

USO DE LA FABRICACIÓN ADITIVA PARA FINES MILITARES COMO UNA VÍA DE CONTRIBUIR A LA ECONOMÍA CIRCULAR Y LA SOSTENIBILIDAD

JUAN ISIDRO DÍAZ GARCÍA

Universidad Politécnica de Madrid

FRANCISCO ANTONIO CORPAS IGLESIAS

Universidad de Jaén

La fabricación aditiva ha experimentado un aumento significativo en su utilización, debido a la creciente volatilidad de los mercados y al aumento de la demanda de productos personalizados por parte de los clientes. Este panorama ha ejercido una presión constante sobre las empresas, instándolas a adoptar enfoques más eficientes y ágiles en sus cadenas de suministro. En respuesta a esta necesidad imperante, se ha producido un cambio fundamental en la concepción de la cadena de suministro pasando de estar centrado en la fábrica a estar orientado desde el cliente.

En este contexto, resulta importante definir la fabricación aditiva como «el proceso de unir materiales para crear objetos a partir de datos de modelos 3D, generalmente capa por capa, a diferencia de los métodos de fabricación por sustracción» [1]. En tal sentido, la introducción de la fabricación aditiva ha desencadenado un cambio que ha permitido que las producciones de menor escala se conviertan en la norma, transformando así las economías de escala en economías de alcance. Mientras que, en el pasado, las cadenas de suministro se diseñaban principalmente para la producción de grandes volúmenes y la optimización de costos, en la actualidad, observamos un cambio hacia lo que se conoce como «cadenas de demanda». Las últimas se enfocan en la personalización masiva de productos, adaptándose de manera ágil a las necesidades individuales de los clientes [2].

Antes de que la pandemia impactara de manera global, ya se habían evidenciado vulnerabilidades en la cadena de suministro, especialmente en sectores críticos como la microelectrónica, incluyendo semiconductores. La fabricación de defensa no fue la excepción y sufrió las consecuencias. Desde la previsión de materiales como el acero y el aluminio utilizados en la construcción de barcos y aviones, hasta piezas pequeñas como frenos y engranajes, la dependencia del sector de piezas y materiales fabricados en el extranjero se volvió repentinamente insostenible. [3].

En resumen, la fabricación aditiva está transformando las cadenas de suministro, pasando de una lógica centrada en la producción masiva a una orientación basada en la personalización y la agilidad. Estos cambios representan un nuevo paradigma en la fabricación que continuará modificando la industria en los años venideros.

FABRICACIÓN ADITIVA EN LA INDUSTRIA MILITAR ↓

La fabricación aditiva ha emergido como una alternativa prometedora a la fabricación convencional en diversas industrias, y en la actualidad, se ha convertido en un área de interés para el Ejército. Entre las razones que respaldan este interés se incluyen [4]:

- a) Mantenimiento: capacidad de imprimir piezas que son difíciles de adquirir, obsoletas o que requieren reparación.
- b) Eliminación de largos plazos de entrega
- c) Uso de geometrías complejas
- d) Reducción del desperdicio de material, entre otras

Para la industria militar, la fabricación aditiva posee la capacidad de abordar vulnerabilidades de diseño asociadas con los métodos de fabricación tradicionales. Al mismo tiempo, tanto los ejércitos como la industria están reconociendo su potencial para resolver problemas de la larga data en la cadena de suministro.

La fabricación aditiva ya se encuentra en uso en la industria de Defensa. En particular, el Ejército de los Estados Unidos ha invertido significativamente en la exploración de esta tecnología con el fin de «reducir los tiempos de los ciclos de mantenimiento, los retrasos en la cadena de suministro y colocar las capacidades de fabricación en el punto de necesidad o cerca de él» [5].

En los últimos años, los investigadores e ingenieros militares han identificado áreas donde la fabricación aditiva podría ser aplicada con éxito. A principios de 2016, se produjo un punto de inflexión cuando el Departamento de Defensa de los Estados Unidos inició una serie de talleres para explorar el uso de la impresión 3D en el ámbito militar. Esos hallazgos se plasmaron en un informe que proporcionó una hoja de ruta para la utilización generalizada de estas técnicas por parte del ejército [2].

