

IMPRESIÓN 3D A BORDO. ¿UNA NECESIDAD REAL Y VIABLE?

Introducción

EN la mar, la logística es un factor primordial y determinante para la preparación de la misión. Y ningún buque, por avanzado que sea, puede cumplirla sin la capacidad de mantener su operatividad frente a averías, desgaste o rotura de componentes, factores que disminuyen considerablemente la operatividad de nuestras unidades. Sin ir más lejos, la historia de la guerra naval es un vivo relato sobre la capacidad de reparar y sostener fuerzas en escenarios lejanos.

Un claro ejemplo histórico fue la guerra de Cuba en 1898, durante la cual quedó patente la falta de infraestructura logística y de capacidad de reparación en ultramar. Este hecho mermó gravemente la

operatividad de la escuadra española en el Caribe, que, lamentablemente, llegó a Santiago de Cuba tras una larga travesía sin apenas posibilidad de mantenimiento adecuado, hecho que condicionó en gran manera el desenlace de la batalla naval (Rodríguez González, 1998).

Hoy en día, la Armada despliega con regularidad en operaciones internacionales (véase la misión Atalanta en el océano Índico) y en entornos extremos, como en las conocidas campañas antárticas del BIO *Hespérides*. Cabe destacar que, en todos los casos, el mantenimiento y el suministro de repuestos, entre otros, representan uno de los retos más complejos de la operación.

BIO *Hespérides*
en la Campaña Antártica 2021-2022.
(Imagen facilitada por el autor)





El limitado espacio a bordo impide almacenar todo lo necesario. La dependencia de cadenas logísticas internacionales encarece y retrasa la llegada de piezas, y la falta de componentes puede obligar incluso a abandonar la zona de operaciones. En este marco, surge una cuestión decisiva: ¿es posible dotar a un buque de la capacidad de fabricar por sí mismo sus repuestos? Actualmente, nos parece todavía una idea utópica.

Pero la respuesta llega de la mano de la fabricación aditiva o impresión 3D, una tecnología que, lejos de ser experimental, ya ha demostrado su utilidad en sectores industriales críticos y que ofrece la posibilidad de transformar el modo en que la Armada gestiona su sostenimiento en operaciones. Sin embargo, ¿es viable a bordo de un buque de la Armada?

Contexto histórico y evolución de la fabricación aditiva en la logística naval

La adopción de la fabricación aditiva —comúnmente conocida como impresión 3D— en la logística naval de la Marina de los Estados Unidos (primera en implementarla) ha sido un proceso progresivo que comenzó en la década de 2010. En 2012, la US Navy inició sus investigaciones en esta tecnología con el objetivo de

explorar su potencial para la creación de prototipos y componentes no estructurales.

Cuatro años después, en 2016, se estableció una hoja de ruta para integrar la fabricación aditiva en sus operaciones, y para 2018 la Naval Sea Systems Command (NAVSEA) aprobó estándares técnicos para el uso de la impresión 3D en contextos navales. Este avance marcó un hito en la modernización de la logística naval, permitiendo la fabricación de piezas y componentes directamente a bordo de los buques, lo que redujo la dependencia de proveedores externos y mejoró la autonomía operativa.

Un ejemplo destacado de esta evolución fue la instalación de una impresora 3D híbrida de metal a bordo del USS *Bataan* (LHD-5) en 2022. Este sistema avanzado, conocido como Phillips Additive Hybrid, combina la tecnología de deposición de metal por láser con alambre de Meltio y un fresador de control numérico computarizado (CNC). Esta integración permitió la fabricación de piezas metálicas críticas directamente en el buque, reduciendo significativamente los tiempos de reparación y aumentando la disponibilidad operativa (NAVSEA, 2023).

