



**Centro Universitario de la Defensa  
en la Escuela Naval Militar**

**TRABAJO FIN DE GRADO**

*Diseño del soporte de una celda de yodo empleada en  
espectroscopía para su impresión 3D*

**Grado en Ingeniería Mecánica**

**ALUMNO:** Samuel Ruiz Juárez

**DIRECTORES:** Alicia Vázquez Carpentier

**CURSO ACADÉMICO:** 2023-2024

**Universida<sub>de</sub>Vigo**





# Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar

## TRABAJO FIN DE GRADO

*Diseño del soporte de una celda de yodo empleada en  
espectroscopía para su impresión 3D*

**Grado en Ingeniería Mecánica**  
Intensificación en Tecnología Naval  
Infantería de Marina

Universida<sub>de</sub>Vigo



## **RESUMEN**

La impresión 3D es una técnica que ha sufrido un crecimiento exponencial en cuanto a su empleo en diferentes ámbitos de la ingeniería desde su invención en los años 80. Las infinitas posibilidades que brinda el manejar este método de fabricación aditiva, va desde aplicaciones cotidianas como piezas para recambios sencillos, hasta las más inverosímiles aplicaciones médicas como puede ser la impresión de válvulas cardíacas. En este TFG se llevará a cabo todo el proceso de diseño de una de estas piezas, incluyendo un análisis de los filamentos disponibles para la impresión 3D. Se espera que el soporte diseñado vea la luz de manos del Real Instituto y Observatorio de la Armada, y pueda ser incluido en su mesa óptica. A lo largo de las páginas que siguen se podrán comprender los pasos a seguir desde que se comienza a diseñar la pieza, hasta que finalmente se lleva a cabo la impresión de esta. El objetivo del trabajo, es desarrollar un soporte que pueda ser producido por la Impresora 3D disponible en el ROA, que sea el encargado de sostener la celda de yodo del reloj atómico que se está intentando implementar. El funcionamiento de este se basa en una celda que es atravesada por un haz láser que excita los átomos del interior y mide la frecuencia de transición atómica del yodo que sirve como referencia para medir el tiempo.

La Armada afronta el desafío de obtener una medición del segundo cada vez más precisa, puesto que la medición del tiempo tiene una influencia directa en actividades clave en cualquier operación militar como la navegación por satélite (GPS) o las comunicaciones. A la finalización de este TFG y con ayuda del ROA, la Armada implementará un reloj de átomos de yodo con una tasa de error de  $10^{15}$ , en otras palabras, un reloj con una tasa de error de un segundo cada 30 millones de años.

## **PALABRAS CLAVE**

Reloj Atómico, Diseño, Fabricación Aditiva, Impresión 3D, Soporte



## AGRADECIMIENTOS

A ti mamá, que siempre estuviste ahí y cargaste con preocupaciones que no te correspondían, que supiste ser paciente y siempre lograste encontrar las palabras que necesitaba escuchar.

A ti papá, por darme siempre los ánimos oportunos y no meter nunca demasiada presión.

A mis hermanos, Mariano y Adrián, por aportarme puntos de vista diferentes para que pudiese ver la vida con un poco más de perspectiva.

Al AA Martínez Sol, por ser bastón cuando ni yo sabía que necesitaba apoyo, y por preocuparse antes del hermano que tenía al lado que de sí mismo. Si estoy entregando este TFG es gracias a ti.

A todo aquel que me haya acompañado a lo largo de este arduo camino haciéndolo un poco más llevadero.

A mis dos promociones de Infantería de Marina, que aprendieron a entenderme y nunca dejaron de enseñarme.

A mi tutora, la Dra. Alicia Vázquez Carpentier, que me ha acompañado a lo largo de este TFG guiándome y aconsejándome cuando ha sido preciso para que este trabajo llegase a buen puerto.

Al TN Antonio Estarellas, mi “tutor” militar, que ha seguido el proceso de inicio a fin, y para el que espero que este TFG sirva de ayuda en cuantos proyectos futuros sea posible.

Gracias a todos los que confiaron en mí y que me dejaron siempre el espacio que necesitaba sin alejarse demasiado del camino que me iban allanando.



## CONTENIDO

Contenido .....	1
Índice de Figuras .....	3
Índice de Tablas.....	5
1 Introducción y objetivos .....	7
1.1 Contextualización.....	7
1.2 Motivación .....	7
1.3 Objetivos .....	9
1.4 Estructura del Trabajo .....	9
2 Estado del arte .....	11
2.1 Impresión 3D o Fabricación Aditiva.....	11
2.1.1 Historia de la Impresión 3D.....	11
2.1.2 Ventajas de la Fabricación aditiva .....	14
2.1.3 Desventajas de la Fabricación Aditiva.....	15
2.2 Técnicas o Métodos de impresión 3D.....	15
2.2.1 Modelado por deposición fundida (FDM).....	15
2.2.2 Estereolitografía (SLA) .....	16
2.2.3 Procesamiento digital de luz (DLP).....	17
2.2.4 Sinterizado selectivo por láser (SLS) .....	18
2.2.5 Fusión de haz de electrones (EBM).....	18
2.2.6 Inyección de material a demanda (DOD) .....	19
2.3 Diseño de las geometrías y archivos .STL .....	20
2.3.1 Técnicas computacionales de diseño y adquisición de geometrías .....	20
2.4 ROA y Sección de Hora.....	23
2.4.1 Historia de la Sección de Hora .....	23
2.4.2 Reloj de átomos de yodo.....	23
3 Desarrollo del TFG.....	25
3.1 Requisitos, características y restricciones del diseño del soporte .....	25
3.1.1 Características de la celda de yodo .....	25
3.1.2 Limitaciones de diseño .....	26
3.1.3 Modo de anclaje del soporte a la base del reloj atómico .....	26
3.1.4 Impresora y método de impresión .....	27
3.1.5 Materiales disponibles para la impresión 3D.....	28
3.1.6 Elección del material adecuado .....	31

3.2 Diseño de la pieza mediante CAD .....	33
3.2.1 Brainstorming de las posibilidades de diseño.....	33
3.2.2 Reducción del empleo de material.....	34
3.3 Propuestas de soportes .....	34
3.3.1 Primer modelo .....	34
3.3.2 Segundo modelo .....	35
3.3.3 Tercer modelo .....	37
3.3.4 Cuarto modelo .....	39
4 Resultados .....	42
4.1 Desarrollo del modelo elegido .....	42
4.1.1 Diseño en 2D y transformación a producto 3D .....	43
4.1.2 Ensamblado de las piezas .....	45
4.2 Fabricación del soporte .....	46
4.2.1 Características de la Impresión .....	46
4.2.2 Análisis de la cantidad de material y del tiempo empleado en la fabricación .....	47
4.2.3 Porcentaje de relleno.....	48
4.2.4 Análisis de costes de fabricación .....	49
5 Conclusiones y líneas futuras .....	53
5.1 Consecución de los objetivos propuestos.....	53
5.2 Problemas encontrados .....	54
5.3 Líneas futuras .....	54
5.4 Implementación de la Impresión 3D en la Armada .....	55
5.5 Conclusiones personales .....	56
6 Bibliografía.....	59
Anexo I: Implicaciones Sociales, y/o Económicas, y/o Ambientales .....	63
Anexo II: Reflexiones Éticas y Sociales .....	65

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Centro Español de Metrología [3] .....	8
Figura 2-1 Ilustración impresión 3D [4].....	11
Figura 2-2 Línea temporal impresión 3D. Parte 1 [6] .....	12
Figura 2-3 Línea temporal impresión 3D. Parte 2 [6] .....	13
Figura 2-4 Línea temporal impresión 3D. Parte 3 [6] .....	13
Figura 2-5 Línea temporal impresión 3D. Parte 4 [6] .....	14
Figura 2-6 Esquema de impresora tipo FDM [5] .....	16
Figura 2-7 Esquema de impresora 3D tipo SLA [6].....	17
Figura 2-8 Esquema impresora DLP [6] .....	17
Figura 2-9 Esquema de impresora SLS [8] .....	18
Figura 2-10 Esquema de Impresora EBM [10] .....	19
Figura 2-11 Esquema Impresora DOD [11] .....	19
Figura 2-12 Logo del software empleado en el TFG [13].....	20
Figura 2-13 Medición manual de una pieza. [15].....	21
Figura 2-14 Medición en MMC de un engranaje helicoidal de acero endurecido [14] .....	21
Figura 2-15 Escáner láser de una figura [17] .....	22
Figura 2-16 Escáner mediante luz blanca [17] .....	22
Figura 2-17 Modelo obtenido por fotogrametría [18] .....	22
Figura 2-18 Edificio del Real Instituto y Observatorio de la Armada [3].....	23
Figura 2-19 Montaje óptico del reloj de yodo del ROA [22] .....	24
Figura 3-1 Celda de yodo del reloj atómico [23] .....	25
Figura 3-2 Vista de los elementos ubicados bajo la celda [23] .....	26
Figura 3-3 Ejemplo de <i>clamps</i> de la casa ThorLabs [24].....	27
Figura 3-4 Impresora Intamsys Funmat HT Enhanced empleada en el ROA [2] .....	27
Figura 3-5 Clasificación de materiales de INTAM [2] .....	29
Figura 3-6 Primer modelo del soporte para la celda de yodo [Autoría propia].....	34
Figura 3-7 Goma ancla necesaria en el soporte nº1 [33].....	35
Figura 3-8 Ensamblaje de la base nº 1 con ausencia de las gomas de sujeción [Autoría propia] ....	35
Figura 3-9 Base del soporte nº 2 [Autoría propia] .....	36
Figura 3-10 Abrazadera nº1 [Autoría propia] .....	36
Figura 3-11 Abrazadera nº2 [Autoría propia] .....	36
Figura 3-12 Vista superior e inferior de la tuerca roscada M4x0.7 [Autoría propia].....	37
Figura 3-13 Ensamblaje de la base nº 2 con el resto de los elementos [Autoría propia] .....	37

Figura 3-14 Base del soporte n°3 [Autoría propia] .....	38
Figura 3-15 Abrazadera n°3 [Autoría propia] .....	38
Figura 3-16 Vista superior e inferior de la tuerca roscada M6x1 [Autoría propia].....	39
Figura 3-17 Ensamblaje de la base n°3 con el resto de los elementos [Autoría propia] .....	39
Figura 3-18 Base del soporte n°4 [Autoría propia] .....	40
Figura 3-19 Ensamblaje de la base n°4 con el resto de los elementos [Autoría propia] .....	40
Figura 3-20 Ensamblaje conjunto de las bases n°3 y n°4 con el resto de los elementos [Autoría propia] .....	41
Figura 4-1 Material seleccionado y web del proveedor [30].....	43
Figura 4-2 Alzado 2D de la celda de yodo [Autoría propia].....	43
Figura 4-3 Revolución del alzado para obtener la celda de yodo [Autoría propia] .....	43
Figura 4-4 Resultado celda de yodo completa [Autoría propia] .....	44
Figura 4-5 Alzado, perfil y planta de los elementos a extruir del soporte n°4 [Autoría propia] .....	44
Figura 4-6 Alzado y planta de las extrusiones de la abrazadera n°3 [Autoría propia] .....	45
Figura 4-7 Proceso de elaboración de la tuerca n°2 [Autoría propia] .....	45
Figura 4-8 Piezas empleadas en el soporte y ensamblaje final de las mismas [Autoría propia].....	45
Figura 4-9 Explicación de las deformaciones térmicas en la impresión 3D [33].....	46
Figura 4-10 Consejos impresión ASA [34] .....	47
Figura 4-11 <i>Slicer</i> conjunto n°3 Ultimaker Cura [Autoría propia].....	47
Figura 4-12 <i>Slicer</i> conjunto n°4 Ultimaker Cura [Autoría propia].....	48
Figura 4-13 Ejemplo de Porcentaje de relleno [20].....	49
Figura 4-14 Detalles de compra de los <i>clamps</i> [25].....	50
Figura 5-1 Armada Estadounidense haciendo uso de la impresión 3D [20] .....	54
Figura 5-2 Organigrama de la JAL [37] .....	55
Figura 5-3 Mercado de Impresión 3D en el ámbito militar [40] .....	56
Figura A1-0-1 Error de impresión de separación de capas [20].....	63
Figura A1-0-2 Evolución de las cuotas modales del transporte de mercancías (toneladas) en los ámbitos nacional e internacional (%). 2007-2021 [41].....	64

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características técnicas impresora Intamsys Funmat HT [25] .....	28
Tabla 2 Tabla resumen de las características de los materiales de impresión 3D [Autoría propia].	31
Tabla 3 Comparativa de precios [Autoría propia] .....	32
Tabla 4 Resumen materiales a tener en cuenta para la impresión [Autoría propia].....	32
Tabla 5 Características del filamento INTAMSYS ASA seleccionado [2] .....	33
Tabla 6 Relación coste-tiempo de la impresión [Autoría propia] .....	48
Tabla 7 Tabla de inversión inicial [Autoría propia] .....	51



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

## 1.1 Contextualización

La impresión 3D, también llamada fabricación aditiva, se define como el proceso mediante el cual un archivo diseñado por ordenador se convierte en un objeto físico. La impresión 3D ha ido ganando una gran popularidad a lo largo de los años. Desde las impresoras más simples y económicas que pueden ser del tamaño de una caja de zapatos; hasta las más sofisticadas, que incluso posibilitan la construcción de edificios con esta tecnología, u otras capaces de imprimir órganos humanos con texturas similares a las reales y que son empleados en prácticas de cirugía médica. [1]

Todas estas máquinas tienen diversas características en común. Por otra parte, esta tecnología es un nicho con grandes expectativas de crecimiento, tanto en la industria como en el mercado. Algunas de estas características pueden ser la facilidad de operabilidad, el coste reducido de los materiales de impresión más habituales y la capacidad de reducir costes, empleando el material estrictamente necesario, a diferencia de otras técnicas de fabricación como pueden ser el torneado o el fresado, en las cuales se lleva a cabo una remoción del material a trabajar.

En función del objeto que se pretenda crear, se optará por la deposición de un material u otro, estos han ido evolucionando desde unos plásticos con características poco interesantes hasta la actualidad, donde se pueden emplear resinas, materiales comestibles o incluso metales.

En este trabajo, emplearemos la impresión 3D como el único método para la fabricación de nuestra pieza, en concreto utilizaremos la impresora “Intamsys Funmat HT Enhanced”, disponible en el Real Instituto y Observatorio de la Armada (de ahora en adelante ROA) y que servirá para dar vida al soporte encargado de sostener la medida más precisa del tiempo en la Sección de Hora.

## 1.2 Motivación

Desde sus inicios, la Armada siempre ha estado a la vanguardia de la técnica, siendo a menudo un ejemplo a seguir, tanto en formación como en procedimientos científicos. Desde que en 1753 se instaurase el primer observatorio en un torreón de la Academia de Guardias Marinas en Cádiz, a petición del ilustre marino y científico Jorge Juan, hasta el establecimiento definitivo del ROA en 1798, siempre se ha perseguido la medición exacta del tiempo, pues es la principal medida para ordenar o secuenciar cualquier evento, comparar los espacios y su duración, conocer la velocidad de diversos elementos u objetos y cuantificar los cambios en la realidad material. La misión de medir el tiempo recayó en la Armada debido, entre otros factores, a la necesidad imprescindible que tenían sus

buques de llevar a bordo un sistema de medición del tiempo, que les permitiese determinar su posición cuando no contaban con referencias costeras. En 1970 se asigna, por Decreto al ROA la responsabilidad de la determinación, mantenimiento y difusión de las escalas del tiempo físico y astronómico, siendo una de las instituciones que no se hallan en el Centro Español de Metrología en Madrid. Esto viene plasmado en la publicación “INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS DESARROLLADAS EN EL REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA DURANTE EL AÑO 2021” del Real Instituto y Observatorio de la Armada publicado por de Defensa en el apartado 4.1.1 “La Comisión de Laboratorios Asociados al CEM está constituida, además del ROA, por otras cinco instituciones con amplia tradición metrológica y experiencia en determinadas magnitudes, y que por razones de especialización científica y técnica son designados por real decreto del Consejo de Ministros como tales y como depositarios de patrones nacionales de las unidades de ciertas magnitudes, complementando la labor del propio CEM. En concreto, estas instituciones desarrollan y mantienen los patrones de la unidad básica de intensidad luminosa y de flujo luminoso (Laboratorio de Fotometría y Radiometría del Instituto de Óptica “Daza de Valdés”, perteneciente al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)), de la humedad, potencia, ruido, atenuación e impedancia en alta frecuencia (Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial “Esteban Terradas” (INTA)), de la unidad derivada de intervalo de alta tensión eléctrica ( $>1000$  V) (Laboratorio Central Oficial de Electrotecnia (LCOE)), de la actividad (de un radionucleido), de la exposición (rayos X y  $\gamma$ ), del kerma y la dosis absorbida (Laboratorio de Metrología de Radiaciones Ionizantes (LMRI) del CIEMAT) y de la concentración de ozono en aire (Instituto de Salud Carlos III).” [3]



**Figura 1-1 Centro Español de Metrología [3]**

Como miembro de una Armada que ha apuntado siempre a la excelencia y a obtener el máximo rendimiento de sus unidades, decidí solicitar la realización de este TFG, que me brindaba la oportunidad de poder contribuir de una manera tangible a un proyecto que se prevé llevar a cabo en la realidad. El poder dotar al ROA de una pieza crítica para sus cometidos me generaba bastante interés. La manera de hacerlo era diseñando el soporte de la celda de yodo del reloj atómico, que mediante espectroscopía consigue determinar la duración de un segundo, y que cuenta, además, con una tasa de error de un segundo cada treinta millones de años. En este trabajo no podía sino encontrar la motivación necesaria para afrontar este último capítulo de mi formación como Ingeniero Mecánico. Por otra parte, indagando en TFGs de otros años, comprobé que no se cuenta con trabajos similares de

cursos pasados, ni temáticas que se acerquen a nada relacionado con algo relativo a un reloj atómico. Esto hace que sea un proyecto que comienza desde cero y (del mismo modo) me estimula a establecer un nuevo camino que alumnos de futuras promociones puedan seguir. Además, el ahondamiento en las técnicas y materiales de impresión 3D que se llevará a cabo en esta memoria, servirá para el empleo futuro de la tecnología de fabricación aditiva en el ámbito de defensa que puede suponer un acercamiento a la autosuficiencia que nos proporcionan dichas técnicas.

### 1.3 Objetivos

El objetivo principal del proyecto consiste en el diseño del soporte de la celda de yodo, que se empleará en el ROA para realizar espectroscopía para un reloj atómico y determinar así la duración del segundo de la manera más fiel posible. El diseño de este soporte y su posterior impresión evitarán el recurrir a una empresa externa para su diseño y producción, lo que conllevará un ahorro significativo en un proyecto ya de por sí costoso. Los objetivos detallados son los que se relacionan a continuación:

- Diseño de distintos soportes mediante software CAD con el mínimo empleo de material posible.
- Comparación de los soportes y su viabilidad a la hora de instalarlos.
- Posible manufactura de las piezas mediante impresoras 3D.
- Análisis económico para determinar el gasto que supondría su fabricación.

### 1.4 Estructura del Trabajo

La estructura del trabajo será la facilitada en la guía proporcionada por el Centro Universitario de la Defensa para la realización de los TFGs.

En primer lugar, contaba con una Introducción que es la que se pudo leer anteriormente, separada en 3 apartados.

A continuación, se pasará al estado del arte, en el que se explicará la historia tanto del ROA como la sección de la hora, que es la que actualmente nos ocupa. También se hablará de la historia de la impresión 3D, se profundizará en los diferentes materiales que se pueden emplear para su posterior empleo en el ROA.

Seguidamente, en el desarrollo, se describirá de manera más detallada el proceso que he seguido en el trabajo, desde el diseño de la estructura, sus partes y las posibles variaciones, hasta las fases de producción de esta.

El cuarto punto, el de Resultados, mostrará con claridad qué estructura y material se han seleccionado finalmente para la creación del soporte de nuestra celda de yodo.

Finalmente, terminaré con unas conclusiones y líneas futuras, en las que se hará un análisis de los resultados obtenidos en el proceso anterior, las posibles ampliaciones del mismo y donde, además, se relacionarán los objetivos iniciales con estos resultados ya mencionados.



## 2 ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Impresión 3D o Fabricación Aditiva

Según una de las compañías estadounidenses más grandes del mercado, *Autodesk*, la definición de fabricación aditiva o impresión 3D es la siguiente:

“La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, es un proceso que se utiliza para crear un objeto físico (o 3D) mediante la superposición de capas de material a partir de un modelo digital. A diferencia de la fabricación sustractiva, que crea el producto final retirando material de un bloque, la fabricación aditiva combina varias piezas para conformar el producto final”. [2]



Figura 2-1 Ilustración impresión 3D [4]

#### 2.1.1 Historia de la Impresión 3D

La impresión 3D comenzó a desarrollarse el siglo pasado. Desde que se inventó la impresora de inyección de tinta en 1976, se comenzó a pensar sobre, si imprimir esta en capas superpuestas podría dar lugar a la creación de un sólido en 3D. La primera persona que comenzó el desarrollo de una patente de un dispositivo capaz de endurecer fopolímeros líquidos mediante luz ultravioleta fue el japonés Hideo Kodama; no obstante, su diseño no llegó a ver la luz debido a la falta de subvenciones.

Fue tres años más tarde cuando el estadounidense Charles W. Hull, fue capaz de imprimir por vez primera una pieza mediante la técnica de estereolitografía, que explicaremos más adelante. [3]

A lo largo de la década de los 90, y cuando se empieza a vislumbrar el enorme potencial de una tecnología que permite obtener modelos, ya sea a escala o a tamaño real, de manera rápida, económica y sin tener que recurrir a otras técnicas de conformado o mecanizado, la investigación y desarrollo de la industria de la impresión 3D comienza a sufrir un crecimiento exponencial. Durante estos años, se patentaron los métodos de impresión de Sinterizado Selectivo por Láser y Modelado por Deposición Fundida. La primera máquina que se comercializó contaba con la tecnología SLA, y fue desarrollada por la empresa 3D Systems, fundada por el Sr. Hull, considerado el padre de la Fabricación Aditiva. En el año 1999, tuvo lugar el nacimiento de la impresión de elementos en 3D con fines biomédicos, desarrollado por el instituto de Wake Forest, que creó una vejiga, que exitosamente se trasplantó a un paciente; esto sentó un precedente con un futuro esperanzador, y hoy en día incluso se imprimen válvulas cardíacas, que se emplean en operaciones de corazón. [4]

En la actualidad la Impresión 3D está bastante desarrollada; eso permite que haya habido un descenso en los precios de las máquinas, así como en los materiales necesarios para la impresión más básicos; cualquiera puede adquirir una impresora 3D por unos 400 euros y comprar una bobina de hilo termofusible por menos de 10. Además, la comunidad comparte habitualmente los diseños en la web, por lo que bastaría con descargar los archivos .STL de terceros y proceder a la impresión.