Uno de los requisitos esenciales es la capacidad del Ejército de fabricar piezas metálicas a gran escala mediante la fabricación aditiva. Existen diversos métodos de fabricación aditiva que se pueden emplear, como el lecho de polvo, haz de electrones, pulverización en frío, pero ninguno que sea ampliamente aceptado para producir piezas de producción a gran escala con aleaciones de acero, aluminio y/o titanio que superen 1 m² en el plano x-y y que, al mismo tiempo inspire confianza estadística y repetibilidad en cuanto a las propiedades del material de las piezas producidas.

Para lograr piezas con propiedades estables se ha planteado un procedimiento en el que la caracterización de los materiales impresos desempeña un papel fundamental. Dicha caracterización debe incluir propiedades de resistencia a la tracción, du-

TABLA 1
OBJETIVOS ESTRATÉGICOS PARA LA ADOPCIÓN
DE LA FABRICACIÓN ADITIVA EN EL ÁMBITO DE LA
DEFENSA

| Objetivos estratégicos | |
|------------------------|---|
| 1 | Integrar la fabricación aditiva en el Departamento de Defensa y la Base Industrial de Defensa |
| 2 | Alinear las actividades de fabricación aditiva en todo el Departamento de Defensa y con los socios externos |
| 3 | Avanzar y promover el uso rápido de la fabricación aditiva |
| 4 | Ampliar el dominio de fabricación aditiva: aprender, practicar y compartir conocimientos |
| 5 | Asegurar el flujo de trabajo de la fabricación aditiva |

Fuente: Adaptado de DoD Additive Manufacturing Strategy [7], 2021.

reza, tenacidad al impacto, análisis microestructural, porosidad y resistencia a la fatiga. El objetivo es asegurar que las propiedades caracterizadas en las piezas producidas cumplan con los requisitos de los sistemas de armas del Ejército [6].

ENFOQUES GLOBALES DE FABRICACIÓN ADITIVA: ESTRATEGIAS EN DIFERENTES PAÍSES DEL MUNDO ↓

El Departamento de Defensa de los Estados Unidos publicó su primera estrategia integral de Fabricación Aditiva en enero de 2021. Esta estrategia, en términos generales, prevé que la fabricación aditiva se convierta en una herramienta eficaz para mitigar la disminución de las fuentes de suministro de fabricación y abordar los déficits en la cadena de suministro con plazos de entrega prolongados. Además, permite a los usuarios del ejército desarrollar soluciones innovadoras para los numerosos desafíos de mantenimiento a los que se enfrentan.

Dentro de la estrategia, se describe cómo la fabricación aditiva puede respaldar a la Defensa de los Estados Unidos de tres maneras clave [7]:

- a) Modernizar los sistemas de defensa nacional utilizando equipos diseñados por fabricación aditiva.
- b) Capacidad para la rápida creación de prototipos y la producción de piezas directas.
- c) Permitir que los usuarios apliquen soluciones innovadoras en el campo de batalla a través de la fabricación aditiva.

Para lograr estos objetivos estratégicos, la estrategia establece directrices específicas. Se puede consultar más detalles en la Tabla 1.

De esta manera, el ejército de Estados Unidos está comprometido con la adopción de la fabricación aditiva en sus procesos.

Países Bajos ↓

El Ejército Real de los Países Bajos, ha desarrollado estrategias para la sustitución de piezas de repuesto en áreas remotas. Para ello, ha realizado estudios destinados a evaluar la viabilidad de la fabricación aditiva como método para producir piezas de repuesto en ubicaciones remotas, ofreciendo una solución temporal hasta que se disponga de una pieza convencional fabricada de manera tradicional.

En el marco de estos esfuerzos, se llevó a cabo una misión en una zona aislada, con el objetivo de determinar si es necesario implementar capacidades de fabricación aditiva. Los resultados revelaron que tanto la ubicación como el tipo de capacidad de fabricación aditiva tienen un impacto significativo en la disponibilidad de vehículos y en los costos operativos totales. Este impacto varía en función del contexto remoto [8].

