



*Máster Universitario en Logística y Gestión Económica de la Defensa*



## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

# **ANÁLISIS COSTE-EFICACIA DE LA IMPLANTACIÓN DE TECNOLOGÍA DE FABRICACIÓN ADITIVA EN LA CADENA DE SUMINISTROS DE LA ARMADA**

**Autor:**

**Carlos Javier Chaves Ruiz**

Fecha de finalización del T.F.M.:

19 de Mayo de 2023



*Máster Universitario en Logística y Gestión Económica de la Defensa*





**Nota del autor:** La responsabilidad de las opiniones expresadas en este documento es únicamente propia del autor en el marco de la realización de un Trabajo Fin de Máster como requisito para la obtención del Título de Máster Universitario en Logística y Gestión Económica de la Defensa. En ningún caso representan la posición oficial del Ministerio de Defensa del Reino de España ni de la Armada.



## ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS.....	4
ÍNDICE DE IMÁGENES.....	5
ÍNDICE DE GRÁFICOS.....	6
1. DATOS DE AUTOR.....	7
2. RESUMEN.....	8
2.1. ABSTRACT.....	9
3. INTRODUCCIÓN.....	10
4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.....	13
5. METODOLOGÍA.....	14
6. FABRICACIÓN ADITIVA.....	16
6.1. CONCEPTO.....	16
6.2. BENEFICIOS Y LIMITACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA.....	17
6.3. FABRICACIÓN ADITIVA VS FABRICACIÓN CONVENCIONAL.....	21
6.4. EL PROCESO DE FABRICACIÓN ADITIVA: LAS FASES.....	27
6.5. MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN ADITIVA.....	40
7. LA CADENA DE SUMINISTRO.....	50
7.1. CONCEPTO Y OBJETIVO.....	50
7.2. DIMENSIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO.....	54
7.3. LA ARMADA: ÚLTIMO ESLABÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO.....	56
8. LA FUNCIÓN DEL APOYO LOGÍSTICO DE LA ARMADA.....	57
8.1. ESTRUCTURA ORGÁNICA Y GESTIÓN DEL APROVISIONAMIENTO.....	58
8.2. DETERMINACIÓN Y NIVELES DE REPUESTOS.....	60
8.3. FUENTES DE OBTENCIÓN DE REPUESTOS.....	63
8.4. PROBLEMAS EN LA CADENA DE SUMINISTRO Y FACTORES QUE LOS GENERAN.....	70
9. CONCLUSIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	78
ANEXOS.....	82



**ÍNDICE DE TABLAS.**

Tabla 1- Coste de inversión en equipos de medición y software.....	35
Tabla 2- Coste de inversión en tecnología aditiva. ....	35
Tabla 3- Coste inversión equipos de acabado.....	36
Tabla 4- Coste inversión tecnología de fabricación aditiva.....	37
Tabla 5- Propiedades de los polímeros. ....	42
Tabla 6- Beneficios e inconvenientes del uso de metales en fabricación aditiva. ....	44
Tabla 7- Lista de metales más empleados en fabricación aditiva.....	45
Tabla 8- Número de expedientes. ....	64
Tabla 9-Duración media de la tramitación de los contratos.....	73



**ÍNDICE DE IMÁGENES.**

Imagen 1- Tecnologías de la "industria 4.0 .....	11
Imagen 2- Fabricación aditiva por sector (%).....	11
Imagen 3- Tipos de material en fabricación aditiva. ....	40
Imagen 4- Clasificación polímeros según su utilidad. ....	41
Imagen 5- Evolución de las actividades empresariales. ....	51
Imagen 6- Sujetos en una cadena de suministro. ....	52
Imagen 7- Estructura horizontal de la cadena de suministro. ....	55
Imagen 8- Estructura vertical de la cadena de suministro.....	55
Imagen 9-Estructura focal de la cadena de suministro.....	56
Imagen 10- Intercambio de información. ....	59
Imagen 11- LCSP (% por tipo de expediente).....	66
Imagen 12- Volumen de ventas FMS 2000-2010. ....	68



**ÍNDICE DE GRÁFICOS.**

Gráfico 1-Función de disponibilidad. .... 24  
Gráfico 2- Curva coste de inversión en tecnología. .... 38



**1. DATOS DE AUTOR.**

Nombre: Carlos Javier

Apellidos: Chaves Ruiz

Correo electrónico: [cachaves@ucm.es](mailto:cachaves@ucm.es)



## **2. RESUMEN.**

Actualmente el mundo está viviendo la cuarta revolución industrial conocida como “la industria 4.0”. Esta revolución se caracteriza por procesos de gestión y fabricación con un alto componente tecnológico que nos permite duplicar la realidad “física” en una realidad virtual.

Dentro de esta “industria 4.0” destaca la tecnología de fabricación aditiva, entendida como un proceso de fabricación que permite obtener un objeto físico a partir de un modelo virtual desarrollado por ordenador.

Pero además, la fabricación aditiva también permite replicar objetos mejorados a partir de un objeto original y todo ello a través de un programa informático y un scanner. Es lo que se conoce como industria inversa.

Esta tecnología tiene una serie de ventajas. Entre ellas destaca el ahorro de tiempo en la cadena de suministro de materiales, aspecto de gran importancia en el ámbito de la Armada, ya que permite reducir la demora existente en la disponibilidad de los materiales, incluidos los repuestos, solicitados a la cadena de suministro desde que surge la necesidad.

La demora en la disponibilidad de los repuestos conlleva un retraso en el mantenimiento de los sistemas y equipos, así como en la operatividad de los mismos y de sus buques y aeronaves. En definitiva, la correcta seguridad y defensa que debe proporcionar la Armada con sus sistemas y equipos está en peligro por la falta de repuestos disponibles.

En este sentido, el estudio elaborado en el presente Trabajo Fin de Máster corrobora que implantar la tecnología de fabricación aditiva en la cadena de suministros de la Armada mejora los tiempos de demora reduciéndola.

### **PALABRAS CLAVE:**

Alcance. Cadena de suministro. Demora. Repuestos. Tecnología de fabricación aditiva.



## **2.1. ABSTRACT.**

*The world is currently experiencing the fourth industrial revolution known as "Industry 4.0". This revolution is characterized by management and manufacturing processes with a high technological component that allows us to duplicate the "physical" reality in a virtual reality.*

*Within this "industry 4.0", additive manufacturing technology stands out, understood as a manufacturing process that makes it possible to obtain a physical object from a virtual model developed by computer.*

*In addition, additive manufacturing also makes it possible to replicate improved objects from an original object, all through a computer program and a scanner. This is known as reverse manufacturing.*

*This technology has a number of advantages. Among them is the time saving in the supply chain of materials, an aspect of great importance in the Navy, since it reduces the existing delay in the availability of materials, including spare parts, requested from the supply chain as soon as the need arises.*

*The delay in the availability of spare parts leads to a delay in the maintenance of systems and equipment, as well as in the operability of the same and of its ships and aircraft. In short, the proper security and defense that the Navy must provide with its systems and equipment is endangered by the lack of available spare parts.*

*In this sense, the study carried out in this Master's thesis corroborates that implementing additive manufacturing technology in the Navy's supply chain improves the delay times by reducing it.*

### **KEY WORDS:**

*Scope. Supply chain. Delay. Spare parts. Additive manufacturing technology.*



### **3. INTRODUCCIÓN.**

La Armada fue creada a finales del siglo XV, cuando los Reyes Católicos crearon la Armada Real con el objetivo de proteger y defender las costas del Reino España. En la actualidad, dicha protección y defensa no solo se refiere a todos los espacios marítimos nacionales, sino que además se ha extendido hacia espacios internacionales en un esfuerzo de colaboración con sus socios y aliados.

Para garantizar los objetivos de seguridad y defensa a lo largo de los años, la Armada ha hecho un gran esfuerzo por no anclarse en el pasado, sino todo lo contrario. En la actualidad, la Armada es considerada una fuerza naval moderna.

Sus Buques, Unidades e Instalaciones (en adelante, BUI's) han ido adaptándose a sus necesidades siempre de la mano de la evolución tecnológica y sin perder nunca de vista que su principal razón de ser es la disponibilidad y operatividad de la Fuerza.

La tecnología es, por tanto, una parte fundamental en el avance y desarrollo de la Armada y, en concreto, del apoyo logístico, que no debemos dejar de lado. De ahí la importancia que el Almirante Jefe del Estado Mayor de la Armada (en adelante, AJEMA) le da a la tecnología, razón por la que se elaboró<sup>1</sup> un Plan de Transformación Digital de la Armada.

Hoy en día estamos viviendo la cuarta revolución industrial, comúnmente conocida como la “industria 4.0”, una nueva revolución que combina técnicas avanzadas de producción y operaciones con tecnologías inteligentes que se integrarán en las organizaciones, en las personas y en los activos.

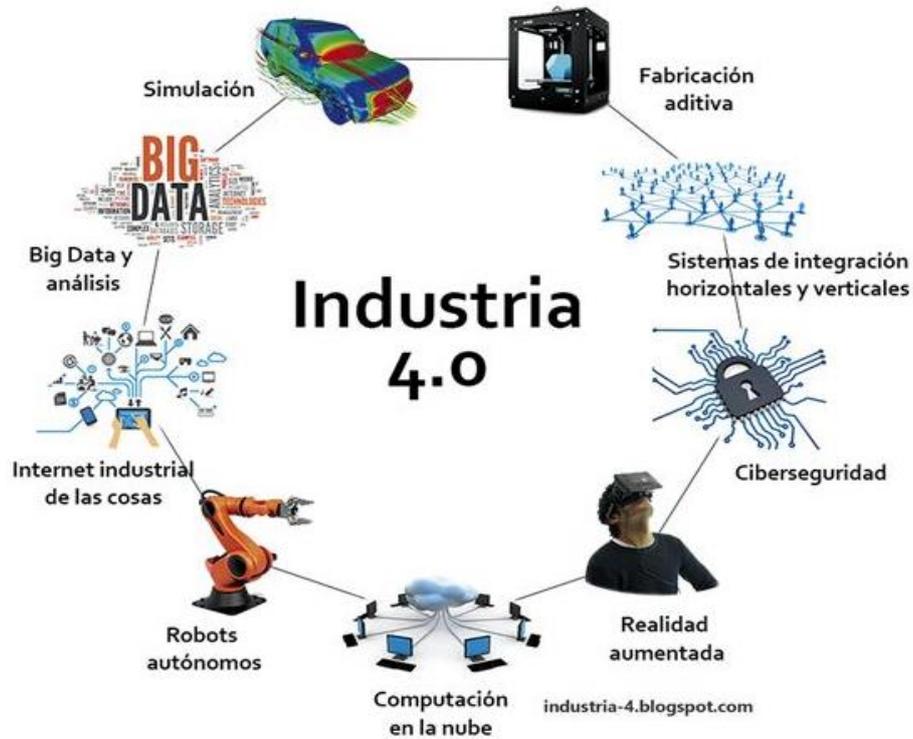
La “industria 4.0” se basa en la combinación e interrelación de diferentes tecnologías digitales. De entre estas tecnologías, la fabricación aditiva se ha manifestado como aquella que permite crear piezas a menor coste y en un menor tiempo, realizar pruebas sobre prototipos y minimizar el desperdicio de recursos, entre otras ventajas.

En la siguiente imagen se muestran todas las tecnologías que se engloban dentro de la “industria 4.0”.

---

<sup>1</sup> Dentro del marco del Plan de Acción del Ministerio de Defensa para la Transformación Digital.

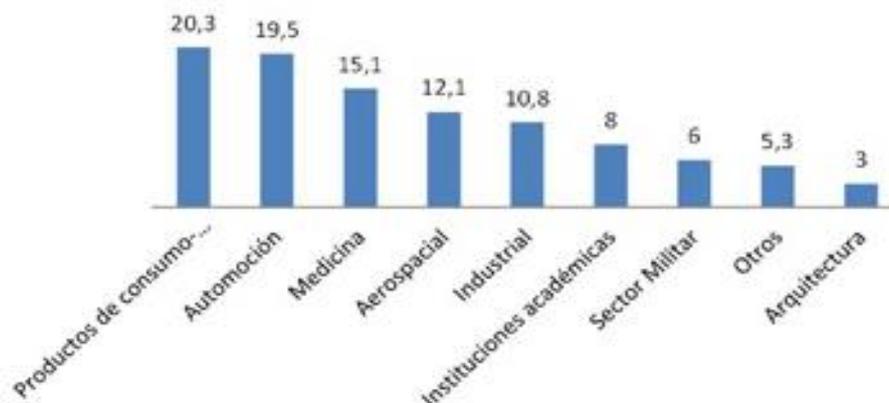
Imagen 1- Tecnologías de la "industria 4.0



Fuente consultada: [www.thesmartcityjournal.com](http://www.thesmartcityjournal.com)

La fabricación aditiva se presenta como un proceso de fabricación que posee una serie de ventajas frente a los procesos de fabricación convencionales. Su utilidad es aplicable en varios sectores, desde los más sencillos hasta los más complejos.

Imagen 2- Fabricación aditiva por sector (%)



Fuente consultada: [www.interempresas.net](http://www.interempresas.net)



Como puede verse en la imagen anterior, la fabricación aditiva está siendo aplicada en el ámbito de la Defensa. Son un ejemplo de ello la U.S. Navy<sup>2</sup> con la instalación a bordo del buque USS Bataan de un sistema híbrido de impresión 3D fabricado por la empresa española Meltio y la Real Fuerza Aérea de los Países Bajos<sup>3</sup> con la implantación de esta tecnología para el mantenimiento de sus aeronaves.

En España, el Ejército de Tierra fue pionero en adquirir tecnología de fabricación aditiva, como por ejemplo una impresora 3D industrial de la empresa española Triditive<sup>4</sup>.

En este sentido, la Armada no quiere mantenerse al margen de la “industria 4.0”, en general, ni de la tecnología de fabricación aditiva, en particular. Por este motivo, el AJEMA rubricó con su firma el 5 de Julio de 2017 la aprobación del Concepto de Apoyo Logístico (en adelante, CONLOG 2017).

Este nuevo documento tiene por objeto establecer, sobre la base de la “industria 4.0”, el nuevo modelo, los principios y criterios conceptuales que han de orientar todas las actividades del apoyo logístico, así como determinar las líneas generales de la evolución de la Armada hacia un nuevo concepto de apoyo logístico que involucre a todos los actores participantes en los procesos logísticos, es decir, la Industria, los proveedores y la estructura del Ministerio de Defensa (en adelante, MINISDEF). [Armada, 2017]

Actualmente la cadena de suministro de la Armada presenta una serie de problemas ocasionados por varios factores. Estos problemas pueden resumirse en una sola expresión: la no disponibilidad de los repuestos en tiempo y lugar necesarios.

Lo que se pretende con la elaboración del presente trabajo fin de máster (en adelante, TFM) es comprobar si la integración de la tecnología de fabricación aditiva en el ámbito del apoyo logístico de la Armada es capaz de solucionar el problema de la demora en la disponibilidad de los repuestos.

Para ello, en el siguiente capítulo se presenta la hipótesis objeto de estudio.

---

<sup>2</sup> <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/464373-Marina-EE-UU-instala-bordo-primera-vez-sistema-hibrido-impresion-3D-metal-creado-Meltio.html>

<sup>3</sup> <https://sicnova3d.com/blog/utillaje-3d-fuerza-aerea-holanda/>

<sup>4</sup> <https://www.defensa.com/espana/primera-maquina-fabricacion-aditiva-hibrida-ejercito-tierra>



#### **4. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS.**

La hipótesis que se plantea en este TFM para su corroboración o no es la siguiente:  
¿implantar la tecnología de fabricación aditiva en la cadena de suministros de la Armada puede solucionar el problema de demora en la obtención de repuestos?

Del planteamiento de esta hipótesis surgen los siguientes objetivos que nos permitirán corroborar o no la hipótesis planteada y en qué sentido:

1. ¿Cómo podría medirse el efecto de implantar la tecnología de fabricación aditiva en la cadena de suministros de la Armada?
2. ¿Cuál sería el mejor aprovechamiento de implantar la tecnología de fabricación aditiva en la cadena de suministro de la Armada?
3. ¿Hacia dónde debería dirigir la Armada sus esfuerzos en caso de implantar la tecnología de fabricación aditiva en su cadena de suministros?



## **5. METODOLOGÍA.**

Para responder a los objetivos planteados en el capítulo anterior, el tipo de metodología a emplear será mixta.

Por un lado será cuantitativa mediante la recolección de datos numéricos, generalmente cuantificados económicamente, y por otro lado será cualitativa mediante la recolección y análisis de material textual (libros, documentos, webs oficiales de empresas, artículos de periódicos especializados, entre otros).

La metodología cuantitativa permitirá dar respuesta a los dos primeros objetivos, mientras que la metodología cualitativa permitirá responder al último objetivo.

En relación a la metodología cuantitativa es importante señalar las limitaciones que me he encontrado y que afectarán a la calidad del desarrollo del TFM. En este sentido, comentar que averiguar costes económicos de las diferentes tecnologías de fabricación aditiva no ha sido tarea fácil, sino ardua, puesto que al tratarse de equipos industriales y profesionales, dicha información no es tan accesible ni tan transparente como sí lo está para equipos propios de uso doméstico.

Por este motivo, los costes de inversión de diferentes equipos utilizados en los procesos de fabricación aditiva son aproximados. Además, dicha aproximación también está influenciada por la variedad existente de empresas, con sus correspondientes calidades y abanico de posibles funcionalidades para cada equipo.

Por otra parte, para simplificar el análisis y estudio del TFM he implantado una serie de restricciones o condiciones a modo de criterio.

La primera condición ha sido acotar el objeto de estudio. En este sentido, de las distintas clases de material que gestionan las Fuerzas Armadas (ver ANEXO II), sólo me centraré en los relativos a los repuestos (según OTAN, artículos de abastecimiento Clase II), entendido como toda pieza que tiene aplicación en un Sistema/Equipo/Componente (en adelante, SEC) determinado y que se almacena en pañoles para reemplazar al idéntico instalado, en caso de avería de éste o durante los mantenimientos programados.



El motivo que justifica que sólo me centre en los repuestos es que la no disponibilidad de éstos influye negativamente en la operatividad de los sistemas y equipos en los que van montados.

La segunda condición ha sido concretar la amplitud del ámbito de estudio. En este sentido me centraré únicamente en el ámbito de la Armada, sin perjuicio de realizar en algún momento una breve referencia a otras marinas o Fuerzas Armadas.

La tercera condición está relacionada con la tecnología de fabricación aditiva. Existen equipos básicos de fabricación aditiva que están orientados a un uso doméstico y una calidad de acabado del producto de bajo valor.

En este sentido, este TFM está orientado a la obtención de repuestos con propiedades físicas específicas y de un alto valor añadido, puesto que estarán sometidos a altos requisitos de exigencia dado el fin para el que son utilizados, por lo que los equipos de fabricación aditiva que son necesarios utilizar tienen un alto componente tecnológico propios de un entorno profesional e industrial.

Para finalizar este capítulo, el desarrollo del TFM se hará conforme al siguiente orden:

1. En primer lugar, se hará un estudio y análisis de la fabricación aditiva, detectando las ventajas y desventajas (tanto de la tecnología como de la materia prima utilizada) derivadas de su uso. En esta primera parte también se recabará información cuantificada, generalmente en términos de costes.
2. En segundo lugar, se hará un breve análisis del concepto, composición y gestión de una cadena de suministro, motivado por el hecho de que la Armada es un sujeto más de esta cadena, es decir, interactúa con otros sujetos ajenos a las Fuerzas Armadas.
3. En tercer lugar, se hará un estudio y análisis de los problemas que tiene la Armada para la adquisición de repuestos y los factores que los generan. Para ello, previamente se mostrará todo lo concerniente a la estructura y gestión de los repuestos en la Armada.
4. Y por último expondré las conclusiones a las que he llegado.



