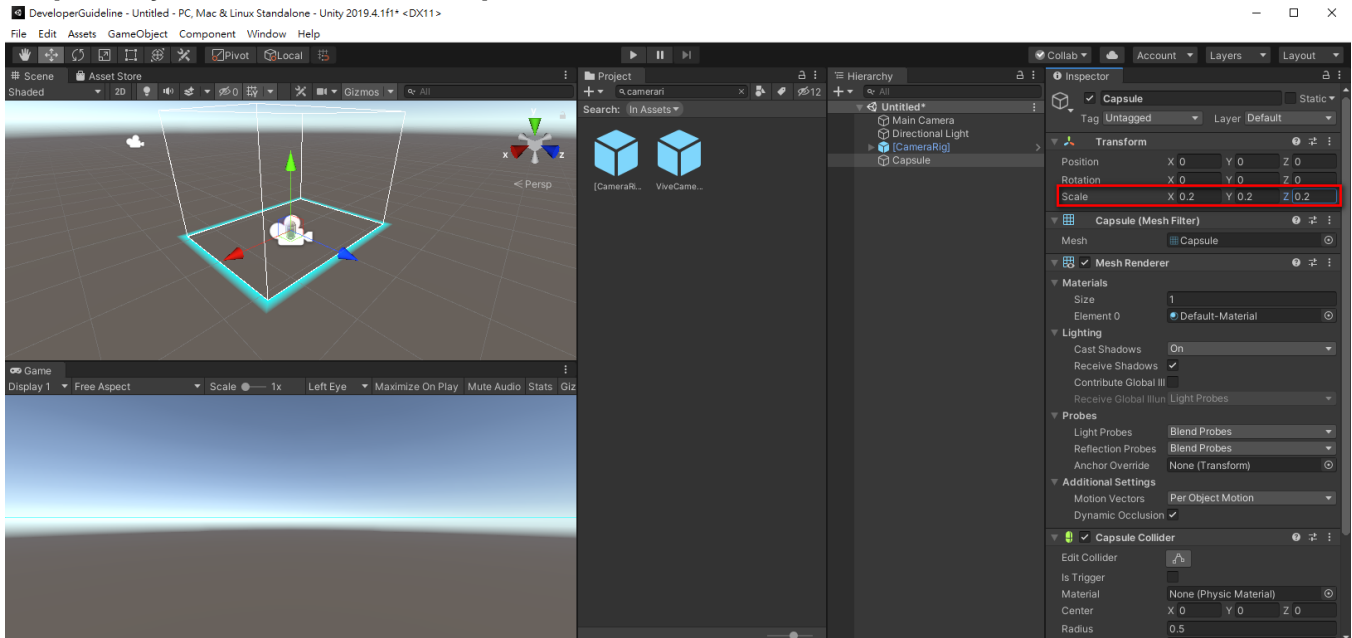
Using the SteamVR 2.0 plugin
Step 1: Add "CameraRig" to Hierarchy.



