

FABRICACIÓN ADITIVA DESPLEGABLE: SOLUCIONES CONTENERIZADAS PARA RESILIENCIA OPERATIVA EN ENTORNOS CRÍTICOS / DEPLOYABLE ADDITIVE MANUFACTURING: CONTAINERIZED SOLUTIONS FOR OPERATIONAL RESILIENCE IN CRITICAL ENVIRONMENTS

Juan Carlos Piquero Camblor¹, Luis Ignacio Suárez Ríos², Manuel Antonio García García³, Miguel Ángel Viñuela Marey⁴

¹ Idonial Centro Tecnológico, Gijón, España, juancarlos.piquero@idonial.com

² Idonial Centro Tecnológico, Gijón, España, luisignacio.suarez@idonial.com

³ Idonial Centro Tecnológico, Gijón, España, mantonio.garcia@idonial.com

⁴ Idonial Centro Tecnológico, Gijón, España, miguelangel.vinuela @idonial.com

Resumen

En escenarios de emergencia, conflicto o intervención sobre infraestructuras críticas, la dependencia de cadenas de suministro centralizadas representa una vulnerabilidad estratégica. El transporte de repuestos y componentes incrementa los tiempos de respuesta y reduce la resiliencia operativa en entornos desplegados.

En este marco, IDONIAL ha desarrollado soluciones aerotransportables en contenedor que integran sistemas avanzados de fabricación aditiva industrial, configurando microfábricas móviles capaces de desplegarse rápidamente en campo. Estas plataformas permiten fabricar componentes estructurales y funcionales directamente en el punto de necesidad, reduciendo significativamente los plazos logísticos y optimizando recursos.

Los desarrollos se han ejecutado en proyectos para la Agencia Europea de Defensa (EDA) así como para el Ejército Español. Además, parte de las soluciones han sido evaluadas en ejercicios bajo estándares OTAN, obteniéndose resultados favorables que consolidan la fabricación aditiva desplegable como una tendencia tecnológica estratégica para defensa, seguridad e infraestructuras críticas.

Palabras clave: Fabricación aditiva, impresión 3D, tecnología desplegable, fábrica móvil, despliegue rápido.

1. Contexto operativo y necesidad tecnológica

Los escenarios actuales de defensa, gestión de emergencias e intervención sobre infraestructuras críticas están experimentando una transformación significativa marcada por el aumento de la complejidad operativa, la dispersión geográfica de las operaciones y la creciente vulnerabilidad de las cadenas logísticas globales. En este contexto, la capacidad de mantener la continuidad operativa en entornos degradados, desconectados o de difícil acceso se ha convertido en un factor estratégico para garantizar la resiliencia de las organizaciones y la disponibilidad funcional de los sistemas desplegados [1].

Las operaciones en entornos críticos presentan habitualmente limitaciones severas relacionadas con el acceso a suministros, la disponibilidad de repuestos y la capacidad de mantenimiento avanzado. En operaciones militares, misiones humanitarias, despliegues temporales o actuaciones sobre infraestructuras estratégicas, la dependencia de cadenas logísticas centralizadas implica tiempos elevados de reposición, incremento de costes operativos y una mayor exposición de personal y medios durante las tareas de abastecimiento [2]. Esta problemática resulta especialmente relevante en escenarios donde las infraestructuras de transporte pueden verse limitadas, degradadas o directamente inaccesibles.

La creciente complejidad tecnológica de las plataformas actuales incrementa además la necesidad de disponer de capacidades de mantenimiento y reparación avanzadas directamente en el entorno operativo. La indisponibilidad de un único componente crítico puede comprometer la continuidad funcional de sistemas completos, afectando tanto a la operatividad de plataformas como a la ejecución de las misiones asociadas.