Pero no sólo hay ejemplos en la US Navy, sino que también cabe destacar la incorporación

por parte de la empresa española Meltio en 2024 de este sistema en operaciones en la mar a bordo del portaviones francés *Charles de Gaulle* (Carrasco, 2024), o su incorporación en la Marina de la República de Corea, aportando soluciones de impresión 3D por soldadura de hilo metálico, permitiendo la creación de piezas metálicas de forma fiable y sostenible (Padilla, 2025).

Situación actual de la Armada y la fabricación aditiva

La Base Naval de Rota ha incorporado un centro de fabricación aditiva y reparación de piezas, inaugurado el 18 de septiembre de 2024, que permite producir repuestos y componentes mediante impresión 3D. Es de destacar que desde su apertura ha fabricado más de 1.000 piezas para distintas unidades de la Armada, que van desde cu-

latas de fusiles y oculares para visores nocturnos hasta piezas para misiles y motores navales.

Este proyecto nace del convenio firmado en diciembre de 2023 entre el Ministerio de Defensa y la empresa andaluza SICNOVA S. L., que contempla la creación de tres Centros de Especialización de Fabricación y Reparación de Piezas (CESFARE) en Albacete (Ejército del Aire y del Espacio), Córdoba (Ejército de Tierra) y Rota (Armada), así como un Centro de Desarrollo de Aplicaciones Especiales y Certificación de Procesos para los Sectores Militar y Defensa (CEDAEC) en Linares, Jaén (ubicación de la empresa), para coordinar y certificar la producción.

En concreto, el centro de la Base Naval de Rota ya utiliza tecnologías muy avanzadas, que incluyen el robot de la empresa Meltio, capaz de realizar piezas y prototipos con materiales



Piezas obtenidas en el Centro de Impresión 3D en la Base Naval de Rota. (Fuente: Ruiz, 2025)

tales como acero, titanio o metales inoxidables. De esta forma, da comienzo el desarrollo de una estrategia de innovación que integra I+D, formación de personal, colaboración con universidades (entre ellas, la UCA) y colaboración con empresas del sector naval. Además, en el ámbito internacional, «ofrece soluciones a las necesidades colectivas de los países de la OTAN» (Ruiz, 2025), como destacó el almirante Rodríguez Peña en una entrevista concedida al *Diario de Cádiz*. Así, se pretende crear un Centro de Excelencia para la Sostenibilidad de la Flota OTAN (CESFO), que formaría parte de los centros de excelencia OTAN, permitiendo de esta forma al centro español de fabricación aditiva apoyar a dicha identidad aliada.

Adicionalmente, la Armada ha adoptado el modelo conocido como Shipyard 4.0 en el astillero de Navantia Ferrol, integrando tecnologías avanzadas, como la fabricación aditiva, en la construcción de las fragatas *F-110*. Este enfoque innovador optimiza los procesos de producción mediante la digitalización de planos, simulaciones de ensamblaje y el uso de impresoras 3D para fabricar piezas y componentes complejos, reduciendo tiempos y costes. Además, mejora la eficiencia en la construcción naval al permitir la producción de repuestos críticos bajo demanda y facilitar la planificación de ensamblajes modulares (Navantia, 2025).

Ejército de Tierra. Proyecto Prometeo

En el panorama nacional, el Ejército de Tierra ha emergido como una de las instituciones más avanzadas en la implementación operativa de la fabricación aditiva. Lejos de limitarse a experiencias de laboratorio o prototipado conceptual, ha logrado integrar la impresión

3D de manera real y funcional en sus despliegues internacionales, especialmente en misiones en el Líbano, Mali y Letonia, donde las limitaciones logísticas hacen de esta tecnología una herramienta estratégica.

El Ejército de Tierra actualmente dispone de un Centro de Impresión 3D en la ciudad de Zaragoza, en la AALOG 41 (Agrupación de Apoyo Logístico número 41), el cual representa un ejemplo consolidado del grado de madurez tecnológica alcanzado por esta rama de las Fuerzas Armadas en el ámbito de la fabricación aditiva. Este centro forma parte de una estrategia más amplia de integración de la impresión 3D en entornos operativos y constituye una referencia nacional en cuanto a procesos, materiales y metodologías ya implantadas y en funcionamiento.