En contrapartida, la impresión 3D se enfrenta a diversos problemas que han ido surgiendo recientemente. En particular, los relacionados con los derechos de autor, que se asemejan a los que sufrió internet cuando irrumpió en el mundo del entretenimiento, y tanto la industria del cine, como de la música se vieron sorprendidas por una plataforma que distribuía contenido de manera gratuita a los usuarios. Del mismo modo, la posibilidad de obtener modelos mediante fotogrametría, que posteriormente se imprimen, hace que sean difíciles de controlar o rastrear el origen de los diseños. A su vez, la posibilidad de imprimir armas tanto blancas como de fuego perfectamente funcionales e irrastreables generó cierta reticencia a la hora de acercar la impresión 3D a toda persona interesada en la misma.

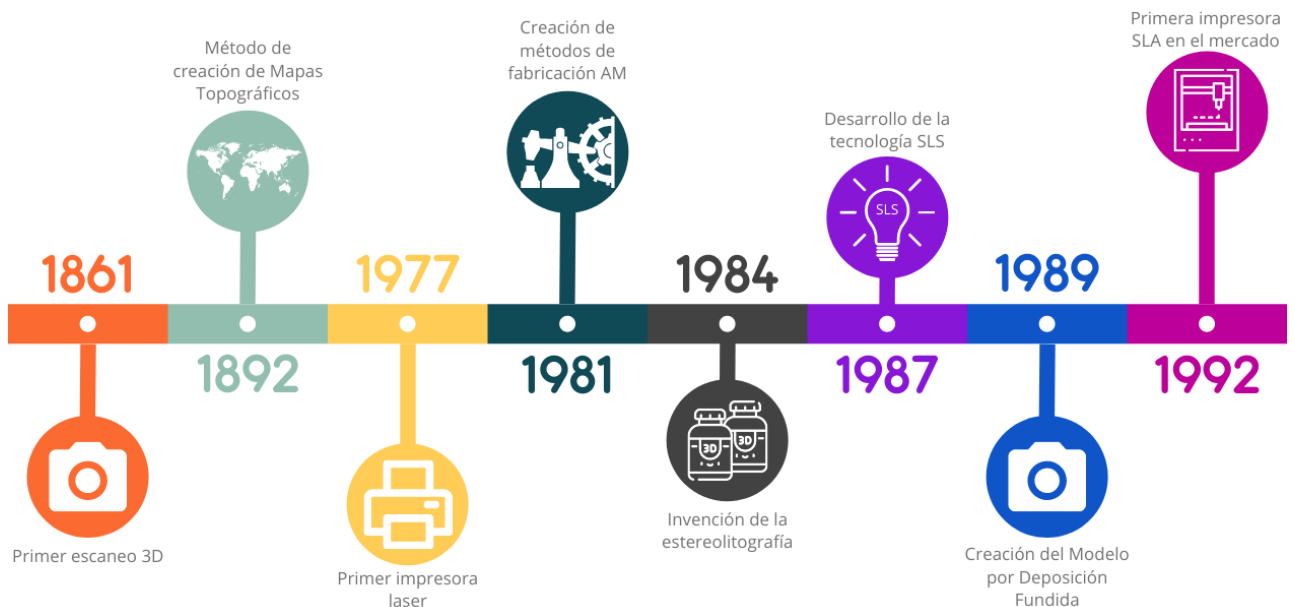


Figura 2-2 Línea temporal impresión 3D. Parte 1 [6]

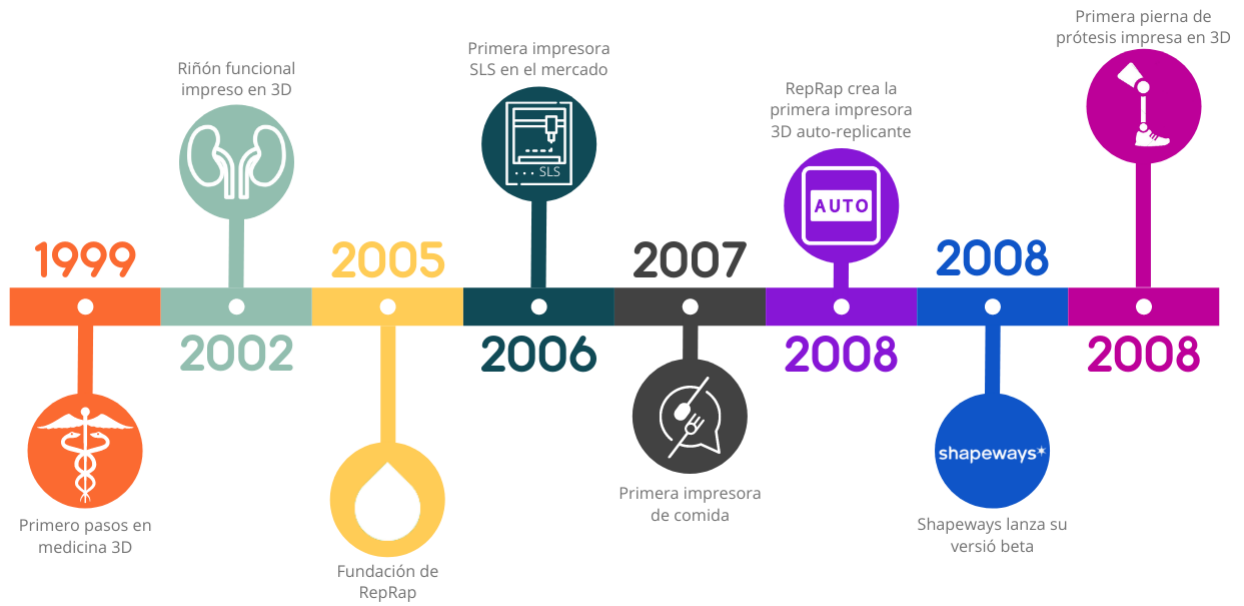


Figura 2-3 Línea temporal impresión 3D. Parte 2 [6]

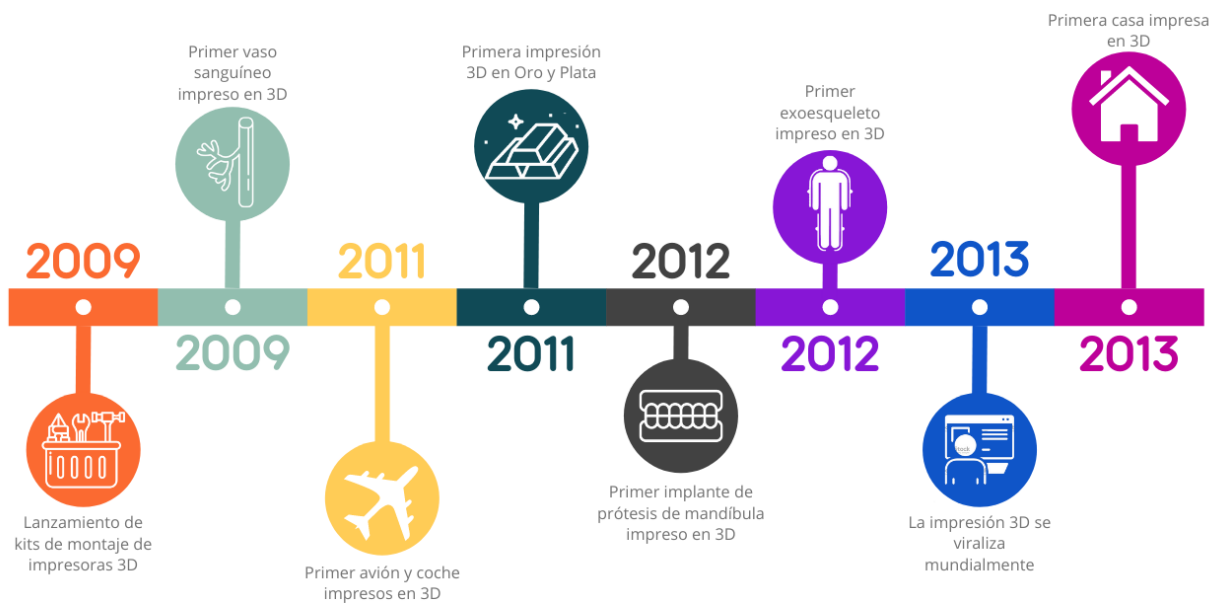


Figura 2-4 Línea temporal impresión 3D. Parte 3 [6]

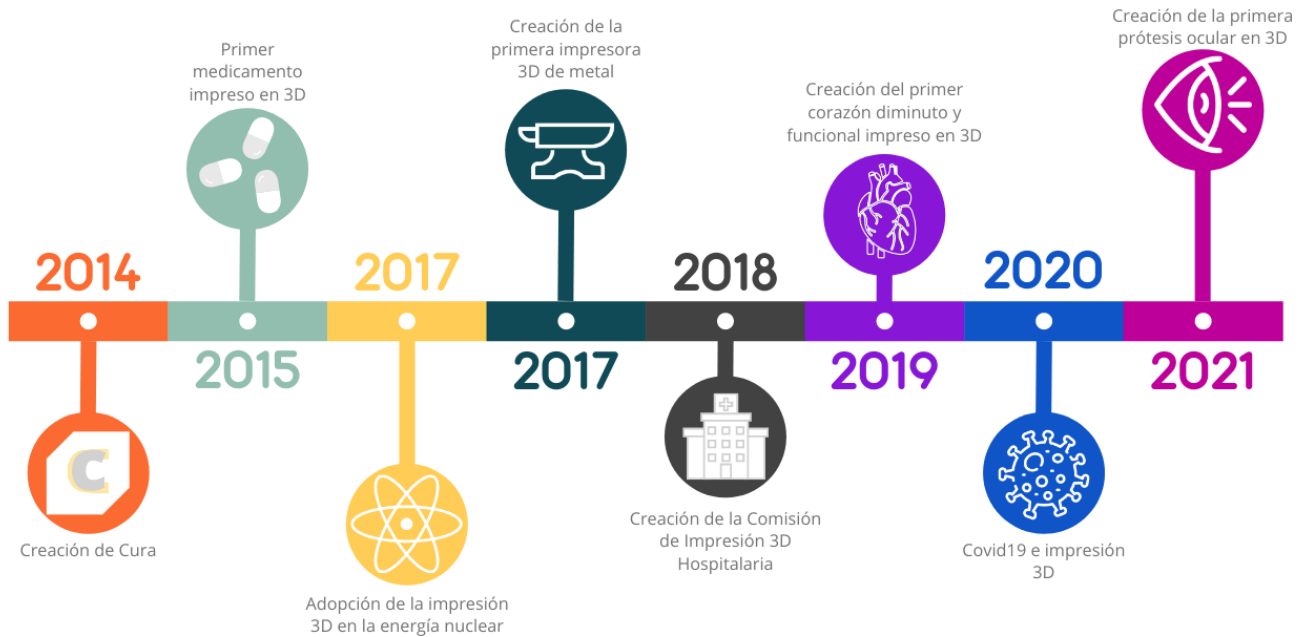


Figura 2-5 Línea temporal impresión 3D. Parte 4 [6]

### 2.1.2 Ventajas de la Fabricación aditiva

La fabricación aditiva supuso una revolución a la hora de desarrollar y fabricar piezas por diversos factores, no obstante, cuenta con numerosas ventajas, que según la empresa *Dassault Systèmes* son las siguientes: [3]

- I. Creación de geometrías complejas: a diferencia de los métodos tradicionales de mecanizado, la impresión 3D puede crear formas más complejas de manera sencilla y sin recurrir a procesos complementarios, ni recurrir a ensamblajes de varios componentes, por ejemplo, con huecos internos que permitan aligerar la pieza y ahorrar en materias primas sin comprometer el diseño.
- II. Aplicaciones médicas personalizadas: la impresión 3D permite a médicos producir artículos completamente personalizados para cada paciente y sus requerimientos, como puede ser el caso de prótesis dentales, caderas, rodillas, etc. Durante la pandemia, la carencia de hisopos provocó que se comenzasen a imprimir para paliar su escasez. La tendencia actual es a desarrollar tejidos biocompatibles, esenciales para los avances en especialidades como la cardiología.
- III. Ingeniería de diseño y fabricación: la impresión 3D agiliza enormemente el proceso de creación de piezas, puesto que basta con introducir el modelo e imprimir, sin tener los ingenieros que enfrentarse a tecnologías de fabricación sustractivas, y lo que antes era un ensamblado complejo de varias piezas, ahora es un único modelo que se imprime en el mismo sitio.
- IV. Fabricación Eficiente: la fabricación aditiva es un método eficiente, puesto que únicamente cuenta con un paso en el que la energía empleada es muy inferior a la que resultaría de la producción de una pieza metálica, por citar un ejemplo, que habría que mecanizar. Además, se desperdicia poco material y se evitan los cortes de inventario o almacén, puesto que se pueden fabricar bajo demanda.
- V. Materiales ligeros: la mayoría de los materiales empleados en esta técnica son plásticos ligeros y materiales de ingeniería, que además pueden contar con características de rendimiento específicas como resistencia a la corrosión química, al calor o a la fuerza.
- VI. Poco desperdicio de material: a diferencia de otros métodos de fabricación que retiran material de la pieza a fabricar, en la impresión 3D, prácticamente la totalidad del material empleado va

destinado a formar parte de la pieza que se elabora, además, muchos filamentos son reciclables, y los materiales en polvo son reutilizables al 95%.

- VII. Creación rápida de piezas: las piezas 3D pueden imprimirse en horas, lo cual supone un menor tiempo frente a los costes adicionales del inventario o del transporte de las mismas hasta su destino, teniendo en cuenta que podría no haber existencias.
- VIII. Precio de los equipos: las impresoras 3D, en comparación con un sistema tradicional de fabricación son muy económicas de obtener, comenzando los precios de las más básicas en 200 euros.
- IX. Sostenibilidad: el proceso de fabricación aditiva, no solo utiliza menos material que otros procesos, sino que puede reutilizar y/o reciclar la mayoría de los plásticos y polvos que se emplean.

### *2.1.3 Desventajas de la Fabricación Aditiva*

Al ser una industria relativamente nueva en comparación a otros métodos de fabricación y estar aún en desarrollo, cuenta con algunas desventajas, algunas de ellas son las que a continuación se enumeran: [3]

- I. Precisión: los procesos de impresión 3D buscan lograr la precisión de las máquinas CNC (Control numérico por Computadora) u otras máquinas de fabricación sustractiva. Sin embargo, las impresoras más precisas producen piezas de ~0,2 mm en comparación con las máquinas CNC de hasta 0,005 mm. Se espera que se vayan reduciendo estas diferencias a medida que se sigue desarrollando la tecnología.
- II. Coste: aun siendo los equipos de impresión más baratos que sus similares de otros procesos, la inversión en formación, desarrollo de las piezas y los materiales que se empleen en la impresión pueden elevar el gasto inicial.
- III. Falsificaciones e infracciones de derechos de autor.
- IV. Eliminación de la mano de obra: el hecho de que todo el proceso de fabricación lo realice la misma máquina, puede provocar que ciertos puestos de empleo pasen a ser prescindibles, al igual que sucede con el resto de la industria a medida que avanza la tecnología.
- V. Calidad de la pieza: determinadas piezas pueden contar con delaminaciones, tensiones internas, fragilidad o incluso deformaciones sufridas a la hora de ser impresas.
- VI. Post-procesamiento: la mayor parte de piezas fabricadas, requieren algún tipo de tratamiento o tarea post-procesado. Habitualmente tratados térmicos, pulidos o eliminación de soportes.
- VII. Volumen de producción: debido a que la producción en serie es más lenta que una línea tradicional, la fabricación aditiva, se empleaba mayoritariamente en la producción de prototipos.
- VIII. Tamaño: las impresoras más sofisticadas requieren de cámaras de impresión más grandes, no obstante, la mayoría de las impresoras 3D realizan construcciones de tamaño reducido.

## **2.2 Técnicas o Métodos de impresión 3D**

### *2.2.1 Modelado por deposición fundida (FDM)*

El FDM es de los más empleados debido a su fácil empleo, el reducido espacio que ocupan las impresoras y la gran versatilidad que proporcionan a la hora de imprimir figuras huecas o de pequeño tamaño. Se trata de un tipo de fabricación en la que se hace pasar un filamento a través de una boquilla extrusora a la temperatura estipulada para ese material, de modo que pasa a ser un fluido, que se va depositando sobre una base. Los archivos para imprimir sufren un proceso en el que se separan en las

tres coordenadas ( $x$  y  $z$ ), las  $x$  e  $y$  irán en el plano horizontal, mientras que la  $z$  se empleará para dividir en capas el producto a reproducir. De esta manera, la impresora realizará tantas pasadas como capas tenga el archivo en cuestión, y la calidad y acabado de la pieza dependerán tanto del número de pasadas como de la precisión de la boquilla extrusora. Estas impresoras emplean mayoritariamente dos tipos de fundentes, el ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno) y el PLA (Ácido Poli-Láctico).

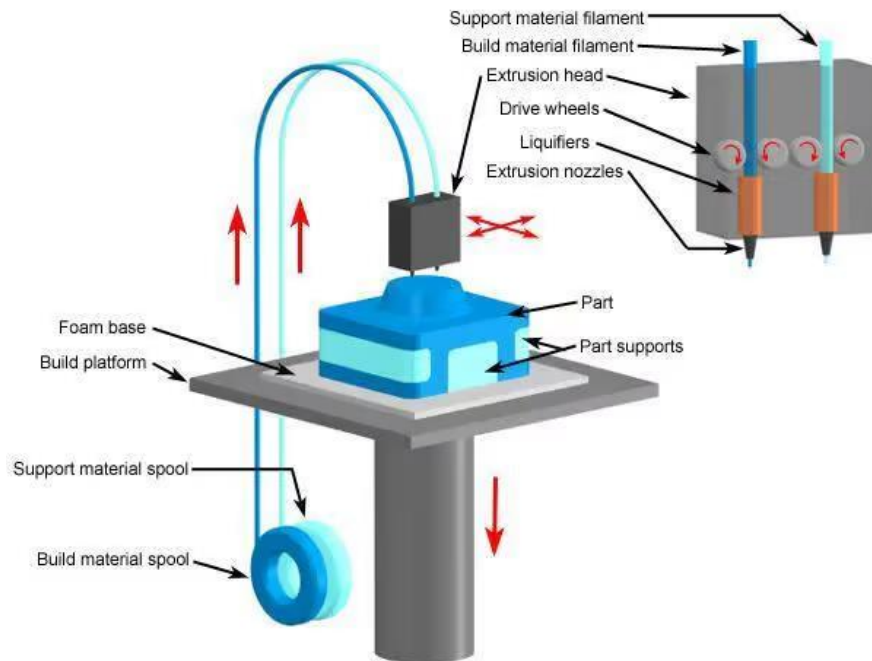


Figura 2-6 Esquema de impresora tipo FDM [5]

### 2.2.2 Estereolitografía (SLA)

La SLA es un proceso de impresión, que emplea la fotopolimerización mediante un láser UV que solidificará partes de una cuba llena de resina líquida para así producir la pieza. Es la metodología más antigua de impresión en 3D y la que mayor número de materiales avanzados para imprimir posee, como pueden ser los biocompatibles, flexibles, esterilizables... Como ventajas fundamentales de este modelo, encontramos la gran calidad de los acabados de las piezas producidas, unido a su rápida producción. Como desventajas más notables, necesitamos contar con una estación para limpiar y curar las piezas, además de contar con una pequeña pérdida del material empleado en la impresión.

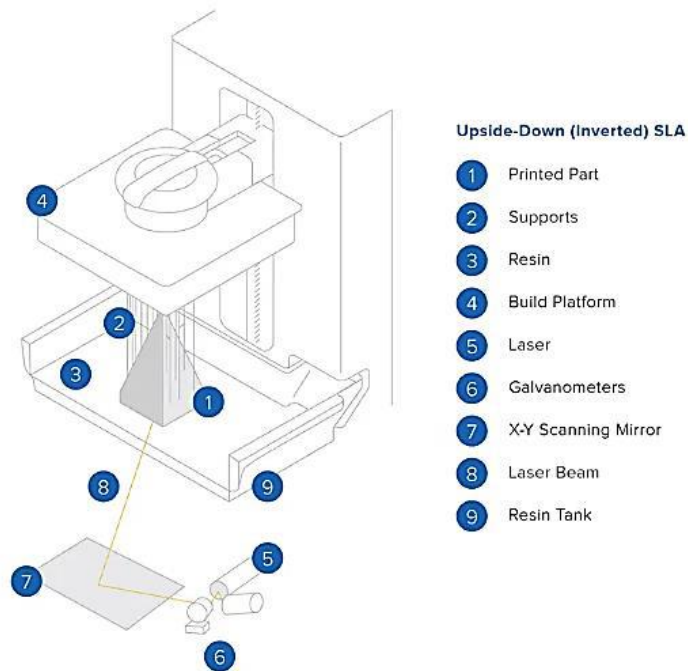


Figura 2-7 Esquema de impresora 3D tipo SLA [6]

### 2.2.3 Procesamiento digital de luz (DLP)

El DLP es un proceso de producción en el que del mismo modo que el método SLA, una luz proyectada en una cuba de resina hace solidificar las distintas capas. Como ventaja principal respecto a esta, es el empleo de luz natural, luz led o luz UV, sin necesidad de contar con un complejo láser.