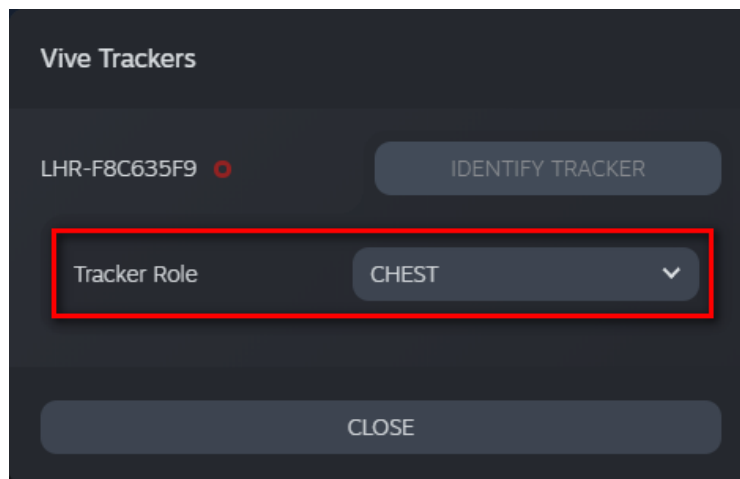
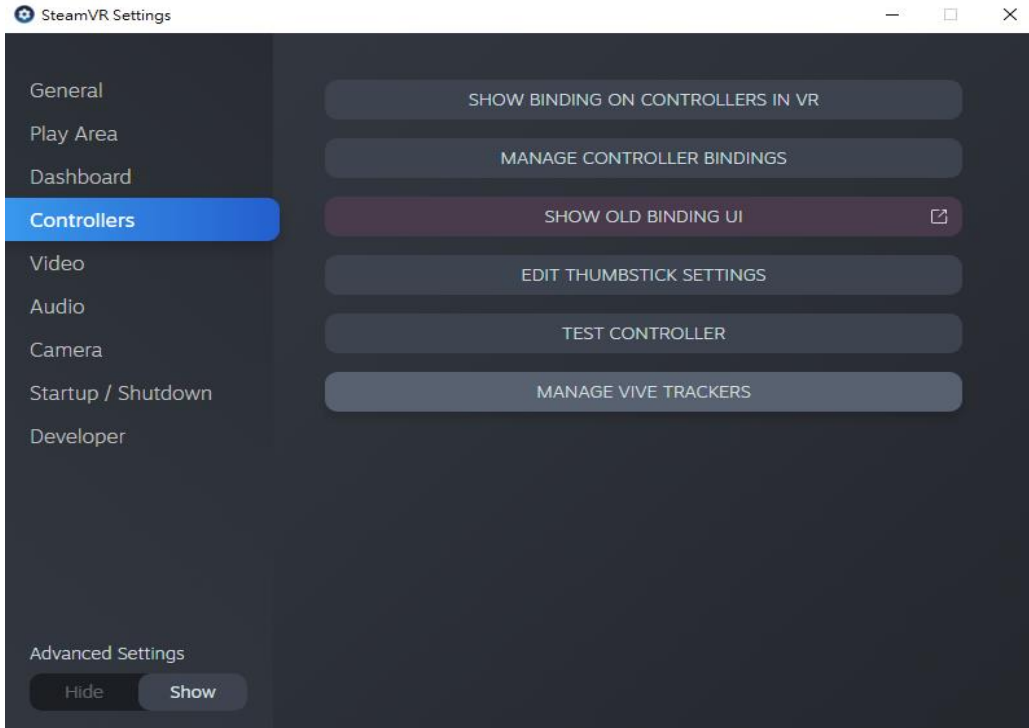
Step 2: Create the 3D Object for VIVE Tracker (3.0). In this example, **Capsule** is used.



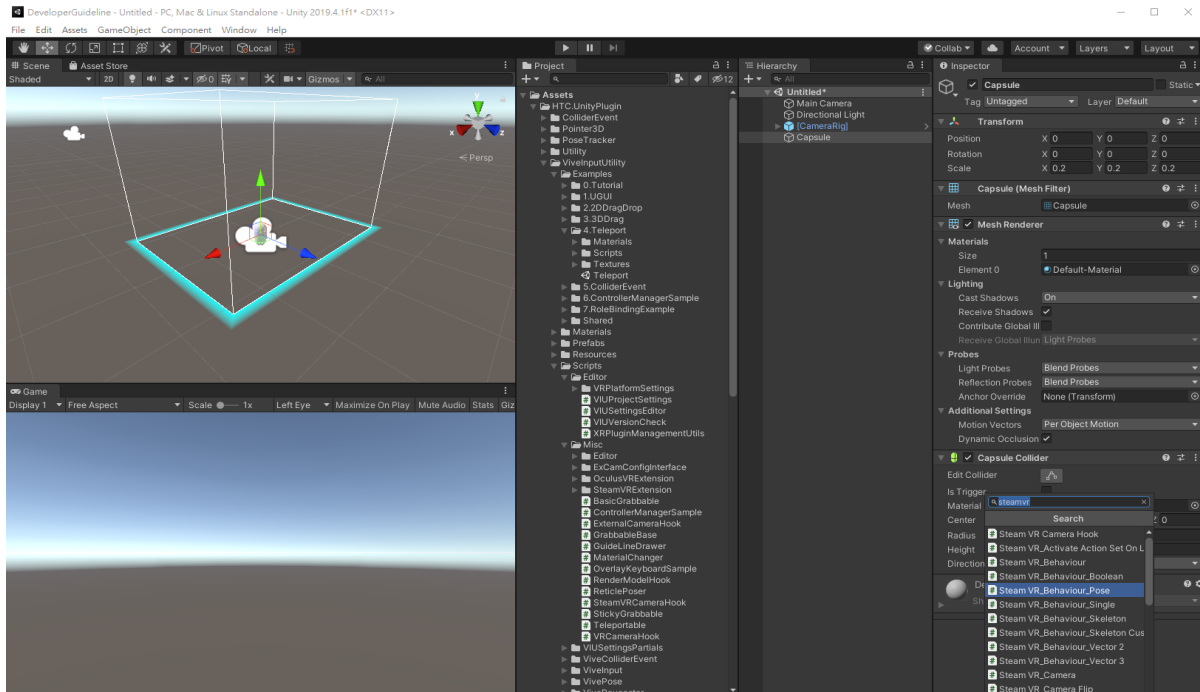
Step 3: Adjust the scale of the Capsule to 0.2.