A diferencia de la Armada, cuyo modelo de impresión 3D aún se encuentra en fase de desarrollo y consolidación (respecto a su integración en buques), el Ejército de Tierra ha logrado desplegar impresoras de modelado por deposición fundida (FDM) directamente a la zona de operaciones, permitiendo la fabricación de piezas esenciales sin necesidad de esperar envíos desde territorio nacional. En estas misiones se utilizan impresoras robustas y adaptadas al entorno táctico, como la Ulti-Maker (básica), la MARTU (con capacidad de impresión en fibra de carbono) y la BCN3D (volumen de impresión 400 x 350 x 400 mm), que trabajan principalmente con tecnología FDM (*Fused Deposition Modeling*), considerada la más viable para entornos de misión debido a su simplicidad, bajo coste, facilidad de transporte y mantenimiento. Los materiales usados son principalmente polímeros y derivados, tales como nailon, nailon reforzado con fibra de carbono, PETG, ASA, ABS, propileno y TPU (termoplásticos de poliuretano).

Además, incluso han llegado a realizar diversas técnicas de posprocesamiento en aquellos casos para los que se requiere mayor resistencia en los materiales debido a su utilidad y empleo. Como ejemplo, introducen una técnica consistente en imprimir piezas huecas y posteriormente rellenarlas con resina epoxi, logrando así mejorar su robustez sin necesidad de mecanizado o posprocesado intensivo.

Cabe destacar que entre las piezas ya fabricadas hay elementos tan variados como selectores de luces para vehículos, tensores de cadenas de distribución de motores, engranajes de lunas, manguitos, componentes de válvulas simples e incluso piezas del sistema de combustible del *Centauro*, que si bien no afectan directamente a la seguridad operativa, sí resultan críticos para mantener la disponibilidad del material y evitar paradas prolongadas.

Otro aspecto importante es la estructura de trabajo remota, siendo un gran atractivo para el personal desplegado en zona de operaciones. De esta manera, desde Zaragoza, personal especializado diseña y adapta los archivos digitales de las piezas necesarias en misión y los remite al contingente desplegado para su impresión *in situ*. Esta forma de trabajo ha demostrado ser altamente eficaz, permitiendo una respuesta ágil, localizada y autónoma ante averías menores o roturas inesperadas. Un ejemplo consistiría en la necesidad por parte del contingente desplegado



Elemento generado en las instalaciones del Ejército de Tierra en Zaragoza, relleno con resina epoxi para dar resistencia. (Imagen facilitada por el autor)

de una pieza en concreto; ésta es solicitada a Zaragoza donde, mediante planos técnicos si se poseen o, en su defecto, desarrollando la pieza mediante un *software* libre, se emite al archivo imprimible directamente al personal desplegado en zona de operaciones, que únicamente ha de imprimir la pieza y, en caso de necesidad, aplicando alguna técnica de posprocesamiento. Además, como posible alternativa en la generación del fichero imprimible, se pueden emplear también diversos escáneres, los cuales facilitan la generación del fichero imprimible de la pieza solicitada en cuestión.

Por supuesto, la formación del personal en diseño asistido por ordenador (CAD) y en el uso

de slicers como Cura, FreeCAD o EAGLE ha sido clave en este proceso. Así, el Ejército de Tierra ha comenzado a generar de forma totalmente autónoma e independiente esta tecnología y a desplegarla bajo el nombre de Proyecto Prometeo, y actualmente imparte cursos de diseño gráfico al personal que despliega en zona de operaciones y apoya la fabricación aditiva. Esta formación técnica se oferta en el seno de la Brigada Logística (BRIOLOG), lo que ha permitido establecer una cultura de innovación práctica y operativa dentro del Ejército de Tierra.