En este contexto, tanto la OTAN como la Unión Europea y el Ministerio de Defensa español identifican la autonomía tecnológica, la resiliencia logística y la fabricación avanzada como capacidades estratégicas prioritarias para los próximos años. La Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa (ETID 2026) establece explícitamente la necesidad de desarrollar capacidades tecnológicamente avanzadas que refuercen la autonomía estratégica nacional y la sostenibilidad operativa de las Fuerzas Armadas [3]. Del mismo modo, la Unión Europea, dentro de su estrategia de autonomía estratégica y resiliencia industrial, subraya la importancia de reducir dependencias críticas y fortalecer las capacidades industriales y tecnológicas de defensa [4].

Dentro de este marco, la fabricación avanzada distribuida se identifica como una de las tecnologías habilitadoras para incrementar la autonomía operativa y reducir la huella logística en despliegue [2]. La posibilidad de fabricar o reparar componentes directamente en el punto de necesidad permite reducir significativamente los tiempos de respuesta, minimizar la dependencia de suministros externos y aumentar la disponibilidad operativa de plataformas, equipos e infraestructuras críticas.

Paralelamente, las tendencias actuales en sostenimiento logístico evolucionan desde modelos basados en grandes cadenas de suministro centralizadas hacia estrategias más distribuidas, flexibles y resilientes. Este cambio de paradigma persigue reducir vulnerabilidades operativas y aumentar la capacidad de adaptación frente a escenarios dinámicos, impredecibles o prolongados en el tiempo.

En consecuencia, disponer de capacidades de fabricación avanzada desplegable constituye una necesidad tecnológica estratégica para mejorar la resiliencia operativa en escenarios críticos. Estas soluciones permiten evolucionar desde un modelo logístico basado en el suministro remoto de repuestos hacia un modelo de producción distribuida en el punto de necesidad, capaz de aumentar la autonomía, reducir tiempos de respuesta y reforzar la continuidad funcional de los sistemas desplegados.

2. Tecnologías avanzadas de fabricación aditiva

La fabricación aditiva, también conocida como impresión 3D, agrupa un conjunto de procesos de fabricación digital basados en la generación de componentes físicos mediante la adición sucesiva de material a partir de un modelo tridimensional. A diferencia de los métodos

convencionales de fabricación sustractiva, como el fresado, el torneado o el mecanizado, estas tecnologías construyen la pieza capa a capa, lo que permite obtener geometrías complejas, estructuras aligeradas y diseños funcionalmente optimizados con una elevada libertad de diseño [6].

El proceso comienza habitualmente con la creación de un modelo digital mediante herramientas CAD o mediante técnicas de digitalización e ingeniería inversa. Posteriormente, la geometría se prepara para fabricación mediante operaciones de orientación, laminado, definición de parámetros de proceso y generación de trayectorias. Finalmente, el equipo ejecuta la deposición, fusión, polimerización o consolidación del material, según la tecnología empleada, pudiendo requerirse etapas posteriores de retirada de soportes, tratamientos térmicos, mecanizado, inspección o acabado superficial.

La cadena de valor asociada a estas tecnologías incluye, por tanto, un conjunto de etapas interrelacionadas que van desde el diseño digital y la preparación del proceso hasta la fabricación, el postprocesado, la inspección y la validación funcional del componente final. Esta visión integral resulta especialmente relevante en aplicaciones industriales, donde la calidad de la pieza no depende únicamente del equipo de impresión, sino también del control de todo el flujo digital y productivo.



Figura 1. Cadena de valor de la fabricación aditiva

Una de las principales ventajas de estas tecnologías es su capacidad para fabricar piezas personalizadas, series cortas y componentes bajo demanda sin necesidad de utillajes específicos. Esto reduce los tiempos de desarrollo, facilita la iteración de diseño y permite responder con rapidez a necesidades cambiantes. En contextos industriales y operativos, esta flexibilidad resulta especialmente relevante para la fabricación de repuestos, útiles, prototipos funcionales o componentes adaptados a requisitos concretos [7].

