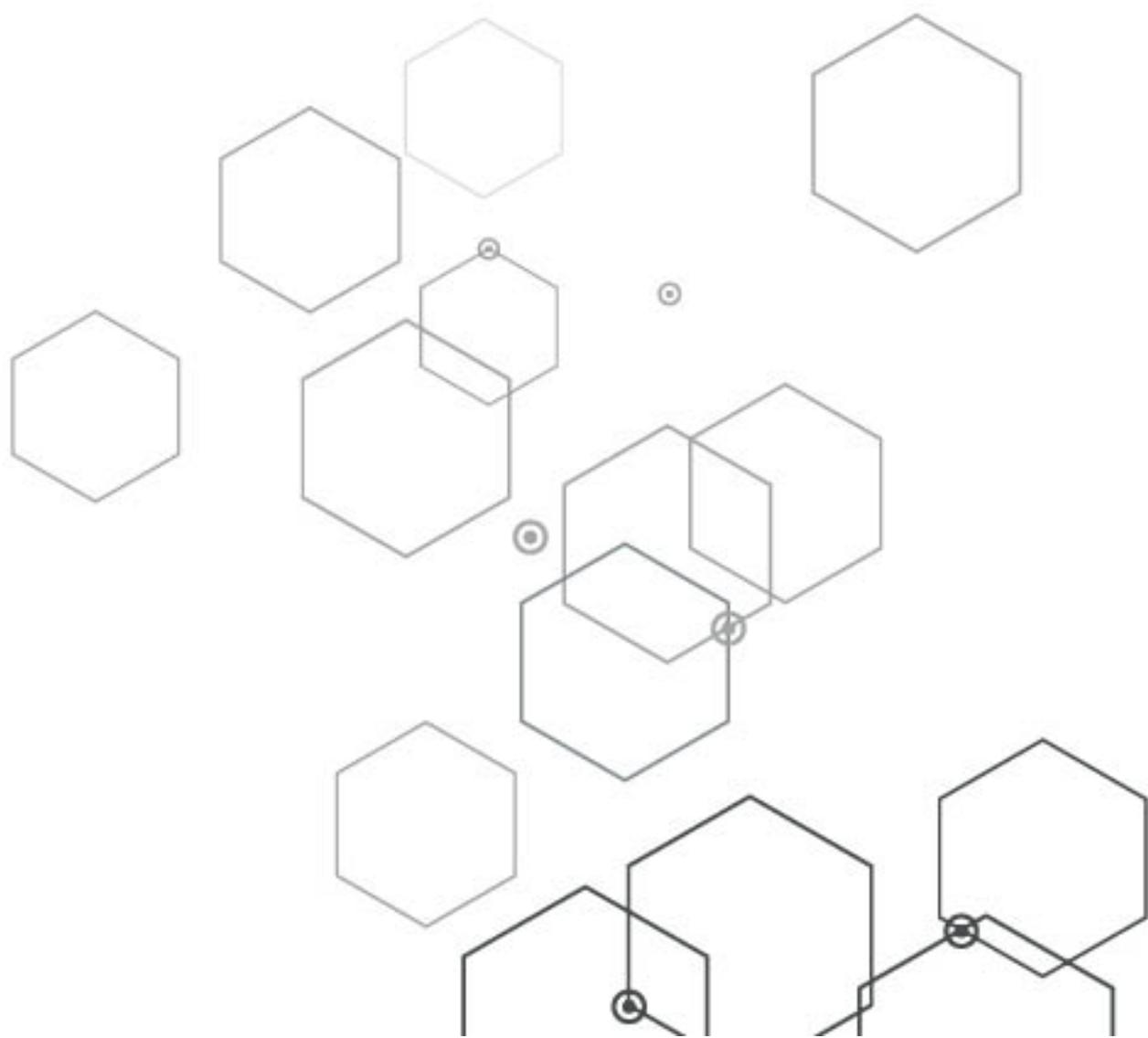


**DIAGNÓSTICO Y ESTUDIO DE LAS
OPORTUNIDADES DE FABRICACIÓN
ADITIVA METÁLICA EN EL SECTOR
AEROSPAZIAL DE LA REGIÓN DEL
SUDOE**

ESTADO DEL ARTE DE LAS TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA: TECNOLOGÍAS, TENDENCIAS, OPORTUNIDADES, RETOS Y APLICACIONES EN EL SECTOR AEROESPACIAL