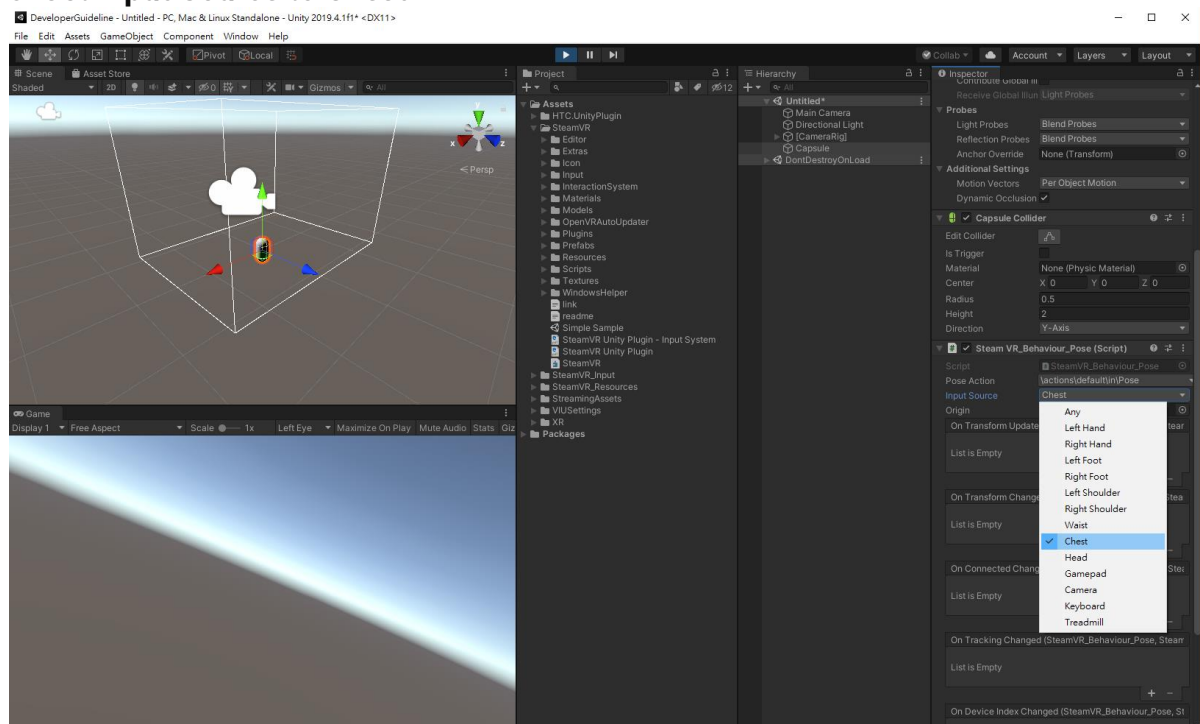
Step 4: In SteamVR, click **Devices > Controller Settings > Manage VIVE Trackers** to edit **Tracker Role** of your tracker. In this example, **Chest** is used.