## **6. FABRICACIÓN ADITIVA.**

Dado que la tecnología de fabricación aditiva se plantea como una posible solución al problema que tiene la Armada en cuanto a la disponibilidad de repuestos solicitados a la cadena de suministros, en este capítulo definiré el concepto de fabricación aditiva.

Posteriormente mostraré, por un parte, los beneficios y limitaciones de la tecnología de fabricación aditiva y, por otra parte, las ventajas y desventajas de los procesos de fabricación aditiva en comparación con otros procesos de fabricación convencionales.

Para finalizar este capítulo, se desgranarán y desarrollarán cada uno de los factores implicados en los procesos de fabricación aditiva: fases, equipos, tecnología y materias primas (o materiales).

Durante el desarrollo de este capítulo mostraré tablas de costes aproximados y rangos de costes en lo que a la inversión en software, equipos y tecnología aditiva se refiere. La finalidad de mostrar estas tablas es utilizarlas como soporte para dar respuesta a los objetivos planteados.

### **6.1. CONCEPTO.**

La fabricación aditiva o manufactura aditiva se define como un método de producción digitalizada que consiste en fabricar objetos previamente modelados, mediante la deposición de capa por capa de material, hasta conformar un objeto tridimensional". [Christoph et al., 2017]

La fabricación aditiva hace referencia a las distintas técnicas de fabricación por adición de material empleadas con el objetivo de producir nuevos componentes complejos y duraderos. [Guillén, 2017]

Habitualmente a la fabricación aditiva se la relaciona o se la define como la impresión en tres dimensiones (en adelante, 3D), lo cual dicha comparación no es del todo correcta puesto que la impresión 3D es una técnica más de fabricación aditiva.

La fabricación aditiva suele emplearse en entornos industriales, profesionales y especializados y además requiere de una formación específica tanto en aspectos de diseño como de comportamiento de materiales.



Por el contrario, la impresión en 3D ha quedado como una tecnología de uso a nivel particular porque requiere de poca especialización y está encaminada a reproducir prototipos, modelos o piezas finales de manera rápida.

## **6.2. BENEFICIOS Y LIMITACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA.**

La fabricación aditiva presenta una serie de beneficios y limitaciones que son consecuencia de la propia tecnología y de los materiales utilizados como materia prima.

A continuación se muestran los beneficios y limitaciones de la fabricación aditiva que ayudarán al lector a tener una idea no solo de cómo está en la actualidad este asunto sino también para que los tenga como base en la posible toma de una decisión.

### **6.2.1. BENEFICIOS Y LIMITACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA.**

Como beneficios podemos señalar las siguientes:

- Permite la fabricación de piezas que tengan una geometría compleja debido a que el proceso de fabricación consiste en la deposición de material capa por capa en los puntos necesarios. Unido a esta característica o ventaja, hay que añadir que la complejidad geométrica permite la fabricación de piezas huecas, con el consiguiente aligeramiento de la misma y ahorro de coste de material. [Zahera, 2012]
- Consecuencia de lo anterior, permite a su vez reducir hasta un noventa por ciento los tiempos de producción. En definitiva, mayor productividad. [Zahera, 2012]
- Permite fabricar productos, sin penalizar el coste, independientemente de si se tienen que fabricar un determinado número de piezas iguales o todas distintas, lo que facilita la personalización, desarrollando así un producto de alto valor añadido. [Flogiatto, 2010]
- La complejidad geométrica y la personalización permiten a su vez elaborar diseños que tengan distintas composiciones<sup>5</sup> tridimensionales del material, no solo por exigencia de requisitos estéticos sino también por exigencias impuestas por

---

<sup>5</sup> Integrar distintas geometrías y materiales en un mismo sólido, permite incluso que simultáneamente se fabrique un eje y su cojinete, un muelle y su soporte. En definitiva, un mecanismo integrado en una sola pieza sin necesidad de armados y ajustes posteriores.



las propiedades químicas, mecánicas o eléctricas que deba tener el producto final y adaptar así el comportamiento de la pieza a las necesidades requeridas en cada caso (resistencia, capilaridad, aerodinámica, conductividad). [Zahera, 2012]

- La integración de componentes puede permitir la fabricación de una sola vez del producto acabado, evitando procesos de ensamblaje de componentes, reduciendo además posibles errores y procesos intermedios durante el ciclo completo de producción (control de inventarios, manipulaciones, mantenimientos, inspecciones), así como reduciendo o eliminando otros costes extras de fabricación al prescindir de utillajes. [Zahera, 2012]
- Permite el ahorro en costes de almacenaje y de logística, ya que podemos disponer de un stock virtual y fabricar solamente aquella pieza que haga falta. [Flogiatto, 2010]
- Permite un ahorro en el consumo de fuentes de energía y, por tanto, menor impacto medioambiental, simplemente porque las piezas fabricadas digitalmente pesan mucho menos y por tanto se reducen los consumos energéticos y los costes de transporte. A su vez, la materia prima ocupa menos espacio y se transporta de forma más sencilla. [Zahera, 2012]
- Permite el consumo de la materia prima estrictamente necesaria así como reciclar el posible sobrante, consiguiendo una producción más limpia y más respetuosa con el medio ambiente. [Zahera, 2012]

#### 6.2.2. LIMITACIONES DE LA FABRICACIÓN ADITIVA.

A pesar de las ventajas y aportaciones que dicha tecnología puede suponer para la industria y otros sectores, existen limitaciones que hacen que las tecnologías de fabricación aditiva no se hayan implantado aún de manera más generalizada en muchos sectores.

Las limitaciones actuales son debidas, tanto a los propios procesos de fabricación aditiva, que aún pueden ser mejorados, como a procesos periféricos o auxiliares (manipulaciones previas de material, post-proceso, control calidad) que condicionan en muchos casos su viabilidad, e incluso al desconocimiento de cómo diseñar los productos o reorientar los



negocios industriales para integrar de forma exitosa estas nuevas tecnologías. [Bourell et al., 2009]

Como desventajas podemos señalar que:

- Las máquinas de fabricación aditiva requieren de una alta inversión, por lo que resultan bastante caras, lo que supone una barrera de entrada. [Zahera, 2012]
- Para muchos materiales, metálicos o no, la gama disponible es muy inferior a la que se puede trabajar por métodos sustractivos. [Zahera, 2012]
- El coste de adquisición de material, por unidad de medida, suele ser también bastante superior para los métodos de fabricación aditiva. [Zahera, 2012]
- Estos problemas de disponibilidad y coste de la materia prima son inherentes a los bajos volúmenes de consumo actuales, ya que se produce el conocido círculo vicioso entre baja demanda, que no justifica las inversiones necesarias en los productores de nuevos materiales, y el alto coste unitario que disuade de un aumento del consumo. [Frontiers, 2011].
- El acabado superficial de las piezas y la velocidad de fabricación son en sí una limitación con una relación inversa, pues el aumento de la velocidad de fabricación condiciona la calidad del acabado superficial. [Zahera, 2012]
- La fabricación en capas produce el efecto conocido como “efecto escalera”, que hace que, entre otras cosas, el trazado de geometrías curvas se complique y el acabado superficial tenga una rugosidad elevada. [Gibson et al., 2010]
- En algunas tecnologías de fabricación aditiva no está asegurada la precisión dimensional con la que se imprime una pieza y la siguiente (es lo que se conoce como la repetibilidad del proceso) y por ende la calidad final entre una pieza y la siguiente, ya que estos dos factores están sujetos a que ciertas variables entre una pieza y la siguiente permanezcan constantes. Por ejemplo, que entre una y otra no exista un deterioro (sobrecalentamiento, roturas...) de los componentes de cualquiera de las máquinas de fabricación aditiva, o que haya una variación de las propiedades o de la calidad de la materia prima entre una pieza y la otra. [Gibson et al., 2010]
- Tamaño limitado de piezas: el volumen de pieza máximo que se puede construir hoy en día es bastante limitado. Querer fabricar aditivamente piezas de mayor



volumen requerirá la construcción de maquinaria a una escala mayor y más personalizada para el fin que se persigue. Lo que a su vez tendría un reflejo considerable en el precio de adquisición de dicha maquinaria y, por tanto, en el precio de la pieza final fabricada aditivamente. [Zahera, 2012]

- Existen riesgos que ponen en peligro la integridad física de las personas y del entorno:
  - Incendio: por el uso de materiales inflamables.
  - Explosión, bien por realizar tareas en atmósferas explosivas debidas al uso de materiales en polvo, gases o productos químicos, o bien por presencia de instalaciones de aire comprimido.
  - Quemadura: por contactos con superficies calientes.
  - Intoxicación e inhalación: por exposición a sustancias nocivas y de materiales en polvo, respectivamente.
- Por último, otro aspecto a tener en cuenta y que supone una limitación, es el que tiene que ver con los derechos de la propiedad industrial o intelectual de la pieza fabricada aditivamente cuando hayan sido fabricados por un usuario distinto al propietario de dichos derechos. [Zahera, 2012]

El costo de comprar o alquilar una propiedad intelectual o industrial para fabricar aditivamente piezas varía significativamente según la tecnología, el tipo de piezas y la región geográfica. Además, hay muchos factores que influyen en el precio, como la duración del contrato, el alcance geográfico y los términos de licencia específicos.

En general, los precios pueden variar desde unos pocos cientos de dólares hasta millones de dólares, dependiendo del alcance de la licencia y del valor de la propiedad intelectual o industrial. Algunas empresas ofrecen licencias de propiedad intelectual e industrial por una tarifa única, mientras que otras pueden requerir pagos periódicos.

No obstante<sup>6</sup>, parece que los fabricantes empiezan a cambiar el modelo de negocio para no vender únicamente repuestos acabados, sino también las licencias de los planos digitales. Además, de esta forma, aunque un fabricante cerrara la línea de

---

<sup>6</sup> Fuente: <https://fuerzanaval.com/impresion-3d-y-su-aplicacion-a-la-logistica-naval/>



producción o desapareciera, se podría seguir apoyando aquellos equipos en uso con repuestos originales.

### **6.3. FABRICACIÓN ADITIVA VS FABRICACIÓN CONVENCIONAL.**

Como se dijo anteriormente, los procesos de fabricación aditiva construyen objetos añadiendo material capa a capa. Por el contrario, en los procesos de fabricación convencionales es totalmente distintos.

Por ejemplo, son procesos de fabricación convencional los siguientes:

- Fabricación sustractiva: esta técnica utiliza herramientas de corte como tornos o fresadoras para eliminar el material de una pieza bruta hasta que tenga la forma deseada.
- Moldeo por inyección: se utiliza para producir piezas de plástico o caucho en grandes cantidades mediante la inyección de material fundido en un molde.
- Forjado: se utiliza para dar forma a los metales mediante la aplicación de calor y presión.
- Extrusión: se utiliza para producir objetos de sección transversal constante, como tubos y perfiles, mediante la aplicación de presión a través de un orificio de molde.
- Fundición: de metal o plástico en un molde.

Estos procesos de fabricación convencional se realizan a mano o, más habitualmente, se llevan a cabo con un control numérico computerizado (CNC). En el proceso del CNC, un modelo virtual diseñado en software CAD sirve como datos para la herramienta de fabricación.

El software de simulación se combina con los datos que introduce el usuario para generar trayectorias que guían a las herramientas a través de la geometría de la pieza. Estas instrucciones indican a la máquina cómo hacer los cortes, canales, orificios y otras características necesarias que requieran la eliminación de material y tienen en cuenta la velocidad de la herramienta de corte y la velocidad de alimentación del material.

Aquí tendríamos la primera diferencia con respecto a la fabricación aditiva. Los archivos iniciales de código máquina de una tecnología y la otra son sustancialmente diferentes.



Para la fabricación sustractiva existen menos pasos y parámetros configurables. En este sentido, la generación de los ficheros de código máquina de las máquinas de fabricación aditiva es una tarea que requiere un mayor esfuerzo tanto desde el punto de vista técnico como en tiempo.

Entre estos procesos de fabricación existen diferencias significativas:

1. La fabricación aditiva presenta ventajas económicas respecto a la fabricación sustractiva principalmente para series muy cortas. La relación histórica entre volumen de producción y coste no se cumple en la fabricación aditiva. Con la fabricación aditiva, la producción de piezas a medida y en tiradas de bajo volumen se convierte en una opción rentable y viable. [Marín, 2019]
2. La fabricación aditiva facilita la posibilidad de aligerar las piezas, bien con canales interiores o bien por optimización topológica de los diseños. En este sentido, esta característica es tan determinante en campos como la aeronáutica y la medicina, que el ahorro de peso es mucho más importante que una diferencia de coste. [Marín, 2019]
3. La complejidad geométrica a conseguir es un reto que los métodos convencionales de fabricación no han resuelto más que con aproximaciones, ensamblajes o por medio de procesos de muy alto coste, y que para la fabricación aditiva es muy poco relevante. [Hopkinson., 2006]
4. La fabricación aditiva reemplaza complejos flujos de trabajo característicos de los métodos de fabricación tradicional, generando así ahorros sustanciales, debido a que es un proceso de fabricación con alta presencia tecnológica automatizada. [Hopkinson., 2006]
5. Además, la mayoría de los equipos de fabricación aditiva están optimizados para facilitar su uso. Por el contrario, el mantenimiento regular o el cambio de materiales en los equipos y máquinas industriales puede implicar tareas que requieren mucho tiempo, sin mencionar las implicaciones de los procedimientos necesarios en el ámbito de la prevención de riesgos laborales. [Hopkinson., 2006]
6. La fabricación aditiva reduce los tiempos de fabricación, por un lado, al no ser necesario la utilización previa de moldes y, por otro lado, al emplear menor cantidad de materia prima. [Marín, 2019]



Antes de cambiar de apartado, voy a centrarme en esta última ventaja de la fabricación aditiva sobre otros procesos de fabricación. Es decir, el ahorro de tiempo en beneficio de una reducción en la demora de la disponibilidad de los repuestos para la Armada. De esta manera podré dar respuesta al primer objetivo planteado en el capítulo 4.

Para responder a esta pregunta u objetivo, hay que tener claras dos ideas:

- La necesidad de la Armada es disponer de todas las voces de repuestos necesarios, es decir, el mayor alcance posible de su lista de repuestos.
- Disponer de esta necesidad en el menor tiempo posible, es decir, minimizando la demora.

Para determinar en qué medida influye la fabricación aditiva en la disponibilidad de los repuestos, elaboraré una función que se plasmará sobre un gráfico.

Esta función la denominaré función de disponibilidad ( $f$ ) y vendrá definida por dos factores variables, que son: la demora (como variable dependiente,  $D$ ) y el alcance de las voces de repuestos (como variable independiente,  $A$ ).

La función de disponibilidad se medirá en términos de tiempo, y expresará la demora entendida como el tiempo transcurrido desde que un peticionario solicita o hace la petición de un repuesto hasta que se produce la recepción de éste.

Dicha función también estará influenciada por otros factores que consideraré constantes, es decir, en condiciones “*ceteris paribus*”. Estas constantes son las ya comentadas a lo largo del TFM, es decir, el presupuesto disponible ( $\bar{p}$ ) y las restricciones impuestas por la normativa contable ( $\bar{c}$ ), entre otros factores.

La función de disponibilidad también vendrá dada por otro factor constante, el Nivel de Inventario ( $\bar{NI}$ ), el cual refleja para un momento dado la cantidad de repuestos existentes que se encuentran disponibles en los pañoles del Primer Escalón de Aprovisionamiento y en los almacenes del Segundo Escalón de Aprovisionamiento. Para este nivel, la demora es nula al entender que se encuentra a disposición del peticionario.

Además, existen otros factores ( $\bar{\beta}$ ), que consideraré constantes para un determinado momento, que podrían influir la función de disponibilidad. Entre estos factores,

podríamos incluir el medio de transporte para el envío del repuesto, la distancia entre los puntos de ubicación del peticionario y el del repuesto, la complejidad del proceso de fabricación, entre otros.

Teniendo en cuenta todo ello, expongo en el siguiente gráfico la que podría ser una función de disponibilidad.

Gráfico 1-Función de disponibilidad.

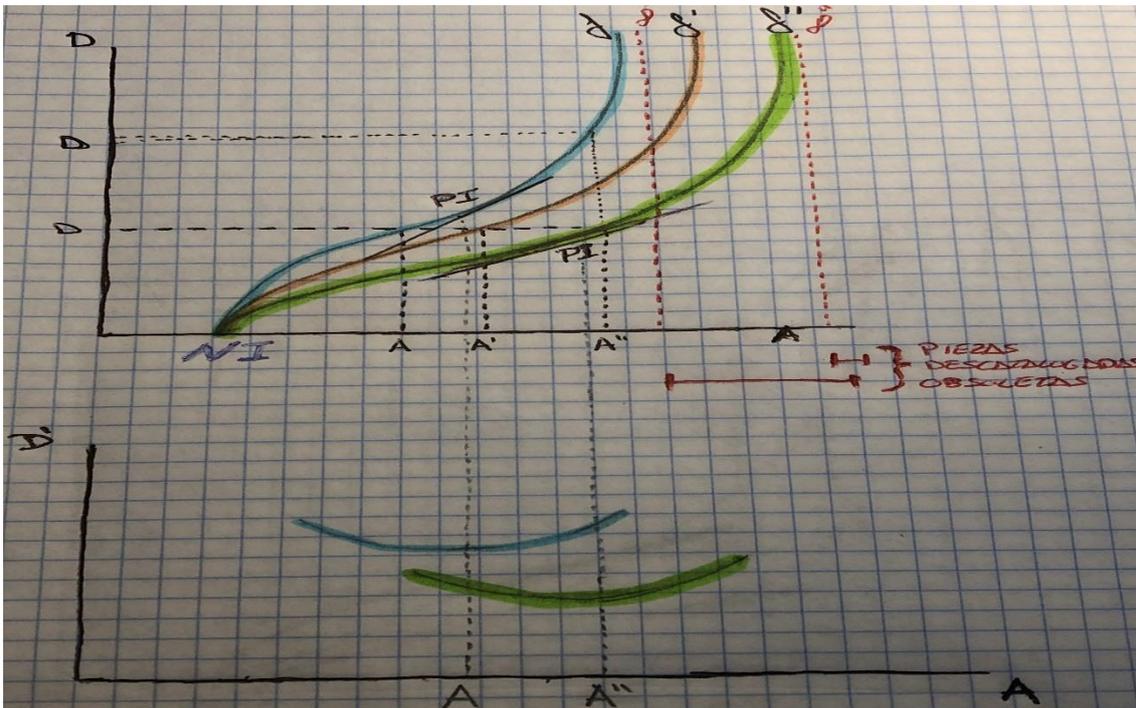


Gráfico de elaboración propia.

Lo que viene a decir esta función es que, dadas unas restricciones de la normativa contractual, un presupuesto disponible y un nivel de inventario, en un momento concreto, la petición de una voz adicional de repuesto implicará un incremento en la demora hasta la recepción del mismo.

La función de disponibilidad es tal que la demora ( $D$ ) tiene una relación directa o positiva con el alcance de las voces ( $A$ ), es decir, que la  $\frac{dD}{dA} > 0$ . Esto viene a decir que para disponer de una voz más del listado de repuestos será necesario incurrir en más tiempo, es decir, la demora se incrementará.



Por otra parte, la relación de la función de disponibilidad con los factores constantes es tal que  $\frac{dD}{d\bar{p}} < 0$  y  $\frac{dD}{d\bar{c}} > 0$ , es decir, indirecta y directa, respectivamente. De manera que, un incremento del presupuesto o una relajación de las restricciones contractuales, me permitiría disponer de una voz de repuesto más incurriendo en menor demora. Esto último se traduciría en una rotación hacia el eje de abscisas de la función de disponibilidad, pasando de  $(f)$  a  $(f')$ .

Por su parte,  $(\bar{\beta})$  influirá en un sentido u otro dependiente del significado del factor concreto de que se trate.

Llegado este punto, es el momento de implantar la tecnología de fabricación aditiva  $(\overline{tfa})$  en la cadena de suministros de la Armada, de manera que la función de disponibilidad tendrá un nuevo factor que consideraré constante para un momento concreto.