Despliegue logístico de fabricación aditiva en zona de operaciones

En el marco del Proyecto Prometeo, el Ejército de Tierra envía a la zona de operaciones

contenedores en los cuales se realiza una instalación eléctrica, adecuada para integrar los siguientes elementos:

- Impresoras de fabricación aditiva.
- Una pequeña zona de posprocesamiento.
- Instalación para trabajar en su interior.

De esta forma, con aproximadamente dos operarios por contenedor (con previa formación en fabricación aditiva en la BRIOLOG), el contingente desplegado adquiere la capacidad de impresión 3D en zona de operaciones. Así, ante la necesidad de cualquier pieza, dicho personal desarrolla o, en su defecto, solicita el fichero imprimible a la AALOG 41, que lo remite para su impresión en zona de operaciones y posterior posprocesamiento en caso necesario.



Módulo de impresión 3D del Ejército de Tierra enviado a la zona de operaciones. Contenedor Prometeo. (Imagen facilitada por el autor)

Sin embargo, hay una gran diferencia operacional y logística entre el Ejército de Tierra y la Armada, y es que el primero dispone de la capacidad de transportar y ubicar tantos contenedores habilitados para impresión 3D como tecnologías necesiten en su interior. Por ello, se espera que exista un módulo de impresión para cada necesidad existente.

Un claro ejemplo podría ser un módulo de fabricación aditiva empleando la tecnología FDM con capacidad de impresión de unas piezas con unas características totalmente distintas a los materiales metálicos y, en su defecto, un segundo contenedor con la tecnología para la fabricación de estas piezas metálicas, lo que supondría condiciones de humedad, trabajo y equipamiento totalmente distintas a las descritas anteriormente, y de esta manera conseguir el despliegue de varios contenedores en zona de operaciones, con las tecnologías más comunes necesarias para la elaboración del mayor rango de piezas posibles.

Armada. Impresión 3D a bordo

Lamentablemente, debido a la compartimentación a bordo de los buques de la Armada, así como a la optimización del espacio para el combate, no parece la solución anterior del Ejército de Tierra (con la posibilidad de despliegue de varios contenedores con distintas tecnologías de fabricación aditiva) la mejor para el entorno naval.

Sin embargo, ¿y si se incorporara un tipo de tecnología y materiales que satisfaga el mayor rango posible de necesidades a bordo de un buque de la Armada? Sin lugar a dudas, éste sería el horizonte que podría otorgar una solución a la fabricación aditiva en nuestros buques. De esta forma, junto a la reciente

incorporación del Centro de Fabricación Aditiva de la Armada en Rota, incluso se podría imitar el modelo actual del Ejército de Tierra en cuanto al soporte territorio nacional-zona de operaciones, consiguiendo una aportación logística y operacional real y viable.

Desafíos y necesidades

La integración de la fabricación aditiva mediante tecnologías de impresión 3D por extrusión a bordo de los buques de la Armada representa una posibilidad técnica cada vez más tangible, impulsada por el avance de los materiales poliméricos funcionales, la miniaturización de los sistemas de impresión y la creciente digitalización de los procesos logísticos y de mantenimiento en el ámbito naval.

A medida que las tecnologías de impresión por filamento fundido (FDM/FFF) han madurado, ha surgido una nueva generación de impresoras robustas, compactas y con capacidad para operar con una gama cada vez más amplia de materiales, incluidos aquéllos especialmente diseñados para ambientes exigentes como el marino (véanse por ejemplo las poliamidas reforzadas, TPE, PP, PETG cargado, etc.). Esto allana el camino hacia su integración operativa directa en plataformas navales.

La posibilidad de fabricar bajo demanda piezas de repuesto, carcasas, soportes, componentes personalizados e incluso elementos estructurales representa un cambio de paradigma en la logística a bordo, con un impacto directo en la eficiencia, autonomía y resiliencia operativa de los buques en despliegue.