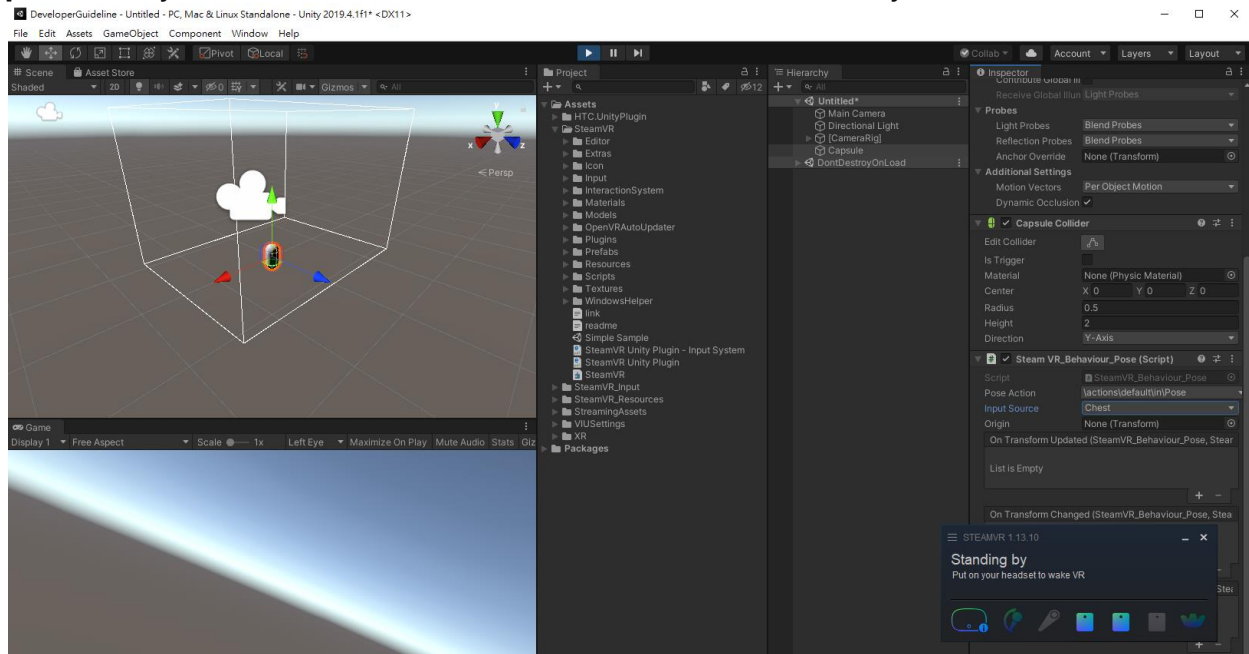
Step 5: Add SteamVR_Behaviour_Pose object



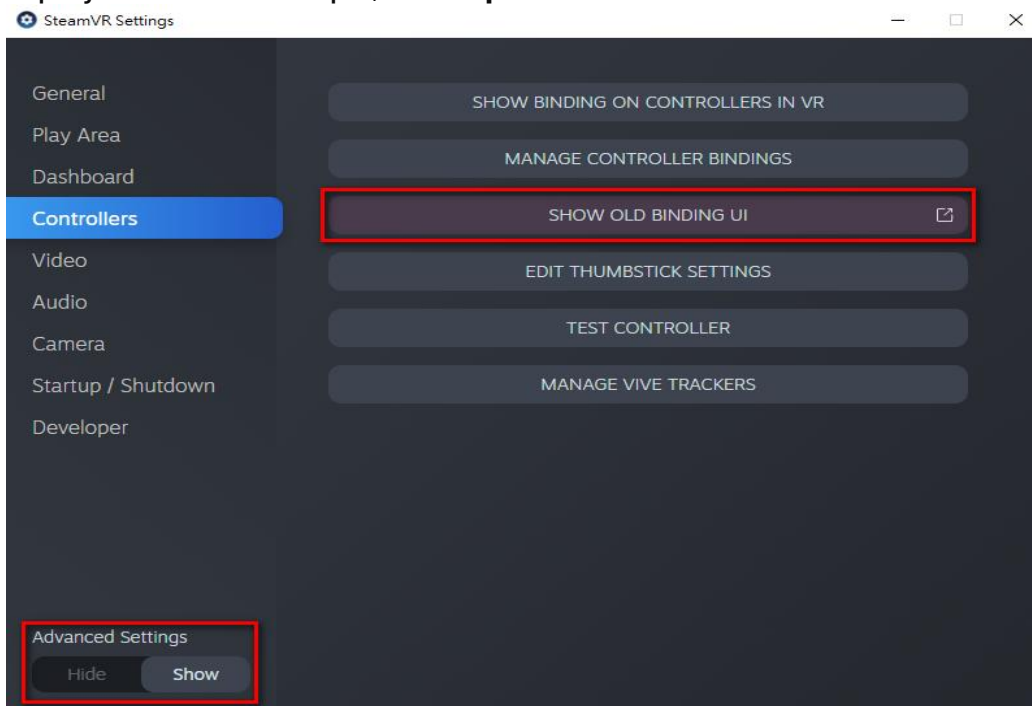
Step 6: Set Input Source to Chest.



Step 7: In Unity, click **Run**. You will need to “Add Action Pose” for your tracker.



In SteamVR Settings, click **Show** in **Advanced Settings**. Click **Show Old Binding UI**, and then choose your project. In this example, **DeveloperGuideline** is used.



After selecting your application, click on **Edit** for **Vive Tracker on Chest**.