De entre todas las ventajas que se han visto de la fabricación aditiva, la reducción de los tiempos logísticos es una de las más importantes. Esto significa que la  $\frac{dD}{dtfa} < 0$ , es decir, relación inversa, por lo que se produce una rotación de  $(f)$  a  $(f'')$ .

De esta manera se puede observar el impacto de aplicar la tecnología de fabricación aditiva a la cadena de suministro de la Armada. Esta constante se mide como volumen de inversión en esta tecnología, de manera que a mayor inversión menor es la demora en la recepción del repuesto.

Dicho de otro modo, la implantación de la tecnología de fabricación aditiva permitiría disponer de repuestos en menor tiempo, siempre y cuando fuesen repuestos susceptibles de fabricarse aditivamente.

A continuación analizaré la forma que tiene la función de disponibilidad. En un principio, la pendiente de la función sería decreciente, justificado por las posibles economías que se dieran en el factor  $(\bar{\beta})$ . Pero llegaría un momento, punto de inflexión, en el que surgen ciertas tensiones que disipan esas economías del factor  $(\bar{\beta})$  y hacen que la pendiente de la función sea creciente.

La pendiente de la función viene dada por la  $\frac{dD}{dA}$ . A lo largo de la función, la pendiente siempre es positiva (y en algún momento podía ser nula), pero hasta el punto de inflexión



es decreciente y a partir del punto de inflexión es creciente. Esto significa que, hasta el punto de inflexión, solicitar una voz adicional de repuesto implica un incremento menor de demora, pero a partir del punto de inflexión, solicitar una voz adicional de repuesto implica un incremento mayor de la demora.

Esto es el concepto de “tiempo marginal” y se representa mediante su curva de “tiempo marginal”. Si comparamos las funciones ( $f$ ) a ( $f''$ ), observamos que implantar la tecnología de fabricación aditiva en la cadena de suministro tiene como ventaja no solo la reducción de la demora, sino además que se reduce la demora marginal al solicitar una voz adicional de repuesto.

A su vez, se puede observar como el punto de inflexión, momento a partir del cual aparecen las tensiones que modifican la pendiente de la función, se retrasa para un volumen de voces más alto.

Otro aspecto a señalar sobre la función es que ésta tiende a infinito. Se justifica porque, como se ha comentado en algún momento, hay repuestos que ya no existen en el mercado y, por tanto, no hay disponibilidad de ellos y la demora se hace indeterminada, infinito.

Sobre este aspecto, la característica de la fabricación aditiva es que nos permite disponer de estos repuestos descatalogados y obsoletos, de manera que se reduce el número de voces que se consideran indisponibles.

A pesar de las ventajas de la fabricación aditiva, no hay que pensar que la fabricación sustractiva sea completamente reemplazada. Aunque hay diferencias importantes, la fabricación sustractiva y la aditiva no son mutuamente excluyentes.

De hecho, a menudo se usan la una junto a la otra y en diferentes momentos del desarrollo del producto y de la fabricación, lo que se conoce como fabricación híbrida. De esta manera, los productos iniciales se fabrican de forma aditiva pero la fabricación tradicional se hace cargo una vez que los tamaños de los lotes aumentan hasta cierto punto.

Esto continúa mientras el producto esté en alta demanda, pero en lugar de crear grandes cantidades de exceso de inventario, las empresas vuelven a fabricar aditivamente para satisfacer la demanda cuando se desacelera.



Este proceso de fabricación híbrida permite a los diseñadores de productos y fabricantes combinar la versatilidad y los tiempos rápidos de la fabricación aditiva con la resistencia de las piezas producidas mediante la fabricación sustractiva.

#### **6.4. EL PROCESO DE FABRICACIÓN ADITIVA: LAS FASES.**

La fabricación aditiva es un proceso que se compone de varias fases, que en definitiva son: [Lago, 2020]

- Fase 1. Generación de un modelo 3D por ordenador.
- Fase 2. Simplificar el modelo 3D al formato válido de la máquina de fabricación.
- Fase 3. Troceado del modelo 3D por capas (rebanado).
- Fase 4. Fabricación capa a capa con la tecnología 3D seleccionada.
- Fase 5. Extracción de la pieza.
- Fase 6. Acabado final.

Desde mi punto de vista personal, de estas seis fases podemos diferenciar una fase genérica de trabajo virtual comprendida por las tres primeras y otra fase genérica de trabajo físico comprendida por las tres últimas.

Antes de entrar de lleno en cada una de las fases es importante comentar que el uso y manejo de toda la tecnología, equipos, piezas, componentes y materias primas que engloban los procesos de fabricación aditiva, requieren de tener unos conocimientos académicos específicos y una habilidad reforzada con la experiencia.

En este sentido<sup>7</sup>, los técnicos de fabricación aditiva son profesionales encargados de dar forma física y desarrollar un proyecto de diseño, por lo cual se requiere contar con una formación especializada en diseño optimizado y fabricación aditiva.

En el ámbito académico, sobre formación en procesos de fabricación aditiva encontramos diversos cursos que van desde un curso básico hasta un máster, pasando por cursos de especialista, por lo que el rango de precios se sitúa entre los 300 y los 5.000 euros.

---

<sup>7</sup> Fuente: [www.lainformacion.com/management/](http://www.lainformacion.com/management/)



El profesional en fabricación aditiva tiene categoría<sup>8</sup> de técnico superior, aspecto a tener cuenta para determinar el salario de este profesional. Si bien, el sueldo dependerá en gran parte de la titulación, la experiencia laboral, el tamaño de la empresa y el sector<sup>9</sup>.

La experiencia laboral en el ámbito de la fabricación aditiva es uno de los principales factores que explican las diferencias salariales. En el caso de un técnico principiante el sueldo se mueve en una horquilla de entre los 23.541 y los 27.000 euros anuales, mientras que con experiencia la horquilla se sitúa entre los 31.695 y los 55.000 euros anuales.

El sector de la empresa es otro factor determinante a la hora de cobrar un sueldo, así como el tamaño de la empresa. Las empresas punteras pueden pagar mejores salarios a sus trabajadores, salarios que oscilan sobre los 50.000 euros anuales.

Por otra parte, también se requerirán de trabajadores con categoría de operario de fábrica o producción para labores de movimiento de piezas y materiales, sustitución de carretes, limpieza de desechos y otras labores similares, cuya rango salarial se sitúa entre los 16.500 y los 20.699 euros anuales.

#### 6.4.1. FASE GENÉRICA DE TRABAJO VIRTUAL.

El punto de partida de un proceso de fabricación aditiva es la creación por ordenador de un modelo digital en el que se represente la pieza a fabricar en tres dimensiones.

Para realizar el modelo tridimensional existen en el mercado una multitud de soluciones, comúnmente llamadas software CAD (Computer Aided Design) que serán más o menos complejas en función de las necesidades de diseño e integración con otros componentes que queramos fabricar. [Kückelhaus, 2016]

Con estos programas podemos generar un diseño, si bien, existen otros modos de generar modelos tridimensionales, por ejemplo: [Pauly et al., 2005]

- Fotogrametría. Técnica que consiste en realizar una serie de fotografías de un objeto desde multitud de ángulos. A continuación, un software se encarga de

<sup>8</sup> Fuente: <https://www.todofp.es/que-estudiar/loe/fabricacion-mecanica/ce-fabricacion-aditiva.html>

<sup>9</sup> <https://mintforpeople.com/noticias/sueldo-tecnico-impresion-3d/>



encontrar los puntos comunes entre las distintas fotografías hasta crear una malla representando el objeto tridimensional.

- Scanner láser / óptico. Equipo que emite una luz láser, midiendo el ángulo en que se devuelve la luz, al mismo tiempo que rota el objeto (o el escáner alrededor de éste) de manera que determina la forma del objeto original.
- Medición mecánica de coordenadas (MMC). Instrumento de medición directa que emplea un puntero físico con el que se va tocando al objeto al mismo tiempo que se envían coordenadas. Se miden así completamente todas las dimensiones del objeto, siendo un procedimiento muy preciso, pero también muy lento.
- Medición manual. Última opción si no hay otra alternativa, que consistiría en medir a mano y con regla las dimensiones más relevantes del objeto para continuar su construcción con una herramienta de diseño para obtener un modelo 3D.

Una vez que ya tenemos creado el modelo tridimensional, debemos transformar el formato CAD en otro formato válido para el equipo o máquina de impresión. Con carácter general, el formato más utilizado para este el archivo es el “.stl” (Standard Triangulation Lenguaje).

La característica o peculiaridad de este formato es que transforma el modelo tridimensional en una malla de triángulos adaptada a la superficie del objeto. Cuantos más triángulos generemos en este paso más precisión obtendremos en la pieza, pero más grande será el archivo con el que tendremos que trabajar.

La calidad del fichero “.stl” obtenido depende en gran medida de la calidad del trabajo CAD realizado (trimados, cierres, precisiones, entre otros factores), de la complejidad del diseño y del propio software empleado.

Por ello es imprescindible un paso siguiente de revisión y corrección de la malla, de manera que se asegure que ésta representa una única superficie y que es topológicamente correcta. Se trata de una tarea compleja que influye sobre la calidad de la pieza fabricada, tanto en su morfología como en sus propiedades mecánicas.

No obstante, en la última década se ha desarrollado y popularizado un nuevo formato específico para procesos de fabricación aditiva, el “.amf” (Additive Manufacturing File), que permite definiciones de objetos mucho más precisas que el formato “.stl”.



Este formato, además de transformar el objeto en una malla de triángulos, permite aproximarse al objeto mediante triángulos curvos a través de las tangentes a los vértices de los mismos. Esta aproximación mejora sustancialmente la precisión, pero genera grandes volúmenes de información por lo que los archivos pueden llegar a ser muy pesados. [Wong, 2012]

Es importante señalar que el uso de triángulos curvados sólo es más eficiente que los triángulos planos originales de “.stl” en aquellas zonas de la pieza donde la geometría sea curva o compleja.

Una vez que tenemos un objeto modelado y mallado, con carácter general para todas las tecnologías de fabricación aditiva es necesario la construcción de una estructura de soporte para la objeto, ya que éste no puede solidificarse en el aire, o para una parte de él (como por ejemplo las zonas huecas) en la fase de impresión.

Al igual que el objeto, el soporte deberá modelarse y mallarse, y ambos ficheros (pieza y soporte) deberán manejarse juntos.

Una vez que obtenemos el modelo en “.stl” o “.amf” es necesario laminar o rebanar el objeto. Para ello será necesario utilizar un software laminador cuya función es la de dividir el modelo tridimensional a imprimir en capas superpuestas muy finas.

#### 6.4.2. FASE GENÉRICA DE TRABAJO FÍSICO.

En esta fase es crucial la tecnología de fabricación aditiva a utilizar. Dicha decisión dependerá de los siguientes parámetros:

1. El tipo de material (polímero, metálico, cerámico, compuestos, papel...).
2. El modo de adición del material (pre-depositado, depositado, proyectado).
3. La forma del material que se aporta (polvo, hilo, láminas...).
4. La fuente de energía que se emplea (resistencias, arco, laser, haz de electrones).
5. La precisión y la velocidad necesarias para producir el objeto deseado.



De la combinación de estos parámetros resultan diferentes tecnologías. Las más utilizadas son las siguientes<sup>10</sup>: [Santos & González, 2018]

- Modelado por deposición fundida (FDM, Fuel Deposition Modeling): se trata de una de las técnicas más sencillas, pues consta de tres elementos básicos: una placa de impresión, una bobina de filamento y una cabeza de extrusión. Consiste en calentar un filamento a su temperatura de transición vítrea y depositarlo en la placa de impresión mediante el extrusor. Con esta tecnología se pueden utilizar materiales termoplásticos, metales con bajo punto de fusión (eutéricos) y pastas comestibles. Se trata de una tecnología con la que se obtienen piezas poco precisas y funcionales pero permite realizar diseños conceptuales, prototipos y modelos a escala de forma ágil y barata.
- Fusión por haz de electrones (EBM, Electron Beam Melting): se trata de una técnica en la que partiendo de una fina capa de polvo precalentado funde selectivamente el material mediante un haz de electrones de aproximadamente tres mil vatios. Todo el proceso se realiza en vacío y permite la reutilización de los materiales no fundidos de una forma sencilla. Se trata de una técnica que permite realizar objetos metálicos a gran velocidad. La mayor limitación de esta tecnología es que solo permite fabricar con materiales que conduzcan bien la electricidad.
- Proyección de aglutinante (DSPC, Blinder Jetting): se trata de una técnica en la que se añade una capa de aglutinante de forma selectiva a una fina capa de polvo. Tras este proceso la pieza tiene que pasar por un tratamiento térmico de curado. Este proceso permite trabajar una gran variedad de materiales, desde plásticos a metales pasando por arena y cerámica.
- Fusión selectiva por láser (SLM, Selective Laser Melting): se trata de una tecnología de fusión de polvo. Partiendo de una fina capa de polvo precalentado se funde selectivamente mediante una haz laser. Los materiales que se trabajan son principalmente aleaciones metálicas. El mayor problema que presenta esta

---

<sup>10</sup> No se pretende hacer un análisis detallado de las características de cada una de las tecnologías, ya que existe numerosa literatura técnica que profundiza en las particularidades de cada una de ellas. Si bien, se considera necesario presentarlas de manera somera para entender las propiedades de cada una.



tecnología es que requiere un complejo diseño de estructuras de soporte que más allá de soportar las piezas tiene que disipar el calor de forma eficaz para no generar tensiones internas.

- Sinterizado selectivo por láser (SLS, Selective Laser Sintering): se parte de una capa de polvo precalentado que se fusiona de forma selectiva mediante un láser. Esta tecnología permite fabricar sin soportes, ya que el material sinterizado se encuentra siempre rodeado del polvo sin sinterizar que hace la función de soporte. Aunque con esta tecnología se puede trabajar una amplia gama de materiales, los más usados son los polímeros termoplásticos.
- Sinterizado directo con láser de metal (DMLS, Direct Metal Laser Sintering): un proceso análogo al SLS pero en lugar de sinterizar polímeros termoplásticos el material que se sinteriza es metal.
- Sinterizado selectivo por calor (SHS, Selective Heat Sintering): se trata de un proceso de fabricación parecido al SLS y al DMLS, pero en lugar de utilizar un láser el material se sinteriza mediante un cabezal térmico. El material con el que se trabaja en esta tecnología son los termoplásticos.
- Estereolitografía (SLA, Stereolithography): se trata de una técnica que aprovecha las propiedades fotopolímeras de algunas resinas, por lo que el material con el que se trabaja es una resina en estado líquido. En este proceso tendremos una capa de resina líquida sobre la que haremos incidir un haz de luz ultravioleta que curará únicamente las zonas seleccionadas. Como resulta evidente este sistema solo se puede utilizar con materiales que se endurezcan por polimerización.
- PolyJet: se trata de una tecnología que, al igual que la SLA, basa su proceso en la fotopolimeración. Es un proceso que aporta el material en forma de micro-gotas mediante cabezas impresoras para seguidamente proyectar sobre éste una luz ultravioleta. Esta tecnología permite la combinación de materiales y colores.
- Laminado de capas (LOM, Laminated Objects Manufacturing): tecnología que no necesita requisitos especiales para su funcionamiento. Se trata de ir colocando finas láminas de material que se cortan con una fresadora o con un láser. Se puede trabajar con cualquier material que pueda convertirse en láminas. Permite fabricar



piezas de gran tamaño pero presenta problemas a la hora de fabricar geometrías complejas. De gran utilidad para crear modelos a escala y prototipos conceptuales.

Los equipos profesionales de impresión aditiva tienen de media una vida útil de 20.000 horas de impresión. Están compuestos por una serie de componentes. Cuando estos componentes se averían o agotan su vida útil, son objeto de reparación o sustitución.

Los principales componentes<sup>11</sup> de una máquina de impresión aditiva son:

1. La plataforma o cama de construcción, fija o móvil: donde se imprime la pieza.
2. El extrusor o boquilla: pieza a través de la cual se deposita el material de construcción, ya sea filamento o resina líquida.
3. El cabezal láser: en caso de impresión aditiva con láser.
4. La fuente de alimentación: en caso de impresión con filamento. Es el encargado de suministrar el material a la boquilla.
5. El sistema de control: es el cerebro de la máquina, coordina todos los movimientos y procesos necesarios para imprimir la pieza.
6. Los sensores: para monitorear y controlar el proceso de impresión.
7. Otros componentes de menor valor: varillas, rodamientos, guías, correas y usillos.

Una vez finalizada la ejecución de la impresión 3D propiamente dicha, tendremos que extraer de la máquina la pieza impresa. Esto que parece no tener trascendencia alguna y que es tan sencillo como abrir una puerta y coger la pieza, en ocasiones será algo más complejo en función de la tecnología utilizada, pues habrá casos en los que haya que esperar al enfriamiento del material o al lavado o eliminación de material sobrante. En estos casos más complejos, existe un coste en tiempo y medios.

Y finalmente, la última fase es la de acabo o procesado, pues en la mayoría de los casos, el proceso de fabricación aditiva no termina con la impresión de la pieza, pues éstas resultan con ciertas imperfecciones a nivel estético que a veces incluso pueden limitar su funcionalidad.

Así, dependiendo de la tecnología empleada, en esta fase pueden aparecer trabajos adicionales como: lijado, lavado en agua o diferentes disolventes, eliminación de

---

<sup>11</sup> Fuente: [https://bluebeehive.eu/lesson/componentes-de-una-impresora-3d/?course\\_id=1436](https://bluebeehive.eu/lesson/componentes-de-una-impresora-3d/?course_id=1436)



soportes, secado, pintado, cromado, vaporizado, inyección de material adicional, dopaje para dar mayor resistencia, entre otros.

Estos trabajos adicionales, unos más superficiales y otros más complejos, podemos clasificarlos en:

- Trabajos mecánicos. Los objetivos son la eliminación de restos superficiales y el suavizado de la superficie. Estos trabajos pueden realizarse manualmente por personal con experiencia y destreza o a través de máquinas y dispositivos eléctricos. En lo que se refiere a los acabados a través de herramientas eléctricas podemos distinguir entre el fresado, el granallado o arenado y la vibración con abrasivos.
- Acabado químico. En este caso, consiste en introducir la pieza en un elemento químico o producto disolvente con el objetivo de suavizar líneas, dar brillo o mejorar la resistencia de la pieza.
- Acabado térmico. Este acabado tiene por finalidad corregir posibles defectos de desprendimiento de capas, rebabas de filamentos o roturas. Se realiza un calentamiento directo sobre la superficie del objeto o se aplica la fundición de material adicional al objeto.

Antes de pasar al siguiente apartado, conviene hacerse una idea de la información analizada este apartado 6.4.

Se ha hecho una explicación sobre la tecnología, equipos y software necesarios para llevar a cabo un proceso de fabricación aditiva. Además, se observa como este proceso se puede complicar más a medida que incrementan las necesidades en la calidad y propiedades de los materiales a utilizar, lo que redundará en un salto notable de la tecnología a emplear.

En definitiva, a mayor complejidad de la pieza a fabricar aditivamente, mayor será la complejidad en la tecnología a utilizar. Lógicamente, a mayor complejidad, mayor será el coste de inversión. Por tanto, plantear esta idea permite responder al segundo objetivo planteado en el capítulo 4. Para ello se mostrarán a continuación una serie de tablas que mostrarán el coste de invertir en cada equipo, software y tecnología necesarios y de posible utilidad en un proceso de fabricación aditiva.



Antes de nada, informar que los costes mostrados son aproximaciones o rangos de costes debido a la existencia de distintas marcas, modelos y funcionalidades, lo cual hace que el coste varíe. Además, el coste hace referencia a la inversión en el inmovilizado concreto, sin incluir posibles costes derivados del transporte, instalación o de mantenimiento.