Francia ↓

El sector de defensa francés ha logrado grandes avances al emplear la fabricación aditiva para imprimir en 3D una hélice compuesta por cinco palas de 200kg mediante el proceso WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*). Esta hélice fue posteriormente instalada en el dragaminas Andrómeda. La empresa francesa *Naval Group* llevó a cabo la impresión de esta hélice en 2021. Los miembros del proyecto explicaron que, al utilizar la tecnología, redujeron drásticamente el tiempo de fabricación y minimizaron la cantidad de materiales utilizados [9].

Australia ↓

La utilización de la fabricación aditiva en el ejército australiano, ha sido, hasta la fecha, bastante limitada y aislada, con iniciativas como el *Makerspace*. Este último es una iniciativa del ejército que proporciona un espacio para fomentar el «aprender haciendo» o aprendizaje práctico y la educación en enfoques innovadores, pensamiento creativo y metodologías ágiles. En el *Makerspace*, se brinda la oportunidad a todo el personal del ejército de unirse a la comunidad local de creadores y adquirir herramientas profesionales para la resolución de problemas en el área de la Implementación de Sistemas Robóticos y Autónomos. El propósito es abordar los desafíos actuales y emergentes que enfrenta el Ejército.

Asimismo, se ha implementado una prueba llamada *Spee3D* en la cual el ejército australiano demostró la viabilidad de imprimir en 3D y reemplazar piezas de vehículos blindados en el campo durante el ejercicio *Koolendong*. Este ejercicio militar es de carácter anual y se lleva a cabo en colaboración entre el ejército australiano y la Fuerza de Rotación Marina-Darwin, que es una fuerza de tarea aerotrestre de la Marina del Cuerpo de Marines de los Estados Unidos.

En el marco de esta prueba, varias piezas de transporte blindado de personal M113 fueron reemplazadas por piezas metálicas fabricadas *in situ*. Este proceso se realizó utilizando tecnología desarrollada por una empresa australiana, llamada *Spee3D*. Las piezas se identificaron, se imprimieron en 3D, se certificaron y posteriormente, se instalaron en los vehículos.

Cabe destacar que la impresora táctica utilizada para este propósito emplea un proceso de pulverización en frío y tiene la capacidad de imprimir piezas metálicas de hasta 40 kilogramos a una velocidad de 100 gramos por minuto.

En 2021, *Spee3D* ha estado colaborando en la capacitación de los primeros técnicos militares de la Célula de Fabricación Aditiva (AMC) del ejército australiano. Estos técnicos se especializan en la producción de piezas metálicas impresas en 3D, abarcando todo el proceso, desde el diseño y la impresión, hasta el mecanizado, el tratamiento térmico y la certificación [5].

APLICACIONES MÁS IMPORTANTES DENTRO DEL SECTOR DEFENSA ↓

La fabricación aditiva brinda a los usuarios la capacidad de producir nuevos productos de manera rápida y rentable, a menudo bajo demanda o en el momento de necesidad. Entre las diversas aplicaciones de la fabricación aditiva, se destacan las siguientes:

1. Sensores impresos para tropa

La tecnología de sensores impresos en 3D (3DP) presenta características de alto rendimiento que permiten el seguimiento de combatientes individuales en el campo de batalla. Esto ofrece protección contra amenazas como toxinas, bacterias o virus, al tiempo que brinda monitoreo en tiempo real de eventos fisiológicos y diagnósticos interconectados [10].

2. Sector aeroespacial

En el ámbito aeroespacial, las aplicaciones de fabricación aditiva metálica, como la creación de tanques de combustible satelitales y turbinas de motores de cohetes, han mostrado ventajas en términos de reducción de costos y plazos de ejecución. Algunas aplicaciones específicas ven mejoras en la reducción de masa.

No obstante, esta tecnología también presenta desafíos, incluyendo problemas con la certificación de piezas, requisitos de control de calidad, limitaciones en la producción de elementos de gran volumen, disponibilidad escasa de materiales, problemas en el posprocesamiento, reducción de resistencia a la fatiga, costos elevados de las máquinas y la necesidad de personal experimentado en el proceso de producción de componentes funcionales [11].