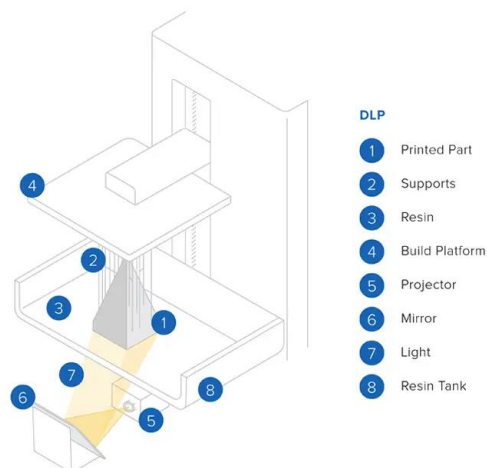


Figura 2-8 Esquema impresora DLP [6]

### 2.2.4 Sinterizado selectivo por láser (SLS)

El SLS, del inglés *selective laser sintering*, se desarrolló en los años 80 y esta tecnología se nutre del láser para imprimir los objetos en 3D. Aunque tiene parecidos comunes con la SLA, este método permite el empleo de materiales en polvo como cristal, nylon, cerámica... El polvo es impactado por el láser, fundiendo y solidificando el material a su paso. Su gran ventaja es el aprovechamiento del 100% del polvo, puesto que el no utilizado, se almacena y se emplea en la siguiente impresión. [7]

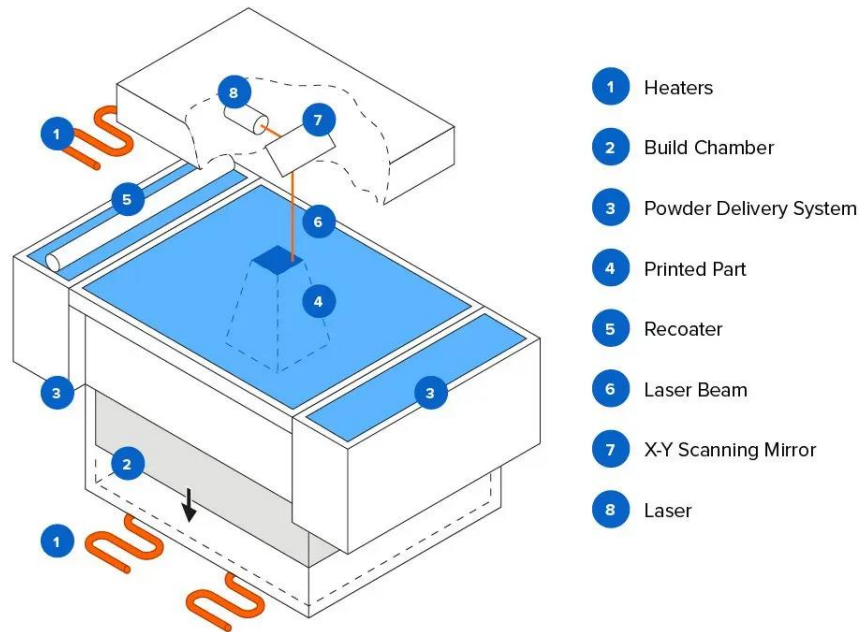


Figura 2-9 Esquema de impresora SLS [8]

### 2.2.5 Fusión de haz de electrones (EBM)

El EBM por sus siglas en inglés, *Electron Beam Melting*, es un método de fabricación aditiva empleando la impresión 3D y polvo metálico. Cuenta con un campo magnético que guía el haz de electrones producido gracias al empleo de un filamento de Tungsteno calentado. Este haz funde el polvo metálico capa por capa hasta crear una pieza 3D con excelentes características físicas, aun pecando de necesitar a menudo algún tipo de trabajo de acabado puesto que suelen ser piezas rugosas, o un tratado térmico para paliar las tensiones internas. Algunas de las ventajas de este método son la rápida creación de piezas, el poco malgasto de material, y las excelentes cualidades mecánicas. En contraposición, se requiere de maquinaria y material costosos así como de personal especializado para su empleo y se debe disponer de una cámara de vacío. [9]

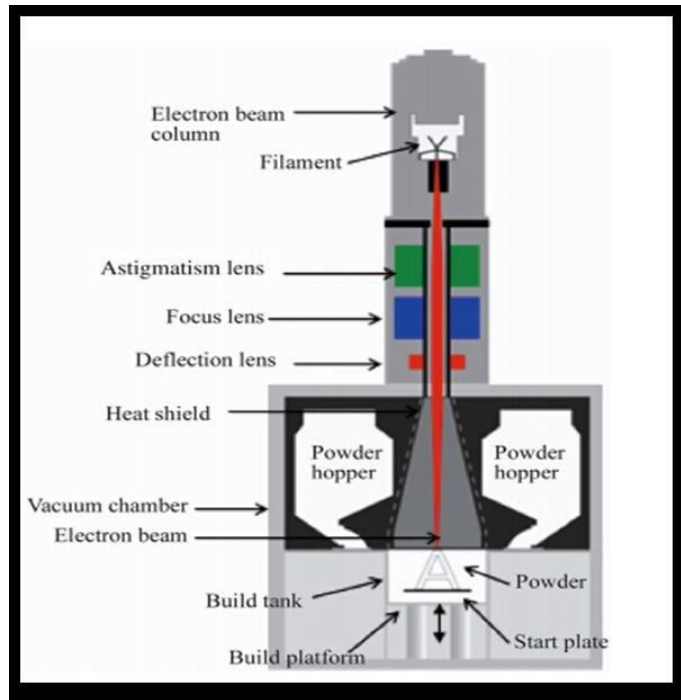


Figura 2-10 Esquema de Impresora EBM [10]

### 2.2.6 Inyección de material a demanda (DOD)

Las impresoras de inyección de material (*Drop On Demand*) cuentan con dos chorros de impresión. En uno de ellos colocan el material con el que se va a llevar a cabo la construcción de la pieza, y en otro, el material de soporte diluible. Estas máquinas también emplean un cortador en las capas previas a la impresión, para garantizar que la capa donde se adhiere quede perfectamente lisa y preparada para la deposición de la siguiente capa. Se trata de una técnica de impresión 3D indirecta, puesto que se emplea mayoritariamente para producir patrones parecidos a la cera, para ser utilizada en fundición a la cera perdida y fabricación de moldes. [11]

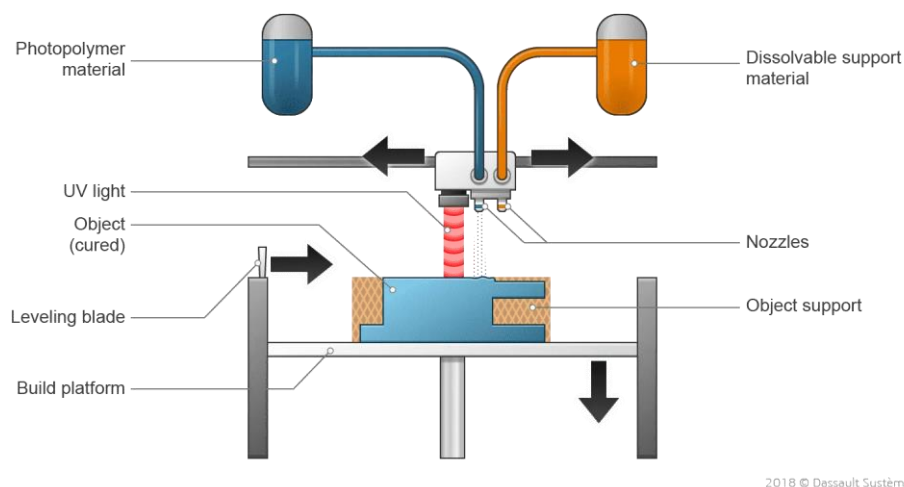


Figura 2-11 Esquema Impresora DOD [11]

## 2.3 Diseño de las geometrías y archivos .STL

Como hemos visto anteriormente, la impresión 3D tiene infinidad de técnicas, aplicaciones y campos en los que desarrollar su actividad. Sin embargo, para llevar a cabo las impresiones, es necesario contar con los planos de la pieza o piezas a elaborar. El archivo más común a la hora de trabajar las piezas de interés es el .STL. En nuestro caso, se empleará el diseño mediante el software Autodesk Inventor, que reúne la tecnología CAD y CAE. El uso de CAD se puede ver en el diseño de piezas, modelado mecánico en 3D, simulación y visualización. El uso de tecnología CAE se puede ver en el análisis de elementos finitos que permite realizar análisis estáticos lineales, pandeo, caída, fatiga y cálculo de estructuras que en nuestro trabajo no se empleará en demasía. Inventor permite integrar datos 2D y 3D en un único entorno, creando una visualización del producto que permite a los usuarios validar la forma, el ajuste y la función del producto final antes de que se construya. Para poder conseguir el objetivo, que es imprimir la pieza, se utilizarán formatos de archivo .STL mencionados anteriormente. [13]



Figura 2-12 Logo del software empleado en el TFG [13]

### 2.3.1 Técnicas computacionales de diseño y adquisición de geometrías

A la hora de desarrollar una pieza para su posterior impresión 3D existen numerosos métodos para conseguir los archivos, generalmente con el formato .STL, y así llevar a cabo la impresión final de la pieza. En el caso de la ingeniería inversa, se trata del proceso de obtener información de una pieza ya existente como pueden ser los planos, materiales o características de este. La siguiente etapa es la conocida como digitalización 3D del objeto físico para convertirlo en un fichero que se pueda trabajar. Para ello, se deben de realizar una serie de medidas con la precisión suficiente como para que la representación del mismo sea fidedigna. Para ello existen diversos métodos como pueden ser los que a continuación se enumeran y describen:

- I. Método manual. Este método es el más sencillo de todos y puede ser llevado a cabo por cualquier operario, puesto que únicamente se necesitan elementos de medida convencionales como un pie de rey y un elemento para medir ángulos. Posteriormente, se trasladarán las medidas a los planos y bocetos del software empleado. [14]

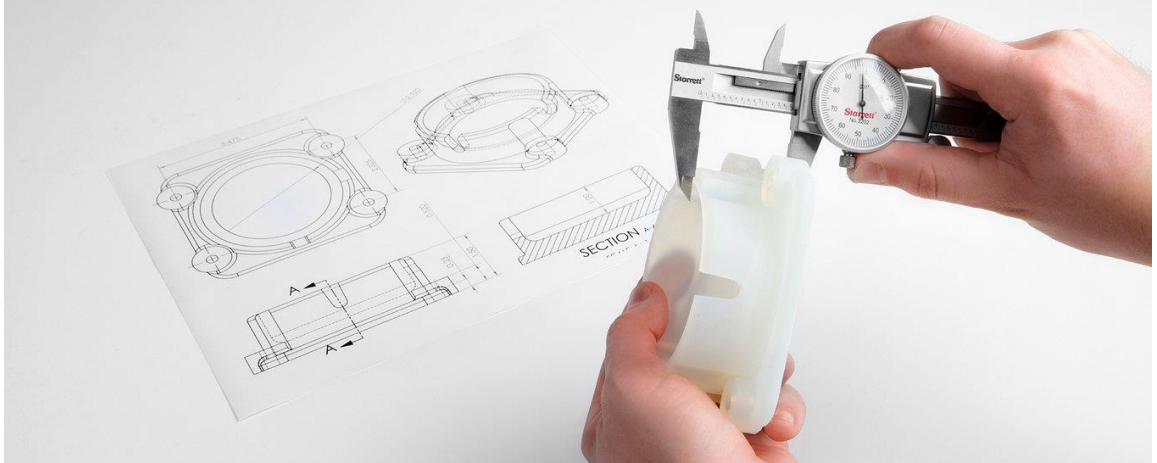


Figura 2-13 Medición manual de una pieza. [15]

- II. Máquinas MMC; o máquinas de medición por coordenadas, son las que mediante un palpador ultrasensible, son capaces de determinar las medidas de los objetos deseados. [14]

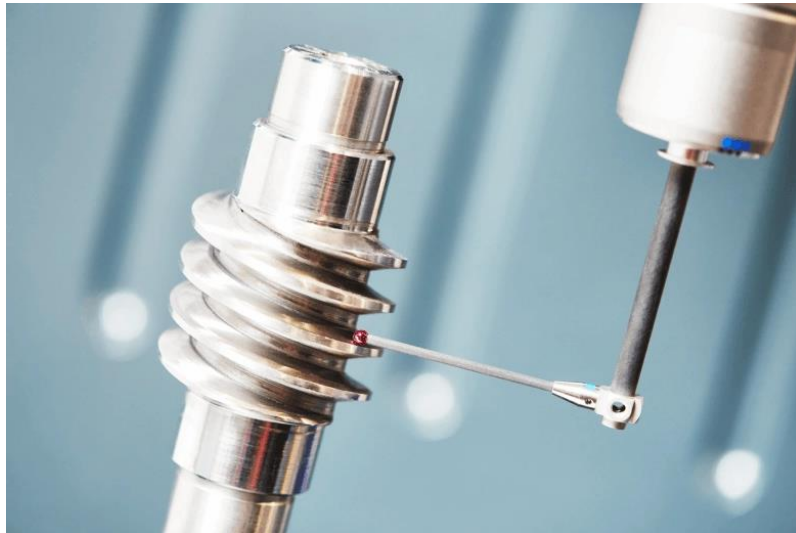


Figura 2-14 Medición en MMC de un engranaje helicoidal de acero endurecido [14]

- III. Escaneado 3D sin contacto. Aquí distinguimos tres categorías que describiré brevemente. En primer lugar, el escáner láser, que emplea una cámara que triangula la posición del mismo al reflejarse en el objeto y obtiene las coordenadas. En segundo lugar, los escáner de luz blanca, que proyectan un patrón de luz, generalmente líneas paralelas y una cámara analiza la deformación de éstas para la determinación del patrón. [17] Por último, la fotogrametría que obtiene una figura 3D superponiendo numerosas imágenes del objeto a referenciar. [18]

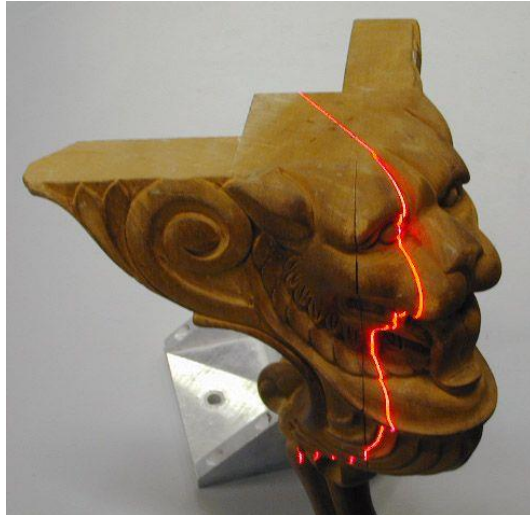


Figura 2-15 Escáner láser de una figura [17]



Figura 2-16 Escáner mediante luz blanca [17]

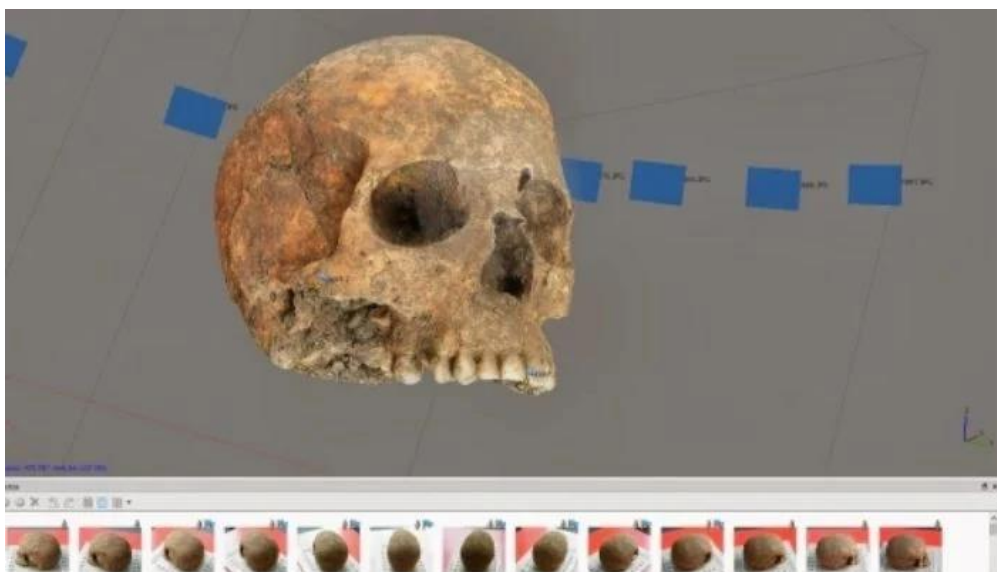


Figura 2-17 Modelo obtenido por fotogrametría [18]

## 2.4 ROA y Sección de Hora

A lo largo de la historia, la Armada siempre ha sido un organismo puntero en cuanto a conocimientos científico-técnicos, sobre todo los relacionados con la navegación o la astronomía. La medida del tiempo, es necesaria para ubicar y controlar todos estos conocimientos. El control del patrón del tiempo inició su cuenta particular hace medio siglo con la creación de la Sección de Hora encuadrada dentro del ROA. Y como define la introducción del catálogo Centinelas del Tiempo: “*En 1971, la Marina introduce en España la escala de Tiempo Atómico Internacional (TAI), base del actual UTC (Tiempo Universal Coordinado), al encomendar al Instituto y Observatorio de la Marina la determinación, mantenimiento y difusión de las escalas de tiempo físico y astronómico, de acuerdo con los requisitos internacionales (R.D. 1852/1970, de 31 de diciembre), y se crea la Sección de Hora, cuyas tareas dependían, hasta entonces, de la Sección de Astronomía. En 1976, esta escala atómica se extendió para determinar la hora legal en España (R.D. 2781/1976), correspondiendo al Observatorio llevar tal escala y tomar las medidas para su difusión.*” [19] Desde entonces el ROA y la Sección de Hora serán los encargados de mantener el patrón nacional de la unidad básica de tiempo.



Figura 2-18 Edificio del Real Instituto y Observatorio de la Armada [3]

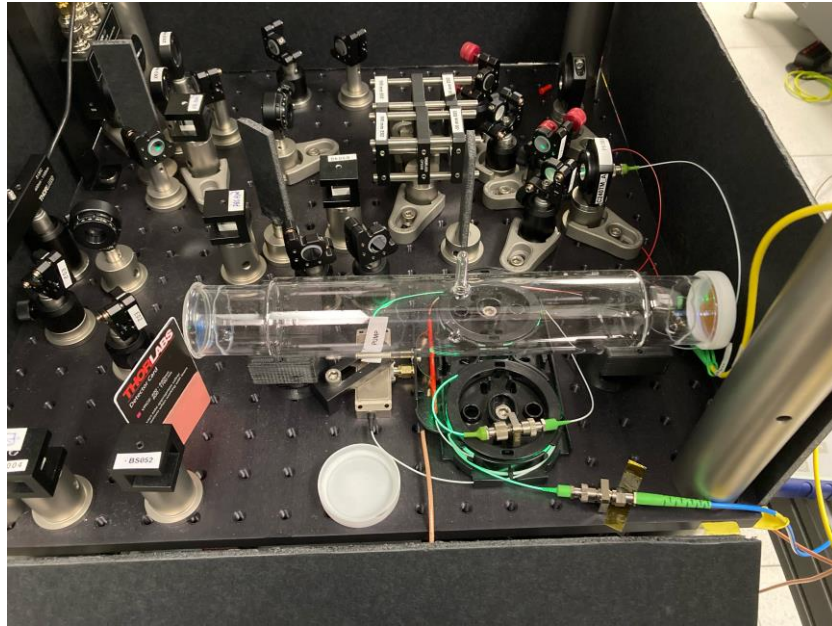
### 2.4.1 Historia de la Sección de Hora

La Sección de Hora del ROA se estableció hace algo más de 50 años en San Fernando, Cádiz. Desde entonces el ROA y la Sección de Hora son los encargados de mantener el patrón nacional de la unidad básica de tiempo. A lo largo de los años han ido incrementando la precisión de sus medidas, contando en la actualidad con un reloj de microondas máser, con un orden de precisión de  $10^{14}$ ; es decir, un segundo de error cada tres millones de años. En nuestro TFG, diseñaremos un soporte para realizar espectroscopía con una celda de yodo, con la misma precisión que el reloj actual, pero contando con las ventajas del láser frente a las microondas. El ROA, está ya ensayando con el desarrollo de un reloj de red óptica de estroncio, que alcanzaría una precisión de  $10^{18}$ ; es decir, un segundo de error cada 30.000 millones de años. [20]

### 2.4.2 Reloj de átomos de yodo

Los relojes ópticos de yodo constan de tres elementos: un componente capaz de proporcionar una frecuencia de referencia, un sistema de realimentación que fija un láser a la frecuencia de referencia y

un peine de frecuencias. Este último es un dispositivo capaz de medir con precisión la frecuencia estabilizada del láser. Las unidades de espectroscopía utilizan una placa base de material de vidrio, en combinación con una tecnología de ensamblaje-integración de los componentes ópticos fácil de manejar, que garantiza una gran estabilidad de apuntamiento de los dos haces láser contrapropagados en la célula de yodo y, por tanto, una gran estabilidad a largo plazo. El láser excita los átomos de yodo y se mide la variación de los mismos con respecto a la energía aportada. Los saltos de estos, medidos mediante sensores ópticos determinarán el tiempo. [21]



**Figura 2-19 Montaje óptico del reloj de yodo del ROA [22]**

## 3 DESARROLLO DEL TFG

### 3.1 Requisitos, características y restricciones del diseño del soporte

El desarrollo de este TFG comenzará determinando los requerimientos, requisitos y limitaciones existentes a la hora de diseñar el soporte de la celda de yodo para espectroscopía, para a continuación profundizar en la impresora disponible en el ROA, que será la que se emplee en nuestra elaboración, y la realización de un estudio detallado de los posibles materiales a emplear, a petición del Observatorio puesto que pretenden basar sus elecciones de materiales para futuras impresiones en los análisis llevados a cabo en este trabajo.

#### 3.1.1 Características de la celda de yodo

El soporte que diseñaremos irá destinado a dotar de estabilidad a una celda de yodo empleada en espectroscopía en uno de los relojes atómicos del ROA. Dicha celda cuenta con las características que se muestran en la imagen a continuación:

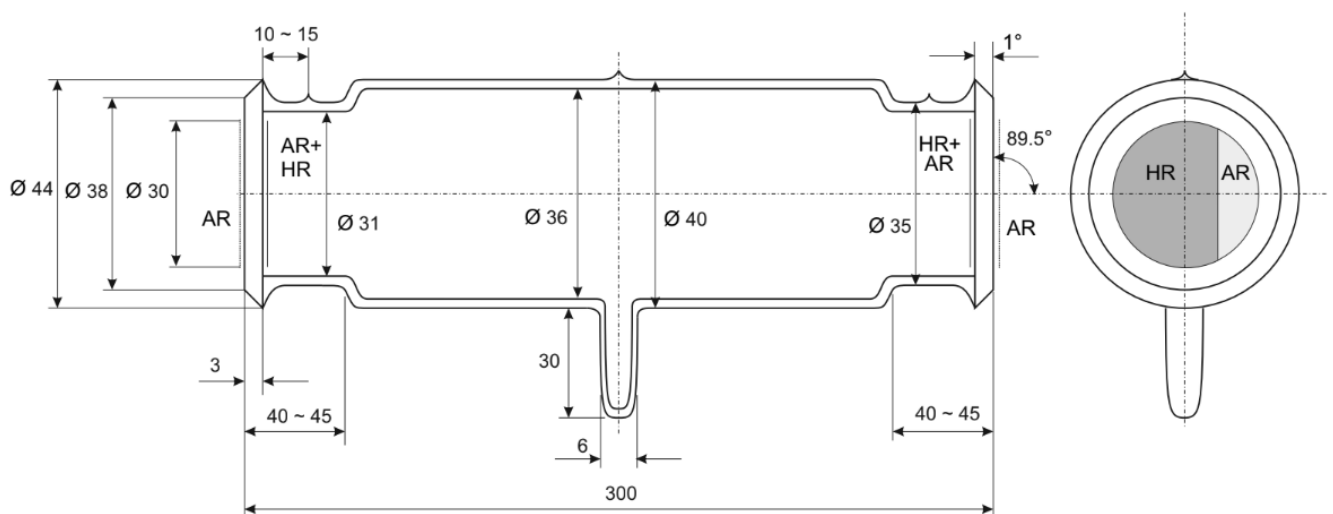


Figura 3-1 Celda de yodo del reloj atómico [23]

Como factores para tener en cuenta, contamos con el capilar de refrigeración del centro de la celda, así como dos pequeños apéndices en las zonas de menor diámetro. Los grados de inclinación de la tapa, así como los diámetros internos, no serán de relevancia a la hora de diseñar el soporte. Se debe de tener en cuenta que la celda debe permanecer estable, sin comprometer la integridad de la misma, puesto que está fabricada con un cristal frágil, especialmente en el cambio de diámetro.