En esta primera tabla se recoge el coste de inversión de los distintos softwares y equipos aplicables a la fase de trabajo virtual vistos en el apartado 6.4.1.

Tabla 1- Coste de inversión en equipos de medición y software.

Inmovilizado	Coste adquisición (€)	
Software CAD	10.000,00	14.000,00
Software "stl" o "amf"	4.000,00	9.000,00
Equipo de fotogrametría	10.000,00	23.000,00
Equipo scanner láser/óptico	10.500,00	19.000,00
Equipo MMC	10.500,00	19.000,00

Tabla de elaboración propia. Fuentes consultadas<sup>12</sup>.

En la siguiente tabla, se muestra el coste de inversión en distintas tecnologías aditivas empleadas en la fase de trabajo físico vistas en el apartado. 6.4.2.

Tabla 2- Coste de inversión en tecnología aditiva.

Tecnología Aditiva	Tamaño (mm)	Formato materia prima	PRECIO aproximado
Blinder Jetting	900 x 900 x 200	polvo cerámico	90.000,00 €
Blinder Jetting	100 x 100 x 50	polvo de arena	90.000,00 €
Blinder Jetting	350 x 220 x 200	polvo metálico	138.800,00 €
Blinder Jetting	160 x 65 x 65	polvo metálico	231.400,00 €
Blinder Jetting	203 x 180 x 69	polvo metálico	231.400,00 €
Blinder Jetting	430 x 320 x 200	polvo metálico	369.000,00 €
DED	250 x 250 x 250	polvo metálico	208.300,00 €
DED	250 x 250 x 250	alambre metálico	500.000,00 €
EBM	380 x 380 x 250	polvo metálico	500.000,00 €
FDM	300 x 220 x 180	filamento de polvo ligado	92.100,00 €
FDM	150 x 150 x 150	Filamento de plástico	10.000,00 €
LOM	380 x 284 x 380	Polvo de nylon	450.000,00 €
LOM	250 x 250 x 250	polvo cerámico	180.000,00 €
PolyJet	400 x 420 x 225	resina líquida	220.000,00 €
SLS	700 x 380 x 580	polvo plástico	500.000,00 €

Tabla de elaboración propia. Fuentes consultadas<sup>13</sup>.

<sup>12</sup> [www.all3dp.com](http://www.all3dp.com); [www.3dnatives.com](http://www.3dnatives.com); [www.geoinnova.org](http://www.geoinnova.org), ...

<sup>13</sup> [www.3dhubs.com](http://www.3dhubs.com), [www.sculpteo.com](http://www.sculpteo.com), [www.makexyz.com](http://www.makexyz.com), [www.all3dp.com](http://www.all3dp.com), ...



A continuación, en esta tabla se muestra el coste de inversión de los distintos equipos de acabado empleados en procesos de fabricación aditiva.

*Tabla 3- Coste inversión equipos de acabado.*

Inmovilizado	Coste adquisición (€)	
Horno de sinterización	9.000,00 €	90.000,00 €
Chorro de arena	13.500,00 €	50.000,00 €
Pulidora	4.800,00 €	18.000,00 €
Tumbling	9.000,00 €	26.000,00 €
Máquina de acabado CNC	48.000,00 €	180.000,00 €
Limpieza química	18.000,00 €	90.000,00 €
Recubrimiento	45.000,00 €	270.000,00 €

*Tabla de elaboración propia. Fuentes consultadas<sup>14</sup>.*

Como se ha comentado a lo largo del TFM, la fabricación aditiva en un proceso de producción en distintas fases, y dependiendo del tipo de repuesto y de la calidad del acabado, requerirá pasar por más o menos fases. A su vez, en cada fase se utilizan unos equipos y softwares distintos.

Por tanto, podemos entender que el coste de implantar esta tecnología dependerá de la amplitud de la cadena de fabricación y el número de líneas o cadenas de fabricación aditiva. En definitiva, el coste de adquirir esta tecnología dependerá de la complejidad de los repuestos a obtener y del número de líneas de fabricación aditiva que queramos adquirir.

Para visualizar esta idea al lector, a modo de ejemplo voy a suponer que una cadena de fabricación aditiva se compone como máximo de los siguientes elementos en el conjunto de todas sus fases:

- Equipo scanner óptico.
- Equipo de fotogrametría.
- Equipo de medición mecánica por coordenadas (MMC).
- Software “CAD” y “.stl”.
- Equipo de impresión en polímeros.

<sup>14</sup> [www.postprocess.com](http://www.postprocess.com), [www.amtpostpro.com](http://www.amtpostpro.com), [www.dyemansion.com](http://www.dyemansion.com),



- Equipo de impresión en metal.
- Equipo de impresión en resina.
- Equipo de acabado de CNC.
- Equipo de recubrimiento.
- Equipo de limpieza química.

También, para simplificar el problema, voy a suponer que en cada línea o cadena de fabricación sólo podrá haber como máximo una unidad de cada equipo.

Dicho esto, existen en torno a mil combinaciones posibles de cadenas de fabricación aditiva. A continuación se muestran algunas de ellas.

Tabla 4- Coste inversión tecnología de fabricación aditiva.

Línea de fabricación aditiva	Equipo scanner óptico	Equipo de fotogrametría	Equipo de medición mecánica por coordenadas	Software "CAD" y ".stl"	Equipo de impresión en polímeros	Equipo de impresión en metal	Equipo de impresión en resina	Equipo de acabado de CNC	Equipo de recubrimiento	Equipo de limpieza química	COSTE ADQUISICIÓN LÍNEA DE FABRICACIÓN ADITIVA
A	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	722.000,00 €
B	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	923.000,00 €
C	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1.325.000,00 €
D	1	0	0	1	1	1	0	1	1	1	1.582.000,00 €
E	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1.844.000,00 €

Tabla de elaboración propia. Datos extraídos de tablas 1,2 y 3.

Como puede observarse, a medida que la línea de fabricación se hace más compleja, el coste de inversión de ésta es mayor. Una línea de fabricación aditiva básica podría alcanzar los 720.000 € frente al 1.844.000 € de una línea más compleja.

En definitiva, mayor complejidad del repuesto a fabricar requerirá mayor complejidad de la línea de fabricación, lo cual implica un mayor coste en la inversión de esta tecnología.

Dicho todo esto, voy a representar en un gráfico la función de coste de inversión en la tecnología de fabricación aditiva.

Gráfico 2- Curva coste de inversión en tecnología.

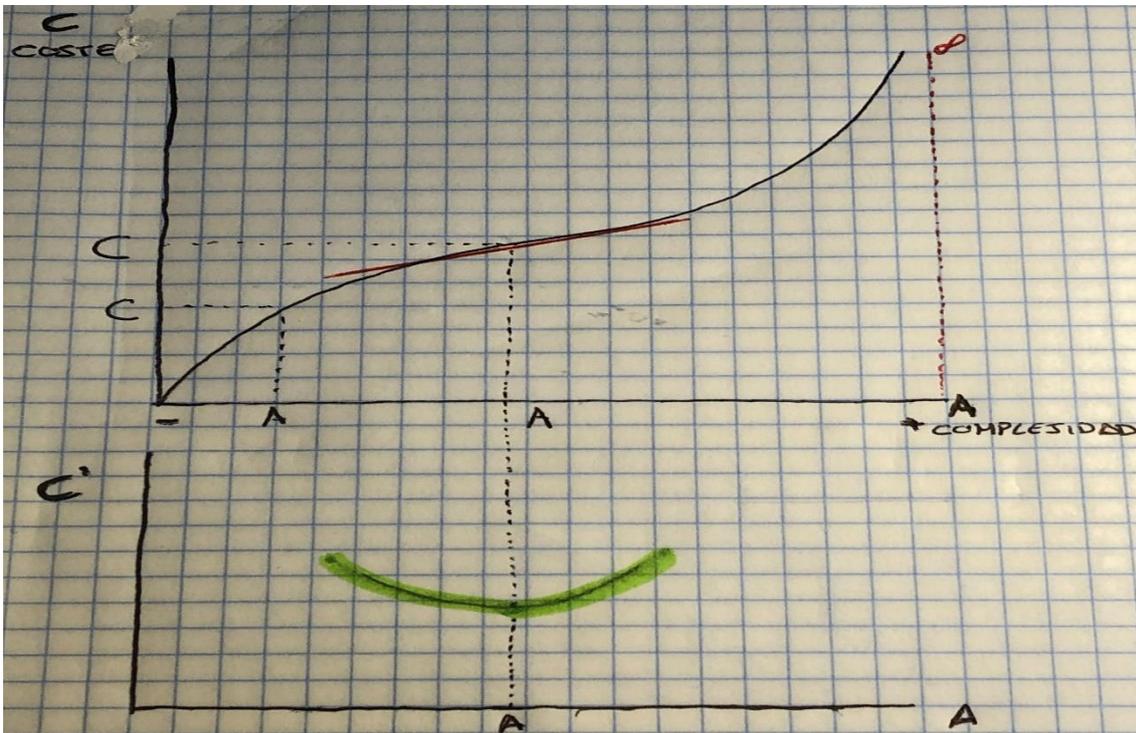


Gráfico de elaboración propia.

Esta podría ser una posible función de costes de inversión. Conviene comentar que en el eje abscisas se incluye sólo aquellos repuestos de la lista de repuestos que son susceptibles de fabricarse aditivamente. Es decir, no se incluyen aquellos repuestos que no se pueden fabricar aditivamente.

Asimismo, el eje de abscisas está ordenado de menor a mayor complejidad de las voces de repuestos.

La lectura del gráfico viene a decir que a medida que se requieren voces más complejas, el coste de inversión en la tecnología (no de la fabricación aditiva del repuesto) es mayor.

Esta función de coste de inversión puede presentar un punto de inflexión, que vendría justificado porque hay equipos que pueden trabajar con distintas materias primas, entre otros supuestos, lo cual hace que la pendiente de la función de costes sea decreciente hasta ese punto de inflexión.



Pero llega un momento en que las propias características y cualidades de las materias primas y de los repuestos a obtener, impliquen la necesidad de adquirir equipos distintos, lo cual supone un mayor coste que se representa con una pendiente de la función de costes creciente.

Esto último viene a decir que el coste marginal de inversión en tecnología para una voz adicional se incrementa de manera decreciente, pero a partir de cierto, punto de inflexión, la complejidad implica que ese coste se incrementa de manera creciente para una voz adicional.

De manera que, a partir de determinada complejidad de voces, es decir, a partir del mínimo de la curva de costes marginales, éstas podrían obtenerse de manera externalizada.

Dicho de otro modo, la tecnología de fabricación aditiva puede incorporarse a la cadena de suministro de la Armada bien adquiriéndola para instalarla en sus propias Unidades o Instalaciones, o bien puede adquirirla mediante un contrato de servicios con terceros, es decir, externalizar la fabricación aditiva de los repuestos. No obstante, ambas posibilidades son compatibles.

Como hemos visto, líneas muy complejas requieren de una gran inversión. La Armada, como cualquier otra Institución u Organismo Público, dispone de un presupuesto de recursos económicos limitados, mientras que las necesidades de la Armada son ilimitadas.

Por tanto, la Armada debe hacer un arduo ejercicio de gestión de económica y ello implica identificar y determinar qué tecnología de fabricación aditiva adquirir. El momento de decidir qué voces se fabrican aditivamente de manera directa o de manera indirecta (externalización) podría venir definido por el mínimo de la curva de costes marginales de inversión en la tecnología.

También hay que tener en cuenta que una tecnología más compleja requiere de unos mantenimientos más complejos, mantenimientos que resultarán más costosos. Y en un escenario de restricciones presupuestarias, a la Armada no le conviene tener que hacerse cargo de mantenimientos costosos que pueden poner en peligro la sostenibilidad y operativas de los sistemas y equipos por falta de recursos suficientes.

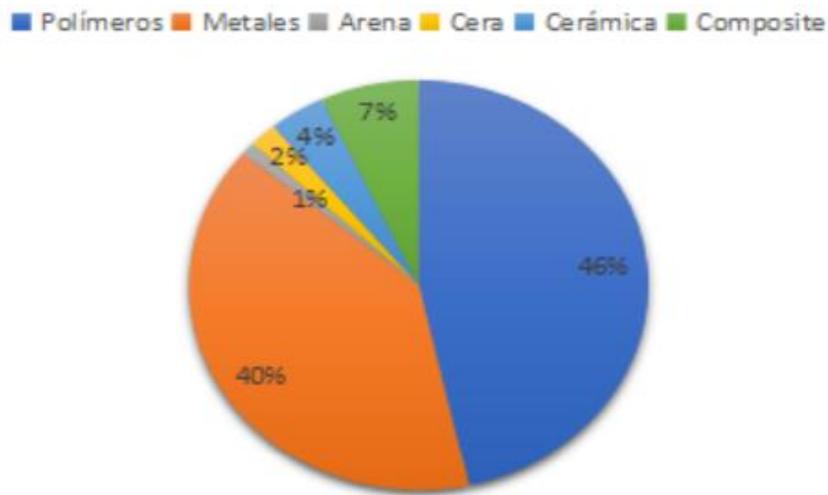
## 6.5. MATERIALES EMPLEADOS EN LA FABRICACIÓN ADITIVA.

Como se comentó en el apartado anterior, la selección del material es crucial para determinar la tecnología a elegir. Los materiales susceptibles de uso en la fabricación aditiva son variados y, además, dentro de un mismo material podemos encontrar varios subtipos.

La selección del material dependerá del uso que se le dará al objeto impreso, así como de las características específicas de cada material en términos de resistencia, durabilidad, textura...

En la siguiente imagen pueden verse los distintos tipos y subtipos de materiales susceptibles de uso en la fabricación aditiva. Podemos observar que los polímeros y los metales son los que más variedades abarcan.

*Imagen 3- Tipos de material en fabricación aditiva.*



*Fuente consultada: [Balbás et al., 2018]*

A continuación me centraré en los de mayor variedad.

### 6.5.1. POLÍMEROS.

Un polímero es un compuesto químico cuyas moléculas están formadas por la unión de otras moléculas más pequeñas llamadas monómeros, que se enlazan entre sí eslabones de una cadena. Estas cadenas, que en ocasiones presentan también ramificaciones o

entrecruzamientos, pueden llegar a alcanzar un gran tamaño, razón por la cual son también conocidos con el nombre de macromoléculas. [Beltrán y Marcilla, 2012]

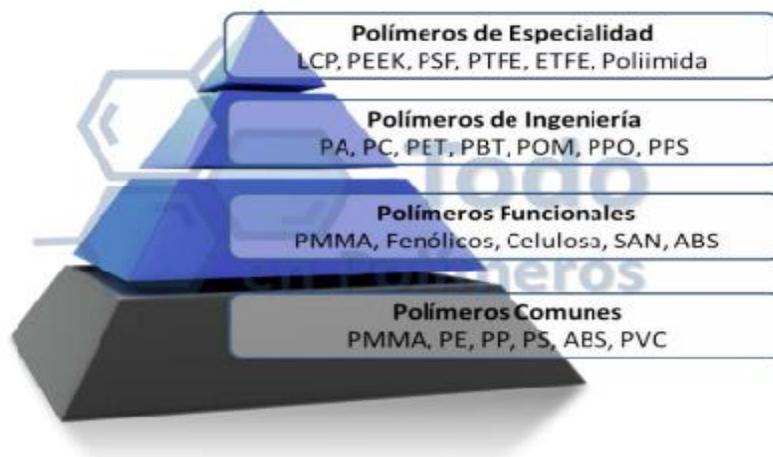
En general, los polímeros tienen una excelente resistencia mecánica debido a que las grandes cadenas poliméricas se atraen. La fuerza de dicha atracción dependerá de la composición química del polímero. Ver ANEXO I.

Las tecnologías aditivas con mayor presencia en la industria son las que consumen materiales poliméricos y, dentro de éstas, la que es más familiar y accesible para los consumidores es la extrusión de filamento termoplástico.

Los materiales plásticos de las tecnologías de deposición fundida se presentan en formato de filamentos en una bobina que será colocada en la máquina de impresión 3D. Existen muchísimas variedades de plásticos y de distintas características para cada proyecto.

En la siguiente imagen se muestra la clasificación de los polímeros empleados.

*Imagen 4- Clasificación polímeros según su utilidad.*



*Fuente consultada: [www.inyeccion-et23.blogspot.com](http://www.inyeccion-et23.blogspot.com)*

Esta clasificación se deriva de las propiedades físicas que ofrecen los diferentes polímeros.

Por lo general, los polímeros de alta especialidad son los de mayor resistencia mecánica, térmica, química o combinación de propiedades y son sinterizados o formulados de manera muy única como polímeros de cristal líquido.



Los polímeros de ingeniería también tienen excelentes propiedades físicas pero son un poco más comunes.

Los polímeros funcionales son aquellos que aunque no tienen altas propiedades físicas ofrecen algún beneficio sobre los polímeros comunes, como por ejemplo, una muy buena resistencia al impacto.

Finalmente los polímeros comunes o "commodity" son los más sencillos y con propiedades físicas simples.

Por otra parte, en la siguiente imagen se muestra una clasificación de plásticos empleados en la fabricación aditiva, con estabilidad térmica y coste. Como puede observarse, el coste está directamente relacionado con el grado de estabilidad térmica.

A continuación se muestra una tabla con las propiedades de algunos de los polímeros más utilizados y principales características de cada uno de ellos.

Tabla 5- Propiedades de los polímeros.

PROPIEDADES	ABS	PA	PC	PLA	PET	Material flexible
USO	Piezas de Lego, coches, electrodomésticos	Contenedores de líquidos. Piezas móviles. Bujes, bisagras, engranajes...	Componentes eléctricos, mecánicos y piezas de automóviles.		Botellas de plástico desechables. Envases de alimentos.	
Dureza	Alta	Alta	Muy alta	Frágil	Alta	Media
Flexibilidad	Media	Alta	Media	Baja	Media	Muy alta
Durabilidad	Alta	Alta	Muy alta	Media	Alta	Muy alta
Dificultad de uso	Media	Media	Media	Media	Baja	Media-baja
Temperatura de impresión	De 210 a 250	De 240 a 260	De 270 a 310	De 190 a 230	De 220 a 250	De 210 a 230
Temperatura de la cama de impresión	De 80 a 110	De 70 a 100	De 90 a 110	No necesaria	De 50 a 75	De 30 a 60
Contracción	Considerable	Considerable	Considerable	Considerable	Mínima	Mínima
Soluble en	Ésteres, cetonas y acetonas.	No	No			
Observaciones	Encoge en contacto con el aire. Requiere impresión cerrada.	Absorbe humedad. Requiere posproceso de secado.	Aborbe humedad. Requiere lugar fresco y seco.	Biodegradable. No mecanizable.		Permite objetos deformables. Se adapta al aire libre.

Tabla de elaboración propia. Fuente consultada: [Puiggali, 2009]



La idea de mostrar esta tabla es hacer ver al lector la complejidad de las propiedades intrínsecas y extrínsecas de estos materiales no solo en su tratamiento o manejo sino también en su estado natural. [Puiggali, 2009]

#### 6.5.2. MATERIALES CERÁMICOS.

Los materiales cerámicos son sólidos inorgánicos fabricados mediante tratamientos térmicos. Se caracterizan por su alta resistencia ya que soportan temperaturas extremas y algunos son inmunes a la fricción, a rayarse y a otras tensiones mecánicas que desgastan el metal y el plástico. [Mari, 2001]

Dichas propiedades implican que por fabricación convencional no resulte fácil hacer formas complejas; sin embargo, el ingeniero químico Zak Eckel y un grupo de químicos dirigidos por Tobias Schaedler, del laboratorio HRL en California, han resuelto este problema desarrollando materiales cerámicos que pueden usarse en impresoras 3D.

El método que han desarrollado los investigadores consiste en una resina que puede utilizarse en una máquina de fabricación aditiva, compuesta de un polímero que contiene en su estructura silicio y otros elementos propios de los materiales cerámicos. El resultado es una pieza diez veces más resistente a las fuerzas mecánicas y que soporta temperaturas de hasta 1700°. [Palou, 2016]

Estos materiales son muy útiles para fabricar componentes de turbinas.