Además, en el sector aeroespacial se han realizado esfuerzos para investigar métodos de fabricación aditiva adecuados con el fin de producir intercambiadores de calor compactos complejos, con alta eficiencia y menor peso [12].

3. Armada de los EEUU

En noviembre de 2022, la Armada logró un hito al instalar por primera vez de forma permanente una impresora 3D de metal a bordo de uno de sus barcos. Esta máquina es capaz de imprimir acero inoxidable a nivel industrial, lo que permite producir piezas bajo demanda. Al reducir la dependencia de proveedores externos, esta tecnología otorga a la Armada una nueva capacidad de autosuficiencia en sus barcos y entre las tripulaciones. Esto, a su vez, contribuye a superar problemas como retrasos en los plazos de entrega y desafíos relacionados con la obsolescencia [2].

4. Hormigón

Desde 2015, a través del programa *Additive Construction*, los ingenieros del Cuerpo de Ingenieros del Ejército, el Centro de Investigación y Desarrollo de Ingenieros y el Laboratorio de Investigación de Ingeniería de la Construcción han estado trabajando en el desarrollo de tecnología capaz de imprimir estructuras a escala de construcción, como edificios y puentes.

Hasta la fecha, han desarrollado cinco máquinas a gran escala capaces de imprimir hormigón. Estas máquinas han permitido la construcción exitosa de dos edificios de 512 pies cuadrados, además de otras construcciones de menor escala, que incluyen barreras y refugios para guardias. La fabricación aditiva de hormigón no solo ha demostrado reducir los costos de mano de obra y acelerar los plazos de planificación, sino que también, ha mejorado la resistencia y estabilidad de las estructuras producidas [2].

5. Cascos de vehículos sin soldadura

El Proyecto *Jointless Hull* tiene como objetivo reducir las pérdidas de transportes debido a explosiones en la parte inferior de los vehículos. En la actualidad, la mayoría de los fabricantes ensamblan los cascos de vehículos soldando diversas piezas, lo que resulta en que la parte inferior de los vehículos tengan juntas. Estos puntos de unión crean vulnerabilidades ante explosiones de bombas en las carreteras. El Proyecto *Jointless Hull* utilizará tecnología aditiva para imprimir cascos de combate únicos y sin costuras, eliminando las debilidades en las carrocerías de los vehículos. Esto se traducirá en una mejora significativa en la resistencia de los vehículos terrestres y una reducción del daño causado por este tipo de ataques, lo que en última instancia incrementará su capacidad de supervivencia [2].

Finalmente, la tecnología de fabricación aditiva tiene un amplio rango de aplicaciones, que incluyen la creación de conductos para aeronaves, tapas de lentes de repuesto, puentes de hormigón, componentes electrónicos avanzados y equipamiento médico. Un ejemplo destacado de la utilidad de la fabricación aditiva ocurrió en 2020, cuando los fabricantes la emplearon con éxito para abordar la escasez de equipos médicos por la pandemia de coronavirus [5].

SOSTENIBILIDAD Y FABRICACIÓN ADITIVA ↓

Recientemente se llevó a cabo un estudio con el propósito de comprender la influencia de la fabricación aditiva de metales en la sostenibilidad ambiental y económica en comparación con la fabricación convencional. Para este fin, se analizaron dos sectores específicos: maquinaria industrial y aeronáutica. Se empleó un enfoque de ciclo de vida para evaluar los impactos ambientales y económicos de la tecnología de fabricación aditiva, comparándolos con los de la fabricación convencional. Este análisis se realizó a través de estudios de casos representativos en ambos sectores, utilizando metodologías de evaluación del ciclo de vida y de costos del ciclo de vida.