La impresión 3D industrial permite además trabajar con una amplia variedad de materiales. Entre ellos se incluyen polímeros técnicos, resinas fotopoliméricas, metales, aleaciones especiales, materiales compuestos reforzados con fibra, cerámicas y materiales híbridos. Esta diversidad amplía significativamente el campo de aplicación de la tecnología, desde piezas ligeras de uso funcional hasta componentes metálicos sometidos a altas exigencias mecánicas, térmicas o ambientales [8].

Desde el punto de vista tecnológico, existen diferentes familias de procesos aditivos, entre las que destacan la extrusión de material, la fotopolimerización en cuba, la fusión de lecho de polvo,

la deposición directa de energía, la inyección de aglutinante y la laminación de hojas. Cada una de ellas presenta ventajas y limitaciones específicas en términos de precisión, tamaño de pieza, productividad, materiales disponibles, coste y requisitos de postprocesado. Por ello, la selección de la tecnología debe realizarse en función de la aplicación final, las prestaciones requeridas y las condiciones reales de operación.

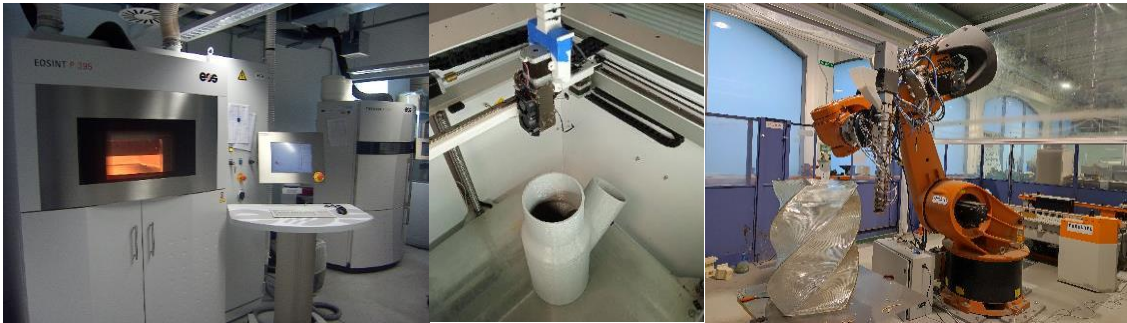


Figura 2. Diferentes tecnologías aditivas, fuente IDONIAL (Izda: PBF sinterizado láser en cama de polvo en metal. Centro: FDM Fused Deposition Modeling. Dcha: Big Area Additive Manufacturing - BAAM)

En el ámbito industrial, estas capacidades han impulsado la adopción de la manufactura capa a capa en sectores como el aeroespacial, automoción, salud, energía, construcción y defensa. En aplicaciones aeroespaciales, permite obtener componentes ligeros y optimizados; en el sector médico, facilita la fabricación de implantes, prótesis y dispositivos personalizados; y en entornos industriales, contribuye a reducir plazos de desarrollo, optimizar inventarios y fabricar repuestos bajo demanda.