#### 6.5.3. MATERIALES HÍBRIDOS.

Se tratan de compuestos que tiene como base PLA e incluyen polvos que dan color o acabado. El ratio de composición suele ser un 70% de PLA y un 30% por el material híbrido. [Puente, 2013]

Se pueden encontrar en el mercado filamentos a base de madera que contienen polvos de bambú, corcho, madera, etc. La presencia de estos materiales dentro del filamento hace que el resultado final sean piezas con una textura más orgánica.

Además, existen filamentos híbridos que mezclan materiales rocosos, como el cemento, los ladrillos o la arena.



#### 6.5.4. COMPOSITES.

Los materiales compuestos, también conocidos por composites, son el resultado de combinar materiales de distinta naturaleza de la que se obtiene un resultado imposible de conseguir por otros procedimientos y se caracterizan por su ligereza y su altísima resistencia mecánica. Generalmente combina un material plástico con fibras continuas de alta resistencia. [Gondra et al., 2022]

Presentan dos elementos principales: fibra y matriz. Combinando adecuadamente diferentes fibras y matrices obtenemos unos materiales con mejores propiedades que las partes que los componen por separado. La matriz puede ser polimérica, metálica, cerámica, entre otros, utilizándose como refuerzo fibras de vidrio, carbono, boro, cerámicas, metálicas o fibras naturales como cáñamo, lino, maíz...

#### 6.5.5. METALES.

Los metales son uno de los elementos más atractivos y de mayor interés en la fabricación por sus propiedades. Aunque depende de cada metal, con carácter general son elementos maleables, dúctiles, tenaces y con gran resistencia mecánica.

En estos momentos la fabricación aditiva en metal se encuentra en pleno desarrollo, por lo que las tecnologías existentes en el mercado tienen un coste muy elevado frente a unas productividades bajas. Con carácter general, en estos momentos se pueden observar las siguientes ventajas e inconvenientes de la fabricación aditiva con materiales metálicos:

Tabla 6- Beneficios e inconvenientes del uso de metales en fabricación aditiva.

<b>VENTAJAS</b>	<b>INCONVENIENTES</b>
<i>Fiable, permite obtener resultados con calidad constante.</i>	<i>Complicada configuración correcta de diseño de la pieza.</i>
<i>Permite fabricar piezas resistentes.</i>	<i>No apto para producción en masa.</i>
<i>Permite aligerar muchas soluciones.</i>	<i>Tiempo de producción elevado.</i>
<i>Permite obtener estructuras únicas y complejas, imposibles de lograr mediante cualquier otra tecnología.</i>	<i>Las dimensiones de los objetos que se pueden fabricar están realmente restringidos.</i>
<i>Mínimo desperdicio de material.</i>	<i>Coste tecnología elevado.</i>

Tabla de elaboración propia. Fuente consultada: [www.s3advanced.com](http://www.s3advanced.com)



El metal, como materia prima para la fabricación aditiva, puede emplearse en formato líquido o en formato sólido y, este último, puede emplearse a su vez en formato polvo o en formato lámina de metal. [Balbás et al., 2018]

Cuando se utiliza metal líquido, la tinta está formada por partículas de polvo de tamaño sub-micrométrico y de un agente líquido. A medida que la tinta se deposita el agente líquido se evapora y las partículas metálicas se fusionan gracias al elemento calefactor que pasa sobre ellas.

Cuando se utiliza una lámina sólida de metal, ésta es cortada por un láser y pegada mediante adhesivos sensibles al calor a las demás láminas creando formas tridimensionales.

El metal en base polvo es la materia prima más utilizada por la mayoría de las tecnologías de fabricación aditiva, bien empleando una cama de polvo o bien inyectando directamente sobre la pieza.

En la siguiente tabla se muestran los metales con base en polvo más utilizados.

Tabla 7- Lista de metales más empleados en fabricación aditiva.

<b>Denominación</b>	<b>Material</b>
Aleaciones de Aluminio	AISI10Mg
	AISI7Mg
	AISI12
Aleaciones de Cobalto	ASTM F75
	CoCrWC
Aceros herramienta	AISI 420
	Marage 300
	H13
	AISI D2
	AISI A2
Aleaciones de Níquel	AISI S7
	Inconel 718
	Inconel 625
	Inconel 713
	Inconel 738
Hastelloy X	Hastelloy X
Aceros Inoxidables	SS 304
	SS 316 L
	SS 410
	15-5 PH
Aleaciones de Titanio	Titanium Grade 2
	Ti6Al4V
	Ti6Al4V ELI
	TiAl6Nb7
Aleaciones de metales preciosos	Oro de joyería
	Plata
Aleaciones de Cobre	CC 480 K

Fuente consultada: [Balbás et al., 2018]



Es importante señalar que la fabricación aditiva con metales se realiza generalmente en una atmósfera inerte, como nitrógeno o argón, para evitar la oxidación y la contaminación del material durante el proceso de fabricación. Esto es especialmente importante en aplicaciones críticas donde la integridad de la pieza y sus propiedades mecánicas son fundamentales, como en el caso de piezas utilizadas en buques de guerra. En estos casos<sup>15</sup>, se pueden usar técnicas como la soldadura por gas inerte (TIG) o la soldadura por arco de plasma (PAW) para crear una atmósfera inerte alrededor del arco de soldadura y minimizar la contaminación de la pieza durante la fabricación aditiva.

A continuación analizaremos los metales que mayor interés suscitan en el campo de la fabricación aditiva, que son: el acero, el aluminio, el titanio y el cobre.

#### 6.5.5.1.-Acero.

La fabricación aditiva del acero se enfrenta al problema de que hay que sacrificar la resistencia por la ductilidad<sup>16</sup>. Sin embargo, en el año 2017 un equipo del Laboratorio Nacional Lawrence Livermore desarrolló un método que utiliza una máquina de fabricación aditiva de sinterización por láser común para controlar la estructura microscópica del grano del metal. [Winick, 2018]

El resultado es un componente con una ductilidad similar al acero inoxidable común pero con el doble de fuerza. Tiene buena resistencia a la corrosión y alta ductilidad y se utiliza para hacer oleoductos, piezas de motores, equipos de cocina, etc.

Pruebas realizadas por investigadores muestran que, bajo ciertas condiciones, el acero impreso en 3D es tres veces más resistente que el acero fabricado con métodos tradicionales.

Estos científicos creen que su acero 316L impreso en 3D podría ofrecer mayores niveles de resistencia y ductilidad a otras formas de acero inoxidable, por lo que es especialmente interesante para la fabricación de equipos químicos, implantes médicos, piezas de motor

---

<sup>15</sup> Fuente: <https://www.engineering.com/story/integrating-metal-additive-manufacturing-10-questions-to-ask>

<sup>16</sup> Dicho de un metal: Que admite grandes deformaciones mecánicas en frío sin llegar a romperse. [Real Academia Española]



y otras partes que requieren propiedades físicas mejoradas. [Laboratorio Nacional Lawrence Livermore, 2017]

Un avance que probablemente interesará a los sectores aeroespacial, automotriz, y de petróleo y gas. De hecho, se trata de áreas que deben fabricar piezas metálicas suficientemente resistentes a condiciones climáticas extremas y situaciones de conflicto armado.

Una de las principales dificultades encontradas por el equipo de investigación es la porosidad del metal impreso en 3D, causado por el proceso de fusión del láser. Las partes porosas se pueden romper, lo que las hace potencialmente peligrosas para aplicaciones críticas.

Para resolver este problema, los investigadores utilizan un proceso de optimización de la densidad, manipulando la microestructura subyacente de acero utilizando el modelado por ordenador.

El acero inoxidable está presente en nuestra vida cotidiana, en la industria mecánica y en la biomédica. Presenta buenas propiedades mecánicas y permite obtener una superficie pulida y brillante.

También es posible imprimir piezas en bronce o en oro utilizando el acero inoxidable como material de base: las capas de polvo de acero inoxidable son recubiertas de pega para inyectar el bronce a la impresión.

#### 6.5.5.2.-Aluminio.

Este material tiene unas excelentes propiedades de ligereza y solidez, además de ser resistente a la corrosión y puede ser soldado. En comparación a los aceros, es menos robusto a la fatiga y a las altas temperaturas. [Álvarez, 2017]

Principalmente es utilizado en las áreas donde la reducción de peso es esencial: piezas mecánicas de automóviles de carrera, aeronáutica, aeroespacial, bicicletas... No obstante, es difícil encontrarlo en estado puro. Se utiliza en forma de aleación con otros metales que mejoran sus propiedades físicas y mecánicas, como el silicio y el magnesio.



#### 6.5.5.3.-Titanio.

El titanio es el material por excelencia de la medicina y de la industria aeroespacial gracias a su buena relación entre solidez y peso, además de su alta resistencia a la corrosión y a su biocompatibilidad. Como el aluminio, las aleaciones de titanio presentan propiedades mecánicas y un comportamiento químico mejorados. [Ruiz, 2020]

La fabricación aditiva hace más fácil la fabricación de piezas en titanio y evita las impurezas obtenidas con las técnicas tradicionales durante la fase de soldadura.

Sin embargo, un gran inconveniente de este material es su coste elevado, unas cincuenta veces superior al del acero.

#### 6.5.5.4.-Cobre.

El cobre es un metal maleable, blando y dúctil. Además un material sumamente interesante por sus propiedades de alta conductividad térmica y eléctrica. Sin embargo, esta misma propiedad de conductividad es la que ha obstaculizado en un principio su éxito como una opción viable para la fabricación aditiva. [BEAMLER, 2020]

Actualmente se ha desarrollado un nuevo proceso de fabricación aditiva que implica una máquina de fusión de haz de electrones que funde el material en formas específicas, lo que supone al respecto el avance más destacado.

Poder trabajar con este metal en procesos de fabricación aditiva es sumamente interesante ya que el cobre está presente sectores y ámbitos:

- Cableado eléctrico, maquinaria y motores.
- Material de construcción para techos, plomería y tuberías.
- Elementos presentes en viviendas y locales, tales como fregaderos, grifos, picaportes, pasamanos, entre otros.
- Aleaciones metálicas como el bronce, el latón y la plata esterlina.
- El cobre es bioestático y ello supone que las bacterias u otras formas vivas no crecerán en él. Por ello, este metal está muy presente en el casco de los barcos.

Finalizado el capítulo 6, conviene mencionar la importancia de la cadena de suministro entendida como un conjunto de sujetos interaccionados entre sí. De entre estos sujetos, la



Armada es uno de ellos y la obtención de sus repuestos requerirá la participación de otros sujetos: fabricantes, profesionales del transporte y la comunicación, entre otros. De ahí la importancia de entender el concepto, estructura y objetivo de una cadena de suministro, en la cual el flujo de información puede ser el factor más importante.



## **7. LA CADENA DE SUMINISTRO.**

En este capítulo se mostrará el posicionamiento de la Armada en la cadena de suministro, es decir, su posición frente a otros sujetos con los que interacciona.

En primer lugar se exponen el concepto y amplitud de la cadena de suministro, para posteriormente mostrar los sujetos que la componen y cómo es la relación entre todos estos; todo ello para perseguir un objetivo común.

Finalmente, se mostrarán las dimensiones de la cadena de suministro y la posición que ocuparía la Armada en ésta.

### **7.1. CONCEPTO Y OBJETIVO.**

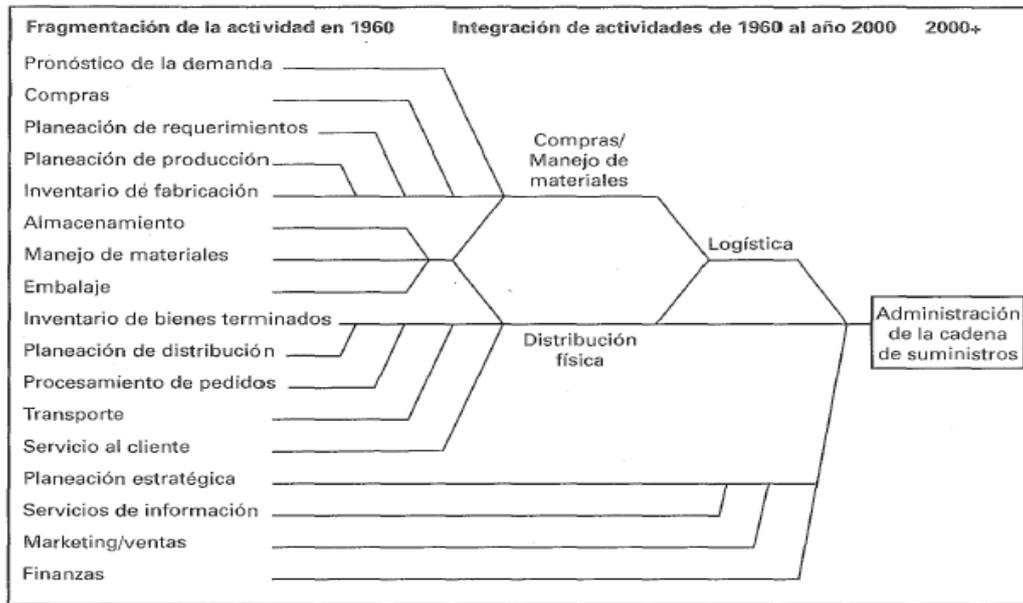
A día de hoy es común asociar el concepto de cadena de suministro al de logística. A primera vista ambos conceptos parecen sinónimos e incluso puede pensarse que uno depende o engloba al otro.

Con carácter general, esta última es la percepción más común, en el sentido de que la cadena de suministro es una parte de la logística. No obstante, dicha percepción no es la correcta.

La realidad es que la logística es una parte de la cadena de suministro, es decir, que la cadena de suministro es un concepto mucho más amplio y que engloba, entre otros aspectos, a la logística.

La siguiente imagen muestra las funciones que integran el concepto de cadena de suministro. [Serna, 2006]

Imagen 5- Evolución de las actividades empresariales.



Fuente consultada: [Serna, 2006]

En dicha imagen se muestra la evolución de las distintas actividades empresariales desde la década de 1960 hasta hoy en día. Se observa que hasta 1960 las actividades de las empresas se realizaban por separado, desde el simple pronóstico de la demanda, pasando por el servicio al cliente y terminando con las actividades de planeamiento y control.

A partir de esta fecha, la práctica empresarial integró las actividades de compras y manejo de materiales, la logística y la distribución física. Fue esta visión integradora de las empresas la que permitió que hoy en día se pueda hablar de la cadena de suministro como un todo.

Por tanto, en base a ello podemos afirmar que la logística es el subconjunto de la cadena de suministro que se encarga principalmente del movimiento de los bienes y servicios desde el punto de origen hasta el punto de consumo, mientras que la cadena de suministro engloba a las distintas organizaciones por las que fluyen los distintos materiales, desde el primer proveedor hasta el cliente final.

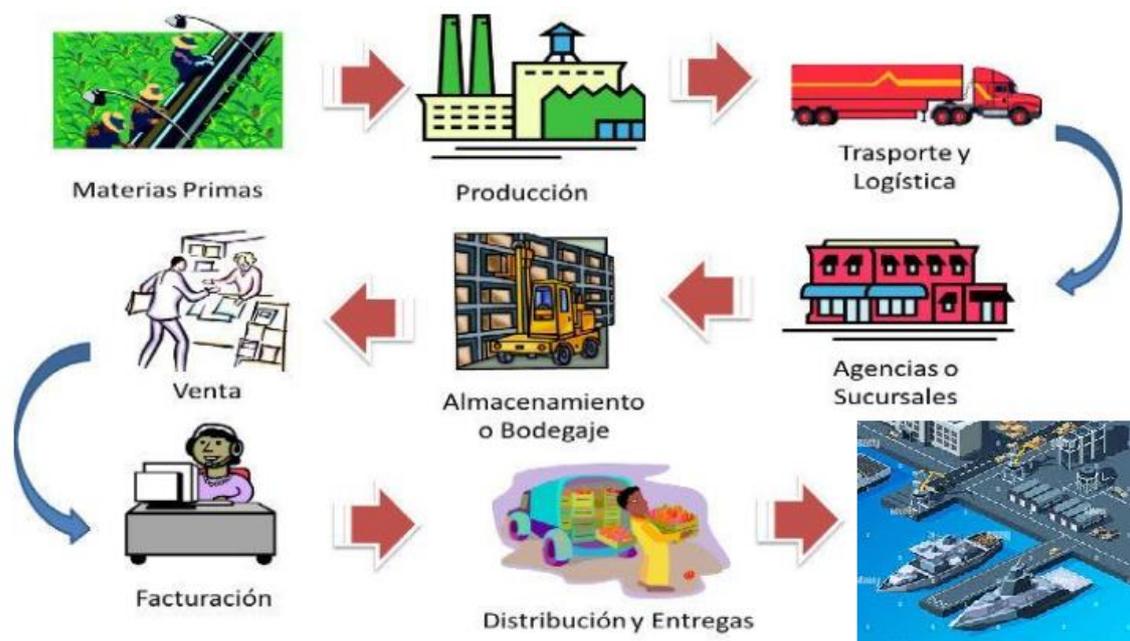
A partir de aquí podemos definir el concepto de cadena de suministro. La realidad es que no existe una definición concreta de lo que es una cadena de suministro sino una multitud de ellas. Por ejemplo:

- La cadena de suministro es la coordinación e integración de todas las actividades asociadas al movimiento de bienes, desde la materia prima hasta el usuario final, para crear una ventaja competitiva sostenible. Esto incluye la administración de sistemas, fuentes, programación de la producción, procesamiento de pedidos, dirección del inventario, transporte, almacenaje y servicio del cliente. [Cooke, 1997]
- El concepto de cadena de suministro hace referencia al control y seguimiento de todas las operaciones realizadas sobre el producto, desde las materias primas hasta la entrega como producto terminado al cliente. [Martín, 2006]

Estas definiciones son un ejemplo de las muchas que hay. Aunque ninguna de ellas se repite, lo cierto es que proyectan una idea común de conjunto e integración. Es decir, que la cadena de suministro es un flujo transversal de actividades desarrolladas por distintas organizaciones empresariales con la finalidad de poner a disposición los bienes y servicios requeridos por los clientes finales.

La siguiente imagen es un ejemplo simplificado que podría representar la definición del concepto de cadena de suministro.

Imagen 6- Sujetos en una cadena de suministro.



Fuente consultada: [www.economipedia.com](http://www.economipedia.com)



Esta imagen recoge a todas las partes que intervienen dentro de un entorno de flujo e intercambio de información.

Podemos observar que en la cadena de suministro se relacionan organizaciones y agentes en distintos niveles. Para algunos la venta de su producto o servicio constituye el insumo o input de otro en una cadena continua hasta llegar al consumidor final.

Es importante señalar que el flujo e intercambio de información, aunque no es un agente ni una organización en sí, es un factor clave e importante; de manera que si el intercambio de información no está coordinado o no es accesible a todas las partes intervinientes en la cadena de suministro, es probable que aparezcan una serie de errores sucesivos que se traducen finalmente en la no atención de la necesidad material o inmaterial del cliente final en el momento, lugar, cuantía y calidad requerida por éste; lo que a su vez supone una pérdida de calidad en el producto o servicio y en una pérdida de competitividad para uno o varios agentes empresariales de la cadena de suministro.

En definitiva, es importante ver la cadena de suministro desde una perspectiva de asociación, entre proveedores y clientes, entendida como una forma de ejercer la actividad compartiendo información, diseñando conjuntamente planes de negocios, promociones y ventas, participando conjuntamente en la investigación y desarrollo de nuevos productos y analizando y planificando la forma de crecer todos juntos. [Jiménez y Hernández, 2000]

El objetivo final de la cadena de suministro es satisfacer las necesidades del cliente de la mejor manera posible, es decir, como se comentó anteriormente, en el momento, lugar, cantidad y calidad requeridos, sin perjuicio de hacerlo de la manera más eficiente y eficaz posible en el uso de todos los recursos (económicos, materiales, de personal y tiempo) para el no menoscabo de la competitividad. [Filbeck, et al. 2005]

Para la consecución de dicho objetivo será necesario llevar a cabo las siguientes actuaciones: [Serna, 2006]

- Disminuir los costes de transporte, distribución y stock de las materias primas y de los productos terminados o semiterminados. Estos costes se pueden disminuir de una manera general atacando toda la cadena o conseguir ahorros por fases.