ÍNDICE

1	ÁMBITO.....	8
2	TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA: ESTADO DEL ARTE	8
2.1	Introducción.....	8
	Ventajas y limitaciones.....	12
	Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva.....	14
	Cadena de producción de la fabricación aditiva.....	17
2.2	Tecnologías de fabricación aditiva mediante la fusión de un lecho de polvo	19
	Fusión selectiva por láser (SLM).....	19
	Fusión por haz de electrones (EBM)	23
2.3	Deposición de energía dirigida para la FA metálica.....	26
	Fabricación directa (EBAM™ o fabricación de formas libres por haz de electrones (EBF ³)	27
	Deposición de metal por láser (LMD).....	28
	Fabricación aditiva mediante soldadura plasma (WAAM).....	29
2.4	Comparación de las tecnologías que emplean la fusión en lecho de polvo (PBF) y las tecnologías de deposición de energía dirigida (DED).....	32
2.5	Estado de desarrollo de las tecnologías de FA.....	33
	Tecnologías de fabricación aditiva mediante la fusión de un lecho de polvo	33
	Fusión selectiva por láser (SLM)	33
	Fusión por haz de electrones (EBM).....	34
	Tecnologías de deposición de energía dirigida	35
	Deposición de metal por láser (LMD).....	35
	Fabricación aditiva con haz de electrones (EBAM®).....	36
	Fabricación aditiva mediante soldadura plasma (WAAM).....	36
2.6	Simulación numérica en la fabricación aditiva	37
	Introducción.....	37
	Simulación por elementos finitos	39
	Programas informáticos más utilizados	40
2.7	Optimización topológica.....	41
	Introducción.....	41
	Técnicas de optimización continua.....	43
	Principales dificultades de la optimización topológica en la fabricación aditiva.....	43
	Programas informáticos	44
2.8	Estrategias de escaneo.....	45
3	FABRICACIÓN ADITIVA: OFERTA TECNOLÓGICA	46

3.1	<i>Motivación y posibilidades</i>	46
3.2	<i>Previsión</i>	48
3.3	<i>Oportunidades comerciales</i>	52
	Europa.....	52
	Estados Unidos de América.....	55
	Asia.....	55
	Sudáfrica	55
	Australia.....	55
3.4	<i>Marco industrial</i>	56
	Materiales metálicos disponibles actualmente para la producción aditiva.....	60
3.5	<i>Tendencias en el sector aeroespacial</i>	61
	Introducción.....	61
	Retos del uso de la fabricación aditiva en el sector aeroespacial.....	64
	Tendencias en materia de FA en el sector aeroespacial	66
	Ejemplos de FA de componentes aeroespaciales	68
3.6	<i>Principales actores del sector de la FAM en la región del SUDOE</i>	73
3.7	<i>RESULTADOS DE LA ENCUESTA: FAM PARA EL SECTOR AEROESPACIAL</i>	89
	Introducción.....	89
	Resultados.....	89
	Metodología.....	91
4	POLÍTICAS REGIONALES DE APOYO A LA FAM EN EL MARCO DE LA RIS3	92
4.1	<i>Introducción</i>	92
4.2	<i>El alcance de la región SUDOE</i>	93
4.3	<i>Los ejes y prioridades de las RIS3 del SUDOE relativos a la FAM</i>	93
5	GLOSARIO	99
6	REFERENCIAS	102