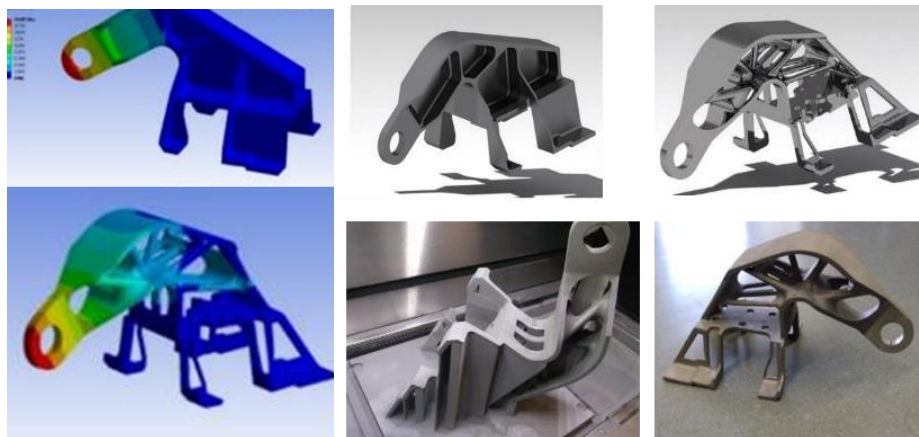


Figura 3. Componente desarrollado por IDONIAL para el sector aeronáutico. Estructura optimizada topológicamente para conseguir reducción de peso. Proceso de fabricación PBF en Ti6Al4V.

Asimismo, estas tecnologías desempeñan un papel creciente en la sostenibilidad industrial. La fabricación bajo demanda permite reducir stocks físicos, minimizar excedentes y disminuir la necesidad de transporte de componentes. Además, en determinadas aplicaciones, la libertad geométrica permite diseñar piezas más ligeras, reducir consumo de material y mejorar la eficiencia funcional del componente final.

Por tanto, más allá de su papel inicial como herramienta de prototipado, la fabricación aditiva se ha consolidado como una tecnología habilitadora para nuevos modelos de producción digital, flexible y eficiente. Su capacidad para conectar diseño, material, proceso y validación en un flujo integrado la convierte en una herramienta clave para la transformación de los sistemas industriales y para el desarrollo de componentes avanzados adaptados a requisitos específicos.

3. Sistemas contenerizados de fabricación avanzada desplegable

La creciente demanda de soluciones de fabricación descentralizada, capaces de operar directamente en el entorno de misión, ha impulsado el desarrollo de plataformas industriales móviles orientadas a mejorar la resiliencia operativa y reducir la dependencia de cadenas logísticas centralizadas. En sectores como defensa, emergencias e infraestructuras críticas, la posibilidad de fabricar o reparar componentes en el punto de necesidad constituye una capacidad de alto valor estratégico [9].

En este contexto, la integración de tecnologías de fabricación avanzada en plataformas contenerizadas representa una evolución hacia modelos de producción más flexibles, resilientes y adaptables. Frente a los esquemas tradicionales basados en instalaciones industriales fijas, los sistemas desplegables permiten trasladar capacidades productivas al propio entorno operativo, reduciendo la dependencia de infraestructuras centralizadas y acortando significativamente los tiempos de respuesta ante necesidades críticas.

Estos sistemas pueden entenderse como microfábricas móviles concebidas para integrar, en un volumen transportable y protegido, equipos de fabricación aditiva, digitalización, postprocesado, inspección y soporte auxiliar. Su objetivo principal es proporcionar capacidad de fabricación, reparación o adaptación de componentes directamente en campo, especialmente en escenarios donde el suministro convencional de repuestos resulta lento, costoso o vulnerable [10].

El uso de contenedores o shelters técnicos como base de integración aporta ventajas relevantes desde el punto de vista logístico y operativo. Estas plataformas facilitan el transporte por medios terrestres, marítimos o aéreos, permiten una rápida instalación en despliegue y ofrecen una envolvente estructural adecuada para proteger los equipos frente a condiciones ambientales exigentes. Además, su configuración modular facilita la adaptación del sistema a diferentes misiones, tecnologías de fabricación y niveles de autonomía requeridos.

Desde el punto de vista funcional, un sistema contenerizado de fabricación avanzada debe integrar no solo el equipo principal de producción, sino también todos los subsistemas necesarios para garantizar una operación estable y segura. Entre ellos se incluyen sistemas de climatización y control ambiental, alimentación eléctrica, extracción y filtrado, almacenamiento de materiales, herramientas auxiliares, sistemas de monitorización, equipos de metrología y soluciones de gestión digital de órdenes de fabricación.