Además, la eficiencia de la cadena se demuestra en la utilización de los recursos humanos y materiales.

- Conseguir el máximo rendimiento a las distintas actividades de la cadena de suministro para que los flujos sean rápidos, los stocks mínimos y las mermas mínimas, para disminuir los tiempos de producción, distribución y entrega, para aumentar la calidad de los productos y servicios, y para mejorar las relaciones con proveedores, clientes y otros agentes de la cadena.
- Compenetrar las decisiones estratégicas del largo plazo con las decisiones tácticas del medio plazo y las decisiones operativas del corto plazo, haciendo frente a los cambios imprevistos en la demanda, oferta u otras alteraciones del entorno.
- Conseguir que la empresa siempre esté dispuesta a proporcionar sus productos y servicios en los tiempos de entrega estipulados y con la mayor calidad posible para fidelizar y satisfacer a los clientes.
- Maximizar el intercambio de información y conocimiento a través de procesos de coordinación y comunicación adecuados.

## **7.2. DIMENSIÓN DE LA CADENA DE SUMINISTRO.**

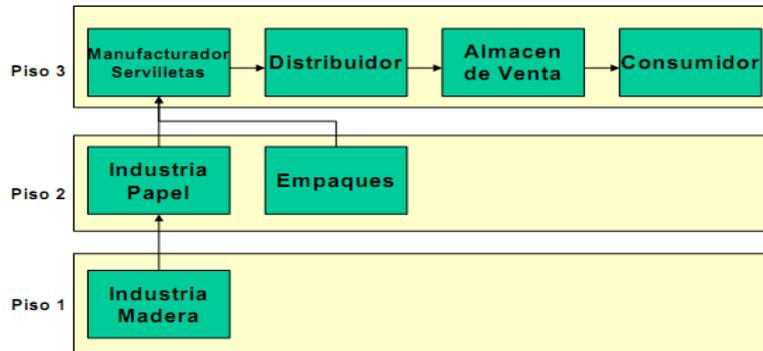
Conocidos los distintos sujetos que integran una cadena de suministro, podemos hacernos una idea de las dimensiones que ésta puede tener.

Las dimensiones estructurales de la cadena de suministro vendrán determinadas por el número de agentes ubicados en un mismo nivel.

En este sentido, distinguimos las siguientes estructuras: [Serna, 2006]

- Horizontal: definida por el número de clientes o proveedores en cada nivel de la cadena de suministro.

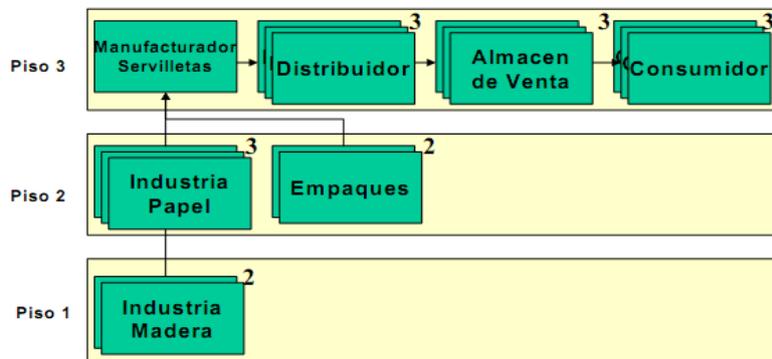
Imagen 7- Estructura horizontal de la cadena de suministro.



Fuente consultada: [www.gestiopolis.com](http://www.gestiopolis.com)

- Vertical: definida por el número de niveles que forman la cadena de suministro.

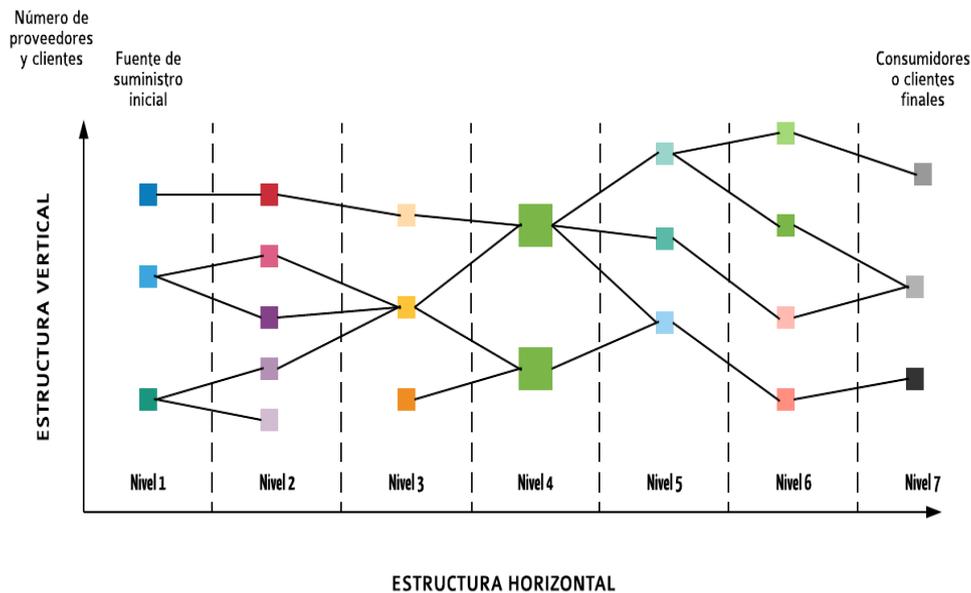
Imagen 8- Estructura vertical de la cadena de suministro.



Fuente consultada: [www.gestiopolis.com](http://www.gestiopolis.com)

- Focal: se determina a partir de la posición de la empresa en la cadena de suministro con respecto al mercado principal. Una empresa puede estar posicionada lejos o cerca de la fuente de abastecimiento inicial, o lejos o cerca del último cliente, o en alguna parte entre estos extremos de la cadena de suministro.

Imagen 9-Estructura focal de la cadena de suministro.



Fuente consultada: [www.evaluandosoftware.com](http://www.evaluandosoftware.com)

### 7.3. LA ARMADA: ÚLTIMO ESLABÓN EN LA CADENA DE SUMINISTRO.

Vistas las estructuras dimensionales de la cadena de suministro, lo que hay en común entre éstas es la posición de la Armada con respecto al resto de sujetos.

En la cadena de suministro, la Armada adquiere el papel de cliente final, demandante y receptora de bienes y servicios suministrados por proveedores.

Como ya se comentó en otro momento en el desarrollo de este TFM, la Armada adolece de una serie de problemas que pueden resumirse en la disponibilidad de los repuestos en tiempo y forma necesarios.

Estos problemas tienen su origen tanto en la propia estructura de Armada como en la propia estructura de la cadena de suministro.

A continuación centraremos el estudio en la función de apoyo logístico de la Armada, tratando una serie de asuntos: problemas y factores que lo generan, su sistema de aprovisionamiento, fuentes de obtención y otros aspectos.



## **8. LA FUNCIÓN DEL APOYO LOGÍSTICO DE LA ARMADA.**

La logística es fundamental para el desarrollo de cualquier operación militar y puede condicionar el éxito o el fracaso de la misión. Además, en la fase de preparación de la fuerza en tiempos de paz, la logística es vital para conseguir que los distintos sistemas y equipos se encuentren alistados para su empleo cuando sean requeridos por el mando operativo.

El CONLOG 2017 define el apoyo logístico como el conjunto de acciones necesarias para proporcionar los medios que necesiten las Unidades y Sistemas para el cumplimiento de sus misiones y desarrollo de sus funciones.

En el conjunto de estas acciones destacamos la de aprovisionamiento, entendida como “la función del apoyo logístico que tiene por objeto prever, obtener, almacenar y distribuir los medios materiales para satisfacer las necesidades de las Unidades y Sistemas”. [Armada, 2017]

De acuerdo con este concepto, el fin último del aprovisionamiento es la operatividad sin menoscabo de la eficiencia. Su objetivo es asegurar la obtención, almacenamiento y distribución de los materiales necesarios para que las unidades puedan realizar las misiones encomendadas y ello supone proporcionar dicho material en cantidad, momento y lugar adecuado, y por supuesto a un coste óptimo ya que el binomio eficacia-coste jamás puede relegarse en tiempos de restricciones presupuestarias.

El aprovisionamiento de repuestos en la Armada está basado en la doctrina empleada por la marina norteamericana, pero adaptada. En este sentido, el actual modelo de aprovisionamiento de la Armada está basado en el mantenimiento de unos determinados niveles de repuestos en los almacenes y paños de los dos escalones de aprovisionamiento que se definen, complementado con la adquisición directa de aquellos repuestos para los que no se ha definido nivel de almacenamiento.

Lo que se estudiará a continuación será, en primer lugar, cómo se estructura y gestiona el aprovisionamiento en la Armada y el cálculo de los repuestos. Para finalizar, se expondrán los problemas a los que se enfrenta dicha gestión y los factores que los causan.



## 8.1. ESTRUCTURA ORGÁNICA Y GESTIÓN DEL APROVISIONAMIENTO.

Conforme al CONLOG 2017, el sistema de aprovisionamiento de la Armada se compone de dos escalones de aprovisionamiento.

El Primer Escalón de Aprovisionamiento es aquél que alberga el material puesto a cargo en los pañoles de los BUI's para su propio aprovisionamiento. Incluirá los materiales necesarios para apoyar sus operaciones, bajo los conceptos de mantenimiento aplicables<sup>17</sup>, durante un tiempo dado que se denominará Periodo de Autonomía Logística<sup>1</sup> (en adelante, PAL<sup>18</sup>).

El Segundo Escalón de Aprovisionamiento es aquel que alberga las reservas de guerra y los materiales necesarios para apoyar las operaciones y actividades navales, así como las acciones del Segundo Escalón de Mantenimiento y aquellas del Tercer Escalón de Mantenimiento que se decida, durante un tiempo dado que se denominará Periodo de Acopio Operativo (en adelante, PAO<sup>19</sup>).

El Segundo Escalón de Aprovisionamiento constará de un Inventario Único para toda la Armada y sus almacenes podrán estar situados en una sola localidad o en varias, teniendo en cuenta el despliegue actual y previsto de la Fuerza. Concretamente, el Segundo Escalón de Aprovisionamiento se compone de los almacenes y depósitos de los Arsenales y la Jefatura de Aprovisionamiento y Transporte de Madrid (en adelante, JAT), los pañoles de los Buques de Aprovisionamiento de Combate no destinados a su propio consumo, almacenes de otros Ejércitos o de empresas (como por ejemplo, INDRA y NAVANTIA).

A este respecto, cabe mencionar el Almacén Virtual Único de la Armada. Éste se creó en 1974 con objeto de conseguir una gestión integral del inventario de material de la Armada que permita disponer de una visión única y global de las existencias de cada voz.

---

<sup>17</sup> En el caso de repuestos, sólo se incluirán aquellos cuyo reemplazo quede dentro de la capacidad de mantenimiento del BUI (Primer Escalón de Mantenimiento).

<sup>18</sup> PAL: número de días durante los que un BUI debe poder desempeñar su misión o función sin necesidad de reaprovisionarse de repuestos y pertrechos en concordancia con su capacidad de mantenimiento. Actualmente está fijado en 60 días.

<sup>19</sup> PAO: número de meses durante los que el Segundo Escalón de Aprovisionamiento debe poder atender, con la fiabilidad establecida, los pedidos de repuestos y pertrechos del Primer Escalón de Aprovisionamiento y de los Segundo y Tercer Escalones de Mantenimiento. Actualmente está fijado en 365 días.

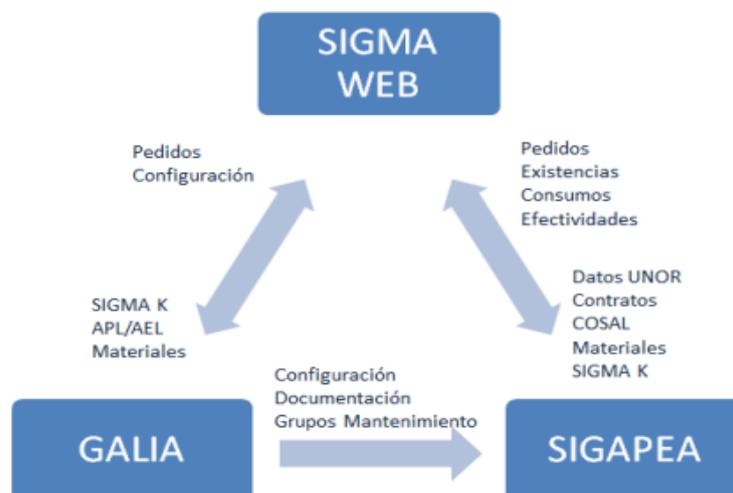


Finalmente, cada Escalón de Aprovisionamiento realiza su gestión utilizando su propia aplicación informática. En este sentido:

- El Primer Escalón de Aprovisionamiento utiliza el Sistema Integrado de Gestión del Aprovisionamiento del Primer Escalón en la Armada (en adelante, SIGAPEA). Es el sistema de ayuda a bordo de los BUI's para el control de la configuración y la gestión del aprovisionamiento.
- El Segundo Escalón de Aprovisionamiento utiliza el Sistema Integrado de Gestión de Material en la Armada (en adelante, SIGMA-DOS). Es el sistema para la gestión y control de los materiales. Además, es el sistema utilizado en el Almacén Virtual Único de la Armada y también presta soporte funcional a los BUI's.
- Existe una tercera aplicación informática denominada Gestión del Apoyo Logístico Integrado de la Armada (en adelante, GALIA) para la gestión de todos los aspectos del mantenimiento. Se gestiona por ambos Escalones de Aprovisionamiento y contiene un módulo de gestión del aprovisionamiento el cual permite definir la relación de materiales y repuestos necesarios para efectuar la programación de las acciones de mantenimiento.

A continuación se muestra gráficamente en la siguiente imagen las relaciones de intercambio de información entre los tres sistemas.

*Imagen 10- Intercambio de información.*



*Fuente consultada: [Armada, 2012]*



## 8.2. DETERMINACIÓN Y NIVELES DE REPUESTOS.

Actualmente, la Instrucción 4/97 del Almirante Jefe del Apoyo Logístico (en adelante, AJAL) determina los criterios para el acopio de repuestos.

### 8.2.1. PRIMER ESCALÓN DE APROVISIONAMIENTO.

Para el cálculo de los niveles de repuestos del Primer Escalón de Aprovisionamiento existen diferentes modelos. La marina estadounidense emplea hasta siete modelos diferentes, que se relacionan a continuación: [Armada, 2022]

- FLSIP, Fleet Logistics Support Improvement Program.
- Conventional.
- MODFLSIP, Modification FLSIP.
- MCO, Maintenance Criticality Oriented.
- ACIM, Availability Centered Inventory Model.
- TIGER ACIM o RBS, Readiness Based Sparing.

Sin embargo, la Armada se ha decidido por un único modelo para el cálculo de los repuestos que no tiene en cuenta explícitamente los costes de almacenamiento ni de gestión de pedidos.

Este modelo está basado en la demora y en la demanda esperada constantes para un PAL y una fiabilidad neta<sup>20</sup>, que es una adaptación del modelo FLSIP americano, en concreto en el 0,5 FLSIP, que consiste en que todos los artículos cuya demanda esperada sea mayor que 0,5 o lo que es lo mismo un consumo esperado de al menos 1 unidad cada dos años, formarán parte del Libro de Cargo.

Las Publicaciones de Cargo son documentos que indican el alcance y la profundidad de los materiales para el apoyo en primer y segundo escalón de los BUI's. Todos los BUI's dispondrán de un Libro de Cargo en el que vendrá definido su Primer Escalón.

---

<sup>20</sup> Es la probabilidad —expresada en tanto por ciento y calculada en cada caso para el Período de Autonomía Logística, del BUI de que se trate— de que al ser necesario un repuesto previsto en el Libro de Cargo se encuentre almacenado en sus pañoles.



El Libro de Cargo tipo COSAL (del inglés “Coordinated Ship Allowance List”) es una publicación preparada para un BUI concreto. Es a la vez una publicación técnica y de aprovisionamiento:

- Técnica, ya que suministra información relativa a la nomenclatura, características operativas, manuales técnicos, planos,... de los SEC.
- De aprovisionamiento, pues proporciona la lista consolidada de los repuestos y de todos los pertrechos, con sus cargos respectivos, necesarios para mantener operativo al BUI y realizar las acciones de mantenimiento oportunas, durante un período de tiempo y una fiabilidad determinados.

La determinación de los repuestos que deben incluirse (alcance<sup>21</sup>) responderá a los siguientes criterios:

- Disponer de capacidad de mantenimiento para su utilización.
- Para los repuestos de gran seguridad, corresponder a equipos vitales o que afecten a la seguridad de la vida humana. (Ver ANEXO II).
- Para los repuestos de gran demanda: garantizar que los Objetivos de Acopio que se establezcan responden a las fiabilidades ordenadas. (VER ANEXO II).
- Para los repuestos de baja demanda: cuando un criterio técnico lo determine.

Una vez aprobadas por el AJEMA las fiabilidades del Primer Escalón de Aprovisionamiento y los PAL de cada uno de los BUI de la Armada, se determinarán las cantidades de repuestos necesarios para cada BUI según la fórmula establecida en la Instrucción 04/97 de 11 de diciembre del AJAL.

La determinación en profundidad<sup>22</sup> de los cargos se efectuará ajustándose al criterio de consolidación<sup>23</sup>.

Los repuestos de baja demanda (ver ANEXO II) que, por criterios técnicos deban figurar a cargo, se incluirán en el Libro de Cargo con la profundidad que corresponda a la mayor

---

<sup>21</sup> Número de voces distintas, del total de las instaladas en un BUI, que figuran en el Libro de Cargo.

<sup>22</sup> Cantidad de una voz determinada que figura en el Libro de Cargo.

<sup>23</sup> Proceso que asigna al Libro de Cargo o Inventario una cantidad ponderada de repuestos de una determinada pieza, teniendo en consideración la existencia de dicha pieza en otros SEC del BUI.



de las siguientes cantidades: Unidad Mínima de Reposición (UMR<sup>24</sup>) o de la que exige una recomendación técnica (TOR<sup>25</sup>).

En definitiva, de lo expuesto anteriormente se extrae que los criterios más importantes para el cálculo del nivel de repuestos de primer escalón son:

- Grado de esencialidad: importancia de la pieza para el funcionamiento del equipo.
- Demora: tiempo desde que se formula el pedido hasta su recepción por el utilizador. En los pliegos contractuales de adquisición de repuestos se incluirán cláusulas que garanticen la obtención de repuestos dentro de los plazos de demora previamente acordados así como la no interrupción de los suministros durante el período que se acuerde.
- Seguridad: su carencia provoca riesgos para el material o las personas.
- Consumo esperado: dato aportado por la recomendación del fabricante.

#### 8.2.2. SEGUNDO ESCALÓN DE APROVISIONAMIENTO.

La publicación de cargo que indica el alcance y profundidad de los repuestos en el Segundo Escalón de Aprovisionamiento es el Libro o Registro de Inventario.

En este caso, la instrucción es mucho más escueta. Establecidas por el AJEMA las fiabilidades del Segundo Escalón de Aprovisionamiento y el Período de Acopio Operativo de repuestos, se determinarán las cantidades de repuestos necesarios que constituirán el cargo del Segundo Escalón de Aprovisionamiento para atender los pedidos que originen los Primeros Escalones de Aprovisionamiento de los BUI's y los Segundos, Terceros y Cuartos Escalones de Mantenimiento de la Armada durante el período fijado.