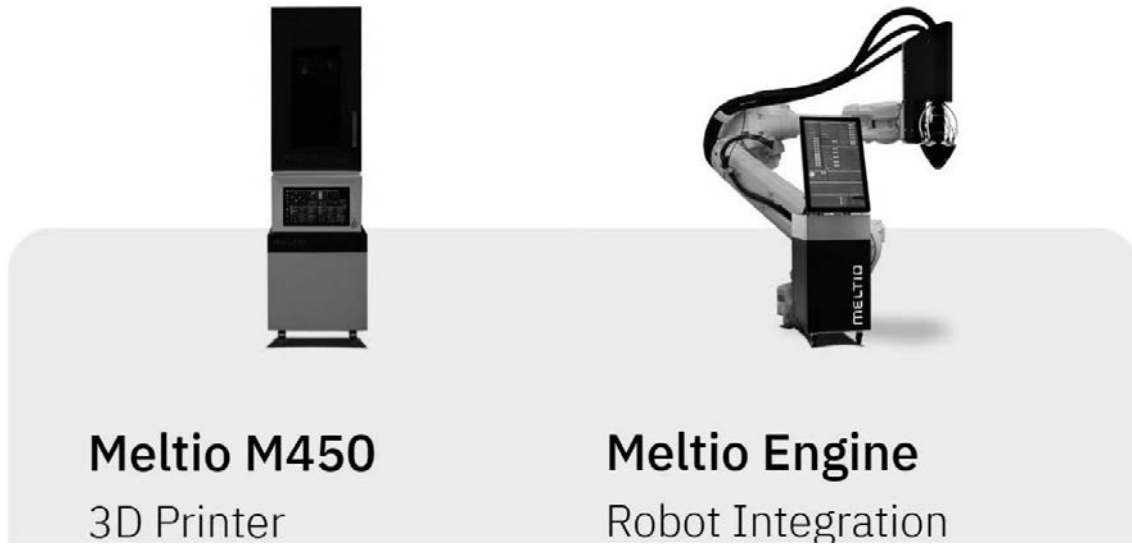
Los resultados de la evaluación económica revelaron que la fabricación aditiva metálica puede reducir el coste total de los componentes aeronáuticos en un 33,2%, incluso considerando varias operaciones de posprocesamiento. Asimismo, la fabricación aditiva reduce el impacto ambiental potencial en más de un 60 % para ambos sectores, principalmente debido a una menor utilización de materiales.

Sin embargo, para lograr una adopción sostenible de la fabricación aditiva metálica, se deben considerar algunos aspectos críticos. Estos incluyen la inversión en equipos, la selección de los posprocesamientos adecuados, la elección del material utilizado y la evaluación del impacto de la fase de uso del producto. Además, se requieren investigaciones adicionales sobre la reutilización del polvo, la optimización del proceso, la certificación y el análisis del impacto social de la fabricación aditiva de metales [4].

FABRICACIÓN ADITIVA DE METALES EN ESPAÑA ↓

Meltio es una empresa fundada en 2019 como resultado de una *Joint Venture* (proyecto conjunto) entre Additec y Sicnova. Está ubicada en Linares, un municipio en la provincia de Jaén, España. Meltio, está transformando la fabricación aditiva de metal mediante sus soluciones de impresión 3D de alto rendimiento, que son asequibles y fáciles de usar. Su misión es ofrecer a sus clientes, socios y empleados las últimas innovaciones en tecnología de impresión 3D de metal. La empresa tiene presencia en 40 países y cuenta con oficinas en Estados Unidos, India e Italia. Además, el 95% de su producción se vende

FIGURA 1
SOLUCIONES MÉTÁLICAS INNOVADORAS



Fuente: Tomado de Meltio M450. Turn-key Metal 3D Printer [16] y Meltio Engine Robot Integration [17], 2023.

en el extranjero [13].

La empresa ha desarrollado un amplio portafolio de soluciones metálicas innovadoras. Entre ellas se encuentran, la Meltio M450, una impresora 3D que proporciona una solución completa para la fabricación aditiva de metal. También, han desarrollado la integración del robot Meltio Engine, una impresora de 3D de metal a gran escala que permite la fabricación de piezas metálicas de mayor tamaño. Ambos equipos se pueden ver en la Figura 1 [14].

Una de las características más destacadas de las soluciones de Meltio es su proceso propio y patentado basado en la tecnología de deposición de metales por láser (Laser Metal Deposition, LMD). Este proceso ha sido aplicado en el sector naval, donde Meltio, en asociación con la Phillips Corporation (empresa global de soluciones y servicios de fabricación), instaló esta tecnología en el año 2023 en el USS Bataan (LHD-5), un buque de asalto anfíbio, con muelle de aterrizaje para helicópteros de la Armada de los Estados Unidos [15].