Otro aspecto clave es la rapidez de despliegue. Estos sistemas deben poder transportarse, instalarse y ponerse en operación en plazos reducidos, con una dependencia mínima de infraestructuras externas. Para ello, resulta necesario diseñar soluciones compactas, robustas y ergonómicas, que faciliten el acceso a los equipos, la manipulación de materiales, la seguridad del personal y el mantenimiento de los subsistemas integrados.

En los últimos años se han desarrollado diferentes iniciativas orientadas a validar este tipo de capacidades en escenarios reales de operación. Entre ellas destacan diversos programas impulsados en el ámbito europeo de defensa, donde se han evaluado laboratorios de fabricación aditiva aerotransportables y autónomos para soporte logístico avanzado en despliegue.

4. Diseño, desarrollo y validación de sistemas desplegados: Casos de éxito

En el ámbito de los sistemas desplegados de fabricación avanzada, IDONIAL fue una de las primeras entidades europeas en desarrollar y validar plataformas autónomas concebidas específicamente para operar en entornos de defensa y escenarios desplegados. Estos desarrollos estuvieron orientados a demostrar la viabilidad de integrar capacidades de diseño digital, fabricación aditiva, digitalización y postprocesado dentro de infraestructuras transportables y autosuficientes, capaces de proporcionar soporte técnico y productivo directamente en el entorno operativo.

Los trabajos realizados permitieron abordar aspectos relacionados con la integración de equipos industriales avanzados en plataformas compactas, la autonomía funcional de los sistemas, la resistencia estructural durante el transporte y la capacidad de operación en condiciones reales de despliegue. Asimismo, sirvieron para validar el potencial de la fabricación distribuida como herramienta para reducir tiempos logísticos, aumentar la resiliencia operativa y mejorar el sostenimiento técnico en campo.

4.1. Laboratorio aerotransportable de fabricación avanzada – Proyecto AMFaD

Uno de los primeros desarrollos realizados en este ámbito fue el proyecto *AMFaD – Additive Manufacturing Feasibility Study and Technology Demonstration*, desarrollado entre 2016 y 2017 [11] con el objetivo de analizar la viabilidad de integrar capacidades avanzadas de fabricación en entornos operativos desplegados.

Dentro del proyecto se trabajó en el diseño, fabricación e integración de un laboratorio autónomo de fabricación avanzada concebido específicamente para ser aerotransportable y desplegable en escenarios operativos. El desarrollo del sistema requirió abordar aspectos relacionados con la resistencia estructural, la distribución funcional de equipos, la reducción de peso, la estabilidad durante el transporte y la operatividad del conjunto bajo condiciones de despliegue.

La plataforma se configuró como un sistema contenerizado autosuficiente, capaz de integrar diferentes tecnologías de fabricación aditiva junto con herramientas de diseño digital, sistemas de digitalización y equipos auxiliares de postprocesado. Todo ello se integró dentro de una infraestructura compacta preparada para operar de forma autónoma en campo, minimizando la dependencia de recursos externos.

Entre las capacidades incorporadas se incluían estaciones CAD para diseño y preparación de fabricación, sistemas de impresión 3D orientados a la producción de componentes poliméricos, así como diferentes herramientas auxiliares destinadas a operaciones de acabado, ajuste y validación de piezas fabricadas. Esta combinación permitía disponer de un flujo completo de trabajo digital y productivo directamente en el entorno de operación.

Uno de los principales condicionantes del desarrollo fue garantizar la capacidad de transporte aéreo del sistema completo. Para ello, se optimizó la arquitectura estructural del contenedor, la

integración de los equipos y la distribución interior de cargas, permitiendo su despliegue mediante plataformas aéreas de transporte táctico. Asimismo, se diseñaron soluciones específicas para asegurar la estabilidad de los equipos durante el transporte y facilitar una rápida puesta en operación una vez desplegado.