### 3.1.2 Limitaciones de diseño

El ROA indicó ciertas limitaciones que el soporte debía cumplir a la hora de ser diseñado. Inicialmente, las únicas restricciones que se indicaron fueron, como medida imprescindible, que el centro del eje de la celda debía estar a una altura del tablero óptico de 55 mm, puesto que es a la altura a la que se propaga el láser. Al comienzo del diseño, también se indicó que debajo de la celda podía ocuparse el espacio necesario. No obstante, a lo largo del desarrollo se llegó a la conclusión de que al ser necesario instalar ciertos dispositivos del reloj, era preferible que estuviese despejada la zona, por lo que como se verá más adelante, se desarrollaron dos soportes independientes para la celda, para poder aprovechar el espacio en detrimento de la estabilidad. Sin embargo, al encontrarse el sistema en una mesa estabilizada, no contará el elemento de fijación con vibraciones externas que le puedan afectar.

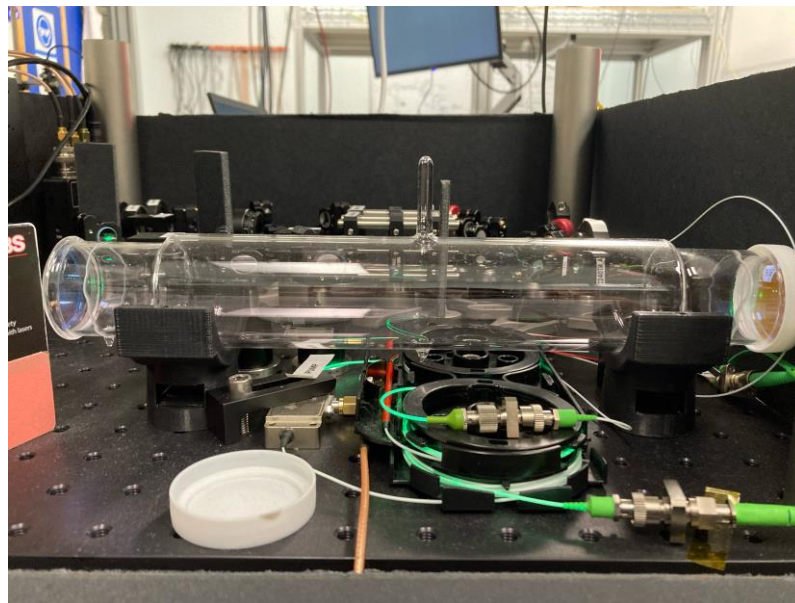


Figura 3-2 Vista de los elementos ubicados bajo la celda [23]

### 3.1.3 Modo de anclaje del soporte a la base del reloj atómico

El anclaje a la mesa óptica se realizará mediante unos *clamps* de la casa ThorLabs. Desde el ROA se indicó que podrían adquirir aquellos que fuesen necesarios sin limitación ni en número ni en diseño y tras un estudio de las opciones disponibles se optó por el modelo CL5AV debido que tienen cierto margen de medidas a la hora de apretar. Al tener las bases diseñadas un espesor de 5 mm, eran los más adecuados.

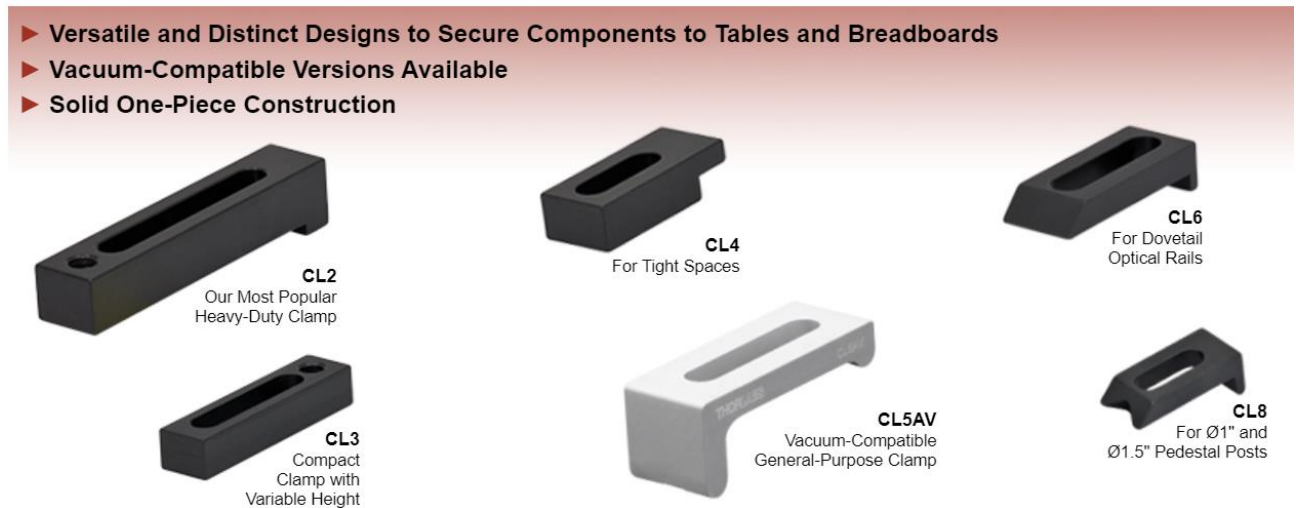


Figura 3-3 Ejemplo de *clamps* de la casa ThorLabs [24]

### 3.1.4 Impresora y método de impresión

El ROA cuenta en la actualidad con una unidad de la impresora 3D Intamsys Funmat HT. Es un dispositivo que funciona mediante FFF, del inglés (*Filament Fluid Fabrication*). Esta impresora cuenta con unas características brillantes; por ejemplo, es capaz de imprimir con una alta calidad industrial gracias a su precisión de 50 micrómetros, además, su cámara se encuentra a 90 °C y la placa donde se imprime a 160 °C para evitar choques térmicos entre la extrusión que sale a 450 °C y la placa. Las características técnicas se muestran en la tabla a continuación, facilitada por la empresa fabricante.

**FUNMAT HT**  
Entry Level Desktop Industrial 3D Printer

**Advanced Thermal Design**  
Heated Chamber Up to 90°C (194°F),  
Hotend Up to 450°C (842°F)

**Smarter Design**  
Automatic Leveling, Filament Absence Warning

**Over 20 Functional Materials**  
Able to Print PEEK/PEKK/ULTEM™ (PEI)/PPSU  
and other Functional Materials

INTAMSYS  
FUNMAT HT

Figura 3-4 Impresora Intamsys Funmat HT Enhanced empleada en el ROA [2]

### Technical Parameters

Model	FUNMAT HT
Printing Technology	Fused Filament Fabrication (FFF)
Machine Size	543×501×663mm (21.4×19.7×26.1in)
Build Volume	260×260×260mm (10.2×10.2×10.2in)
Build Platform	PI Sheet Heating + Ceramic Glass
Leveling	Automatic Leveling
Layer Thickness	0.05-0.3mm
Max Travel Speed	Max. 300mm/s
Extruder Temperature	Max. 450°C/842°F
Platform Temperature	Max. 160°C/320°F
Chamber Temperature	Max. 90°C/194°F
Input File Type	STL/OBJ
Filament Diameter	1.75mm
Position Resolution	XY: 12.25µm Z: 1.25µm
Motor Drive	High Performance Independent Drivers
Safety Certification	FCC/SGS/CE
Supported Materials	PEEK/PEEK-CF/ PEEK-GF/PEKK/ULTEM™ (PEI)*/PPSU*/PC/PC Alloys/PA/ PA-CF/ASA/ABS/HIPS/TPU/PETG/PLA/Carbon Fiber-Filled/Glass Fiber-Filled/ ESD-Safe, etc.

**Tabla 1 Características técnicas impresora Intamsys Funmat HT [25]**

#### 3.1.5 Materiales disponibles para la impresión 3D

En este apartado del desarrollo, se estudiarán todas las opciones de materiales de impresión a la venta en la página de la casa de la impresora empleada en el ROA; están disponibles en la página web de Intamsys. La empresa divide los materiales de impresión en tres grandes grupos y un último definido como materiales para soportes (partes de la pieza necesarias para la impresión pero que a la postre se desechan), estos grupos son:

- I. INTAM Performance: PEEK, PEKK, PEI, PPSU y PPS.
- II. INTAM Engineering: Diferentes PC y PA.
- III. INTAM Basic: ABS, PLA y ASA
- IV. INTAM Support: PVS, HIPS, SP #####



**Figura 3-5 Clasificación de materiales de INTAM [2]**

### **INTAM Performance**

Este grupo está formado por los PEEK (PoliÉterÉterCetona) que son unos termoplásticos de alto rendimiento, ofrecen alta resistencia y rigidez, así como resistencia al calor. En el grupo de los PEEK, encontramos ciertas mejoras, como pueden ser el PEEK-CF, con componentes de fibra de carbono que cuenta con una mejor relación peso-resistencia y el PEEK-GF con fibra de vidrio que además es un gran aislante eléctrico. [2]

También contamos con el PEKK (PoliÉterCetonaCetona), que tiene una columna vertebral química muy estable. Su estructura semicristalina en estado sólido ofrece una excelente combinación de resistencia mecánica y térmica junto con resistencia química y al fuego. Es muy similar al PEEK, con la salvedad de que la impresión es más sencilla. [2]

PEI 9085 (PoliÉterImida) es un producto de mezcla de termoplástico retardante de llama de alto rendimiento. Tiene una alta relación resistencia-peso y tiene clasificación FST (llama, humo y toxicidad). Además, puede emplearse tanto a altas temperaturas como a temperaturas bajo 0. [2]

PEI 1010 (PoliÉterImida) es un termoplástico de alto rendimiento que ofrece excelente resistencia, estabilidad térmica, ofrece alta resistencia al calor, resistencia química y resistencia a la tracción. Cumple con aplicaciones de calidad alimentaria: NSF 51. [2]

PPSU (PoliPhenylSulfona) es un termoplástico amorfo de alto rendimiento que ofrece buena resistencia al impacto y resistencia química. Funciona a temperaturas de hasta 180 °C y tiene una resistencia a la hidrólisis superior en comparación con otros termoplásticos amorfos. También resiste ácidos y bases comunes en un amplio rango de temperaturas. Es esterilizable y resistente a los rayos gamma. [2]

El PPS (SulfuroPoliPhenileno) es un filamento termoplástico de ingeniería semicristalino de alta temperatura. Debido a su estructura es muy resistente a los productos químicos, cuenta con una muy buena resistencia mecánica, incluso a altas temperaturas y, además de su baja absorción de agua, también tiene buena estabilidad dimensional y excelentes propiedades eléctricas. [2]

El alambre VICTREX AM™200 fue desarrollado para su uso en el campo de la fabricación aditiva. Al rediseñar los polímeros a nivel molecular, se pueden lograr mejores resultados de impresión sin el uso de aditivos ni plastificantes. Tiene un punto de fusión relativamente bajo, cristalización lenta, buena fluidez y es fácil de imprimir. [2]

### **INTAM Engineering**

El PC (PoliCarbonato) es un filamento avanzado con una alta calidad de impresión, gran resistencia mecánica y resistencia al calor, ofrece excelente resistencia al impacto y resistencia a la fractura, lo que la convierte en la opción ideal para aplicaciones de ingeniería. El PC también puede ser combinado en PC-ABS, PC-PBT o PC-FR. El PC-ABS (mezcla de terpolímero de policarbonato/acrilonitrilo-butadieno-estireno) ofrece excelente tenacidad y resistencia al calor al mismo tiempo que muestra un buen acabado superficial y buena compatibilidad con el revestimiento de metal. El PC-PBT (mezcla de polímeros de policarbonato/tereftalato de polibutilo) es una aleación termoplástica que ofrece buena resistencia al calor y tenacidad a baja temperatura de hasta -30 °C y presenta buena resistencia química. Por su parte el PC-FR (*Fire Retardant*) alcanza un rendimiento V0 en la prueba de retardo de llama UL94 y muestra una excelente tenacidad, resistencia y resistencia al calor. [2]

Los PA6-66, PA6-CF, PA12-CF, son compuestos de Nylon 6 y Nylon 12 respectivamente, que cuentan con gran resistencia al desgaste, una buena relación resistencia-rigidez y una alta adherencia entre capas. Los PA que cuentan con la terminación CF, además, están reforzados con fibra de carbono, mejorando aún más sus características como puede ser la baja absorción de agua o disminuyendo la densidad de la pieza. [2]

### **INTAM Basic**

Este grupo está formado por los materiales más básicos y asequibles empleados en la impresión 3D, ellos son el ABS, el PLA y el ASA. [2]

El ABS es un filamento a base de acrilonitrilo-butadieno-estireno que ofrece una calidad de impresión superior, excelente resistencia mecánica y resistencia al calor, con temperaturas de impresión moderadas y gran resistencia a la deformación y una gran relación costo-rendimiento. [2]

ABS+ está diseñado específicamente para soluciones de soporte solubles en agua. El ABS es un material difícil de imprimir, el ABS+ que en cambio cuenta con propiedades únicas, no sólo puede mejorar la tasa de éxito de la impresión, sino también mejorar en gran medida la estabilidad dimensional. [2]

El ASA es copolímero de acrilonitrilo-estireno-acrilato, una alternativa al ABS con una resistencia a la intemperie mejorada debido a su resistencia a los rayos UV. Por otra parte, sus excelentes propiedades mecánicas lo convierten en la elección perfecta para aplicaciones cotidianas. [2]

El PLA (Ácido Poliláctico) tiene propiedades mecánicas mejoradas y una buena calidad de impresión. Tiene mejores propiedades mecánicas en general que el ABS lo que sumado a su bajo coste lo convierten en una opción a tener en cuenta. [2]

### **INTAM Support**

Sin entrar en grandes detalles, los materiales con el prefijo SP seguidos de un número son los empleados como soportes para las piezas que lo requieran, a grandes rasgos, todos son fácilmente extraíbles a temperatura ambiente y de manera manual y cada material de soporte está diseñado específicamente para un tipo de termofusible de impresión, de la manera que a continuación se relaciona:

- SP3030- ABS+, PA6 y PA6-CF
- SP3050- PA12 y PA12-CF

- SP5000- PEEK, PEEK-CF, PEEK-GF, PEKK, PEI 9085, PEI 1010, PPSU, PPS
- SP5040- PEI9085
- SP5080- PEI1010, PPSU

El HIPS (Poliestireno de Alto Impacto) posee buena resistencia al impacto y baja absorción de agua. También se puede utilizar como material de soporte separable para ABS, ASA y PC. [2]

El PVA (Alcohol Polivinílico) es un soporte soluble en agua para filamentos a base de PLA, TPU y Nylon. [2]

### 3.1.6 Elección del material adecuado

Para la elección de materiales se ha llevado a cabo un análisis exhaustivo de los que ofrece la empresa INTAMSYS. En primer lugar, consiguiendo los documentos de especificaciones de cada uno de ellos, y analizando la información hasta determinar una nota del 1 al 10 en cada una de las características más relevantes a la hora de imprimir las piezas. Estas características son la dureza, la resistencia química o al fuego, la flexibilidad, la durabilidad, la facilidad de impresión, si pueden o no tener contacto con los alimentos y finalmente un apartado con los empleos más comunes de estos materiales. [2] [25] [26] [27] También se ha realizado un estudio de mercado y se ha añadido una segunda tabla con el precio por kg de cada uno de los materiales candidatos para la impresión. [28] [29]

MATERIAL	Dureza	Resistencia Química	Resistencia al Fuego	Flexibilidad	Durabilidad	Facilidad de Impresión	Contacto con Alimentos	Usos comunes
ABS	7	6	4	7	7	6	NO	Prototipado y piezas funcionales
ABS+	8	7	5	8	8	7	NO	Prototipado y piezas funcionales
ASA	8	8	8	8	8	7	NO	Aplicaciones exteriores y piezas mecánicas
PLA	5	5	5	9	5	9	SÍ	Impresiones amigables con el medio ambiente y prototipado
PEEK	9	9	9	4	9	4	SÍ	Industria aeroespacial y aplicaciones médicas
PEEK-CF	9	9	9	4	9	4	SÍ	Componentes estructurales y aplicaciones de alta resistencia
PEEK-GF	9	9	9	4	9	4	SÍ	Aplicaciones de alta resistencia e industria automotriz
PEI 9085	7	9	9	7	9	4	SÍ	Aplicaciones aeroespaciales y dispositivos médicos
PEI 1010	7	9	9	7	9	4	SÍ	Componentes electrónicos y piezas de maquinaria
PPSU	7	9	9	7	9	7	SÍ	Aplicaciones médicas y piezas de automoción
PPS	7	9	9	7	9	7	SÍ	Componentes químicos y aplicaciones eléctricas
PC	7	7	7	7	9	7	NO	Prototipado y piezas de ingeniería
PC-ABS	7	7	7	7	9	7	NO	Piezas automotrices y aplicaciones de consumo
PC-PBT	7	7	7	7	9	7	NO	Piezas eléctricas y aplicaciones automotrices
PC-FR	7	7	7	7	9	7	NO	Aplicaciones ignífugas y electrónicas
PA6/66	9	7	7	7	7	9	SÍ	Piezas mecánicas y aplicaciones industriales
PA6-CF	9	7	7	7	7	7	SÍ	Aplicaciones de alta resistencia y componentes estructurales
PA12-CF	9	7	7	7	7	7	SÍ	Componentes de ingeniería y aplicaciones de alta resistencia
PVA	5	5	5	9	5	9	SÍ	Soporte soluble y prototipado
HIPS	7	7	4	7	7	9	NO	Prototipado y modelos de fundición
SP-####	5	4	3	6	4	9	NO	Elementos estructurales para la impresión de otras piezas

**Tabla 2** Tabla resumen de las características de los materiales de impresión 3D [Autoría propia]

MATERIAL	Precio €/kg	MATERIAL	Precio €/kg
ABS	40	PC	59
ABS+	92	PC-ABS	72
ASA	40	PC-PBT	108
PLA	37	PC-FR	71
PEEK	696	PA6/66	73
PEEK-CF	267	PA6-CF	83
PEEK-GF	256	PA12-CF	99
PEI 9085	376	PVA	87
PEI 1010	250	HIPS	78
PPSU	255	SP- #####	60-200
PPS	133		

Tabla 3 Comparativa de precios [Autoría propia]

En nuestro caso, buscamos una pieza que no será sometida a esfuerzos trascendentales, que no tendrá contacto con alimentos y donde la flexibilidad no es determinante; por ello nos centraremos en un material que sea estable en cuanto a posibles cambios de temperatura (el soporte ha de permanecer inmóvil e invariable en cuanto a su tamaño, posición y forma), cuyo precio sea lo más contenido posible y que cuente con una alta durabilidad además de una elevada facilidad de impresión, que se traducirá en un soporte más preciso, lo que desembocará en un mejor ajuste con la celda de yodo y con la plataforma donde se pretende instalar. Por todas estas razones, los materiales candidatos a ser empleados en la impresión del soporte serán el ABS, el PLA, el ASA y el PC. A continuación, se detalla una tabla con las características de estos, además de una columna con la suma de las puntuaciones de “Durabilidad” y “Facilidad de Impresión” que nos ayudará a la hora de elegir el material definitivo.

MATERIAL	Dureza	Resistencia Química	Resistencia al Fuego	Flexibilidad	Durabilidad	Facilidad de Impresión	SUMA PUNTUACION: Durab+Fac.Imp	Precio €/kg	Contacto con alimentos
ABS	7	6	4	7	7	6	13	40	NO
ASA	8	8	8	8	8	7	15	40	NO
PLA	5	5	5	9	5	9	14	37	SÍ
PC	7	7	7	7	9	7	16	59	NO

Tabla 4 Resumen materiales a tener en cuenta para la impresión [Autoría propia]

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de los materiales y sus propiedades, he determinado que lo ideal es descartar el ABS y el PC por su posible deformación debido a la temperatura y agentes externos [30]. Por lo tanto, la elección final debería ser el ASA, por ser el de mayor puntuación y estar más equilibrada la relación Durabilidad-Facilidad de impresión. No obstante, el PLA es una opción muy interesante debido a su precio contenido y su facilidad de impresión, aunque habría que tener en cuenta su menor durabilidad a la hora de sustituir el soporte con relativa frecuencia.

**INTAMSYS**

## INTAMSYS® ASA

**Product Description**  
**INTAMSYS® ASA** is an Acrylonitrile-Styrene-Acrylate copolymer based filament designed specifically for FDM/FFF 3D printing. It is an alternative to ABS with an improved weather resistance. Its UV resistance and excellent mechanical properties make it the perfect choice for real life applications.

PHYSICAL PROPERTIES	TEST METHOD	UNITS	TYPICAL VALUE
Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.10-1.15
Glass transition temperature	DSC, 10°C/min	°C	98
Heat deflection temperature	ISO 75 1.8MPa	°C	100
Melt index	220°C, 10kg	g/10min	25

MECHANICAL PROPERTIES <sup>1</sup>	TEST METHOD	UNITS	TYPICAL VALUE
Tensile strength	ISO 527	MPa	43.8
Young's modulus	ISO 527	MPa	2379
Elongation at break	ISO 527	%	6.7
Flexural strength	ISO 178	MPa	73.4
Flexural modulus	ISO 178	MPa	3206
Impact strength	ISO 179, Notched	kJ/m <sup>2</sup>	10.3

Note:  
 1. All testing specimens were printed using a FUNMAT HT 3D PRINTER under the following conditions:  
 Printing temperature = 255 °C, printing speed = 45 mm/s, number of shells = 2, and 100% infill.