La determinación en alcance vendrá dada primero por la demanda esperada, después por el criterio técnico y finalmente por el precio y de nuevo una segunda realimentación de criterio técnico.

---

<sup>24</sup> Muchas piezas se tienen que reemplazar por juegos y se debe llevar la suficiente cantidad del elemento para formar un juego completo.

<sup>25</sup> Decisión técnica que se aplica para asegurar que se lleva una cierta cantidad del artículo porque ésta es necesaria para la misión del BUI o para la seguridad de su dotación.



### 8.2.3. CÁLCULO DE NIVELES.

Determinados el alcance y la profundidad de los repuestos, la evolución posterior en los inventarios del Primer y Segundo Escalones de Aprovisionamiento es la aplicación de un sistema de mantenimiento de niveles, que son: [Armada, 2020]

- Nivel Máximo (NM): Es la máxima cantidad de existencias de un material que debe existir en el almacén y sobre pedido para asegurar el Objetivo de Acopio.

$$NM = OA + (\text{Consumo medio} * \text{Demora estimada})$$

- Objetivo de Acopio (OA): Es la cantidad óptima de material de repuestos que debe mantenerse a bordo en pañoles o almacenes del Segundo Escalón. Se corresponde a las cantidades indicadas en el correspondiente Libro de Cargo.

$$OA = NS + (\text{Consumo medio} * \text{Periodo Operativo})$$

- Nivel Mínimo (Nmi): nivel a partir del que se realiza pedido de reposición para evitar que las existencias queden por debajo del Nivel de Seguridad.

$$Nmi = NS + (\text{Consumo medio} * \text{Demora Estimada})$$

- Nivel de Seguridad (NS): nivel por debajo del que no deben quedar las existencias de un repuesto en almacén. Sólo se podrá disponer de los repuestos de este nivel en caso de alteraciones imprevistas del consumo o interrupciones anormales del reaprovisionamiento.

$$NS = \text{Periodo Acopio} * \text{Consumo Medio}$$

Dicho esto, la jerarquía entre estos niveles es tal que:  $NM > OA > Nmi > NS$ .

El cálculo de estos niveles se realiza automáticamente por la correspondiente propia aplicación informática al menos una vez al mes y teniendo en cuenta para ello parámetros de demanda.

### 8.3. FUENTES DE OBTENCIÓN DE REPUESTOS.

Como pudimos ver en la imagen número 6 del presente TFM, la planificación o planeamiento es una de las funciones o actividades que engloba la cadena de suministro.



En el ámbito de la Armada, la planificación es el paso previo, ya que decidir sobre la estrategia de las operaciones y determinar los repuestos que se deben adquirir constituye la primera fase. Precisamente es lo que hemos visto en el apartado 8.2.

La segunda fase supone tomar decisión sobre cómo se van a adquirir los repuestos, a precios razonables, en la cantidad suficiente y cuando se requieran.

La adquisición de repuestos y la reposición de los niveles de inventario se llevan a cabo a través de diferentes fuentes de obtención, que son:

- A través de la normativa contractual de aplicación nacional.
- A través del Foreign Military Sales (en adelante, FMS).
- A través de la NATO Support and Procurement Agency (en adelante, NSPA).

En la siguiente tabla podemos ver el total de expedientes que se hicieron en el año 2021.

Tabla 8- Número de expedientes.

Ley aplicable	Número de expedientes
Ley 9/2017 de Contratos del Sector Público	23.329
Ley 24/2011 de Contratos de Defensa y Seguridad	1.513
Excluido ámbito Leyes 9/2017 y 24/2011	178
<b>Total general</b>	<b>25.020</b>

Fuente consultada: [www.defensa.gob.es/defensa/contratacionpublica/](http://www.defensa.gob.es/defensa/contratacionpublica/).

Como puede verse, la normativa contractual nacional fue la más utilizada, concretamente la Ley 9/2017, frente a otras fuentes (FMS y NSPA) excluidas del ámbito de la normativa contractual.

#### 8.5.1. NORMATIVA CONTRALCUAL DE APLICACIÓN NACIONAL.

La adquisición nacional se rige por las siguientes normas:

- La Ley 9/2017 de contratos del Sector Público (en adelante, LCSP).
- La Ley 24/2011 de contratos del Sector Público en los ámbitos de la Seguridad y la Defensa (en adelante, LCSD).



La contratación se lleva a cabo principalmente a través de la LCSP. La legislación nacional es bastante estricta en cuanto a las formas de licitación de los contratos y hay que respetar todos los procedimientos y plazos en ella descritos. A ello hay que sumarle la escasez e incertidumbre presupuestaria, y la dependencia de créditos extraordinarios, por lo que en muchas ocasiones no es posible ejecutar el recurso presupuestario planeado para adquirir los repuestos necesarios para el sostenimiento de unidades y sistemas.

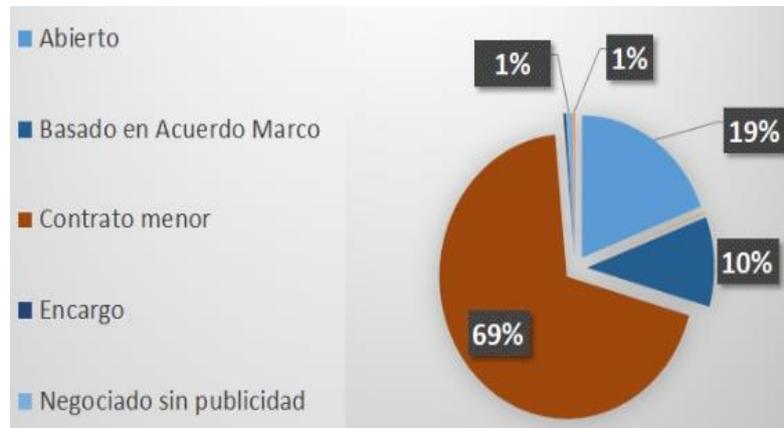
Para contrarrestar esta problemática se recurre cada vez con más frecuencia al procedimiento contractual del Acuerdo Marco. Mediante esta figura contractual se negocia con una o varias empresas el suministro requerido para ciclos de hasta 4 años, y mediante contratos basados en estos Acuerdos Marco se van ejecutando las necesidades en cada ejercicio económico a medida que se va teniendo recurso económico disponible, de manera que se gana agilidad en todo el proceso.

Ahora bien, la adquisición por la vía de Acuerdos Marco presenta los siguientes inconvenientes:

- La propia Ley no pretende que se use el Acuerdo Marco de una forma abusiva, ya que puede verse como un instrumento para evitar los contratos menores y la fragmentación del objeto de los contratos.
- Al tratarse de material muy diverso y con unos requisitos técnicos muy exigentes hace que los licitadores tengan mucha dificultad en definir estos materiales, lo que conlleva que los plazos se demoren muchísimo y muchos de estos acuerdos se caigan porque por no cumplir los plazos establecidos en la Ley.
- Al tratarse de acuerdos donde las empresas que se presentan son en algunos casos únicas, las ofertas son menos competitivas, lo que conlleva el aumento del precio de los artículos objetos del contrato.

En la siguiente imagen podemos ver el peso de las distintas modalidades de contratación dentro de la LCSP para el año 2021 y comprobar que los Acuerdos Marco son tan solo un diez por ciento de la totalidad de los expedientes de contratación.

Imagen 11- LCSP (% por tipo de expediente).



Fuente consultada: [www.defensa.gob.es/defensa/contratacionpublica/](http://www.defensa.gob.es/defensa/contratacionpublica/)

Otra forma de obtención, y la más deseada conforme a la LCSP, es el contrato de suministro a través el procedimiento abierto, aunque también hay que recurrir al procedimiento negociado cuando el material militar en cuestión así lo requiera.

Mencionar que al MINISDEF y la Jefatura de Apoyo Logístico (en adelante, JAL) tienen la posibilidad de transferir recursos económicos a las Jefaturas de Repuestos de los arsenales para que éstas puedan atender de forma descentralizada las necesidades particulares de las unidades a las que apoyan<sup>26</sup>.

En lo que respecta a la LCSD, su aplicación se ejerce en menor medida, como vimos en la tabla número 4, porque define un ámbito de aplicación con unos márgenes muy limitados y estrictos, que en muchas ocasiones imposibilita su utilización.

En este sentido, el ámbito será el de la Defensa o la Seguridad Pública. Por Defensa debe entenderse “el conjunto de actividades reguladas en la Ley Orgánica 5/2005, de 17 de noviembre de la Defensa Nacional” y por Seguridad Pública se engloba “al conjunto de actividades no militares de las Fuerzas y Cuerpos de Seguridad Pública dirigidas a la protección de las personas y de los bienes y a la preservación y mantenimiento de orden ciudadano dentro del territorio nacional, el conjunto de actividades desarrolladas por las autoridades aduaneras encaminadas a garantizar la seguridad y protección del territorio

<sup>26</sup> A diferencia de lo que ocurre con FMS y NSPA, que su ejecución es centralizada en la JAL.



aduanero de la Unión Europea, así como cualesquiera otras que se definan como tales en las leyes”.

De manera resumida, los pilares fundamentales que sustentan la aprobación de la LCDS son, por un lado, la salvaguarda de la información sensible o clasificada que se transmite a los candidatos y licitadores y, por otro lado, dotar al órgano de contratación de un grado más elevado de discrecionalidad en la selección del contratista, flexibilizando las normas relativas a los procedimientos de contratación pública.

#### 8.5.2. FMS.

El FMS es un programa de los EE.UU. cuya finalidad es la venta de bienes y servicios destinados a la seguridad y defensa. Los EE.UU pueden vender los artículos y servicios de defensa a los países extranjeros y a las organizaciones internacionales cuando el Presidente de los EE.UU. considere formalmente que, al hacerlo, refuerza la seguridad de los EE.UU y la promoción de la paz mundial.

Bajo este programa, el gobierno de los EE.UU y un gobierno extranjero suscriben un acuerdo de ventas de gobierno a gobierno. Este programa se establece para llevar a cabo la venta de material militar a países aliados y amigos, consolidando compras propias norteamericanas con las destinadas a otros países, garantizando el mejor precio incrementado en un porcentaje para cubrir los gastos administrativos de la gestión.

De esta forma el programa FMS pretende la estandarización y la interdependencia entre las Fuerzas Armadas norteamericanas y sus aliados, la protección de determinada tecnología sensible y reducir los costes unitarios por consolidación.

Para entender bien este programa de ventas y su respaldo por la administración americana, nada más que hay que ver la siguiente imagen y ver cómo se ha convertido no solo en un instrumento de la política exterior sino también en un lucrativo negocio, en el que participan varias agencias americanas y toda la industria del sector de defensa americana.

Imagen 12- Volumen de ventas FMS 2000-2010.

## FMS Sales 2000-2010



Fuente consultada: Defense Security Cooperation Agency

El abastecimiento de repuestos por esta vía de adquisición es seguro y garantiza su obtención. Son repuestos sobre todo para equipos de procedencia americana. El trámite de petición es ágil pero su entrega se demora en al menos tres meses, provocando que el peticionario, bien sea el primer o el segundo escalón de aprovisionamiento, deba tener en cuenta este tiempo de reposición.

Las ventajas que aporta este sistema de adquisición son:

- Es una fuente esencial y necesaria para la obtención de los repuestos necesarios para la Armada.
- Al establecerse como acuerdos entre dos gobiernos, deja fuera la Ley de Contratos del Sector Público.
- La consolidación con compras propias y de otros países, genera economías de escala, con una reducción de costes considerable.

Sin embargo, también presenta inconvenientes, como por ejemplo:



- Tiene elevados gastos administrativos, en torno al 3,8 por ciento o 18.000 dólares para contratos inferiores a 400.000 dólares.
- Dificultad para recuperar fondos sobrantes.
- Poca transparencia que impide saber los procedimientos propios del programa para la formación de precios e incentivos, el desarrollo de los hitos, la regulación de las penalizaciones y las garantías de cumplimiento.

### 8.5.3. NSPA.

La NSPA es una agencia de la OTAN que reúne en una sola organización las capacidades de adquisición, logística, médicas y de infraestructura, el apoyo operativo y de sistemas y los servicios a las naciones de la OTAN, las Autoridades Militares de la OTAN y las naciones asociadas.

Desde su creación en 1958, la NSPA adquiere, opera y mantiene todo a través de un vínculo imparcial entre la industria y las naciones: desde repuestos para los sistemas de armas hasta el suministro de combustible, servicios portuarios, servicios médicos y de catering o servicios de apoyo a las bases para las tropas estacionadas en todo el mundo.

La Agencia permite la consolidación y centralización de las funciones de gestión logística, proporcionando un apoyo de principio a fin y permitiendo a sus clientes conseguir economías de escala. Su financiación es por cuenta del cliente, operando sobre la base de "sin beneficios y sin pérdidas".

Las ventajas que presenta este sistema de adquisición de repuestos son:

- Transmite un notable grado de fiabilidad a la adquisición.
- Permite visualizar y obtener información logística de otros ejércitos de la OTAN.
- Posibilidad de adquirir repuestos sin la obligación de iniciar procedimientos contractuales bajo la Ley de Contratos del Sector Público.

En cuanto a las desventajas, cabe destacar que:

- Es un proceso lento porque la adquisición se inicia cuando concurren varias peticiones de países miembros sobre un mismo repuesto, lo cual es un aspecto a tener en cuenta cuando se realiza un planteamiento de necesidades a corto plazo.



- Es un sistema poco abierto a las necesidades logísticas específicas de los ejércitos, no se obtiene cualquier repuesto a cualquier precio, debe haber una consolidación de la necesidad entre los países para proceder a la obtención.

#### **8.4. PROBLEMAS EN LA CADENA DE SUMINISTRO Y FACTORES QUE LOS GENERAN.**

En los últimos años, la Armada está teniendo un problema para la obtención de los repuestos necesario. Este problema es ni más ni menos que la disponibilidad de los repuestos en el momento, en el lugar y en la cuantía necesaria.

Esta indisponibilidad se traduce en el deterioro de los sistemas y equipos que requieren de dichos repuestos necesarios para el mantenimiento de su operatividad. Lo que a su vez implica o pone en riesgo la disponibilidad de los Buques y Unidades de la Armada para el cumplimiento de sus fines en seguridad y defensa.

A veces, esta indisponibilidad es por la inexistencia de un repuesto que ya no se fabrica, bien porque está obsoleto (y descatalogado) o bien porque la empresa fabricante del repuesto ya no existe; este último aspecto se debe a que el ciclo de vida de nuestros buques es tan amplio que algunos fabricantes de los componentes originales van desapareciendo.

En otros casos, la indisponibilidad se produce por la demora en el tiempo desde que se solicita la pieza por el usuario hasta que ésta la recibe. El margen de esta ventana temporal será más amplia si no hay existencias del repuesto en los almacenes de la Armada; de haberlas, la demora sería la correspondiente al tiempo necesario para enviar la pieza desde el almacén hasta el lugar de ubicación del Buque o Unidad solicitante.

A continuación, voy a desarrollar los distintos factores que llevan a la indisponibilidad de los repuestos en tiempo, lugar y cuantía necesarios. Los factores más destacables son los siguientes:

1. En primer lugar, hay que hacer referencia al método de cálculo de los niveles de repuestos que se ha explicado en el apartado 8.2. En relación a ello, al método puede objetarse que parte de dos premisas o hipótesis falsas, en el sentido de que tanto la demora como la demanda esperada no pueden ser constantes. Es necesario adaptar estos dos elementos de cálculo a unas cantidades basadas en una



estadística real de consumos mediante las oportunas revisiones o modificaciones del alcance y profundidad del Libro de Cargo. Veamos porqué:

- a. La demora no puede considerarse una constante porque la existencia de numerosos sujetos a lo largo de toda la cadena de suministro implica que haya incertidumbre y, por tanto, esta incertidumbre genera variabilidad en el tiempo, es decir, en la demora.

El usuario o utilizador solicita la pieza mediante un vale de material que recibe el correspondiente Servicio de Aprovisionamiento del Segundo Escalón. Si la pieza está disponible en el almacén de apoyo u otro, la demora puede ser pequeña.

Si no hay existencias de dicha pieza en el Inventario Único de la Armada, el Servicio de Aprovisionamiento correspondiente o, en su caso, el Servicio de Repuestos y Pertrechos de la Dirección de Sostenimiento de la JAL, deberá iniciar un expediente de adquisición por vía de alguna de las fuentes de adquisición desarrolladas en el apartado 8.3.

El inicio del expediente de adquisición estará supeditado a la existencia de recurso económico. Además, una vez iniciado el expediente por la vía de obtención que se considere oportuna en cada momento, su tramitación está asociada a una burocracia de gestión en perjuicio de un aumento de la demora en la obtención del repuesto.

A este factor puede sumarse el hecho de que los fabricantes al no estar vinculados por cláusulas que les obliguen a mantener un stock costoso, lo que realmente hacen es comenzar la producción en el momento en que resultan adjudicatarios, puesto que no pueden permitirse el riesgo de acopiar unos materiales que desconocen si finalmente van a ser adquiridos por la Armada. Por tanto debemos sumar a los plazos contractuales, el periodo de fabricación.

Por tanto, resulta evidente que la definición de niveles de inventario basados en el acopio de unas cantidades suficientes para absorber el consumo desde que se produce el pedido de un material hasta que finalmente se obtiene su reposición mediante las fuentes de obtención



resulta tremendamente especulativa en tiempos en los que la disponibilidad presupuestaria es también incierta.

Port todo ello, la demora es una variable altamente oscilante.

- b. La demanda esperada o consumo no puede ser una constante porque muchos de los repuestos que se solicitan pertenecen a equipos cuyo funcionamiento no es continuo.
  - c. No es lo mismo un sistema de artillería que se utiliza ocasionalmente que un sistema de propulsión que funciona de modo continuo navegando, o el de auxiliares que dependiendo de la disponibilidad de corriente de tierra tal vez deba seguir operando incluso en puerto.
  - d. Además la propia actividad global del BUI dependerá de la planificación anual de la Fuerza, cuya previsión es ciertamente difícil debido a la imprevisibilidad del perfil de misión a desempeñar según el escenario geopolítico y estratégico.
2. Factores presupuestarios y contractuales. Como se ha comentado en el punto anterior, los presupuestos y la normativa contractual influyen en la no disponibilidad de los repuestos en tiempo, lugar y cuantía necesarios. Sobre este aspecto voy a profundizar para mostrar el impacto de ambos factores.

Los recursos económicos asignados a las Fuerzas Armadas (y, por tanto, a la Armada) a través de los Presupuestos han sido objeto de un recorte durante los último años que reduce la capacidad para mantener o incrementar los esfuerzos en el sostenimiento de los SEC y la operatividad de los BUI's. [Fonfría, 2012]

Pero el limitado recurso económico no es el único factor que afecta al Presupuesto de las Fuerzas Armadas, sino que además, la disponibilidad de éste es un factor que irrumpe de manera negativa. [Fonfría, 2013]

Es decir, existe una indisponibilidad del presupuesto desde la apertura del ejercicio, de manera que el presupuesto inicial es inferior al gasto final.

Ello se debe, en primer lugar, a la no inclusión dentro del Presupuesto del MINISDEF de diversas partidas que deberían tenerse en cuenta desde un primer momento y, en segundo lugar, a las modificaciones presupuestarias por la vía del crédito extraordinario, ampliaciones de crédito y libramientos procedentes del Fondo de Contingencia. [Fonfría, 2013]



Esta situación genera problemas desde tres perspectivas:

- a) La perspectiva presupuestaria, al no cumplir con la norma de transparencia y sencillez.
- b) La perspectiva de gestión eficiente del recurso económico, ya que una parte de ellos se libera para su gasto en momentos del tiempo muy tardíos, lo que conduce a severas restricciones temporales del gasto, por lo que no siempre se realiza de la manera más adecuada.
- c) La perspectiva de la propia operatividad de las Fuerzas Armadas, al limitar el gasto en ciertas partidas y durante ciertos momentos, cuando son necesarios, y no poder disponer del crédito.