El sistema *Phillips Additive Hybrid* combina la tecnología de deposición de metal por láser de Meltio con la fresadora de control de los centros de mecanizado vertical CNC de Haas, que están instalados a bordo del buque [13]. Esta implementación de la tecnología de impresión 3D de Meltio ha demostrado ser una aplicación industrialmente útil en el sector naval, mejorando la disponibilidad operativa y reduciendo la demanda de cadenas de suministro tradicional, de igual manera, demostrando el potencial que tiene la fabricación aditiva.

Además, de la impresora 3D metálica, se ha instalado una segunda impresora 3D para producir com-

ponentes de polímero a bordo del USS Bataan (LHD-5). Esto permite a la tripulación imprimir las piezas necesarias utilizando más de 300 paquetes de datos que definen la configuración y los procedimientos de diseño [13].

Meltio ha presentado recientemente, su innovador *software*, Meltio Space, que es un programa de fabricación de piezas metálicas precisas mediante impresión 3D. Este software ofrece un diseño fiable y rápido, perfiles de materiales y parámetros de impresión 3D recomendados. Además, cuenta con procesadores específicos para brazos robóticos de marcas reconocidas, como *ABB*, *Kuka*, *Fanuc* y *Yaskawa*, que brindan detección de colisiones y simulación [15].

CONCLUSIONES

Luego de realizar la revisión de los artículos se puede concluir:

1. **Cadena de suministro:** La fabricación aditiva se destaca por su capacidad para eliminar nodos intermedios en la cadena de suministro, lo que reduce significativamente los tiempos de transporte y acerca la producción al consumidor final. La combinación de proximidad a los clientes y flexibilidad en el diseño constituye la principal ventaja de adoptar esta tecnología.
2. **Tiempos de entrega y costos:** La tecnología aditiva podría reducir los tiempos de entrega de piezas hasta en un 90%, en comparación con métodos tradicionales como la forja y la fundición. Además, genera menos desechos en comparación con los métodos de producción

tradicionales, y podría reducir los costos de materiales en un 90%, al mismo tiempo que reduce el consumo de energía en un 50%. La evaluación económica revela que la fabricación aditiva metálica reduce el coste total de los componentes aeronáuticos en un 33,2%, incluso cuando se tienen en cuenta las operaciones de posprocesamiento.

3. **Estrategias militares:** Los ejércitos de diversos países están desarrollando estrategias para incorporar la fabricación aditiva dentro de su planificación de mantenimiento y operatividad. Esto a su vez, les permitirá modernizar sus sistemas de defensa mediante el uso de equipos diseñados por fabricación aditiva, la capacidad de crear prototipos rápidamente, la sustitución de piezas de repuesto en zonas remotas y la competencia para producir y reemplazar piezas de vehículos blindados en el campo.
4. **Contribución a la fabricación aditiva en el sector militar de España:** La empresa Meltio está transformando la forma en que se fabrican las piezas metálicas. Su proceso propio y patentado, ofrece versatilidad y eficiencia sin precedentes en la fabricación de metal. Esta tecnología se utiliza en la Armada de los Estados Unidos, lo que destaca su impacto a nivel internacional.
5. **Transición hacia la sostenibilidad:** en resumen, esta revisión confirma que la fabricación aditiva desempeñará un papel crucial en la transición hacia la sostenibilidad. La difusión de esta tecnología crea oportunidades para una producción y un consumo más sostenibles, lo que beneficiaría tanto a la industria como al medioambiente.