No obstante, convertir esta posibilidad en una realidad operativa consolidada requiere abordar una serie de desafíos técnicos, logís-

ticos y organizativos que esta investigación se propone estudiar y resolver:

—Estabilidad operativa a bordo: uno de los primeros interrogantes es la capacidad de operar impresoras 3D en un entorno móvil y con condiciones variables (vibraciones, inclinación, humedad). Para ello, es necesario evaluar la necesidad de sistemas de nivelación activa, bastidores antivibraciones y carcasas de aislamiento térmico y ambiental que aseguren impresiones fiables incluso en condiciones marítimas complejas. Digamos que, en cierta forma, hace falta «navalizar» todo el entramado de fabricación aditiva que se quisiera incorporar a bordo, incluso debiéndose limitar las condiciones de estabilidad para su empleo.

—Espacio disponible y condiciones ambientales: la elección del equipo debe adaptarse a las restricciones espaciales del buque y a la posibilidad de mantener condiciones estables de temperatura, humedad y ventilación. Esto implica desarrollar soluciones compactas, seguras y con bajo mantenimiento, capaces de operar en salas técnicas, cámaras específicas o *containers* modulares adaptados. Sin lugar a dudas, este hecho condiciona en gran medida la tecnología de fabricación aditiva a incorporar a bordo. Por ello, directamente todas las tecnologías asociadas con impresiones de polvo de metal o similares no se consideran adecuadas para el entorno marino, debido a las condiciones ambientales óptimas necesarias para su empleo.

Así, se considera la impresión bajo la tecnología FDM la más adecuada, barata, y asequible para ser aplicada en los buques de la Armada.

—Formación del personal y protocolos de operación: la impresión 3D a bordo sólo será viable si el personal cuenta con las competencias técnicas necesarias para operar los equipos,

mantenerlos y realizar tareas básicas de diseño y posprocesado. Para ello, es necesario proponer programas de formación adaptados al entorno militar, con especial atención a la operatividad en situaciones de alta exigencia. Así, el Centro de Impresión 3D en la Base Naval de Rota podría ofertar cursos de formación y adiestramiento para el personal que lo necesite en sus unidades, los cuales se programarían periódicamente compatibilizando los ciclos logísticos/operativos de los buques.

—Gestión de archivos digitales y modelos CAD: la estandarización y digitalización del catálogo de repuestos es clave. Se requiere un sistema de gestión digital seguro, con una base de datos de modelos paramétricos validados, accesibles desde cada buque y con posibilidad de modificaciones *in situ* según las necesidades emergentes.

Para ello, como se ha mencionado anteriormente, podrían ser incorporados dichos modelos a las distintas aplicaciones logísticas de la Armada, archivos a los cuales se accedería desde cualquier buque en caso necesario para poder desarrollar la impresión a bordo.

A su vez, la empresa SICNOVA S. L., a través de su centro CEFARE y el Centro de Impresión 3D ubicado en la Base Naval de Rota, podría también otorgar soluciones tecnológicas y de desarrollo de modelos paramétricos para los buques. De esta forma, imitando en cierta manera la idea del Ejército de Tierra, las unidades en zona de operaciones contarían con el apoyo necesario para la obtención de los modelos para su impresión a bordo, o incluso desde territorio nacional, empleando para ello equipos más adecuados o soluciones específicas.

—Posprocesado y validación de componentes: dado que muchas piezas requerirán un acabado posterior para garantizar su funcionalidad (endurecimiento, recubrimientos, curado UV o

térmico), es necesario asimismo estudiar la viabilidad de técnicas de posprocesado a bordo en condiciones controladas. Una posible solución puede ser el empleo de resinas epóxicas, con las que se adquieren, de forma rápida y viable, mejores propiedades mecánicas.

—Estrategia de implementación progresiva: no todos los buques tienen las mismas necesidades ni capacidades de integración inmediata. Por ello, se considera además necesario proponer una hoja de ruta escalonada que permita la introducción de esta tecnología de forma modular y adaptable, comenzando por plataformas logísticas o de mando (véanse el BAA *Castilla/Galicia*, LHD *Juan Carlos I* o BAC *Patiño/Cantabria*) y extendiéndose progresivamente a otras unidades.