**Tabla 5 Características del filamento INTAMSYS ASA seleccionado [2]**

## 3.2 Diseño de la pieza mediante CAD

A la hora de diseñar la pieza, se ha empleado el programa de ordenador Autodesk Inventor, por contar la Universidad de Vigo con la licencia necesaria para el alumnado que necesitase emplearlo. Es un software al que tuvimos acceso en las prácticas de laboratorio de algunas asignaturas a lo largo de los años en los que hemos cursado la ingeniería. Se trata de una interfaz bastante intuitiva en la que se pueden realizar diseños 2D, 3D, análisis de esfuerzos y tensiones y ensamblados de piezas entre otras cosas.

### 3.2.1 Brainstorming de las posibilidades de diseño

Antes de lanzarme a diseñar la pieza definitiva, o más bien, las tres últimas propuestas, se llevó a cabo un estudio de las necesidades por parte del ROA a la hora de hacer la pieza y sobre todo las restricciones. La idea principal era cristalina, un soporte con dos puntos de anclaje para la celda de yodo sujetos por una base común a ambos para dar mayor estabilidad. Además, quería que fuese algo sencillo pero elaborado, sin caer en florituras innecesarias, pero realizando una pieza estable, robusta y ligera a la vez. La idea principal rondaba tres vértices entorno a los que debería girar el diseño; estructuralmente sólido (empleando formas triangulares para repartir las posibles fuerzas), sencillez en el empleo y que la mayoría de las piezas se pudiesen fabricar con una impresora 3D o se pudiesen conseguir de manera sencilla. Por ello la idea estaba clara: dos extremos en los que asentar la celda, unidos por su base el uno al otro y empleando estructuras resistentes pero sencillas. Habría que tener en cuenta a su vez la presencia del capilar de la celda, por lo que sería conveniente liberar el centro de la estructura para evitar roces con este.

### 3.2.2 Reducción del empleo de material

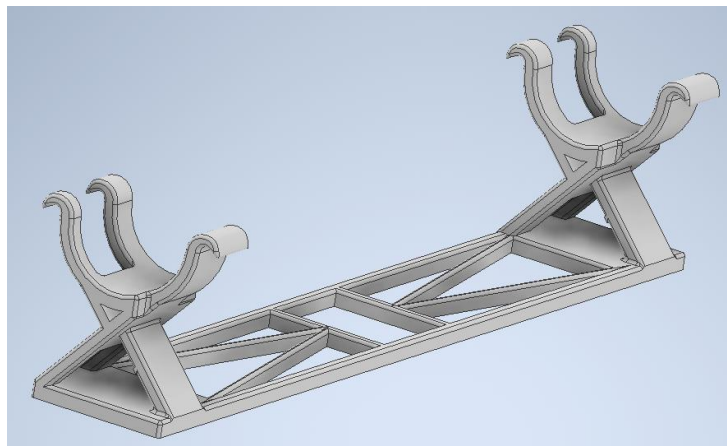
A la hora de diseñar el soporte también se tuvo en cuenta la premisa de hacerlo con el mínimo material imprescindible, no sólo por ahorrar costes, sino también por evitar un despilfarro de materias primas, que a la postre reduce la contaminación generada durante el proceso. Para ello, se realizaron diversas extrusiones en el soporte, reduciendo así el gasto de filamento empleado.

## 3.3 Propuestas de soportes

A continuación, se comentarán los soportes diseñados, así como sus partes principales y componentes.

### 3.3.1 Primer modelo

La primera idea fue la de desarrollar una base en la que la celda estuviese sujeta por gomas elásticas. Esto evitaría realizar una presión excesiva en la celda y la posibilidad de dañarla. Habría que tener en cuenta la caducidad de las gomas y su posible sustitución.



**Figura 3-6 Primer modelo del soporte para la celda de yodo [Autoría propia]**

Las gomas seleccionadas son las conocidas como gomas agrícolas, por su alta durabilidad (5 años a la intemperie) y su fácil empleo puesto que cuentan con un extremo que favorece el agarre sin necesidad de emplear herramientas. Además, su precio contenido (alrededor de 5 euros una bolsa de 300 unidades) las hacen ideales para cumplir con nuestros objetivos. La única desventaja a la hora de elegir este modelo sería la obligatoriedad de adquirir las gomas de un proveedor externo sin poder fabricar la totalidad del soporte mediante la impresora 3D.



Figura 3-7 Goma ancla necesaria en el soporte n°1 [33]

Se debe hacer un esfuerzo de imaginación a continuación para incluir las gomas de la Fig. 3-6 en el ensamblaje que se puede ver en la siguiente figura de la base n°1.

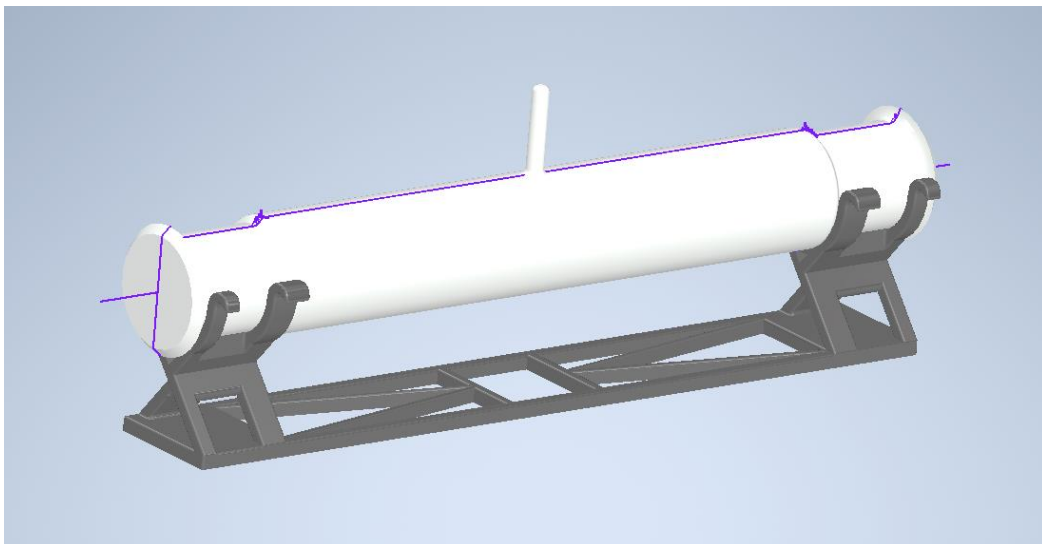


Figura 3-8 Ensamblaje de la base n° 1 con ausencia de las gomas de sujeción [Autoría propia]

### 3.3.2 Segundo modelo

El segundo modelo se centró en que todas las partes fuesen imprimibles en el ROA, por ello desde la base hasta los anclajes se diseñaron pensando en ello. Este soporte es similar al primero a diferencia de la sujeción de la celda de yodo; en este caso, se haría firme a la celda gracias a unas piezas que se encajan en la parte superior y a continuación se atornillan a la estructura principal con unas tuercas también de diseño propio. A continuación, pasaré a explicar las partes junto con una imagen de cada una.

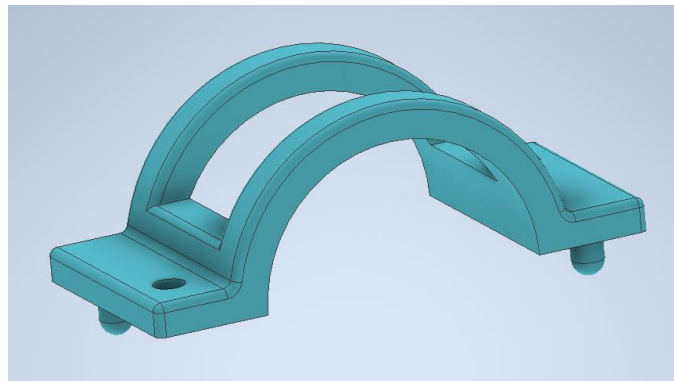
La parte principal es la base del soporte, compuesta por dos torres, sobre las que irá apoyada la celda de yodo. Esta parte se ha hecho minimizando al máximo el empleo de material, tanto en la unión entre los dos extremos, como en la misma cuna donde asienta la celda, a la que también se le ha retirado material que era prescindible. El soporte llevará encajadas y atornilladas en la parte superior

dos abrazaderas, por ello tiene dispuestas dos perforaciones y dos apéndices roscados, para mantener perfectamente unidas las sujeciones de la celda.

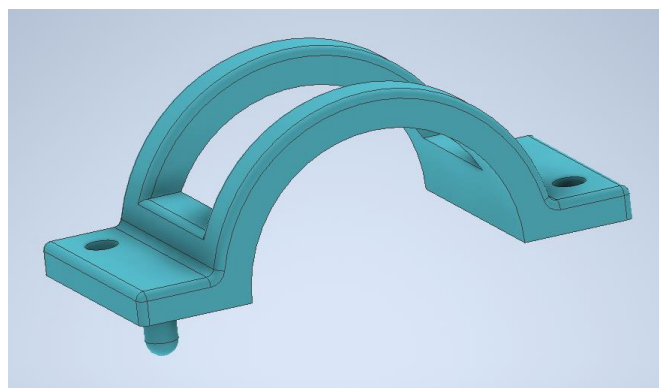


**Figura 3-9 Base del soporte n° 2 [Autoría propia]**

A continuación, hablaré de la parte superior del soporte, compuesta por dos abrazaderas, diferentes puesto que son simétricas, que encajarán en la base debido a unos tetones y unas perforaciones opuestas a los de la base.



**Figura 3-10 Abrazadera n°1 [Autoría propia]**



**Figura 3-11 Abrazadera n°2 [Autoría propia]**

Finalmente, se ha diseñado una tuerca que deberá ser impresa cuatro veces. Tanto la tuerca como los tetones roscados de la base cuentan con una rosca normalizada M4x0.7 y una profundidad de roscado de 4 mm.

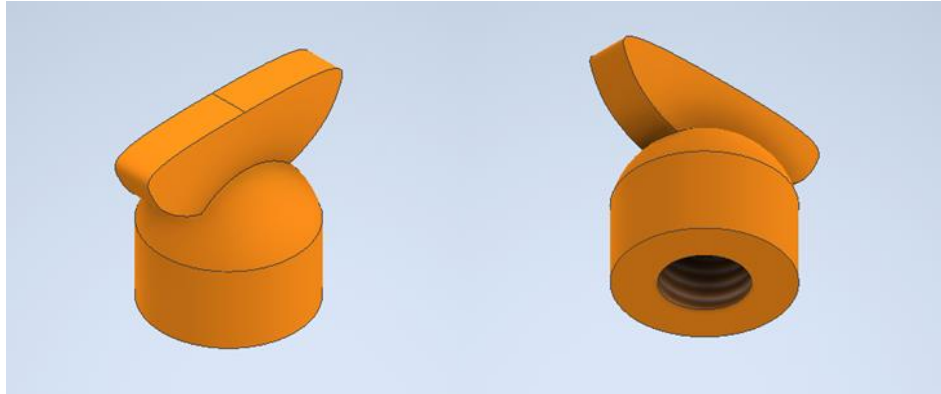


Figura 3-12 Vista superior e inferior de la tuerca roscada M4x0.7 [Autoría propia]

Por último, se insertará una imagen del conjunto de la base incluyendo la celda, para que se puedan apreciar la ubicación de los distintos elementos, y el aspecto que debe tener una vez montado.

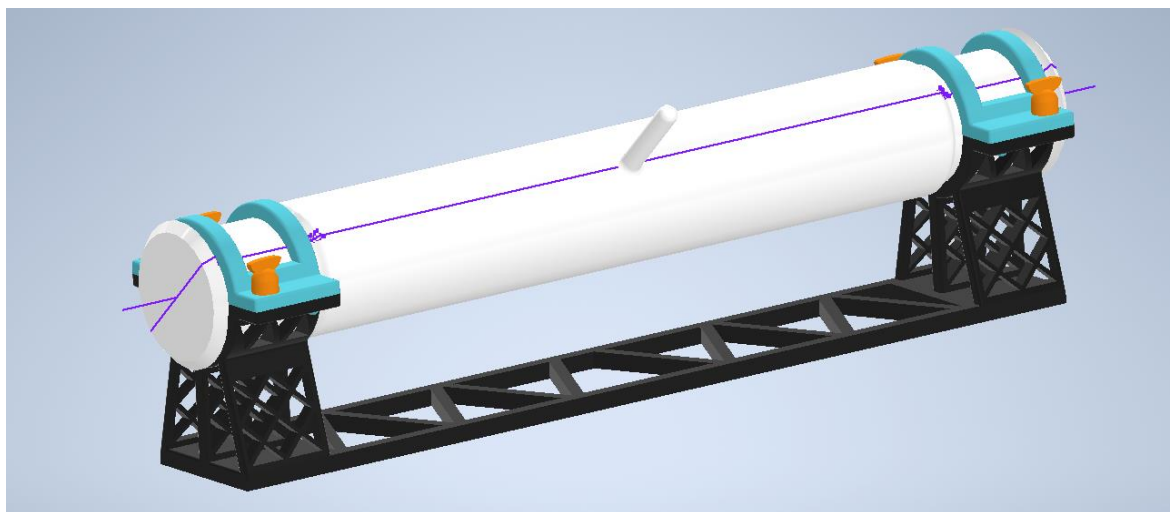
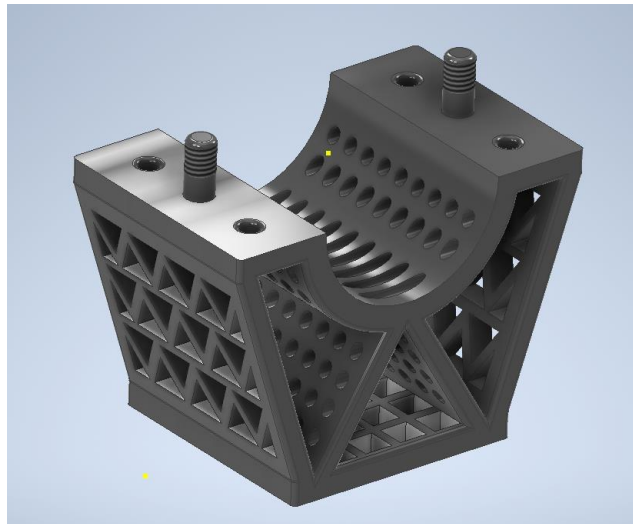


Figura 3-13 Ensamblaje de la base n° 2 con el resto de los elementos [Autoría propia]

### 3.3.3 Tercer modelo

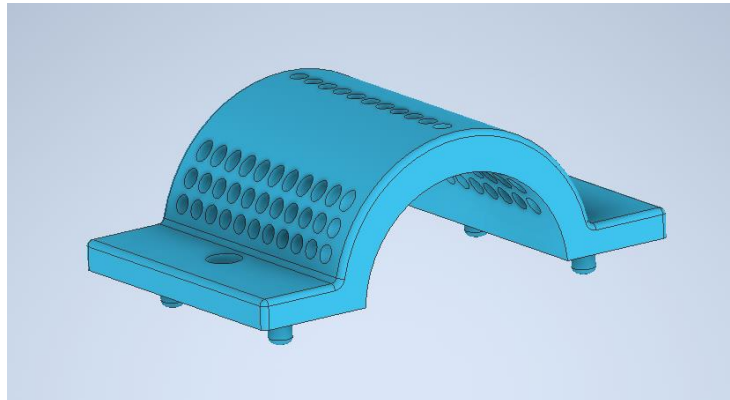
El tercer modelo trata de dos bases independientes que sostienen la celda de yodo por la parte de mayor diámetro. El hecho de no estar fijas las bases entre sí, permiten una mayor facilidad en la colocación de la celda, variando ligeramente la posición de las bases desde el capilar hasta la variación del diámetro de esta. El hecho de liberar el espacio entre los soportes permite colocar el hardware necesario para la instauración del reloj de yodo, optimizando así la zona de trabajo disponible, sin tener volumen sin aprovechar. También se ha diseñado la parte superior (abrazadera) y las tuercas necesarias para sostenerla. Por otra parte, a la hora de diseñar el conjunto, todas las piezas que no comprometen la estructura han sido perforadas en formas circulares, triangulares o rectangulares para

reducir el empleo innecesario de material y de tiempo en la impresión. A continuación, se incluirán imágenes del diseño.



**Figura 3-14 Base del soporte n°3 [Autoría propia]**

La base cuenta con 4 perforaciones y dos extrusiones roscadas, inversamente simétricas a las de la abrazadera, para evitar holguras en el montaje.



**Figura 3-15 Abrazadera n°3 [Autoría propia]**

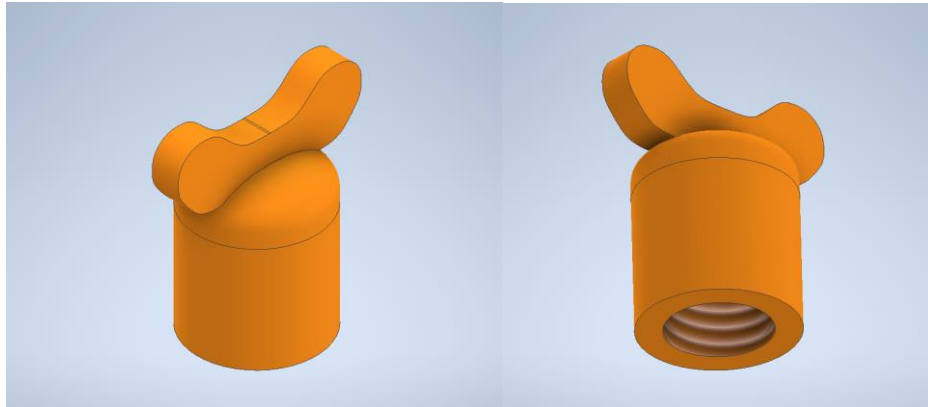


Figura 3-16 Vista superior e inferior de la tuerca roscada M6x1 [Autoría propia]

Para el tercer ensamblado debemos tener en cuenta que tanto las bases como las abrazaderas han de ser impresas dos veces y las tuercas que lo sujetan cuatro. Seguidamente se muestra una imagen del resultado final del soporte incluyendo la celda de yodo.

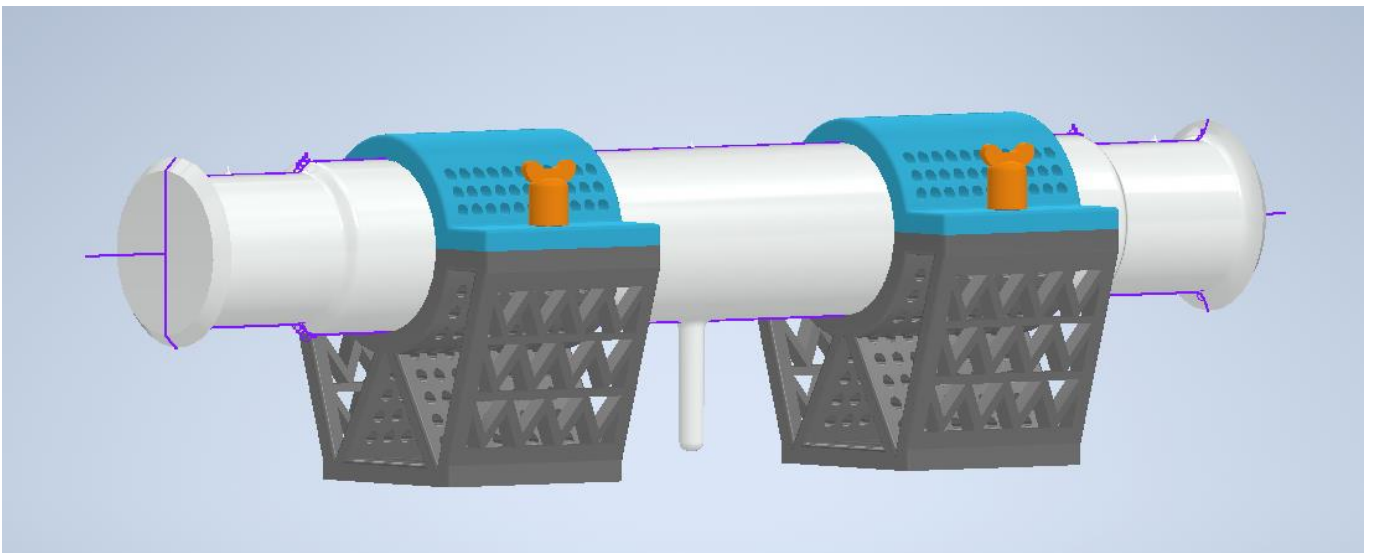
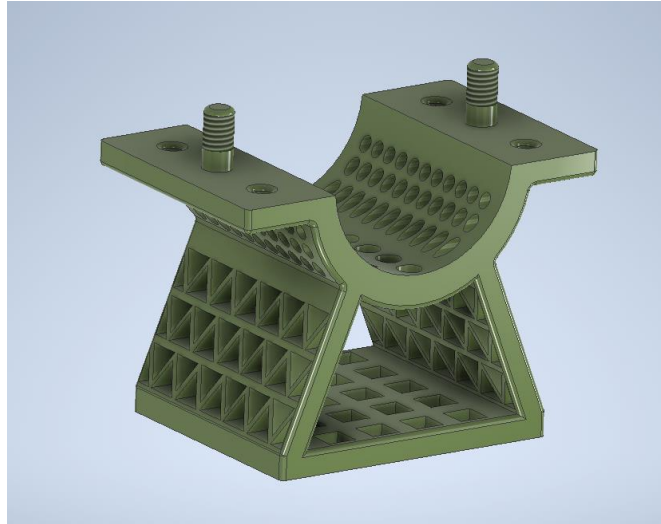


Figura 3-17 Ensamblaje de la base n°3 con el resto de los elementos [Autoría propia]

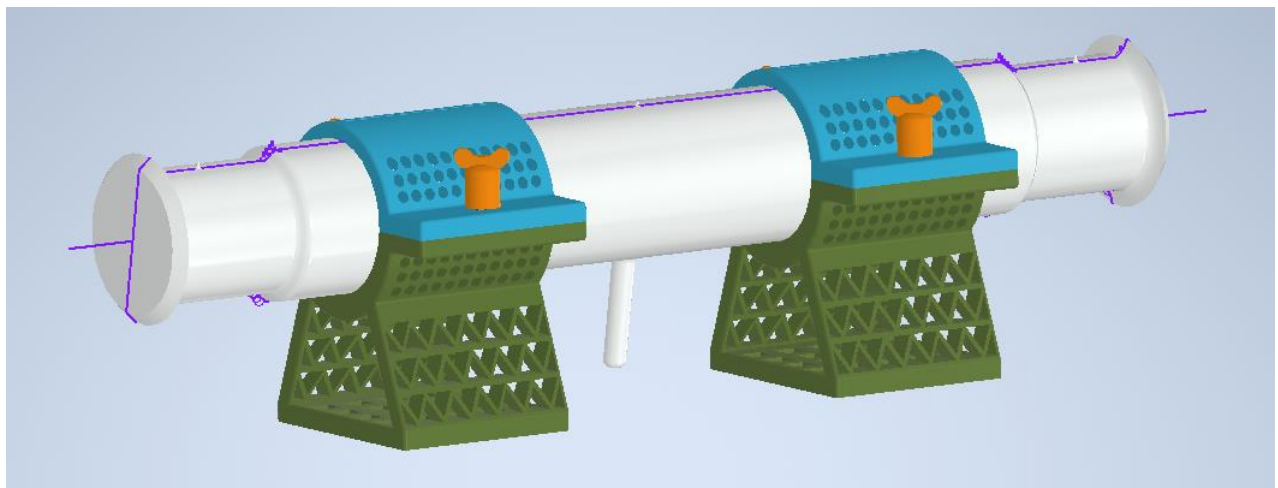
### 3.3.4 Cuarto modelo

El último diseño parte desde la idea del modelo anterior. Está compuesto por dos estructuras independientes en las que se ha intentado simplificar el diseño, manteniendo las tuercas y las abrazaderas idénticas al ensamblado anterior. Todo ello facilita la interoperabilidad, puesto que cabe la posibilidad de cambiar únicamente los soportes manteniendo el resto de las piezas idénticas, evitando la fabricación innecesaria de más elementos. A continuación, se puede ver una imagen de la nueva base, las tuercas y abrazaderas no se incluirán puesto que pueden ser consultadas en las páginas anteriores (Fig. 3-14 y Fig. 3-15).