Índice de ilustraciones

Gráfico 2-1. Previsiones de crecimiento mundial de la industria de la impresión en 3D para la venta de productos y servicios de FA (expresado en miles de millones y en millones de dólares respectivamente): previsiones de 2013 y 2014 (en la izquierda) y previsiones de 2016 (en la derecha)[1].	9
Gráfico 2-2. Ciclo de sobreexplotación de Gartner. Evolución de la fabricación aditiva de 2013 a 2015. [5].	11
Gráfico 2-3. Desglose del porcentaje de los sectores industriales que utilizan la FA [1].	11
Gráfico 2-4. Influencia del tamaño de la serie en los costes de producción (expresado en número de unidades o volumen de producción) (en la izquierda), e influencia de la personalización en los costes de producción (en la derecha).	13
Gráfico 2-5. Clasificación de los procesos de FA, proveedores y fabricantes relacionados, tipos de materiales aplicados y sectores comerciales [4].	15
Gráfico 2-6. Procesos de fabricación aditiva, ASTM F2792/ ISO17296-2 [8].	16
Gráfico 2-7. Clasificación de los procesos de fabricación aditiva metálica.	16
Gráfico 2-8. Descripción de las tecnologías de FA metálica [10].	17
Gráfico 2-9. Todo el proceso de fabricación aditiva de una pieza metálica incluyendo las distintas etapas [8] [11].	19
Gráfico 2-10. Representación esquemática del proceso de fusión selectiva por láser (SLM) [14].	20
Gráfico 2-11. Parámetros de escaneado representados esquemáticamente	20
Gráfico 2-12. Pieza industrial fabricada con la tecnología SLM en el Centro de Investigación IK4-LORTEK.	21
Gráfico 2-13. Imagen de un equipo de fusión por haz de electrones [15].	23
Gráfico 2-14. Representación esquemática del proceso de fabricación EBAM™ [18].	27
Gráfico 2-15. Representación esquemática de un proceso de deposición de metal por láser.	28
Gráfico 2-16. Diagrama esquemático de los procesos con a) GMAW, b) GTAW y c) PAW [57].	30
Gráfico 2-17. Pieza de titanio (larguero de BAE Systems) fabricada por medio de un proceso de WAAM [58], [59].	31
Gráfico 2-18. Ilustración del proceso de optimización topológica de estructuras continuas.	42
Gráfico 2-19. Ilustración del proceso de optimización topológica discreta.	42
Gráfico 3-1. Flujo de procesos de FA. [39].	47
Gráfico 3-2. Tasa de producción de la FA. [40].	47
Gráfico 3-3. Venta de equipos para la FA. Fuente: Informe de Wohlers 2013 [41, 42].	48
Gráfico 3-4. La FA aplicada a los sectores industriales principales [1].	61
Gráfico 3-5. Análisis del precio de los componentes frente a la tasa de deposición del material (metal) en la FA, con punto de equilibrio, comparado con la fabricación tradicional, y manteniendo las proporciones típicas en el sector aeroespacial entre los materiales adquiridos y los materiales usados en último término [27].	64
Gráfico 3-6. Aplicación espacial, desarrollada por CATEC y AIRBUS D&S: a) conjunto ACU para el cohete de lanzamiento VEGA, b) soporte de conectores original, c) soportes	

optimizados: i) fabricación de una sola pieza (montaje integrado), ii) optimización convencional; y, iii) diseño biónico	66
Gráfico 3-7. Aplicación espacial desarrollada por CATEC y AIRBUS D & S: a) Soporte original de Hipparcos, b) Optimización topológica del soporte fabricado mediante SLM....	67
Gráfico 3-8. Disruptor biónico para avión desarrollado por Airbus. El diseño se inspira en el nenúfar [30].	67
Gráfico 3-9. Se hizo una demostración de la partición biónica de Airbus en Autodesk University [30]......	68
Gráfico 3-10. a) Modelo de diseño de helicóptero; b) Parte de la maqueta del escape de gas [36].	69
Gráfico 3-11. Prototipo fabricado por SICNOVA.....	69
Gráfico 3-12. Algunos ejemplos de piezas industriales para moldeo y mecanizado en el sector de la aeronáutica proporcionados por AERNNOVA.	70
Gráfico 3-13. a) tobera de mezcla para los gases de escape de la turbina producida con DED-LENS de Optomec, b) cárter de compresor producido con PBF-EBM de Arcam, c) álabe producido con PBF-SLM por Concept Laser, d) álabes fabricados con PBF-SLM de Morris Technologies.....	71
Gráfico 3-14. Soporte de telemetría producido en aluminio, aplicación espacial desarrollada por AIRBUS D&S: a) versión original; b) vista del componente optimizado. .	72
Gráfico 3-15. Desarrollo de la estructura primaria de ARIANE5, por CATEC y AIRBUS D&S: (a) Vista del LPSS y del lanzacohetes ARIANE 5 (la banda se ensambla con el adaptador de carga útil (ACU)), b) componentes fabricados usando la técnica SLM de FA, (c) ensamblaje del sistema, prueba funcional.....	72
Gráfico 3-16. Estimación de la evolución del desarrollo y la madurez de la fabricación aditiva metálica.....	90
Gráfico 4-1. Mapa 1 con las regiones del SUDOE.....	93