Controller Binding

← BACK

CHANGE BINDINGS FOR DEVELOPERGUIDELINE [TESTING]

Current Binding

Official bindings for DeveloperGuideline [Testing]
These are the official bindings published by the developer of this game

Edit

Current Controller



Vive Tracker on Chest

Create New Binding

Click **Add Action Pose** and change the poses of `/user/chest/pose/raw` from **Unused** to **Pose**. When you move VIVE Tracker (3.0), you will see the Capsule object is also moving in the content.

Controller Binding

← BACK

EDITING BINDINGS_VIVE_TRACKER_CHEST

DEVELOPER BINDING FOR VIVE TRACKER ON CHEST IN DEVELOPERGUIDELINE [TESTING]

default

10

platformer

2

buggy

4

mixedreality

Power



Add Chords

Add Action Pose

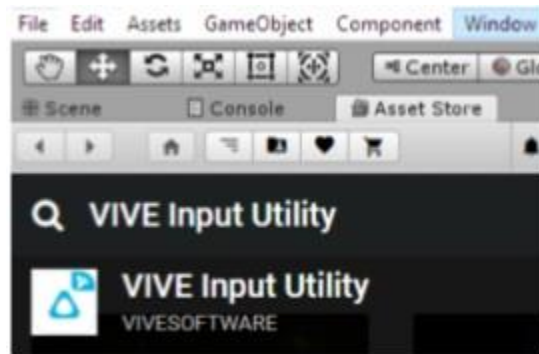
Add Haptics

Publish to Workshop

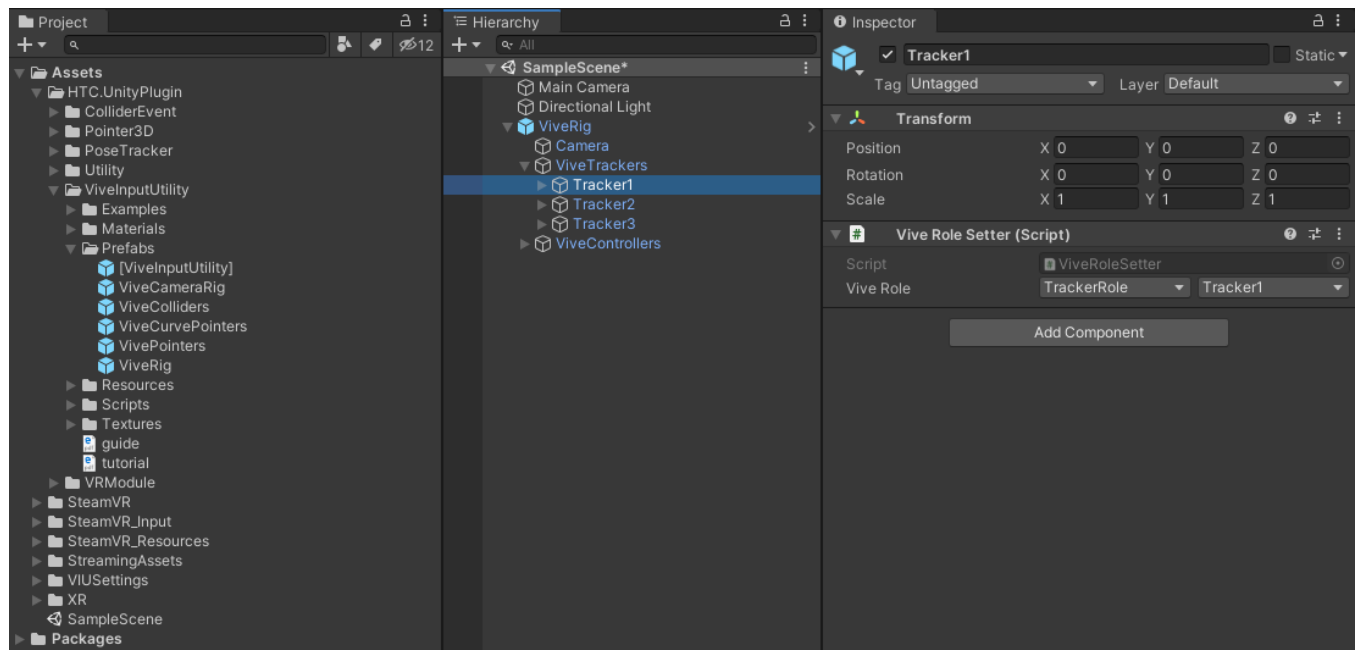
Save Personal Binding

Using VIVE Unity plugin

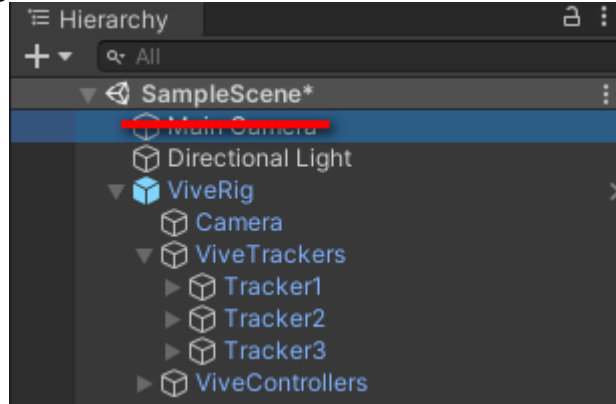
Import the VIVE Input Utility plugin into your project. If you do not have the plugin, download it from the Unity Asset Store. The VIVE Input Utility (VIU) plugin is a cross-platform VR toolkit with additional support for the VIVE Trackers.



Step 1: Add "ViveCameraRig" or "ViveRig" to scene Hierarchy to add support for controllers and trackers in Unity.



Step 2. Just like SteamVR's "CameraRig", you can remove the existing "Camera" from the scene because the ViveRig includes a camera.



Step 3. Run to see the trackers supported just like the controllers. You will see the models from SteamVR if you have the SteamVR plugin, otherwise you will only see included models. The VIVERig and VIVECameraRig prefabs include support for up to three trackers. To add additional trackers, simply duplicate a tracker and rename the game object. In the inspector, make sure to also update the ViveRole.



SteamVR Tracker (3.0) model (example)

Note: Currently in both SteamVR and VIU, there is support for up to 11 (or 13, if not using controllers) trackers for a total of 16 devices (including the HMD and base stations). Recently, OpenVR has been updated to support up to 64 devices, but this has not been updated yet in the Unity plugins (but developers can add support with their own code).