REFERENCIAS

[1] ASTM F2792-12^a, 2013. Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies [consulta: 8 septiembre 2023]. Disponible en: DOI: 10.1520/F2792-12

[2] CALIGNANO, F Y MERCURIO, V., 2023. An overview of the impact of additive manufacturing on supply chain, reshoring, and sustainability. *Cleaner Logistics and Supply Chain* [en línea]. 7, 100113 [consulta: 2 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.clscn.2023.100103>

[3] HOLMES, L. *National Defense* [en línea]. Additive Technology Revolutionizes Defense Manufacturing, 2023 [consulta: 21-09-2023]. Disponible en: <https://www.nationaldefensemagazine.org/articles/2023/7/6/additive-technology-revolutionizes-defense-manufacturing>

[4] GONÇALVES, A, FERREIRA, B, LEITE, M Y RIBEIRO, I., 2023. Environmental and Economic Sustainability Impacts of Metal Additive Manufacturing: A Study in the Industrial Machinery and Aeronautical Sectors. *Sustainable Production and Consumption* [en línea]. 42, pp. 292-308 [consulta: 16 septiembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2023.10.004>

[5] *Australian Army Research Centre* [en línea]. Adopting

Additive Manufacturing and its Impact on Land Power, 2022 [consulta: 15-09-2023]. Disponible en:

<https://researchcentre.army.gov.au/library/land-power-forum/adopting-additive-manufacturing-and-its-impact-land-power>

[6] *America's Seed Fund. SBIR/STTR* [en línea]. Large Scale Metal Additive Manufacturing Process for Army Components, 2021 [consulta: 14-09-2023]. Disponible en: <https://www.sbir.gov/node/2072039>

[7] Office of the Under Secretary of Defense, Research and Engineering [en línea] DoD Additive Manufacturing Strategy, 2021 [consulta: 8 octubre 2023]. Disponible en: <https://www.cto.mil/dod-additive-manufacturing-strategy/>

[8] ZULSTRA, V, BASTEN, R, Y JUSLING, T., 2022. Printing in the Army: Where to locate additive manufacturing capabilities in a remote spare parts supply chain? [en línea]. Vol. 55, No.10, pp. 1165-1170 [consulta: 13 septiembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.547>

[9] FICZERE, P., 2022. Additive manufacturing in the military and defence industry. Design of Machines and Structures [en línea]. Vol. 12, No. 2, pp. 73–77 [consulta: 6 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.32972/dms.2022.016>

[10] BIRD, D.T, Y RAVINDRA, N.M., 2021. Additive Manufacturing of Sensors for Military Monitoring Applications. *Polymers* [en línea]. 13, 1455 [consulta: 6 octubre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/polym13091455>

[11] BLAKEY-MILNER, B, GRADL, P, SNEDDEN, G, BROOKS, M, PITOT, J, LOPEZ, E, LEARY, M, BERTO, F Y DU PLESSIS, A., 2021. Metal additive manufacturing in aerospace: A review [en línea]. 209, 110008 [consulta: 17 septiembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2021.110008>

[12] CARERI, F, KHAN, R.H.U, TODD, C Y ATTALLAH, M.M., 2023. Additive manufacturing of heat exchangers in aerospace applications: a review. *Applied Thermal Engineering* [en línea]. 235, 121387 [consulta: 12 septiembre 2023]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121387>

[13] DONAIRE, G. EL PAÍS [en línea]. El 'milagro' de Meltio: cómo una empresa jienense se ha convertido en proveedor de la US Navy, 2023 [consulta: 01-10-2023]. Disponible en: <https://elpais.com/economia/negocios/2023-04-08/el-milagro-de-meltio-como-una-empresa-jienense-se-ha-convertido-en-proveedor-de-la-us-navy.html>

[14] MELTIO [en línea]. About Meltio, 2023 [consulta: 28-09-2023]. Disponible en: <https://meltio3d.com/about-2/>

[15] DONAIRE, G. LA VANGUARDIA [en línea]. Meltio Space revoluciona la tecnología 3D desde su planta en Linares (Jaén). 2023 [consulta: 01-10-2023]. Disponible en: <https://www.lavanguardia.com/vida/20230831/9196335/meltio-space-revoluciona-tecnologia-3d-planta-linares-jaen.html>

[16] MELTIO [en línea]. Meltio M450. Turn-key Metal 3D Printer [imagen digital], 2023 [consulta: 28-09-2023]. Disponible en: <https://meltio3d.com/metal-3d-printers/meltio-m450/>

[17] MELTIO [en línea]. Meltio Engine Robot Integration [imagen digital], 2023 [consulta: 28-09-2023]. Disponible en: <https://meltio3d.com/metal-3d-printers/meltio-engine-robot-integration/>