Índice de tablas

Tabla 2-1. Ventajas de las tecnologías de fabricación aditiva	12
Tabla 2-2. Limitaciones de las tecnologías de fabricación aditiva.....	13
Tabla 2-3. Ventajas y desventajas de la tecnología de SLM.....	22
Tabla 2-4. Descripción de los materiales que se transforman mediante SLM.....	22
Tabla 2-5. Comparación de procesos mediante EBM y mediante SLM.	24
Tabla 2-6. Descripción de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales metálicos disponibles para los distintos procesos de FA: Fusión de lecho de polvo con láser y fusión de lecho de polvo con electrones, así como diferentes empresas.	25
Tabla 2-7. Ventajas y desventajas de la tecnología de deposición de metal por láser.	28
Tabla 2-8. Ventajas y desventajas de los procesos que emplean la tecnología WAAM.	31
Tabla 2-9. Comparación de procesos de FA: fusión en lecho de polvo y deposición de energía dirigida [2], [22], [23].....	32
Tabla 2-10. Estado de desarrollo de la SLM.....	33
Tabla 2-11. Estado de desarrollo de la EBM.....	34
Tabla 2-12. Estado de desarrollo de la LMD	35
Tabla 2-13. Estado de desarrollo de la EBAM	36
Tabla 2-14. Estado de desarrollo de la WAAM	36

Tabla 3-1. Aplicaciones generales de la tecnología de FA en el sector automovilístico, aeroespacial y espacial, así como en la fabricación de moldes [44]56
Tabla 3-2. Lista de actores principales en el campo de la fabricación aditiva metálica73

1 ÁMBITO

El presente informe es una contribución al Paquete de Trabajo n.º 1 del proyecto «Diagnóstico y estudio de oportunidades de tecnologías de fabricación aditiva en el sector aeroespacial del SUDOE» de ADDISPACE, y se compone de las entregas **«E.1.1.1 Estudio del diagnóstico»**, **«E.1.2.1 Estudio de las dificultades de adopción»**, **«E.1.3.1 Estudio de oportunidades consolidado»**.

Este informe describe los últimos avances en el campo de las tecnologías de fabricación aditiva (FA), haciendo especial hincapié en las tecnologías más relevantes al servicio de la fabricación aditiva metálica (FAM), a saber, las tecnologías de fabricación aditiva por *Fusión de lecho de polvo* (PBF, por sus siglas en inglés) y por *Deposición de energía dirigida* (DED).

Este informe también describe las tecnologías y tendencias en la aplicación de las tecnologías de fabricación aditiva al sector aeroespacial e incluye un estudio sobre las dificultades de su adopción.

Por último, en este documento también se identifican las oportunidades de utilizar los Fondos Estructurales europeos para financiar las actividades de I+D en el campo de la FAM y su encaje en el RIS3 (Estrategias de investigación e innovación para una especialización inteligente).

2 TECNOLOGÍAS DE FABRICACIÓN ADITIVA: ESTADO DEL ARTE

2.1 Introducción

La fabricación aditiva (FA) designa un grupo de tecnologías utilizadas para construir componentes tridimensionales directamente a partir de datos para diseño asistido por ordenador (CAD) mediante una estrategia aditiva basada en la deposición y fusión de capas sucesivas de un material de base (polvo). La FA se examina aquí en contraste con los procesos sustractivos convencionales que emplean operaciones de mecanizado (como el torneado, el fresado y el pulido) o las técnicas conformativas (como el moldeo mediante prensado, fundición o inyección).

Para describir los procesos de FA, se usan con frecuencia términos tales como *impresión 3D*, *prototipado rápido*, *fabricación digital directa*, *fabricación directa* y *fabricación de sólidos de forma libre*.

Aunque la FA no va a sustituir ninguno de los procesos tradicionales de fabricación, representa un motor de desarrollo de primera magnitud para crear e innovar, que suma, a la par, potencial para complementar los procesos tradicionales. Es por ello que la FA está acaparando cada vez más atención y dedicación en todo el mundo, y es que, resulta de gran interés evaluar si la FA podría ser una tecnología útil e incluso disruptiva. En efecto, el gran entusiasmo que despierta la FA abarca muchos campos, desde las ciencias de la

computación y el diseño de productos hasta los nuevos materiales y el *lean engineering*. Esta tendencia se refleja en algunos indicadores, como en la esperada previsión del crecimiento mundial de la industria de la impresión en 3D, donde se puede observar que tenderá a crecer de manera exponencial desde el 2014 hasta el 2020 (las previsiones para 2013, 2014 y 2016 están incluidas en el Gráfico 2-1) [1].