En cuanto a la normativa contractual, en concreto la LCSP, ésta tiene un fuerte carácter controlador y de transparencia en búsqueda de la mejor utilización de los recursos y la no malversación de los mismos.

En este sentido, en ocasiones resulta complicado redactar de manera adecuada la justificación de las necesidades que determinen la idoneidad de los distintos sistemas de adjudicación.

A su vez, la protección a los licitadores y la igualdad de oportunidades entre ellos, motiva el prolongado calendario de tramitación de los expedientes de contratación.

Como podemos ver en la siguiente, el tiempo medio de tramitación de cada modalidad de contratación es extenso, salvo contratos menores, Acuerdos Marco y contratos de emergencia.

Tabla 9-Duración media de la tramitación de los contratos.

	TIPO	TIEMPO MEDIO
DÍAS NATURALES Ordinarios	• Abierto (PA)	• 130 – 150 días
	• Abierto Simplificado (PAS)	• 70 – 90 días
	• Abierto Simplificado Abreviado (PASA)	• 45 – 60 días
	• Negociado con Publicidad	• 130 – 150 días
	• Negociado sin Publicidad	• 40 – 45 días
Otros Procedimientos	• Contratos menores	• 10 – 15 días
	• Acuerdos Marco sin nueva licitación	• 8 – 34 días
	• Acuerdos Marco con nueva licitación	• 24 – 95 días
	• Contratos Basados	• 20 – 25 días
	• Emergencia	• 0 días

Tabla de elaboración propia. Fuente consultada: [www.calendariocontratacionpublica.es](http://www.calendariocontratacionpublica.es)



Resumiendo, la inadecuada disponibilidad de los recursos económicos en tiempo y forma, unido a la lentitud del procedimiento de licitación y posibles deficiencias que lo demoren, tienen su impacto en la cadena de suministro, retrasando la adquisición, recepción, disposición y reparación de los repuestos requeridos, con el consiguiente vaciado de pañoles y almacenes, y la inoperatividad de sistemas y equipos.

3. De falta de personal. Las Fuerzas Armadas se nutren de personal militar y personal civil de la categoría de funcionarios y personal laboral.

- a. En cuanto al personal militar, la prioridad que establece el AJEMA es ocupar los destinos ligados a la Fuerza (esencialmente buques) en perjuicio de los destinos de Apoyo a la Fuerza. Esto supone que destinos con cometido propios de la gestión logística en el Segundo Escalón de Aprovisionamiento están escasos de personal en perjuicio de la mayor carga de trabajo del personal activo.

A esta escasez de personal militar hay que añadir la movilidad que caracteriza al personal militar, los cuales ocupan destinos con carácter general con un tiempo máximo determinado de años de permanencia en ellos.

Esta movilidad excesiva del personal militar destinado en labores logísticas impide obtener un mayor rendimiento derivado del “*expertise*” y “*know how*” que sólo la experiencia de una prolongada permanencia es capaz de proporcionar.

- b. En cuanto al personal civil, su presencia es cada vez menor debido a diversos motivos: puestos de trabajo que se quedan vacantes por jubilación y que no se cubren y otras se amortizan, aunque también se da un efecto de escape motivado por la mejor remuneración en otros organismos públicos.

El caso es que la disminución del personal civil con conocimientos técnicos en el Segundos Escalón de Aprovisionamiento y la escasa tasa de reposición de las plazas amortizadas tras la jubilación, así como la escasa flexibilidad en la normativa que regula su movilidad y destinos que impide recolocar al mismo, incluso dentro de un mismo Arsenal, constituyen una



debilidad que unidas a las anteriores suponen un gran reto para el apoyo logístico y, concretamente, para el aprovisionamiento de repuestos.

Llegados a este punto conviene hacer una reflexión sobre el tema a tratar. Planteada la fabricación aditiva como una solución al problema y habiendo visto el beneficio que obtendría la Armada entendido como una reducción de la demora en la disponibilidad de los repuestos y visto el coste de inversión en el que habría incurrir teniendo en cuenta la limitación presupuestaria, estamos en condiciones de responder al tercer y último objetivo planteado en el capítulo 4.

En este sentido, uno de los aspectos más importantes que debería tener en cuenta la Armada es identificar de su lista de repuestos cuáles son susceptibles de fabricación aditiva.

Como hemos visto hasta ahora, la fabricación aditiva puede suponer un gran ahorro en términos de tiempo, una menor demora en la recepción de los repuestos. Pero ese ahorro en términos de tiempo tiene un coste que es el referente a la inversión en la tecnología de fabricación aditiva.

Hemos podido observar que adquirir dicha tecnología requiere el desembolso de grandes cantidades de recurso económico. Con lo cual, el primer paso que debería dar la Armada es determinar el alcance de las voces de repuestos que pueden fabricarse aditivamente.

Una vez determinado el alcance e identificadas la voces susceptibles de fabricación aditiva, será más fácil conocer las tecnologías concretas para cada tipo de voz de repuestos.

De esta manera, la Armada podría hacer un plan económico plurianual orientado a la inversión en tecnología de fabricación aditiva: cuántas líneas de fabricación aditiva adquirir, la amplitud de cada una de éstas, la ubicación física de cada línea... Y externalizar aquellas tecnologías aditivas que requieran de una inversión que no esté al alcance de la Armada en un horizonte plurianual.

Otro aspecto importante relacionado con determinar el alcance susceptible de fabricación aditiva es el hecho de que la Armada empiece a exigir a los proveedores y fabricantes de dichos repuestos la entrega de los correspondiente planos digitales de los repuestos, además de su equivalente en papel, para que la obtención de repuestos pueda hacerse de



forma autónoma y bajo licencia en el caso que corresponda. Por ello es importante incluir en los próximos contratos de adquisición de sistemas y equipos, una cláusula en el Pliego de Prescripciones Técnicas la aportación de dichos planos digitales de los repuestos.

Pero hasta que la industria no empiece a suministrar estos planos digitales como parte de la documentación de mantenimiento de sus equipos, existirá una enorme labor pendiente de digitalización de los planos de repuestos ya existentes, labor que bien deberá ejercer el personal de Armada o bien deberá externalizar a través del correspondiente expediente de licitación del servicio.

A sabiendas de esta enorme labor, las limitaciones comentadas en el punto 8.4 referente a la escasez de personal y a la movilidad del mismo en los destinos de aprovisionamiento, hacer viable la idea de externalidad esta labor.

Además, la fabricación aditiva es una tecnología relativamente nueva y especializada que requiere habilidades y conocimientos específicos en diseño 3D, software de impresión, manejo de equipos de impresión, procesos de acabado... por lo que el personal de Armada necesitará de una formación adicional y especialización para aplicar sus conocimientos a esta tecnología, lo cual requiere de tiempo para que su aplicación resulte efectiva.



## **9. CONCLUSIONES.**

Llegados a este punto, corresponde plasmar las conclusiones a las que se han llegado una vez que se han respondido a los objetivos planteados en el capítulo 4:

1. La implantación de la tecnología de fabricación aditiva capacitaría al sistema de aprovisionamiento de la Armada para disponer de repuestos incurriendo en una menor demora.
2. La implantación de la tecnología de fabricación aditiva permitiría al sistema de aprovisionamiento de la Armada disponer de aquellos repuestos descatalogados y obsoletos que ya no se encuentran en el mercado.
3. La determinación e identificación del alcance de los repuestos susceptibles de fabricación aditiva permitiría a la Armada, en un escenario de presupuestos limitados, un mayor aprovechamiento de la tecnología de fabricación aditiva para incorporarla directamente en su cadena de suministro y para aquellos repuestos que la Armada no pueda fabricar aditivamente de manera directa, puede externalizar el servicio.
4. La fabricación aditiva debe ir acompañada de una cadena de suministros que aporte medios de transporte y comunicación que favorezcan reducir la demora.
5. El proceso de fabricación aditiva ni sustituye ni reemplaza a otros procesos de fabricación convencionales. Es un proceso que convivirá con el resto y su utilización es la más adecuada porque resuelve un problema de disponibilidad de repuestos en un momento concreto y en unas circunstancias concretas.
6. La pieza clave del éxito de la fabricación aditiva es determinar e identificar el alcance de los repuestos susceptibles de fabricarse aditivamente.

Resumiendo. Corroboro la hipótesis de que la fabricación aditiva es una alternativa eficiente en el sentido de que soluciona el problema de disponibilidad u obtención de repuestos en beneficio de una reducción de la demora.



## **BIBLIOGRAFÍA.**

- AJAL. (1997). *Instrucción 004/97 de 11 de diciembre, sobre libros de cargo e inventario. Gestión de los escalones de aprovisionamiento de repuestos y pertrechos*. Armada.
- AJAL. (2023). *Visión del AJAL del Arsenal inteligente*.
- AJEMA. (1995). *Instrucción de Organización 1 de 1995, de 16 de marzo, sobre el Aprovisionamiento en la Armada*. Armada.
- Álvarez Rodríguez, E. M. (2017). *Diseño de una planta de extrusión de aluminio*. Universidad de Oviedo.
- Armada. (2017). *Concepto de Apoyo Logístico*.
- Armada. (2020). *Manual de Aprovisionamiento del Primer Escalón de la Armada*.
- Armada. (2022). *Manuel de Aprovisionamiento del Segundo Escalón de la Armada*.
- Balbás Calvo, A., Espinosa, M. del M., & Domínguez Somonte, M. (2018). *Últimos avances en la fabricación aditiva con materiales metálicos*. Universidad de Educación a Distancia.
- Bayly, P., Baroggi, R., Malavolti, M., Raimondi, G., Tavernier, G., Vignati, G., & Zecchini, G. (1979). *Aprovisionamiento, almacenaje y gestión de stocks*. Ediciones Deusto S.A.
- BEAMLER, A. M. (2020, octubre 27). *Impresión 3D en cobre*.
- Beltrán Rico, M., & Marcilla Gomis, A. (2012). *Tecnología de los polímeros. Procesado y propiedades*. Publicaciones Universidad de Alicante.
- Blanco Ibarra, F. (2002). *Contabilidad de costes y analítica de gestión para las decisiones estratégicas*. (Novena). Ediciones Deusto S.A.
- Bourell, D., Leu, M., & Rosen, D. (2009). *Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing*. University of Texas.
- Christoph, R., Muñoz, R., & Hernández, Á. (2017). *Manufactura Aditiva. Realidad y Reflexión*, 43, 97.



- Domingo, T. S., Velázquez-Gaztelu, P., Ortega, L., Sánchez, R., López, B., Bravo, L., Merino, M., Méndez, B., Reyes, G., Carreño, N., González-Rosón, A., Ovejero, H., Mayandía, P., & Andrés, L. (2021). *Revista del Ejército de Tierra español. Ejército de Tierra.*, 959.
- European Commission. (2016). *Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions.* European Commission.
- Fogliatto, F. (2010). *Mass Customization: Engineering and Managing Global Operations.* Springer.
- Fonfría Mesa, A. (2012). Sobre la naturaleza y alcance de la economía de la Defensa. *IEEE*, 79.
- Fonfría Mesa, A. (2013). *El gasto en defensa en España. Una nota metodológica.* IEEE.
- Fonfría Mesa, A. (2018). *Proyecciones del gasto en Defensa 2040.* IEEE.
- Frontiers of Engineering (Ed.). (2011). *Reports en Leading-Edge Engineering from de 2011 Symposium.* The National Academies Press.
- Gibson, Rosen, & Stucker. (2010). *Additive Manufacturing Technologies: Rapid prototyping to Direct Digital Manufacturing.* Springer.
- Gondra, K., Neira, S., Allue, S., Greaves, W., & Ruíz, J. (2022). Study of the manufacturing process of laminated composites of polypropylene reinforced with continuous fibres. *Revista de Materiales Compuestos.*
- Guillén, B. (2017, abril 5). *La impresora 3D, un invento de los 80 que triunfa 30 años después.*
- Hopkinson, N., Hague, R. J. M., & Dickens, P. M. (2006). *Rapid Manufacturing—An Industrial revolution for the digital age.* Publisher-John Wiley and Sons Ltd UK.
- ICAC. (2021). *Plan General de Contabilidad.* Instituto de Contabilidad y Auditoría de Cuentas.
- Kückelhaus, D. M. (2016). *3D Printing and the future.* DHL Trend Research.
- Laboratorio Nacional Lawrence Livermore (Ed.). (2017). *Investigadores de laboratorio logran un gran avance en acero inoxidable de grado marino impreso en 3D.*



- Lago Job, J. P. (2020). *Revisión de las técnicas de fabricación aditiva y sus aplicaciones*.
- Marín Requena, A. (2019). *Análisis del proceso del diseño para fabricación aditiva aplicado a componentes aeroespaciales*. Universidad Politécnica de Valencia.
- Mari, E. A. (2001). *Los materiales cerámicos. Aplicaciones estructurales, funcionales y artísticas*. (Primera). Alsina.
- Ministerio de Defensa. (1979). *Orden Ministerial de Defensa número 139/1979, de 17 de mayo, sobre el Sistega Integral de Gestión de Material en la Armada*. Armada.
- Ministerio de Defensa. (2020). *Plan de acción del Ministerio de Defensa para la transformación digital*. Ministerio de Defensa.
- Morales Güeto, J. (2005). *Tecnología de los materiales cerámicos*. Díaz Santos.
- Palou, N. (2016, abril 20). *Piezas cerámicas impresas en 3D ultrafuertes y resistentes a temperaturas extremas*.
- Pauly, M., Mitra, N. J., Giesen, J., Gross, M., & Guibas, L. J. (2005). *Example-Based 3D Scan Completion*.
- Puente Córdoba, J. (2013). *Síntesis y caracterización de un material híbrido de matriz polímera*. Autónoma de Nuevo León.
- Puiggali, J. (2009). *Estructura y propiedades de los polímeros. Física de los polímeros*. Publicaciones Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona.
- Rosanas Marti, J., & Ballarin Fredes, E. (1986). *Contabilidad de Costes para toma de decisiones*. Desclee de Brouwer S.A.
- Rubio, R., & Díaz, M. (2021). *Introducción a la fabricación aditiva*. Fundación Confemetal.
- Ruiz Monsalve, R. (2020). *Estudio de la viabilidad de la fabricación aditiva para la elaboración de componentes industriales en aleaciones de titanio*. 18(1), ix.
- Santos, D., & González, A. (2018). *Additive manufacturing feasibility study & technology demonstration*. European Defence Agency (EDA).



Winick, E. (2018, enero 2). Las cinco cosas más increíbles que la impresión 3D creó el año pasado. *MIT Technology Review*.

Wong, K. V., & Hernandez, A. (2012). A Review of Additive Manufacturing. *ISRN Mechanical Engineering*.

Zahera, M. (2012). *La fabricación aditiva, tecnología avanzada para el diseño y desarrollo de productos..*



## **ANEXOS**

### **ANEXO I. DENOMINACIONES Y SIGLAS DE LOS POLÍMEROS**

#### **EMPLEADOS EN FABRICACIÓN ADITIVA.**

### **ANEXO II. TIPOS DE BIENES: LOS REPUESTOS.**

### **ANEXO III. LISTADO DE ACRÓNIMOS.**



## ANEXO I

### DENOMINACIONES Y SIGLAS DE LOS POLÍMEROS EMPLEADOS EN FABRICACIÓN ADITIVA

- Acetal o Polyoxymethylene (POM)
- Acrylic o Polymethyl methacrylate (PMMA)
- Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS)
- Acrylonitrile Styrene Acrylate (ASA)
- High Impact Polystyrene (HIPS)
- Nailon o Polyamide (PA)
- Polycarbonate (PC)
- Polyethylene (PE)
- Polyether Ether Ketone (PEEK)
- Polyethylene Terephthalate (PET)
- Polyethylene Trimethylene Terephthalate (PETT)
- Polyethylene Yerephthalate Glycol-Modified (PETG)
- Polylactic Acid (PLA)
- Polypropylene (PP)
- Polystyrene (PS)
- Polyvinyl Alcohol (PVA)
- Polyvinyl chloride (PVC)
- Thermoplastic Elastomer (TPE)



## ANEXO II

### TIPOS DE BIENES: LOS REPUESTOS<sup>27</sup>

No todos los bienes merecen el mismo tratamiento desde el punto de vista logístico. La primera gran división de los bienes que puede realizarse es en bienes muebles y bienes inmuebles.

Los bienes muebles pueden ser o no objeto de aprovisionamiento. Por otra parte, los bienes inmuebles sólo son objeto de construcción y de mantenimiento.

Los bienes muebles se dividen en dos tipos: consumibles y no consumibles. Son consumibles aquellos cuya utilización provoca su inutilidad. Los no consumibles son aquellos cuya utilización no provoca necesariamente su inutilidad.

Los bienes consumibles se pueden clasificar en las siguientes categorías: pinturas, material diverso (oficina, limpieza,...), víveres, vestuario, combustibles y municiones.

Los bienes no consumibles se pueden distinguir en los siguientes grupos: sistemas, equipos, componentes, piezas y pertrechos. De estos cinco grupos solamente las piezas y los pertrechos pueden ser objeto de aprovisionamiento, llamándose repuestos a las piezas que lo son.

Cuando un repuesto se consume a un ritmo superior a una unidad en el PAL, se denomina repuesto de gran demanda. Cuando el ritmo de consumo sea inferior a una unidad se denomina repuesto de baja demanda.

A los repuestos de baja demanda que sean esenciales para la misión o función del BUI o que sean esenciales para la seguridad de la dotación, se les llama repuestos de seguridad.

Los repuestos que aun siendo de muy baja demanda están incluidos en el inventario del Segundo Escalón de Aprovisionamiento por afectar gravemente a la operatividad de un BUI y presentar una demora de obtención excesiva desde el punto de vista de las necesidades de la Armada, por ejemplo, ancla, eje de cola, hélice, antena de radar, etc. se denominan repuestos de gran seguridad.

---

<sup>27</sup> [Armada, 2012]



Algunos repuestos, por usarse en la realización de mantenimientos o para el aislamiento de averías, son solicitados continuamente. Estos repuestos se encuentran en poder de los utilizadores para que puedan disponer de ellos de forma inmediata en cualquier momento y denominan repuestos de emergencia y material anticipado.

Los repuestos de emergencia son voces a cargo de uso muy frecuente por parte de los mantenedores y que deben encontrarse a pie de equipo para su uso inmediato.

El material anticipado se clasifica a su vez en material MAM (en sus siglas en inglés, Maintenance Assistance Modules) y material OSI (en sus siglas en inglés, Operating Space Items):

- MAM: repuestos a cargo necesarios para realizar mantenimientos en los SEC por el procedimiento de sustitución progresiva y selectiva de módulos.
- OSI: repuestos en poder de los utilizadores.



### ANEXO III

#### LISTADO DE ACRÓNIMOS

3D	Tres Dimensiones
AJAL	Almirante Jefe del Apoyo Logístico
AJEMA	Almirante Jefe del Estao Mayor de la Armada
BUI's	Buques, Unidades e Instalaciones
CONLOG 2017	Conceptos del Apoyo Logístico 2017
FMS	Foreign Military Sales
GALIA	Gestión del Apoyo Logístico Integrado de la Armada
JAL	Jefatura del Apoyo Logístico
JAT	Jefatura de Aprovisionamiento y Transportes
LCSD	Ley de Contratos de Seguridad y Defensa
LCSP	Ley de Contratos del Sector Público
MINISDEF	Ministerio de Defensa
NSPA	NATO Suport and Procurement Agency
PAL	Periodo de Autonomía Logística
PAO	Periodo de Autonomía Operativa
SEC	Sistema / Equipo / Componente
SIGAPEA	Sistema Integrado de Gestión del Aprovisionamiento del Primer Escalón de la Armada
SIGMA-DOS	Sistema Integrado de Gestión de Material del Segundo Escalón en la Armada
TFM	Trabajo Fin de Máster