Una realidad posible. Aplicación de la fabricación aditiva por extrusión y posprocesamiento de repuestos resistentes a ambientes corrosivos

Bajo el pretexto de que la disponibilidad y funcionalidad de nuestros equipos a bordo (incluyendo los componentes que logran su funcionamiento) es crucial para conseguir una operatividad continua en la consecución de la misión y teniendo en cuenta los costes asociados que supone la adquisición de componentes y materiales en puertos extranjeros (además del retraso que esto puede ocasionar), se considera necesaria la impresión 3D a bordo de los buques de la Armada.

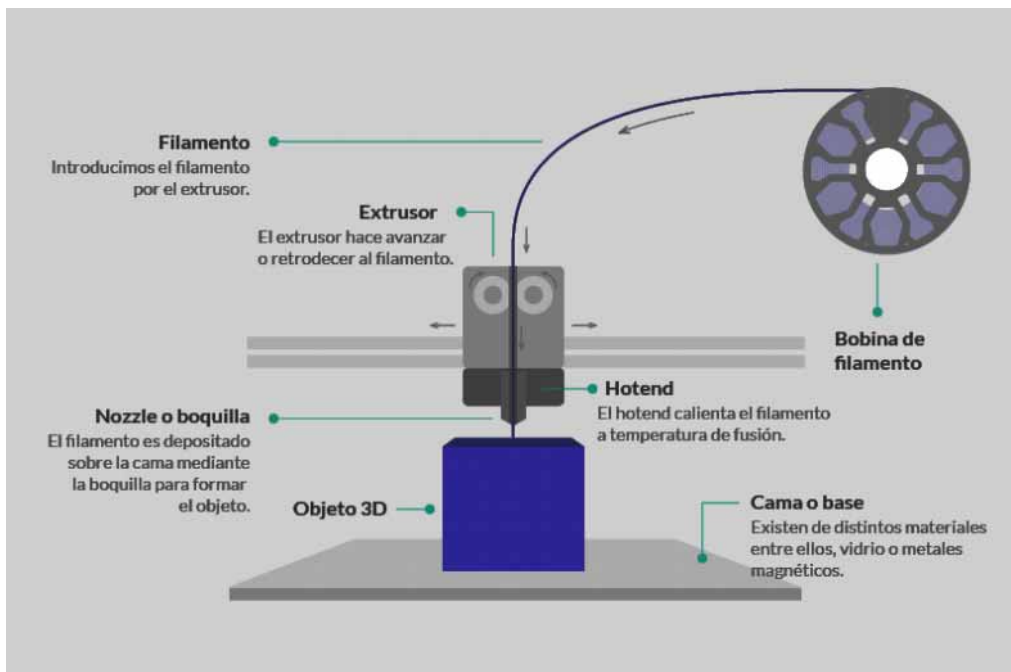
Para ello, debemos destacar la tecnología de impresión 3D bajo FDM (extrusión), que se perfila como una herramienta con alto potencial estratégico, que permite autonomía técnica, mejora las capacidades de respuesta operativa y reduce significativamente la dependencia de suministros externos durante misiones prolongadas o en zonas de difícil ac-

ceso logístico. Por tanto, se considera la técnica de fabricación aditiva mediante extrusión la más adecuada para introducir en los buques de la Armada, debido a su escaso coste, gran versatilidad, facilidad de manejo, espacio reducido, condiciones ambientales y la gran cantidad de materiales que puede utilizar.

En su lugar, otras tecnologías, como la fusión de leche en polvo, la deposición de energía localizada o la fotopolimerización en tanque o cuba, no se consideran adecuadas para ser incorporadas en buques de la Armada debido a las necesidades espaciales y ambientales para su empleo, además de tener un coste mucho mayor respecto a la tecnología y materiales de la impresión FDM.