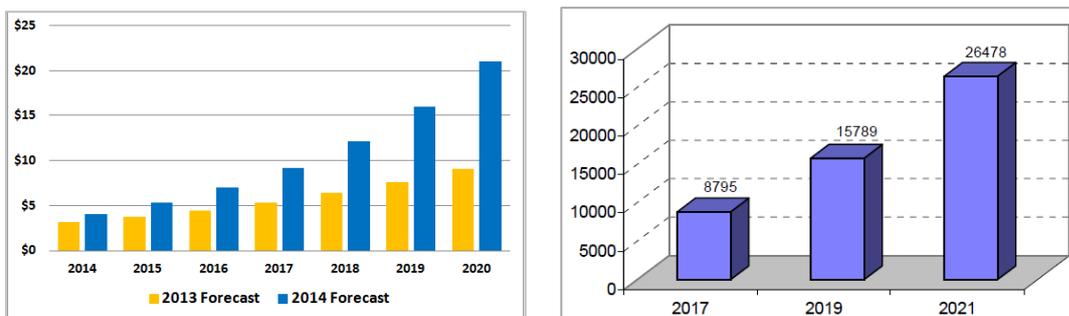


Gráfico 2-1. Previsiones de crecimiento mundial de la industria de la impresión en 3D para la venta de productos y servicios de FA (expresado en miles de millones y en millones de dólares respectivamente): previsiones de 2013 y 2014 (en la izquierda) y previsiones de 2016 (en la derecha)[1].

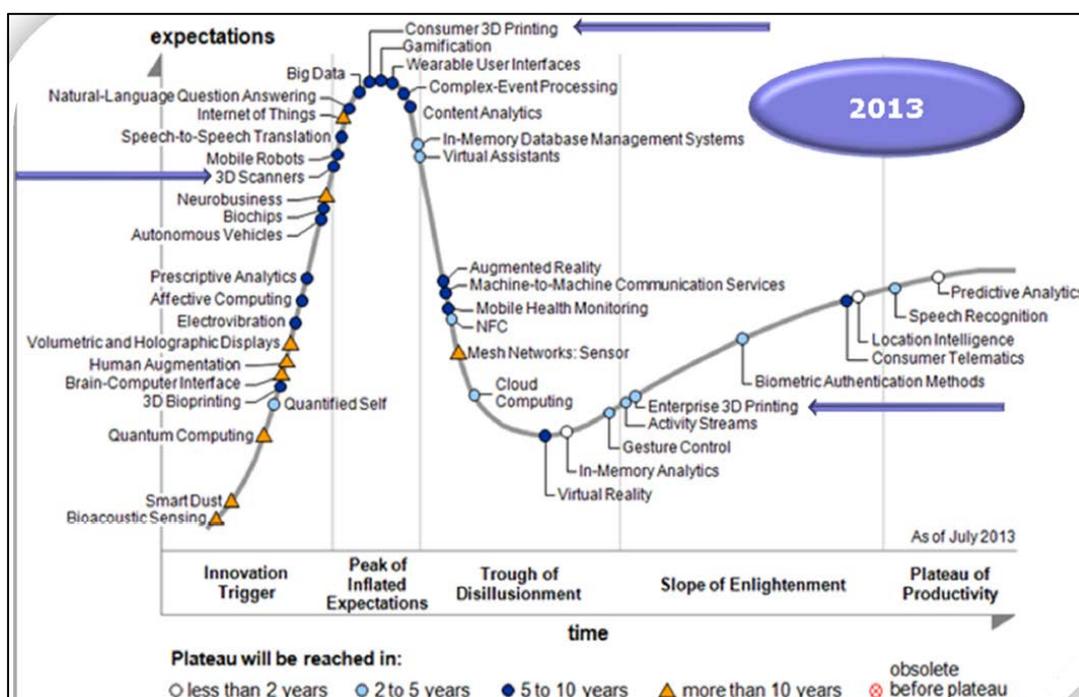
En efecto, son muchos los diferentes países que no han dejado de mejorar su conocimiento sobre esta tecnología desde hace ya varios años. La adopción de la FA está evolucionando rápidamente y se encuentra hoy entre las competencias nacionales esenciales de diferentes países. En los Estados Unidos de América (EE. UU.), la fabricación tridimensional es un tema de prioridad nacional, por lo que se espera una gran inversión en el campo de la FA. De hecho, la administración estadounidense creó el Instituto Nacional de la Innovación para la Fabricación Aditiva de los Estados Unidos de América (NAMII) (2012-13), específicamente para coordinar y financiar proyectos de investigación sobre las tecnologías de FA. Los países asiáticos también están desempeñando una función relevante en el desarrollo de la FA; aproximadamente el 30 % de todos los sistemas industriales de FA están instalados en la región de Asia-Pacífico. Por otro lado, en Europa, el uso de la FA con polvos metálicos es un sector industrial nuevo y en auge [2]. En este continente, si nos atenemos a los recientes proyectos financiados por el Programa Marco de Financiación Europea, se ha llevado a cabo una investigación de alto nivel en materia de FA, en particular, en técnicas específicas de FA y aplicaciones centradas en los sectores médico y aeroespacial. Además, se están realizando grandes esfuerzos en el desarrollo de la normalización de esta tecnología y en el desarrollo de una mayor producción de piezas [3].