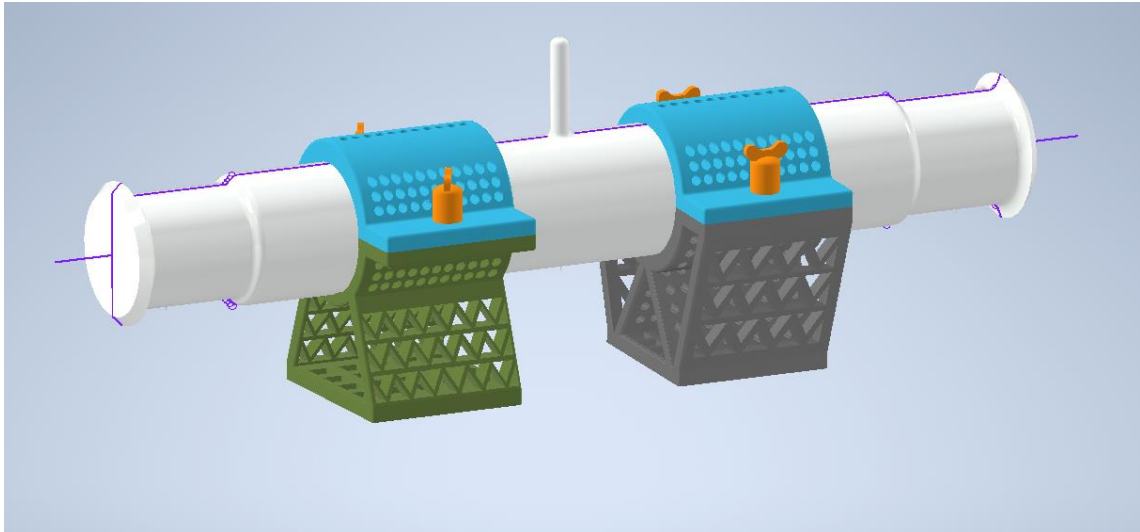
**Figura 3-18 Base del soporte n°4 [Autoría propia]**

Por último, se puede comprobar en la Fig. 3-18 el resultado del ensamblado de la pieza al completo incluyendo la celda de yodo.



**Figura 3-19 Ensamblaje de la base n°4 con el resto de los elementos [Autoría propia]**

Para concluir se incluye una imagen del ensamblado empleando las abrazaderas y las tuercas comunes con una base tipo n°3 y otra tipo n°4 para comprobar la interoperabilidad.



**Figura 3-20** Ensamblaje conjunto de las bases n°3 y n°4 con el resto de los elementos [Autoría propia]

## 4 RESULTADOS

En este apartado, se llevará a cabo el análisis de los resultados obtenidos en el proceso de diseño, así como un estudio de los aspectos más influyentes en la fabricación del modelo seleccionado. Para ello, se tendrán en cuenta tanto tiempos de fabricación, como cantidad de material empleada en la impresión.

### 4.1 Desarrollo del modelo elegido

El modelo elegido, considerando las sugerencias recibidas por parte del TN Estarellas, será finalmente el nº4. Se trata de dos soportes independientes, que cuentan con la misma abrazadera y tuercas para ambas partes. Además, se ha perforado en los lugares donde ha sido físicamente posible, sin perjudicar al comportamiento estructural de la pieza para evitar un malgasto de materia prima. Los *clamps* irán situados en la parte baja de la estructura, y únicamente se necesita el empleo de dos de ellos por cada unidad de sujeción de la celda. Este modelo, como analizado anteriormente, se aconseja que sea impreso en ASA (acrilonitrilo-estireno-acrilato), debido a su buena relación Durabilidad-Facilidad de Impresión, además de contar con un precio contenido de 40 €/kg según el proveedor [crea3d.com](http://crea3d.com). [28] También contamos con ciertas garantías de éxito a la hora de compatibilidades con la impresora, puesto que este filamento es fabricado por la propia Intamsys, que es de la misma marca que la impresora del ROA. Para más inri, la apariencia final del material es negro mate, lo que prevendría una posible reflexión del láser mal alineado contra las aristas y los ángulos de la pieza. El poder minimizar estas reflexiones, nos aporta un plus en seguridad para los operarios del sistema.

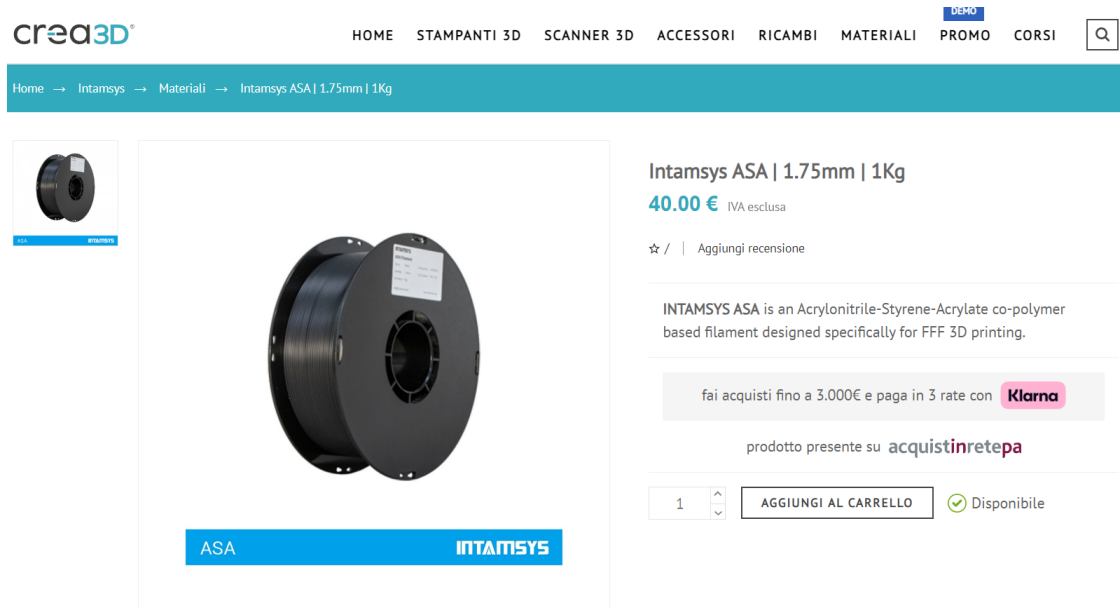


Figura 4-1 Material seleccionado y web del proveedor [30]

#### 4.1.1 Diseño en 2D y transformación a producto 3D

A la hora de diseñar la pieza se ha seguido un orden ascendente en cuanto a complejidad y dimensiones se refiere. Lo primero fue diseñar un modelo de la celda de yodo, para a la hora de llevar a cabo el ensamblado comprobar que todo funcionaba en concordancia. Para ello, se diseñó un modelo 2D del alzado de la celda obviando el capilar, para a continuación llevar a cabo la conversión en un sólido mediante la revolución del diseño sobre su eje central.



Figura 4-2 Alzado 2D de la celda de yodo [Autoría propia]

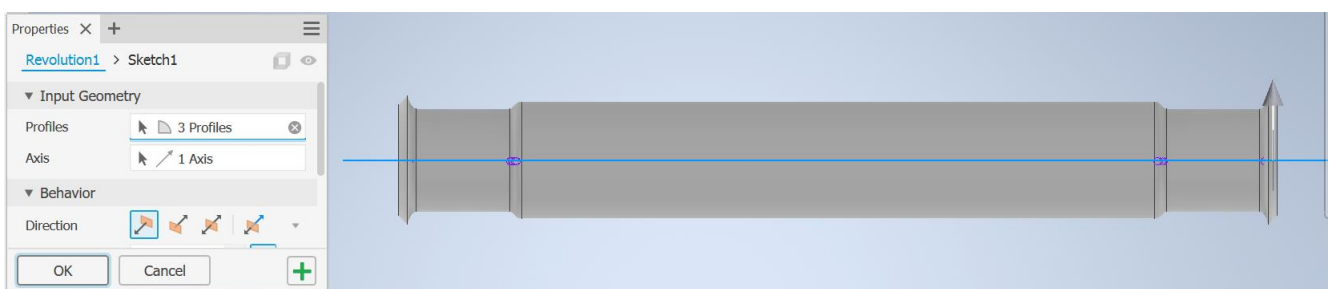
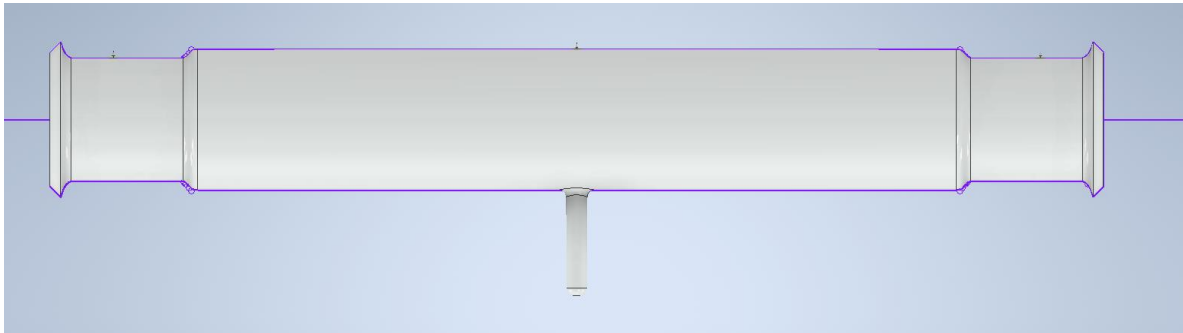


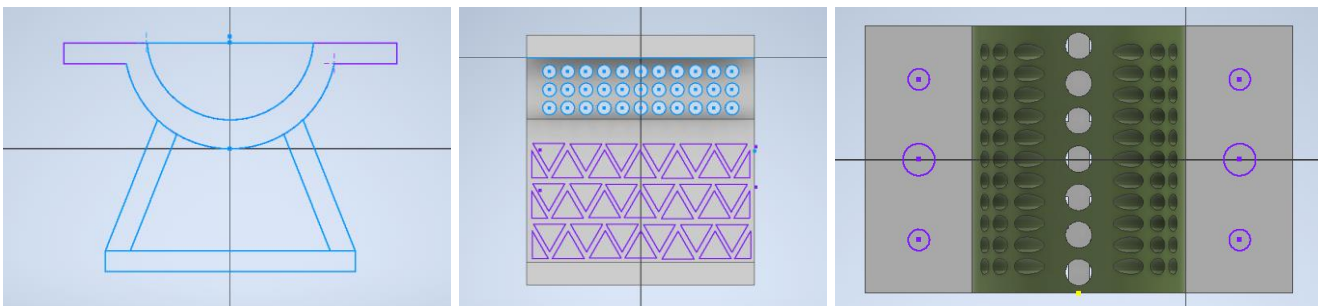
Figura 4-3 Revolución del alzado para obtener la celda de yodo [Autoría propia]

El siguiente paso fue colocar el capilar y las pequeñas protuberancias de la celda de yodo, todo esto se hizo mediante la creación de sendos planos de trabajo sobre los que se extruirían por un lado el capilar, y por otro se revolucionarían dos medios conos para obtener las protuberancias.



**Figura 4-4 Resultado celda de yodo completa [Autoría propia]**

Inicialmente se barajó la idea de dos soportes independientes que, a diferencia de la primera propuesta, las abrazaderas superiores debían ser idénticas para evitar confusiones y posibles errores a la hora de emplear el soporte. A la hora de crear el soporte se ha optado por diseñar el alzado que a continuación se extruiría para dar lugar a una pieza sobre la que extruir las reducciones de material en forma de círculos, triángulos y cuadrados. Finalmente se crea un nuevo plano de trabajo en la parte superior de la pieza, para extruir 4 agujeros por los que pasarán los pernos de la abrazadera, y un perno con rosca M6x1 que atravesará a esta para posteriormente ser sostenida mediante dos tuercas.



**Figura 4-5 Alzado, perfil y planta de los elementos a extruir del soporte n°4 [Autoría propia]**

La abrazadera fue diseñada empleando la parte superior del croquis anterior, que se extruiría a la misma longitud que en el caso de la base. A continuación, se creó nuevamente un plano de diseño para extruir los agujeros destinados a reducir el empleo de material.

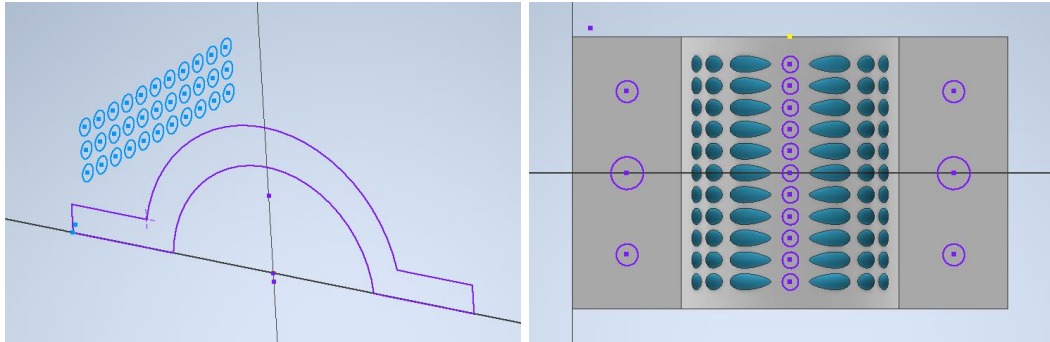


Figura 4-6 Alzado y planta de las extrusiones de la abrazadera nº3 [Autoría propia]

Las tuercas que serán empleadas fueron diseñadas mediante un círculo interior de 6mm y uno exterior de 9mm, se extruyó obteniendo un cilindro de 8mm de alto, en el que a continuación se dibujó un arco que al revolucionarse daría lugar a la tapa de la tuerca. Finalmente, se diseñó un agarre en el plano medio del cilindro, extruyéndolo a ambos lados del eje, y para terminar, se introdujo la rosa M6x1 en el interior de la pieza concordando con el tetón roscado de la base.

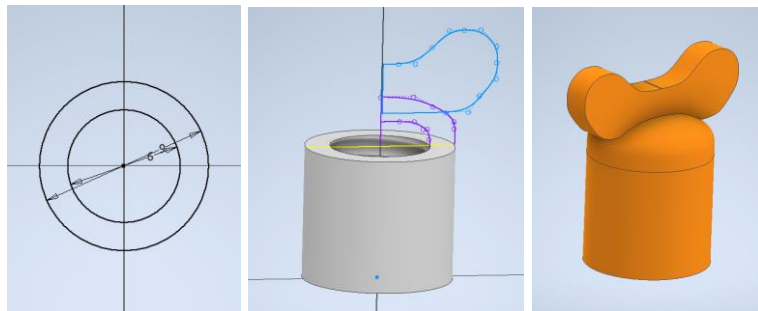


Figura 4-7 Proceso de elaboración de la tuerca nº2 [Autoría propia]

Para concluir este apartado, se mostrará el resultado final de las 3 piezas necesarias para realizar el soporte, así como una imagen del resultado final ensamblado.

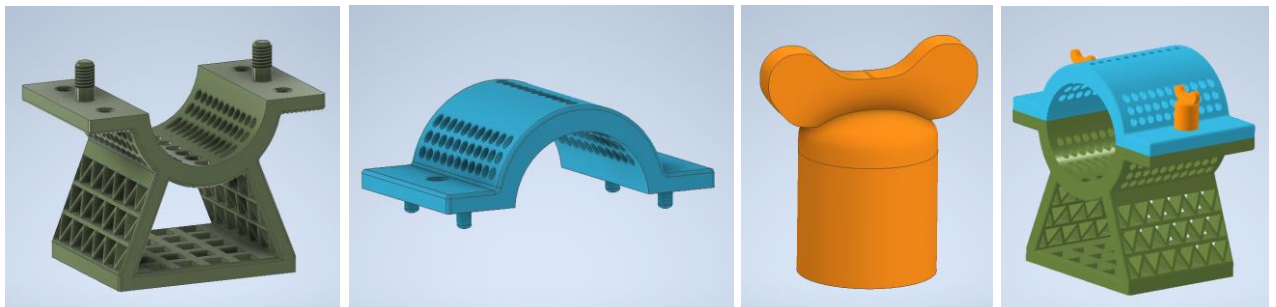


Figura 4-8 Piezas empleadas en el soporte y ensamblaje final de las mismas [Autoría propia]

#### 4.1.2 Ensamblado de las piezas

Para realizar el ensamblaje también se ha empleado el programa Autodesk Inventor. Fundamentalmente se han ido añadiendo los componentes uno por uno (dos bases, dos abrazaderas,

cuatro tuercas y la celda de yodo) y se han ido aplicando restricciones al movimiento (*constrain*), siendo lo fundamental el conseguir que la base y la abrazadera junto con la tuerca, estuviesen fijas entre sí, para a continuación, añadir la celda de yodo al conjunto mediante una relación de *joint* entre ellos. El resultado final del ensamblaje es el que se puede ver en Fig. 3-18, del apartado 3.3.4 de esta memoria.

## 4.2 Fabricación del soporte

Como ya se mencionó en apartados anteriores, el proceso de fabricación ha de ser llevado a cabo mediante el hardware disponible en el ROA, siendo este, la impresora Intamsys Funmat HT Enhanced. En los apartados que a continuación se relacionan se explicarán los pasos y características de la impresión.

### 4.2.1 Características de la Impresión

El ASA, por sus características necesita la existencia de una cama caliente para evitar el *cracking* por deformación del material. Este defecto, también es conocido como “delaminación”, que como su nombre indica, consiste en la separación de las capas ya impresas de nuestra pieza, como si no estuviesen bien adheridas. Este suceso se debe a la contracción del material debido a la diferencia térmica de las capas. Cuando esta situación se da en la primera capa de impresión (la que está en contacto con la cama) se denomina *warping*. [33]

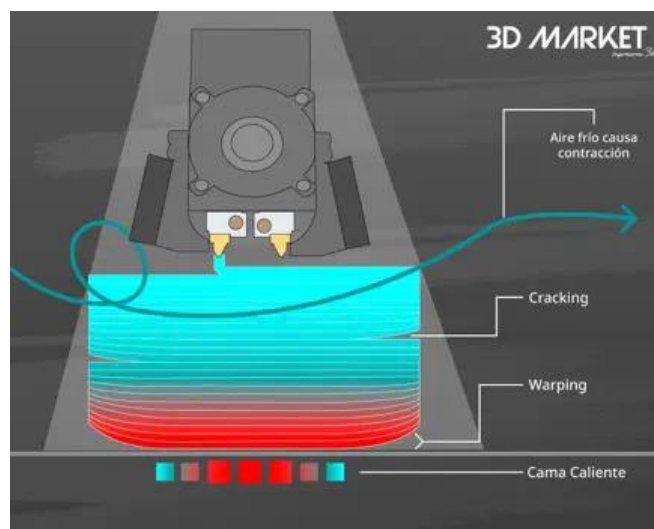


Figura 4-9 Explicación de las deformaciones térmicas en la impresión 3D [33]

Como norma general y tras comparar en diversos foros, se han obtenido las siguientes recomendaciones a la hora de llevar a cabo la fabricación mediante el uso del ASA.

## Consejos para imprimir ASA

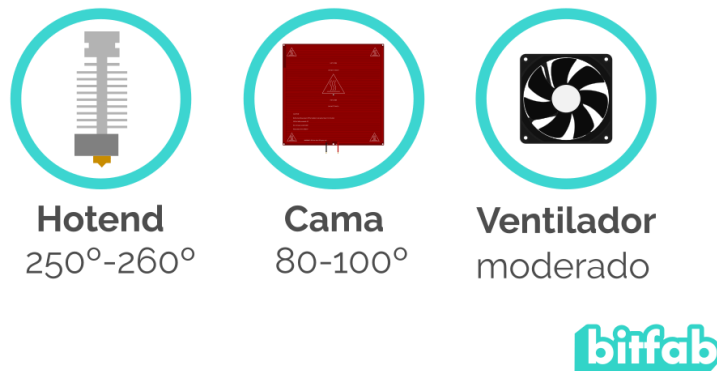


Figura 4-10 Consejos impresión ASA [34]

### 4.2.2 Análisis de la cantidad de material y del tiempo empleado en la fabricación

Según el software empleado como slicer, en nuestro caso el ultimaker cura, la duración de impresión fluctúa en función del grosor de la capa. Debemos ajustar este grosor para conseguir la mejor relación entre tiempo empleado-calidad final. Nuestra pieza tiene una rosca M4x0.7 mm, debemos seleccionar un ancho que permita la impresión de dicha rosca consiguiendo que no se vea comprometido el correcto funcionamiento de las tuercas. Por ello, he decidido hacer la impresión con un grosor de 0.1 mm, esto es puesto que la rosca al tener un paso 0.7 mm (distancia entre dos puntos idénticos entre dos dientes consecutivos de una rosca). Además, entre diámetro exterior e interior de ésta hay 0.5 mm, por lo que imprimiendo a 0.1mm conseguiríamos un funcionamiento más que correcto. He realizado un análisis tanto para la base n°3 como la n°4, por ser las más propicias para realizar el soporte de la celda de yodo.