El sistema fue validado en la Base Aérea de Zaragoza, en España, donde se evaluaron aspectos relacionados con la transportabilidad, autonomía operativa, rapidez de despliegue y capacidad funcional del laboratorio en condiciones representativas de utilización. Posteriormente, el laboratorio estuvo operativo en maniobras de la OTAN, demostrando su capacidad para proporcionar soporte de fabricación avanzada en un entorno militar real.

Los resultados obtenidos permitieron demostrar la viabilidad de integrar capacidades avanzadas de fabricación digital en plataformas desplegables orientadas al soporte logístico y mantenimiento avanzado en campo.



Figura 4. Sistema desarrollado por IDONIAL. Imágenes del exterior e interior de la planta móvil aerotransportable de fabricación aditiva.



Figura 5. Pruebas de validación y despliegue en la base aérea de Zaragoza.

4.2. Sistema desplegable de fabricación aditiva para aplicaciones sanitarias en defensa

Otro de los desarrollos realizados por IDONIAL en el ámbito de los sistemas desplegables se orientó a aplicaciones sanitarias en defensa, en colaboración con el Hospital Central de la Defensa Gómez Ulla. El objetivo fue desarrollar un sistema transportable, desplegable y autónomo para la fabricación bajo demanda de instrumental quirúrgico y elementos de soporte sanitario en Zona de Operaciones.

La solución se concibió como un contenedor técnico equipado con capacidades de diseño, impresión 3D, digitalización, postprocesado y recuperación de materiales. Para ello, el sistema integraba estaciones de diseño e ingeniería, equipos de fabricación aditiva por extrusión, una unidad de escaneo 3D para digitalización de piezas y herramientas auxiliares para el acabado y ajuste funcional de los componentes fabricados.

Un aspecto diferencial del sistema era su capacidad para trabajar con distintos materiales poliméricos, incluyendo materiales comerciales y material reciclado obtenido mediante trituración de residuos y su posterior conversión en pellet reutilizable. Esta funcionalidad permitía aumentar la autonomía del sistema y reducir la dependencia logística de materia prima en despliegue.

El conjunto fue diseñado bajo criterios de transportabilidad tierra-mar-aire, autonomía operativa y rapidez de despliegue, permitiendo trasladar capacidades de fabricación avanzada al entorno sanitario militar y contribuir a la disponibilidad de instrumental y recursos técnicos en escenarios donde el suministro convencional puede resultar limitado o complejo.

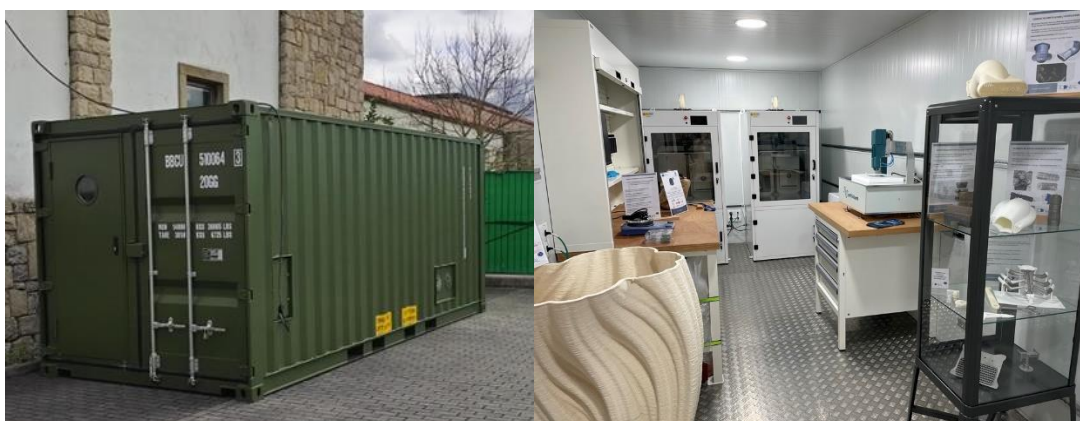


Figura 6. Solución desplegable desarrollada por IDONIAL para el Hospital Central de la Defensa (2024).