El Ciclo de Sobreexplotación de Gartner es una herramienta de análisis gráfico aplicada principalmente al estudio de la madurez o el grado de adopción y aplicación social de tecnologías específicas. En lo que respecta a las tecnologías de FA, estos procesos se iniciaron hace más de veinte años en el mercado del prototipado rápido de maquetas plásticas de dispositivos (mockups) para el diseño de productos [4]. No obstante, solo han despertado la atención del público en los últimos años, cuando surgieron oportunidades en el ámbito del mecanizado y la producción directa de componentes en plásticos, metales y cerámica. En efecto, hasta el 2009, la FA ni siquiera se menciona en el Ciclo de sobreexplotación de Gartner. En el año 2010, las estimaciones sitúan por primera vez a la

FA a una distancia de 5-10 años de la meseta de productividad (madurez) de la tecnología. Entre 2013 y 2015, las tecnologías de FA se muestran progresivamente más cerca del nivel de producción real en algunos sectores (es decir, de la fase «rampa de consolidación»), (consúltese para más información el Gráfico 2-2 [5]).

Cabe mencionar en este momento que el Hype Cycle de Gartner o Ciclo de Sobreexplotación de Gartner principalmente representa tendencias a la hora de adoptar diferentes tecnologías, pero que, en efecto, las tecnologías de FA ya se han establecido en algunos sectores al nivel de producción real.

Como puede observarse en Gráfico 2-3, según una encuesta realizada a 100 de los principales proveedores de servicios y fabricantes de sistemas de FA (que representan a más de 100 000 usuarios y clientes), en la que se preguntaba a cada empresa en qué industrias prestaban sus servicios y cuáles eran sus ingresos aproximados, las máquinas industriales/máquinas de oficina [incluidos los equipos de oficina (como ordenadores, enrutadores e impresoras) y los equipos industriales de automatización (como las máquinas de control numérico y los robots)] son un sector que dominaba el uso las tecnologías de FA en el año 2014, seguido a continuación por los sectores de los productos/aparatos electrónicos de consumo y los vehículos de motor. Las tecnologías de FA revisten un gran interés también para los sectores médico/dental y el aeroespacial [1].