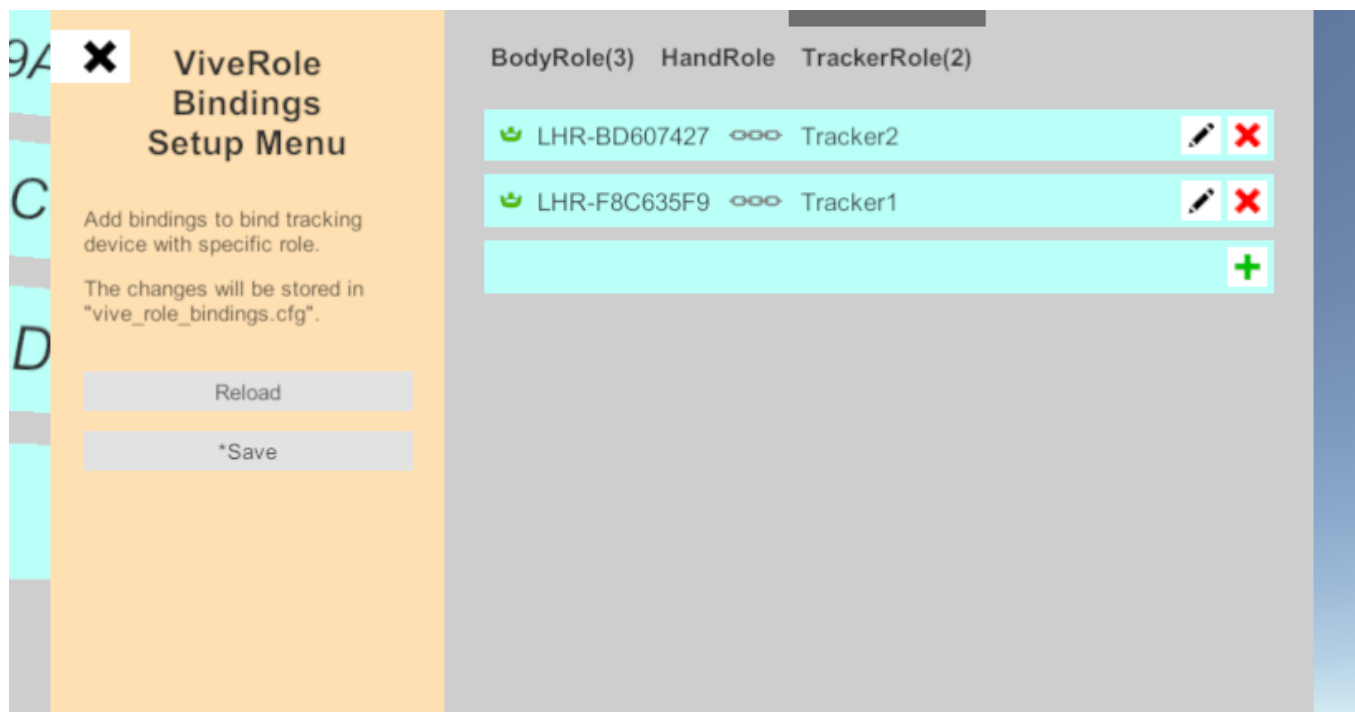
VIVE Trackers and VIVE Roles

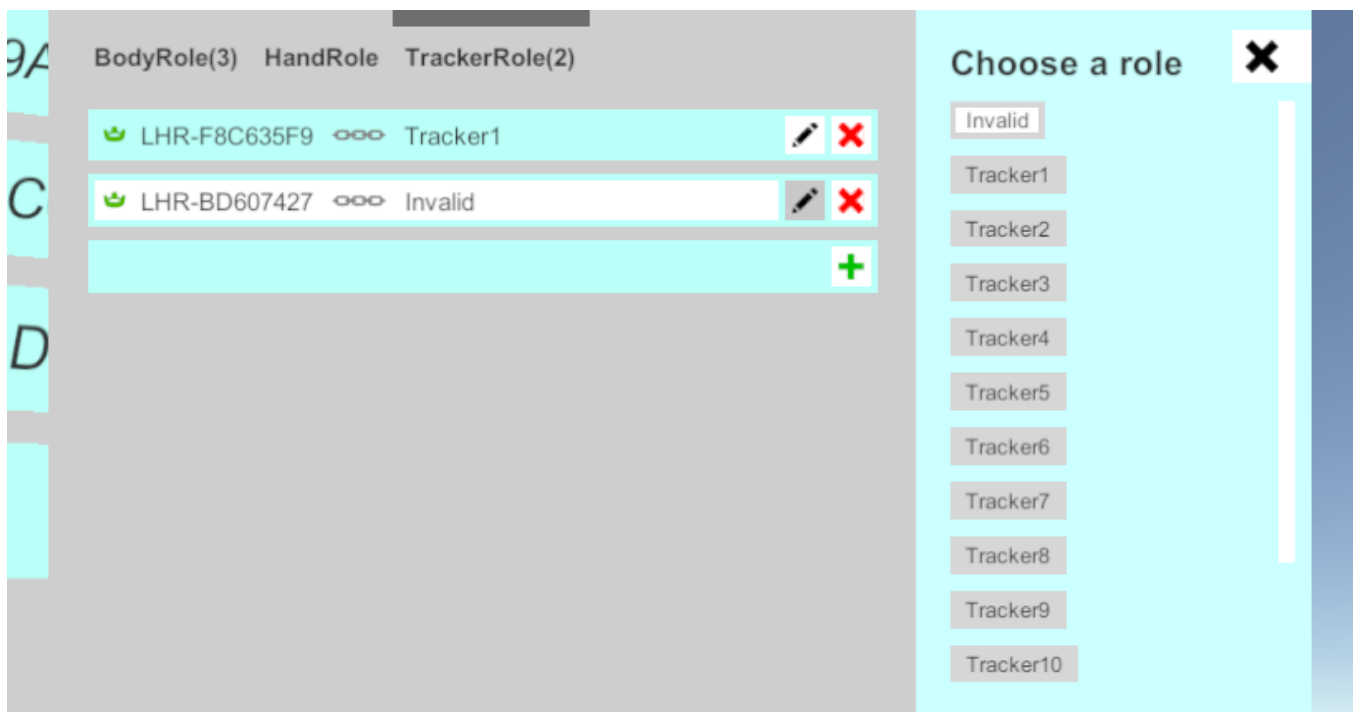
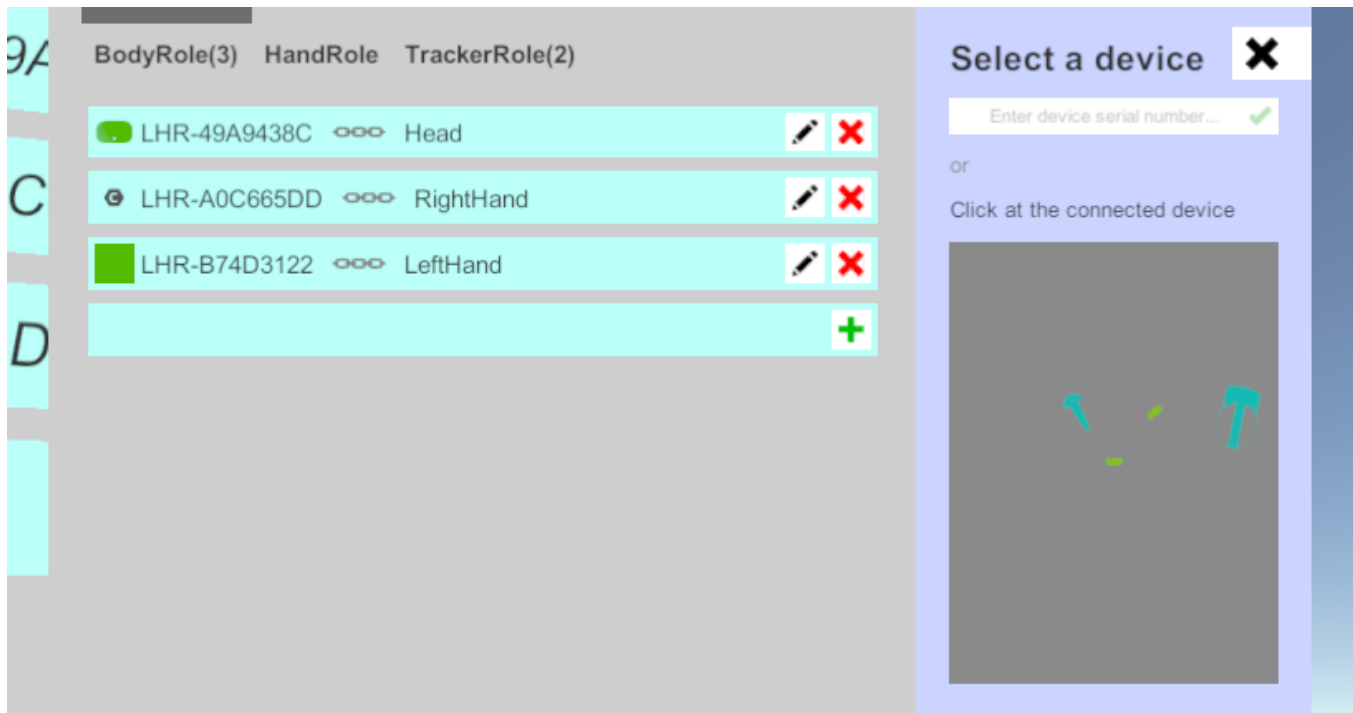
One of the benefits of using the VIVE Input Utility is that you can swap VIVE trackers or redefine where they are attached to without worrying about managing device IDs and serial numbers.