Adicionalmente, el posprocesamiento es una etapa —aunque no siempre necesaria— que resulta crucial en la fabricación aditiva, ya que mejora las propiedades mecánicas, la apariencia, así como la funcionalidad de las piezas impresas. Por ello, encontramos diversos métodos comunes de posprocesamiento, tales como el lijado, el pulido, el tratamiento térmico y la aplicación de recubrimientos protectores. De esta forma, el posprocesamiento no sólo mejora la estética de las piezas impresas, sino que también puede ser fundamental para su rendimiento en aplicaciones específicas. En concreto, en ambientes corrosivos como los marítimos, el recubrimiento adecuado puede extender significativamente la vida útil de una pieza y mejorar la resistencia mecánica y la precisión dimensional, vitales para componentes que deben encajar con precisión en ensamblajes.

En la actualidad, los materiales comúnmente utilizados en FDM son los termoplásticos semicristalinos o amorfos, entre los cuales destacan el PLA (ácido poliláctico), el ABS (acrilonitrilo



Esquema básico de fabricación aditiva mediante extrusión. (Imagen facilitada por el autor)

butadieno estireno), el PETG (tereftalato de polietileno glicolizado), el ASA (acrilonitrilo estireno acrilato), el PA (poliamidas como PA6, PA11 y PA12) y el PP (polipropileno).

Más allá de estos polímeros base, el desarrollo de filamentos compuestos o cargados ha permitido extender considerablemente el alcance de la impresión por extrusión. Estos materiales consisten en matrices poliméricas reforzadas con partículas cerámicas, metálicas, fibras de carbono o vidrio o incluso aditivos funcionales, como nanopartículas conductoras o antimicrobianas. Por ejemplo, el uso de PLA, PA o PETG cargados con fibras de carbono ha demostrado mejorar significativamente la rigidez y resistencia mecánica de las piezas, aunque a costa de cierta reducción en la ductilidad. En entornos como el naval, donde la resistencia a la fatiga, el impacto o la corrosión son factores críticos, estos materiales representan

una solución potencialmente viable siempre que se estudien sus mecanismos de degradación en ambientes marinos.

Por otra parte, mencionar la existencia de materiales avanzados como el polietileno de alta densidad (PEAD) y los elastómeros termoplásticos (TPE), que ofrecen resistencia química y flexibilidad, respectivamente. Estos últimos permiten fabricar piezas elásticas, como juntas o amortiguadores, lo que amplía las posibilidades de aplicación en entornos exigentes, pudiendo llegar a ser atractivos para el medio marino.

En definitiva, el abanico de materiales disponibles para impresión 3D por extrusión se ha expandido considerablemente en la última década, permitiendo abordar aplicaciones que hasta hace poco eran impensables para esta tecnología. La selección del material más adecuado para un entorno naval dependerá



de una combinación de factores, que incluyen la resistencia mecánica requerida, la exposición a agentes corrosivos, la posibilidad o no de realizar posprocesado a bordo y las limitaciones propias del entorno operativo del buque.

Conclusiones y posibles líneas de futuro:

La evolución de la fabricación aditiva, especialmente mediante tecnologías de impresión 3D por extrusión (FDM), ha demostrado su capacidad para transformar de forma significativa la logística militar, aportando soluciones inmediatas, sostenibles y adaptables en entornos operacionales exigentes. Tal y como se ha visto en el caso del Ejército de Tierra con el Proyecto Prometeo, esta tecnología no sólo es viable, sino que ya es una realidad operativa consolidada en escenarios internacionales.

En el caso de la Armada, si bien su implementación a bordo de buques presenta retos específicos, tales como la limitación del espacio, la estabilidad operacional y las condiciones ambientales marinas, la existencia del Centro de Fabricación Aditiva en la Base Naval de Rota y la colaboración con empresas nacionales como SICNOVA, Melitio, y Navantia, pueden asentar las bases

necesarias para una futura integración realista y funcional de esta capacidad en el entorno naval.