5. Conclusiones

A la vista de lo expuesto, la fabricación aditiva se consolida como una tecnología estratégica para el desarrollo de capacidades de fabricación distribuida orientadas a entornos críticos y operaciones desplegadas. Su capacidad para producir componentes bajo demanda, trabajar con múltiples materiales y reducir la dependencia de utillajes específicos permite responder de forma flexible y eficiente a necesidades operativas cambiantes.

En este marco, la integración de estas tecnologías dentro de plataformas contenerizadas y sistemas desplegados representa una evolución natural hacia nuevos modelos de sostenimiento logístico basados en la resiliencia operativa, la autonomía y la producción descentralizada. Estas soluciones permiten trasladar capacidades avanzadas de fabricación, digitalización y postprocesado directamente al entorno de operación, reduciendo tiempos de respuesta y minimizando la dependencia de cadenas logísticas convencionales.

Los desarrollos realizados por IDONIAL demuestran la viabilidad técnica y operativa de este tipo de plataformas en aplicaciones de defensa y soporte avanzado en campo. Los trabajos realizados abarcan desde laboratorios aerotransportables de fabricación avanzada hasta sistemas desplegables orientados a aplicaciones sanitarias militares, integrando capacidades de diseño digital, fabricación aditiva, ingeniería inversa, recuperación de materiales y operación autónoma. Las experiencias desarrolladas han puesto de manifiesto la capacidad de estos sistemas para operar en escenarios representativos, confirmando su potencial para incrementar la resiliencia logística y mejorar la disponibilidad operativa de equipos y recursos críticos.

En conjunto, los resultados obtenidos evidencian que las sistemas contenerizados desplegables basadas en tecnologías de fabricación avanzada constituyen una línea de alto interés para futuras capacidades de sostenimiento en defensa, emergencias e infraestructuras críticas, abriendo la puerta a nuevos modelos de fabricación distribuida y soporte técnico avanzado en despliegue.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Agencia Europea de Defensa (EDA), al Hospital Central de la Defensa Gómez Ulla y al equipo técnico de IDONIAL Centro Tecnológico su colaboración y contribución al desarrollo de la tecnología aquí presentada.

7. Bibliografía

- [1] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Building Resilience into the Nation's Critical Infrastructure. Washington DC, 2019.
- [2] NATO Science and Technology Organization (STO). Additive Manufacturing for Military Applications. STO Technical Report, 2021.
- [3] Estrategia de Tecnología e Innovación para la Defensa. ETID 2026. Secretaría de Estado de Defensa, Dirección General de Estrategia e Innovación de la Industria de Defensa, marzo de 2026.
- [4] European Commission. Roadmap on critical technologies for security and defence. European Union, 2022.
- [5] Valtonen, I. (2022). "Enhancing military logistics with additive manufacturing." *Journal of Military Studies*, 11(1), 1–17.
- [6] ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary. International Organization for Standardization, 2021.
- [7] Mecheter, A., Bucourt, J. F., et al. "Additive Manufacturing Technology for Spare Parts Application: A Systematic Review." *Applied Sciences*, 12(9), 4160, 2022.
- [8] Zhou, L., Miller, J., et al. "Additive Manufacturing: A Comprehensive Review." *Sensors*, 24(9), 2668, 2024.

[9] Valtonen, I. “Enhancing military logistics with additive manufacturing.” *Journal of Military Studies*, 11(1), 1–17, 2022.

[10] Ejército de Tierra. *Fabricación Aditiva*. Ministerio de Defensa de España, 2017.

[11] [IDONIAL – AMFaD Additive Manufacturing Feasibility Study and Technology Demonstration](#). Proyecto desarrollado para la Agencia Europea de Defensa (EDA), 2017.