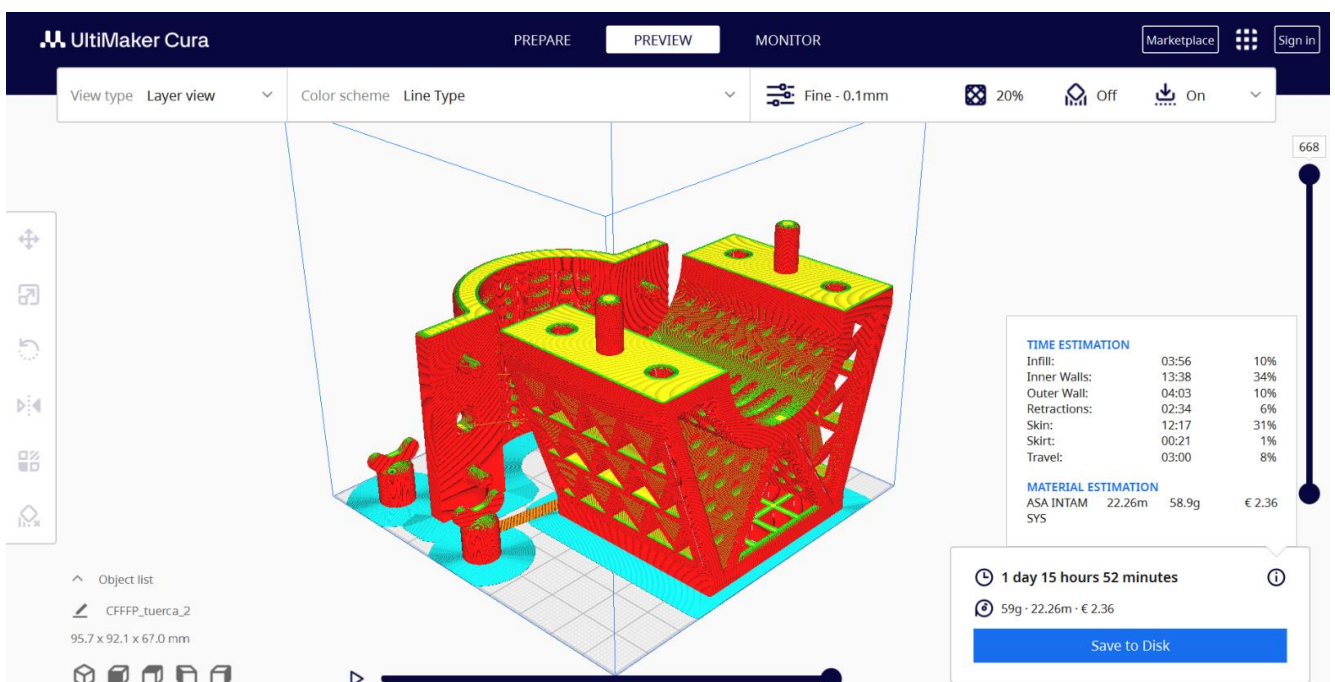


Figura 4-11 Slicer conjunto n°3 Ultimaker Cura [Autoría propia]

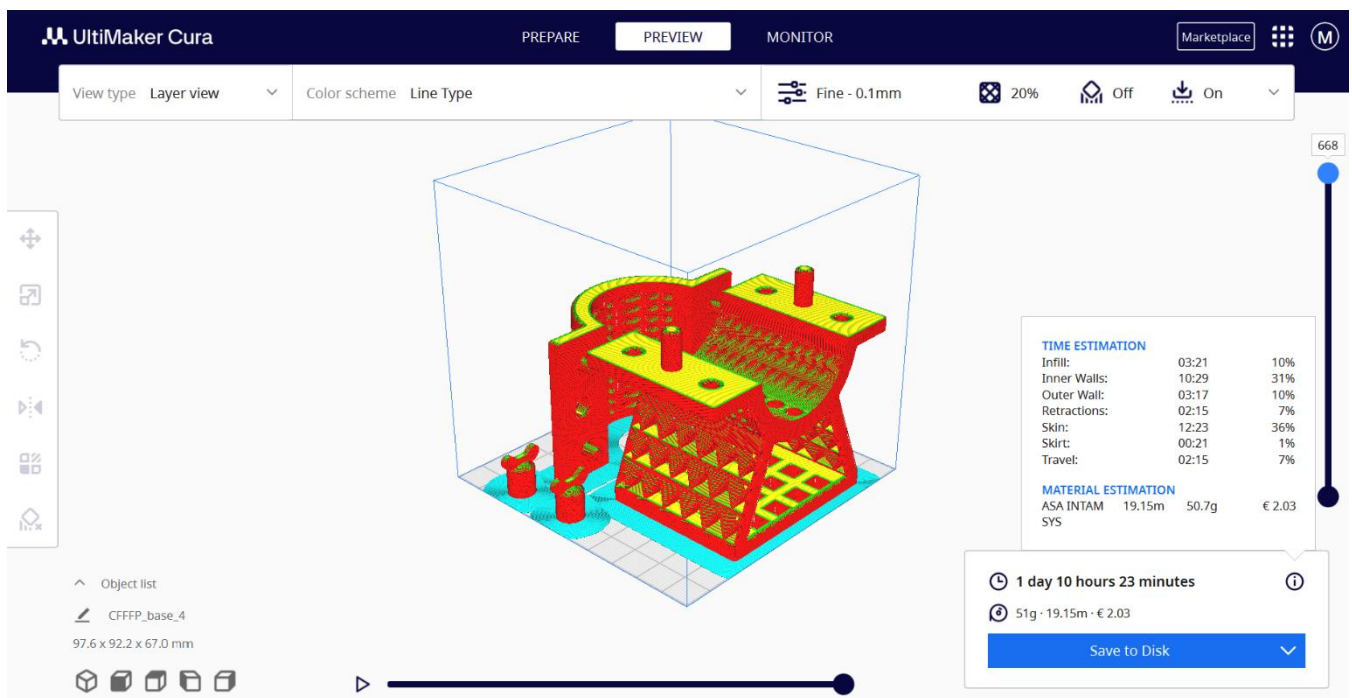


Figura 4-12 Slicer conjunto n°4 Ultimaker Cura [Autoría propia]

En primer lugar, debemos tener en cuenta que se necesitan dos bases para un soporte de la celda. Al haber incluido en el programa todo lo necesario para la mitad de un soporte (dos tuercas, una abrazadera y un soporte), habría que llevar a cabo dos impresiones completas. Como podemos observar, tanto los tiempos de impresión, como el empleo de material son muy similares imprimiendo únicamente un soporte de cada modelo. Tanto en el caso del soporte n°3 como del n°4 habría que duplicar todos los datos obtenidos de tiempo, material y coste, por lo que quedarían los resultados que a continuación se relacionan:

Conjunto de piezas	Tiempo Impresión	Gramos de Filamento	Metros de Filamento	Coste Total
N°3	3d 7h 44m	118g	44.52m	4.72€
N°4	2d 20h 46m	102g	38.30m	4.06€

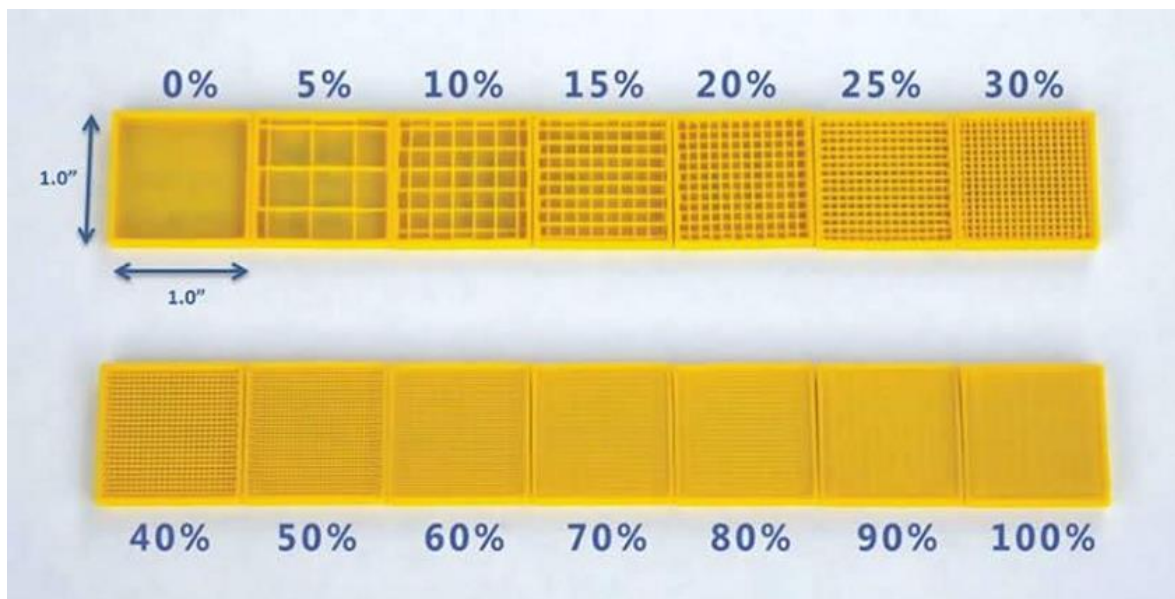
Tabla 6 Relación coste-tiempo de la impresión [Autoría propia]

Después de analizar la tabla anterior, podemos constatar que, al doblar la producción del soporte, lo hacen con ello el resto de parámetros, y pasan a ser diferencias a tener en cuenta, sobretodo en el apartado del tiempo, en el que decantarnos por el modelo n°3 conllevaría el aumentar el tiempo de producción en 12 horas.

### 4.2.3 Porcentaje de relleno

El porcentaje de relleno es la cantidad de material que ocupa la parte interna de la pieza, el relleno o *infill*, en inglés. Los programas de laminación ofrecen la posibilidad de imprimir desde el 0 % de relleno para piezas huecas hasta el 100 % para las macizas, no obstante, el estándar que se suele emplear es la impresión al 20 %. Con este dato se consiguen piezas con resistencia media/alta, con bajo peso y un tiempo de impresión eficiente. Esto se traduce en un buen ratio resistencia-coste. La

experiencia de otros usuarios ha llevado a la conclusión de que con un 25-50 % de relleno se aumenta en un 25% la resistencia, sin embargo, del 50 al 70 % de relleno únicamente se aumenta un 10 %. Por ello, se debe tener en cuenta cuánto de importante es ganar este pequeño porcentaje a cambio de aumentar el tiempo de fabricación de manera considerable. En nuestro modelo nº3, pasamos de un tiempo de impresión de 3 d 3 h y 22 m por el set completo con dos soportes al 10 % a un tiempo de 5 d 22 h 10 m con 100% de relleno. Además, pasamos de un gasto de 41.46 metros, 110 gramos y 4.32 euros a un consumo de 68.82 metros, 182 gramos y 7.28 euros en el 100 %. Siguiendo los consejos de diversas páginas webs especializadas en la impresión 3D como Filament2print, 3D Works, 3D Natives y el blog de impresoras especializadas blog.Prusa3D; he decidido decantarme por hacer la pieza con el 20 % de relleno. El porcentaje de relleno además es más interesante cuando se desarrollan diseños menos detallados. En el caso de nuestros soportes, por haber reducido el empleo de material en el desarrollo de las piezas con CAD (incluyendo perforaciones y extrusiones fundamentalmente), no tiene tanto sentido pensar en porcentajes de relleno. No obstante, hemos podido comprobar anteriormente la enorme repercusión que tiene la variación de porcentaje en cuanto a tiempos de impresión aumentando este en más de dos días y medio y doblando casi el precio para una misma pieza. Esto nos da cuenta de la importancia que puede tener en la impresión de piezas de mayor tamaño. [35] Por último, se puede modificar el patrón de relleno de las piezas, siendo los principales tipos el hexagonal, el triangular o el cuadrado. En nuestra pieza, debido a la poca carga que sufrirá, no es un parámetro a tener en cuenta a la hora de hacer la laminación.



**Figura 4-13 Ejemplo de Porcentaje de relleno [20]**

#### 4.2.4 Análisis de costes de fabricación

En este apartado del desarrollo se procederá a llevar a cabo un análisis de los costes de fabricación de la totalidad de la pieza. Para ello, se analizarán; el consumo del material de impresión necesario, el consumo eléctrico de la impresora y el coste de adquisición de los *clamps*, necesarios para hacer firme la pieza a la mesa óptica.

En primer lugar, debemos tener en cuenta el material que se empleará para la impresión, en nuestro caso, el ASA de Intamsys. Según el *slicer* (UltiMaker Cura) en el que se llevó a cabo el estudio de impresión, se determinó que se necesitaban 51g de material, equivalentes a 19,15 m por cada soporte. Teniendo en cuenta que la estructura está formada por un par de estos, se necesitan 102

g, es decir 38,30 m de filamento. Además, y como ya quedó analizado en la Tabla 6 del apartado 3.5.2, esto equivale a un precio de 4.06 € de material.

La impresión, además, transcurrirá a lo largo de 2 d 20 h y 46 minutos. Este dato, lo tendremos en cuenta a continuación, para estimar los gastos de consumo eléctrico. Según los datos técnicos proporcionados por la página especializada 3dSystems, la impresora Intamsys Funmat HT Enhanced, funciona en el siguiente rango. 200~240 V, 10.5 A. 50~60 Hz, 1200 W. Teniendo en cuenta que el tiempo de funcionamiento es de 68.77 h, el consumo total será de 1.2 kWh multiplicado por el tiempo de uso. Suponiendo, según la empresa energética Repsol, un precio de 0.2 €/kWh, nos encontramos con el siguiente gasto: [6] [36]


$$68.77 \text{ h} \times 1.2 \text{ kWh} \times 0.2 \text{ €/kWh} = 16.50 \text{ €}$$

A continuación, debemos añadir el precio de los *clamps*, que serán los elementos de sujeción. En nuestro caso, se recomienda el uso de dos elementos por cada soporte. Teniendo en cuenta la presencia de dos módulos en cada estructura, se realizará una compra de 5 anclajes, manteniendo uno de respeto por si hiciese falta en alguna situación especial. Para ello, se ha optado por acudir a la página web del especialista ThorLabs, en el que se oferta el siguiente paquete:

**THORLABS** Products ▾ Rapid Order ▾

🏠 Products Home / Optomechanical Components / Optical Post Assemblies / Bases

### CL5A-P5 - Table Clamp, L-Shape, Rounded Lip, 5 Pack



[Zoom](#)

**Part Number:** CL5A-P5 [-Ask a technical question](#)

**Package Weight:** 0.04 kg / Each

**Available:** Today

**RoHS:** RoHS✓

**Price:** **21,33 €**

**Add To Cart:** Qty:  Add To Cart

**Release Date:** 15.04.2016

Figura 4-14 Detalles de compra de los *clamps* [25]

Finalmente, y teniendo en cuenta todos los aspectos mencionados anteriormente, el montante de la inversión inicial será; la suma del material empleado, el consumo eléctrico y la adquisición de los *clamps*. No se tendrá en cuenta la adquisición de la impresora, debido a que el ROA ya cuenta con ella. Hay que tener en cuenta a su vez, que esta inversión inicial puede ser amortizada al reutilizar las sujeciones de ThorLabs para futuros proyectos.

Por último, se ha calculado que el montante asciende a 41.89 €, como se contempla en la tabla que se adjunta a continuación:

PRODUCTO	Precio (€)	Coste Total (€)
Filamento ASA	4,06	41,89
Consumo Eléctrico	16,5	
<i>Clamps</i>	21,33	

**Tabla 7** Tabla de inversión inicial [Autoría propia]



## 5 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

En este quinto apartado del Trabajo de Fin de Grado, se va a determinar si se han cumplido los objetivos propuestos; los problemas encontrados a la hora del diseño de las piezas, y demás vicisitudes que surgieron a lo largo del proceso de creación de los soportes. Por otra parte, se profundizará en las líneas futuras, en la implementación de la impresión 3D en determinadas dependencias de la Armada, y se aportarán, además, unas conclusiones personales.

### 5.1 Consecución de los objetivos propuestos

El objetivo principal de este trabajo fue, desde el principio, el diseño de un soporte que fuese elaborado mediante la impresora 3D del ROA, la Intamsys Funmat HT Enhanced. Para ello, había ciertos hitos intermedios, que era imprescindible ir cumpliendo. Algunos de estos objetivos eran los siguientes.

- Ser capaz de diseñar la pieza mediante las técnicas de diseño asistido por ordenador. Esto requería una familiarización por parte del alumno con el programa, y una preparación previa al diseño de cualquier pieza.
- Conocer la colocación y características de la celda de yodo, para la que se iba a diseñar el soporte. También ha sido necesario adquirir conocimientos básicos sobre el funcionamiento del reloj, las disposiciones de las distintas mesas ópticas y las posibles limitaciones de la nuestra.
- Se debían tener en cuenta las dimensiones de los *clamps* a la hora de diseñar el soporte, puesto que la estabilidad era un requisito imprescindible.
- Se ha conseguido desarrollar una tabla con las características principales de los distintos filamentos para impresión 3D, como nos sugirió el ROA, que puede ser empleada en proyectos futuros.
- Todos los elementos del soporte pueden ser creados por la impresora, a excepción de los *clamps*, sin necesidad de recurrir a fabricantes externos.
- Se ha llevado a cabo un estudio económico del costo total de la fabricación de la pieza.
- Finalmente, se ha conseguido minimizar el empleo del número de piezas en cada soporte, además de lograr la interoperabilidad entre los distintos modelos (3 y 4).

## 5.2 Problemas encontrados

La mayor parte de los problemas surgieron a raíz del diseño por ordenador. La falta de conocimientos de la plataforma, unido con la dificultad de convertir en realidad las ideas que surgían, fue algo que ralentizó todo el proceso de diseño. Además, el no contar con el modelo de impresora que se empleará, ha supuesto la inviabilidad de probar el resultado final. No obstante, se presupone que el resultado será el esperado, por contar el ROA con una impresora que permite una precisión de impresión de entre 0.05 mm y 0.3 mm de espesor por capa. La mayoría de los fallos encontrados en TFGs de diferentes compañeros, corresponden a la parte de la impresión, en gran medida debidos al empleo de unas impresoras asequibles, que nada tienen que ver con la que se empleará en nuestro caso, por lo que asumimos que no encontraremos los siguientes contratiempos:

-Las contracciones entre capas por el cambio de temperatura. Nuestra impresora al contar con una base calentada, y una atmósfera a 90 °C, evita por completo este fenómeno.

- Las imprecisiones de impresión, irregularidades y demás desperfectos de las piezas, provocados por un hardware poco desarrollado y asequible.

El tamaño de la impresora. La Intamsys Funmat HT Enhanced, con la que cuenta el ROA, tiene las dimensiones de un cubo de 260 mm de lado. Esta característica, además de las limitaciones de espacio que se necesitaba emplear para otros cometidos bajo la celda de yodo, hizo que se descartasen los dos primeros modelos que, no obstante, podrían haber sido impresos en otro hardware.

## 5.3 Líneas futuras

En este proyecto en concreto, las líneas futuras son relativamente limitadas. Más allá de posibles mejoras del soporte, de realizar algún análisis de fuerzas más en profundidad, o de optimizar el proceso de impresión, lo aconsejable sería, más bien, mantener una estrecha relación con el ROA, y poder seguir desarrollando piezas que les puedan ser de utilidad, como el caso del soporte de la celda de yodo que se ha llevado a cabo en el presente TFG. A su vez, se podría estudiar el proceso a seguir para integrar la impresión 3D en la Armada, como método de elaboración de recambios, mejoras de equipos, o personalización de los mismos.



Figura 5-1 Armada Estadounidense haciendo uso de la impresión 3D [20]

Tal vez, sería interesante estudiar la implementación de impresoras 3D a bordo de los buques y unidades de la Armada. No sólo, adquiriendo el material necesario, sino también explotando su potencial al máximo.

Los nuevos métodos de fabricación aditiva, permiten la impresión con polvos de metal. Esta maquinaria, combinada con un terminal CNC (para extruir, fresar, troquelar, o demás procesos de fabricación), brinda infinitas capacidades a la hora de fabricar repuestos a bordo. Este proceso únicamente está limitado por el espacio que ocupan los dispositivos de fabricación.

Además, si los buques contasen con una base de datos, que incluyera todas las piezas que pudieran ser sustituidas, seríamos capaces de aumentar la autonomía de estos en cuanto a averías por rotura de material de manera considerable. Por último, se debería estudiar la posibilidad de integrar los métodos de adquisición de geometrías mencionados en el apartado 2.3.1, para ser capaces de obtener nuevos modelos .STL que no estuviesen disponibles en la base de datos. Se propone, por ejemplo, el escaneado por fotogrametría. Este tipo de adquisición de geometrías, se encuentra disponible hoy en día en muchos de los teléfonos de última generación, en concreto en los de la empresa Apple, Inc.

## 5.4 Implementación de la Impresión 3D en la Armada

La transformación digital en la Armada, conocida como Armada 4.0, se enfrenta al desafío de mejorar la eficiencia en la dirección, administración, logística y producción. La Jefatura de Apoyo Logístico (JAL) desempeña un papel central en este proceso, con su Dirección de Abastecimiento y Transporte (DAT) encargada de la gestión del material y la catalogación del inventario.

En este contexto, las direcciones de Ingeniería y Construcciones Navales (DIC) y de Sostenimiento (DISOS) emergen como impulsores clave. Estas áreas, están enfocadas en el desarrollo de la maqueta digital, que busca crear gemelos digitales de las unidades navales para facilitar el asesoramiento remoto.