De esta forma, la apuesta por la impresión FDM con materiales resistentes a ambientes corrosivos marinos, combinada con técnicas de posprocesado sencillas pero eficaces, puede establecer un modelo escalable, robusto y adaptado a las necesidades reales de la flota, aumentando sus posibilidades logísticas y operativas durante la consecución de la misión. Lógicamente, no será un camino sencillo e inmediato, por lo que deberán tenerse en cuenta para su integración y adaptación a bordo las siguientes líneas de futuro:

- Desarrollo de un sistema modular de impresión 3D navalizado: capaz de diseñar e implementar estaciones compactas de impresión FDM optimizadas para su uso en buques de la Armada, incorporando aislamiento térmico, sistemas antivibración/estabilización y climatización integrada.

—Integración en la cadena logística digital de la Armada: creando una base de datos centralizada de piezas validadas, accesible desde los buques y que permita la fabricación bajo demanda de componentes críticos, con soporte desde territorio nacional en el diseño y desarrollo de modelos CAD.

—Formación técnica del personal embarcado: estableciendo itinerarios formativos específicos para las dotaciones impartidos *online* desde el Centro de Impresión 3D de la Base Naval de Rota, que permitan operar, mantener y diseñar piezas utilizando herramientas CAD y técnicas básicas de posprocesado.

—Colaboración con la industria y centros de I+D: fortaleciendo alianzas con empresas y universidades especializadas para el desarrollo de nuevos materiales, técnicas de validación y soluciones de impresión adaptadas al entorno marino, posicionándonos así a la vanguardia respecto al resto de marinas.

—Evaluación operacional en escenarios reales: mediante pruebas piloto a bordo de unidades seleccionadas, en contextos reales de misión, validar la viabilidad técnica y logística del sistema y establecer protocolos operativos estándares.

En definitiva, la impresión 3D no debe considerarse una solución futurista o meramente experimental, sino una herramienta concreta y transformadora, capaz de incrementar significativamente la autonomía operativa de los buques, reducir los costes logísticos y aumentar la resiliencia del sistema naval en su conjunto. Si se abordan de forma adecuada los desafíos actuales, la fabricación aditiva puede convertirse en un pilar clave del sostenimiento naval del siglo XXI.

BIBLIOGRAFÍA

- Rodríguez González, A. R. (julio 1998): «El combate de Santiago de Cuba». *Revista General de Marina*.
- Carrasco, B. (19 de julio de 2024): «La Marina francesa valida la tecnología de impresión 3D de metal de la española Meltio». *Infodefensa*, <https://www.infodefensa.com/texto-diario/mostrar/4933582/armada-francesa-tambien-opta-tecnologia-impresion-3d-metal-espanola-meltio>
- Navantia (2025): «Navantia's F-110 frigate, equipped with advanced technology and defense capabilities, represents a significant leap towards the Smart Ship concept of the 21.st century», <https://www.navantia.es/en/product/f110/#:~:text=With%20cutting%20edge%20technology%20and,based%20on%202%2C000%20light%20points>
- NAVSEA (15 de agosto de 2023): «NAVSEA Improves Readiness of USS Bataan with New 3D Printing Capability». *America's Navy*, <https://www.navy.mil/Press-Office/News-Stories/Article/3494213/navsea-improves-readiness-of-uss-bataan-with-new-3d-printing-capability/>
- Padilla, S. (30 de septiembre de 2025): «Meltio introduce su impresión 3D en la Defensa asiática». *Cadena Ser, Linares*, <https://cadenaser.com/andalucia/2025/03/27/meltio-introduce-su-impresion-3d-en-la-defensa-asiatica-radio-linares/>
- Ruiz, A. (8 de mayo de 2025): «El centro de fabricación de piezas 3D para la Armada que ya funciona en la Base de Rota». *Diario de Cádiz*, https://www.diariodecadiz.es/noticias-provincia-cadiz/centro-fabricacion-piezas-3d-armada-base-rota_0_2003788747.html