You can now assign VIVE Roles depending on the context: TrackerRole, BodyRole, HandRole and DeviceRole. For example, you can define the same VIVE tracker as always assigned to your left foot using BodyRole LeftFoot. You can also assign for trackers to the same role to make it easier to swap out tracker devices when one is low on battery.

The VIVE Input Utility also provides a tool to discover and assign roles without additional code.

A keyboard shortcut, which can be assigned to display this overlay UI:





Additionally, there is an API available to create your own VR UI for assigning roles. For more information, check this [github article](#). An example project is included in the VIU plugin - "7.RoleBindingExample".

	VIVE Tracker (3.0) HTC Corporation	Developer Guidelines V1.0 12/16/2020
---	--	---

Tracker on Unity or Unreal Engine

If you encounter problems in enabling VIVE Tracker (3.0) on Unity or Unreal Engine, refer to the following:

- For Unity 3D:
 - Download link for the VIVE Input Utility package: [AssetStore](#) or [GitHub](#)
 - VIVE Input Utility source code repository:
<https://github.com/VIVESoftware/VIVEInputUtility-Unity>
- For Unreal Engine 4:
 - Check that you're using Unreal Engine version 4.26 or newer.

Firmware update

Check the SteamVR notification to update the firmware. You can update the VIVE Tracker (3.0) firmware by:

1. Copy the firmware binary files (including MCU, FPGA and RF) provided by HTC into the same folder of "lighthouse_watchman_update.exe" in your PC.
2. If a VIVE controller is connected to your computer through USB, unplug it first.
3. Connect one VIVE Tracker (3.0) to your computer using the USB cable.
4. Execute the following commands:

a. Update the MCU firmware:

```
lighthouse_watchman_update --target=default watchman_v3.fw
```

b. Update the FPGA firmware:

```
lighthouse_watchman_update.exe --target=default ice40_hdk_xxx.fw
```

c. Update the RF firmware:

```
lighthouse_watchman_update --target=default nrf52_xxx.fw
```