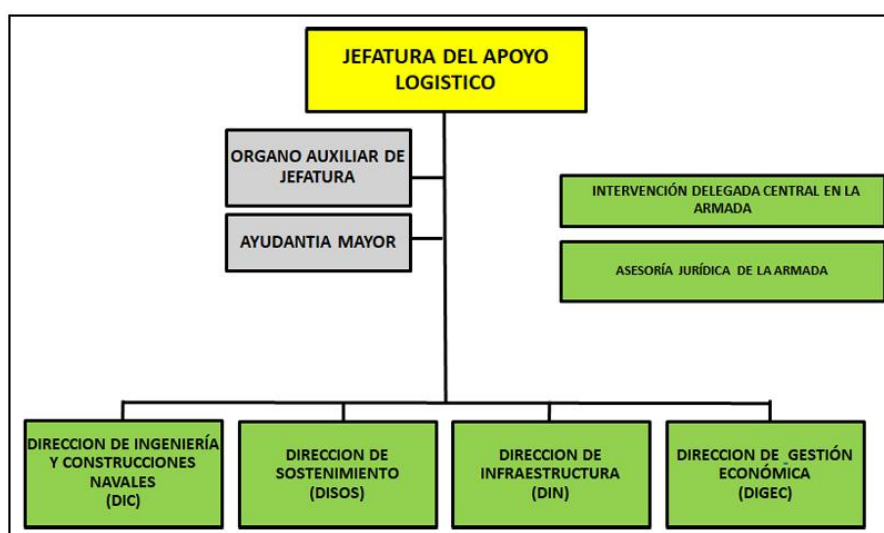


Figura 5-2 Organigrama de la JAL [37]

La impresión en 3D se plantea como una herramienta prometedora para la fabricación de repuestos, especialmente para piezas con un alto índice de fallo o demanda limitada. Sin embargo, es crucial entender sus limitaciones, generalmente las debidas al espacio, puesto que estas máquinas suelen ocupar un volumen elevado, en comparación con el tamaño de las piezas que pueden crear. La impresión 3D a bordo, podría por lo tanto imprimir tanto piezas plásticas, que formen parte de

válvulas, tuberías, codos o equipos individuales de los usuarios, como piezas metálicas, empleadas en todo tipo de elementos de la maquinaria del buque.

La propuesta de integrar la impresión 3D con el software GALIA surge como una solución viable. El software GALIA, utilizado para cargar partes de mantenimiento, podría incorporar una sección dedicada a la descarga de archivos .STL de piezas necesarias para la impresión a bordo de los buques o unidades de Infantería de Marina.

Esta iniciativa no solo optimizaría los recursos y tiempos de respuesta, sino que también tendría un impacto significativo en los costos. Comparado con los gastos de adquisición y envío de piezas convencionales, el costo de una impresora 3D y los materiales necesarios resulta considerablemente inferior. La implementación de impresoras 3D en los arsenales, además de algunas impresoras disponibles para embarcar en unidades desplegadas, se presenta como una medida práctica y eficiente para afrontar los desafíos logísticos y de mantenimiento en alta mar o en bases de operaciones. Además, esta iniciativa podría expandirse a nivel internacional, facilitando la colaboración entre Fuerzas Armadas y países mediante sistemas de comunicación como SIJE. [38]

Como se puede observar en la imagen a continuación, algunos países, en concreto Estados Unidos y Canadá, ya se han subido al tren de la impresión 3D en el ámbito de defensa, que además espera un crecimiento del 26% en los siguientes años. Es el momento, de comenzar a desarrollar la implantación de esta tecnología para no depender siempre de otros estados que supieron invertir en el momento adecuado.

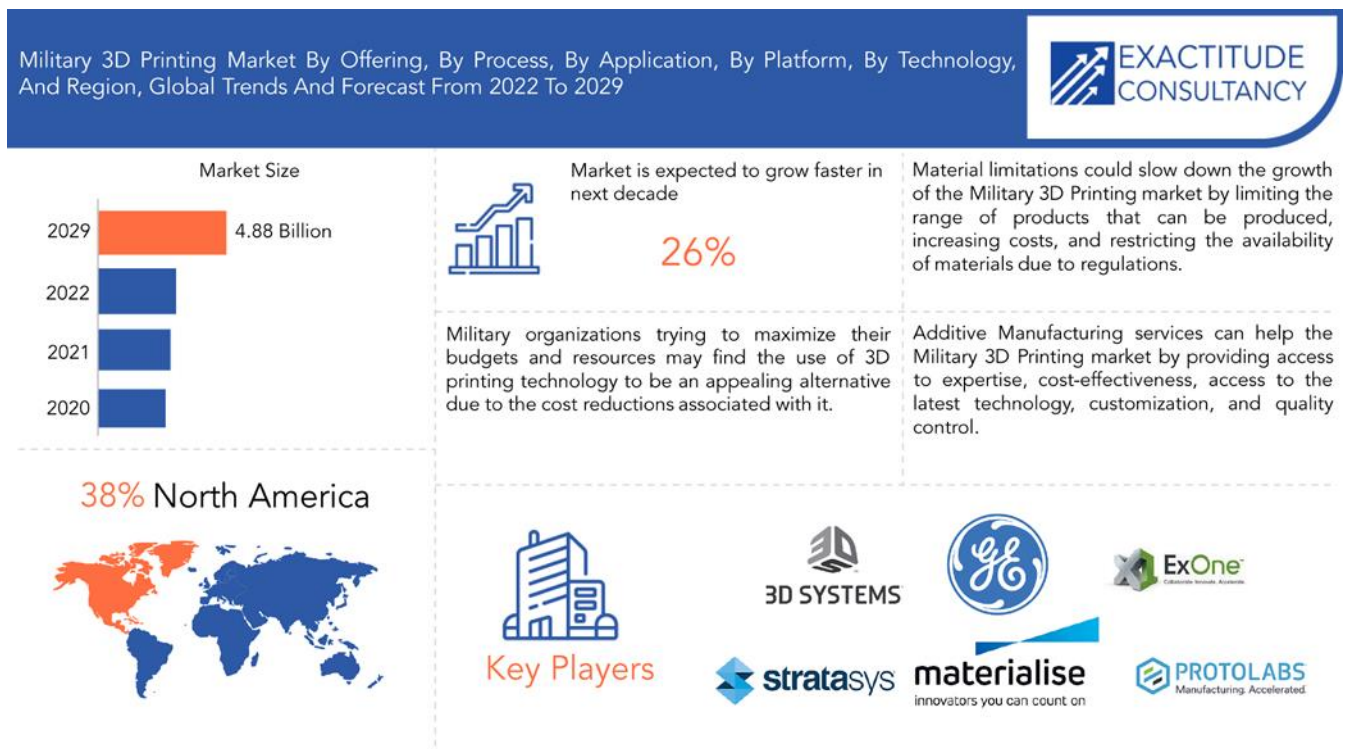


Figura 5-3 Mercado de Impresión 3D en el ámbito militar [40]

## 5.5 Conclusiones personales

A grandes rasgos, el TFG lo considero un éxito desde el punto de vista personal. El hecho de haber diseñado una pieza fundamental para el desarrollo de un reloj atómico en el ROA, es algo que desde un principio me pareció fascinante. Que este trabajo vaya a tener una implantación en la vida real,

además de haber satisfecho la petición por parte del TN Estarellas, de hacer un análisis exhaustivo de los materiales para impresión 3D con el método FDM, para su posterior empleo, ha supuesto para mí una motivación extra a lo largo de todo el trabajo.

A su vez, me ha servido para darme cuenta de la infinidad de empleos que puede tener la impresión 3D en la Armada. La autosuficiencia de los barcos, dentro de las limitaciones lógicas, puede verse drásticamente aumentada al poder fabricar con una misma impresora. Brinda la oportunidad de fabricar un gran abanico de repuestos, que a menudo no tienen espacio a bordo.

En cuanto a Infantería de Marina se refiere, la impresión 3D también otorga numerosas ventajas. Los equipos individuales del combatiente, a menudo son reutilizados, proviniendo de los soldados de ciclos anteriores, con el desgaste que esto supone. Es por ello, por lo que es habitual encontrar piezas sometidas a bastante desgaste, en un incorrecto estado de funcionamiento o incluso rotas. El poseer cada batallón, una impresora 3D, junto con los planos de las piezas más habituales, otorgaría la capacidad a las unidades de fabricar sus propios repuestos de manera rápida y, sobre todo, económica. Piezas como los clips de las mochilas de combate, las sujeciones del barbuquejo del casco, o diferentes atalajes del fusil, podrían ser fácilmente producidas e implementadas a petición de los combatientes. Todo esto evitaría el proceso de compra, envío y entrega de las piezas, que habitualmente se demora excesivamente debido a la ruptura de stock de los proveedores. Finalmente, se podrían diseñar piezas para personalizar el armamento de los soldados. Algunas de estas piezas podrían ser; railes *picatinny*, soportes para montar elementos ópticos en el fusil, o como se desarrolló en el TFG del AN Torralbo Candía, producir mejoras en el agarre de las armas cortas, e incluso, modificar la empuñadura para adaptarla al personal zurdo. [37]



## 6 BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. Bucco, «La impresión 3D y su aplicación en los servicios médicos,» Universidad de San Andrés, Buenos Aires, 2016.
- [2] Real Instituto y Observatorio de la Armada, «INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS DESARROLLADAS EN EL REAL INSTITUTO Y OBSERVATORIO DE LA ARMADA DURANTE EL AÑO 2021,» Ministerio de Defensa, Madrid, 2022.
- [3] Centro Español de Metrología, «cem.es,» [En línea]. Available: <https://www.cem.es/es/cem/presentacion>. [Último acceso: 13 02 2024].
- [4] Autodesk, Inc., «Autodesk,» [En línea]. Available: <https://www.autodesk.es/solutions/3d-printing>. [Último acceso: 28 febrero 2024].
- [5] podiprint, «Podiprint,» [En línea]. Available: <https://www.podiprint.com/impresion-bajo-demanda/la-impresion-3d-bajo-demanda/>. [Último acceso: 28 02 2024].
- [6] 3D Systems, Inc., «3dsystems,» [En línea]. Available: <https://es.3dsystems.com/our-story>. [Último acceso: 28 febrero 2024].
- [7] I. Valverde, «Impresión tridimensional de modelos cardiacos,» *Revista Española de cardiología*, vol. 70, n° 4, pp. 282-291, 2017.
- [8] KUMOTICA, «kumotica.es,» [En línea]. Available: <https://kumotica.es/blog/impresion-3d/historia-de-la-impresion-3d-ano-a-ano>. [Último acceso: 29 02 2024].
- [9] todo-3D, «todo-3d,» [En línea]. Available: <https://todo-3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/?v=911e8753d716>. [Último acceso: 28 02 2024].
- [10] 3formlabs, «formlabs,» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/comparacion-impresoras-3d-resina-sla-dlp/>. [Último acceso: 2024].
- [11] Impresoras 3D, «impresoras3d,» [En línea]. Available: [https://www.impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/#Impresoras\\_3D\\_de\\_Sinterizacion\\_Selectiva\\_por\\_Laser\\_SLS](https://www.impresoras3d.com/tipos-de-impresoras-3d/#Impresoras_3D_de_Sinterizacion_Selectiva_por_Laser_SLS). [Último acceso: 02

- 2024].
- [12] Formalabs, «Formalabs,» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/blog/what-is-selective-laser-sintering/>. [Último acceso: 02 2024].
- [13] Dassault Systèmes, «3ds,» [En línea]. Available: <https://www.3ds.com/es/make/solutions/blog/pros-and-cons-3d-printing>. [Último acceso: 29 febrero 2024].
- [14] researchgate, «Researchgate,» [En línea]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Electron-Beam-Melting-EBM-mechanism-Source-arcamcom\\_fig1\\_323791292](https://www.researchgate.net/figure/Electron-Beam-Melting-EBM-mechanism-Source-arcamcom_fig1_323791292). [Último acceso: 29 02 2024].
- [15] AUTODESK, «autodesk.es,» [En línea]. Available: <https://www.flashforge-eu.com/software-for-3d-printing/autodesk-inventor-professional>. [Último acceso: 29 02 2024].
- [16] J. A. M. Bernal, «Aplicación de la impresión 3D en las lanchas de instrucción para,» Marín, 2023.
- [17] Formalabs, «Formalabs.com,» [En línea]. Available: <https://formlabs.com/es/blog/precision-fiabilidad-tolerancia-impresion-3d/>. [Último acceso: 29 02 2024].
- [18] artec3d, «Artec3d.com,» [En línea]. Available: <https://www.artec3d.com/es/learning-center/what-is-cmm-machine>. [Último acceso: 29 02 2024].
- [19] digitalización3d, «digitalizacion3d.com,» [En línea]. Available: <https://www.digitalizacion-3d.com/que-es-y-para-que-sirve-un-escaner-3d/>. [Último acceso: 29 02 2024].
- [20] 3dnatives, «3dnatives.com,» [En línea]. Available: <https://www.3dnatives.com/es/fotogrametria-y-impresion-3d-180520222/>. [Último acceso: 29 02 2024].
- [21] A. A. P. García, «Centinelas del Tiempo: Relojes que cambiaron el mundo,» Secretaría General Técnica, Madrid, 2021.
- [22] F. J. Galindo, «Relojes Ópticos,» Revista Española de Metrología e-medida, Madrid, 2016.
- [23] Kepler, «kepler.global,» [En línea]. Available: <https://www.kepler.global/conf/iodine/>. [Último acceso: 29 02 2024].
- [24] T. A. Estarellas, *Fotografía Reloj de yodo*, San Fernando, 2024.
- [25] THORLABS, «thorlabs.com,» [En línea]. Available: [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=191](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=191). [Último acceso: 12 03 2024].
- [26] Intamsys, «Intamsys.com,» [En línea]. Available: <https://www.intamsys.com/funmat-ht-3d-printer/>. [Último acceso: 14 03 2024].
- [27] E. G. G. & V. P. A. Kirill S. Erokhin, «Revealing interactions of layered polymeric materials at solid-liquid interface for building solvent compatibility charts for 3D printing applications,» *Scientific REPORTS*, 2019.

- [28] simplify3d, «Simplify3D.com,» [En línea]. Available: <https://www.simplify3d.com/resources/materials-guide/properties-table/>. [Último acceso: 18 03 2024].
- [29] ThreeDotZeroSTUDIO, «3D Printing Filament COmparison,» Three Dot Zero Studios, LLC, 2017.
- [30] Crea 3D, «crea3d.com,» [En línea]. Available: <https://www.crea3d.com/en/188-intamsys-materials?order=product.name.asc>. [Último acceso: 18 03 2024].
- [31] 3dprintersdepot, «3dprintersdepot.com,» [En línea]. Available: <https://3dprintersdepot.com/products/intamsys-pva-1-75mm-750g-support-filament>. [Último acceso: 18 03 2024].
- [32] intelligy, «Intelligy.com,» [En línea]. Available: <https://intelligy.com/blog/2021/07/08/los-materiales-de-impresion-3d-mas-utilizados/>. [Último acceso: 18 03 2024].
- [33] Suministro Agrícola, «suministroagricola.es,» [En línea]. Available: <https://www.suministroagricola.es/gomas-ancla/1606-goma-ancla-clasica-numero-8-bolsa-de-300-unidades-iva-incluido.html>. [Último acceso: 14 03 2024].
- [34] 3Dmarket, «3dmarket.mx,» [En línea]. Available: <https://www.3dmarket.mx/consejos-para-imprimir-en-3d/delaminacion-o-cracking/#:~:text=Este%20defecto%20es%20conocido%20como,si%20no%20estuviesen%20bien%20adheridas..> [Último acceso: 29 03 2024].
- [35] bitfab, «bitfab.io,» [En línea]. Available: <https://bitfab.io/es/blog/imprimir-filamento-asa/>. [Último acceso: 29 03 2024].
- [36] Filament2print, «filament2print.com,» [En línea]. Available: [https://filament2print.com/es/blog/71\\_importancia-relleno-impresion-3d.html](https://filament2print.com/es/blog/71_importancia-relleno-impresion-3d.html). [Último acceso: 29 03 2024].
- [37] REPSOL, «repsol.es,» [En línea]. Available: <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/cuanto-gasta-calefactor-electrico/#:~:text=%C2%BFCu%C3%A1nto%20gasta%20en%20euros%20un,hora%20que%20lo%20mantengas%20encendido..> [Último acceso: 02 04 2024].
- [38] Armada Española, «armada.mde.es,» [En línea]. Available: <http://armada.mde.es/ArmadaPortal/page/Portal/ArmadaEspañola/buquessuperficie/prefL>. [Último acceso: 05 04 2024].
- [39] R. A. H. López, «Visión del AJAL del Arsenal Inteligente,» Ministerio de Defensa, 2023.
- [40] Exactitude Consultancy, «exactitudeconsultancy.com,» [En línea]. Available: <https://exactitudeconsultancy.com/es/reports/18819/military-3d-printing-market/>. [Último acceso: 08 04 2024].
- [41] A. G. T. Candía, «Diseño e impresión 3D de empuñaduras personalizadas para armas de fuego o aire comprimido,» CUD Uvigo, Marín, 2020.
- [42] OTLE, «otle.transportes.gob.es,» [En línea]. Available: <https://otle.transportes.gob.es/inform/es/2022/6logistica/63-transportede->

mercancias/634reparto-modal-del-transporte-de-mercancias-total-nacional-internacional-en-toneladas-transportadas. [Último acceso: 05 04 2024].

- [43] top3dshop, «top3dshop.com,» [En línea]. Available: <https://top3dshop.com/es-es/product/intamsys-funmat-ht-enhanced-3d-printer>. [Último acceso: 13 03 2024].

## ANEXO I: IMPLICACIONES SOCIALES, Y/O ECONÓMICAS, Y/O AMBIENTALES

Como se ha mencionado en apartados anteriores, la fabricación aditiva cuenta con la ventaja de que la mayor parte del material, es empleado en la elaboración de la pieza, sin dejar mayor desperdicio que el del filamento necesario para elaborar los soportes de la impresión.

En la actualidad, alrededor del 10% del material empleado para realizar los filamentos termofusibles proviene de materiales reciclados, no obstante, se estima que este porcentaje alcance entre el 40 y el 60 en los años venideros. El poder reutilizar el material de los soportes, de las piezas que han sufrido algún defecto de impresión o incluso las que han visto llegar el final de su vida útil, puede suponer un ahorro considerable, sobretodo en el aspecto económico.

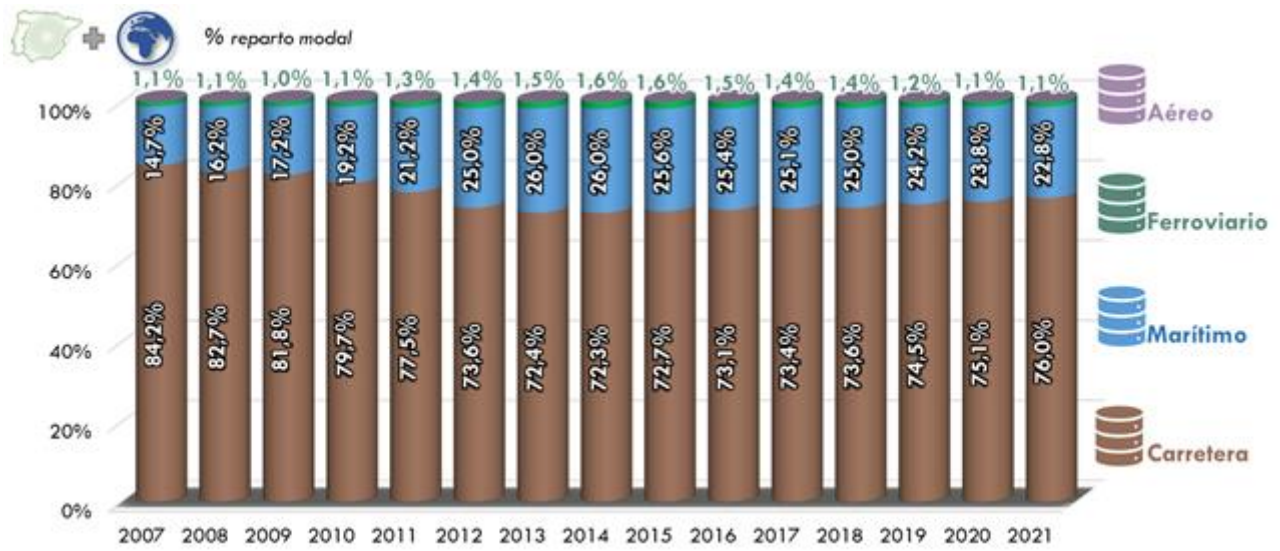


**Figura A1-0-1 Error de impresión de separación de capas [20]**

Hay otro aspecto a tener en cuenta en la impresión 3D, y es que, al poder programar la hora de funcionamiento de las máquinas, se las puede hacer funcionar a las denominadas horas valle (P3 en la factura de la luz), que al ser las de menor demanda energética, presentan unos precios por kW más competitivos. [13]

En cuanto al aspecto medioambiental, la industria es la mayor consumidora de potencia eléctrica de nuestra sociedad. Los procesos de fabricación requieren una enorme cantidad de kW para poder operar a diario. En la fabricación aditiva, esta necesidad energética es mucho menor. En primer lugar, puesto que se optimizan al máximo los tiempos de producción, limitando así el tiempo de operación de las máquinas. Se hace como hemos visto en apartados anteriores, reduciendo el porcentaje de relleno o creando perforaciones y extrusiones allá donde sea posible, sin perjudicar la solidez de la estructura. El reciclaje del material empleado como filamentos, además de un ahorro económico en cuanto a materia prima se refiere, también supondría un ahorro de la energía necesaria para producirlos, que en el caso del reciclaje es menor que en la producción. Finalmente, el poder producir las piezas in-situ, también

previene el uso de medios de transporte para su envío y entrega, limitando así el consumo de combustibles fósiles, donde la mayor parte del tráfico de mercancías se produce por carreteras.



**Figura A1-0-2 Evolución de las cuotas modales del transporte de mercancías (toneladas) en los ámbitos nacional e internacional (%). 2007-2021 [41]**

En resumidas cuentas, la impresión 3D cuenta con numerosos puntos a favor en lo que a ahorro de energía y materias primas se refiere, contribuyendo todo ello a una mayor sostenibilidad, y un menor consumo en la industria relacionada con la producción.

## **ANEXO II: REFLEXIONES ÉTICAS Y SOCIALES**

La propuesta de este TFG, se basa en el desarrollo de un soporte para la celda de yodo, que será empleada para espectroscopía en el ROA, en un nuevo reloj óptico que pretende mejorar las capacidades de la medición del segundo actuales. El desarrollo del reloj, tendrá una repercusión real en la sociedad, puesto que como se mencionó en apartados anteriores, la medición precisa de este, es algo que puede afectar a ámbitos tan diversos como los sistemas de navegación por posicionamiento, pasando por las transacciones económicas de la bolsa de valores, hasta las comunicaciones militares, que a menudo requieren de métodos de sincronismo entre dispositivos de extrema precisión y complejidad, que necesitan de una medición precisa del tiempo. Se puede sumar a esto, la precisión que aportará a diferentes experimentos nacionales, llevados a cabo en diferentes laboratorios. A todos ellos les aportará mayor exactitud en sus procesos de investigación, el hecho de contar con una medida del tiempo lo más fidedigna posible.