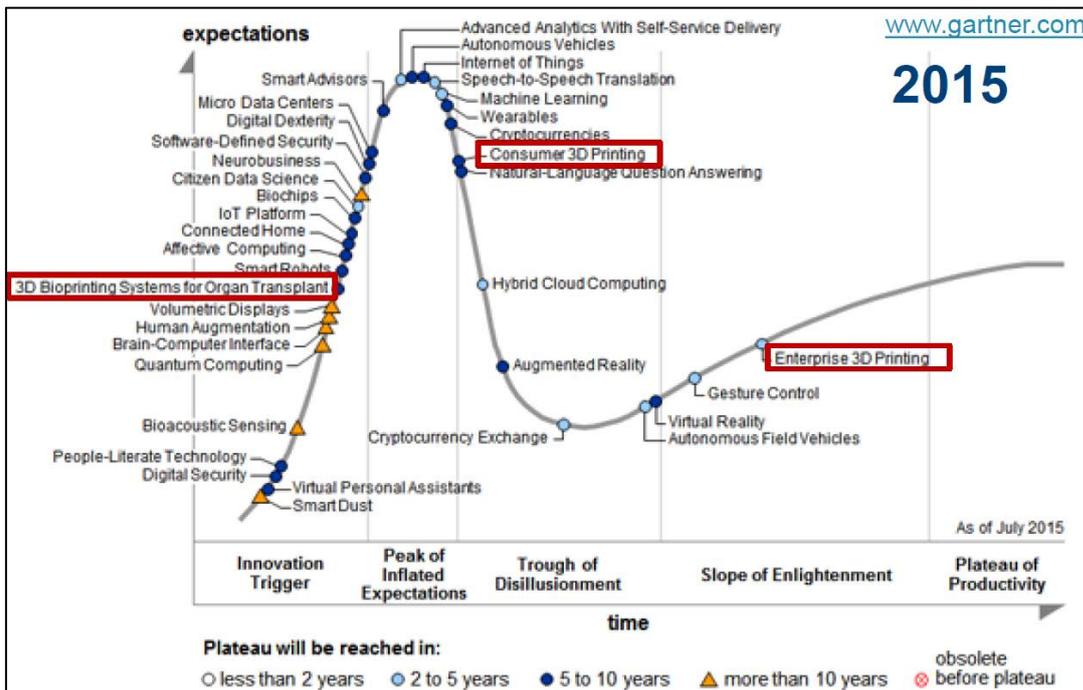


Gráfico 2-2. Ciclo de sobreexplotación de Gartner. Evolución de la fabricación aditiva de 2013 a 2015. [5].

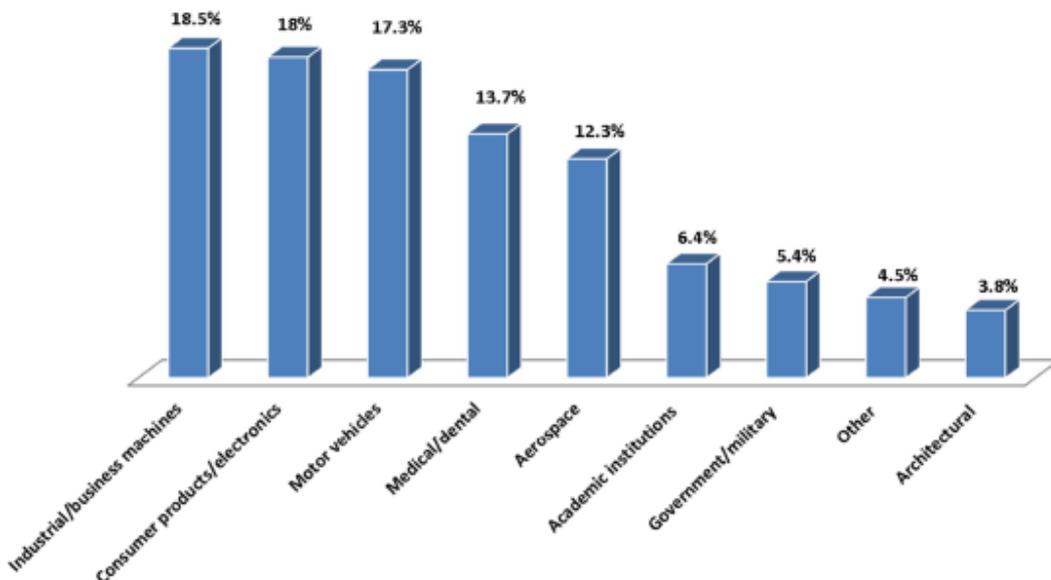


Gráfico 2-3. Desglose del porcentaje de los sectores industriales que utilizan la FA [1].

A pesar de que la FA se emplea de manera significativa en determinados sectores, como se ha descrito anteriormente, todavía existe un enorme potencial para seguir aumentando su uso e incluso para introducirla en nuevos sectores.

No obstante, hoy en día, uno de los problemas de FA es que muchos de los sectores manufactureros tradicionales no son conscientes o no entienden qué ventajas les puede aportar la FA. La FA sustituirá algunos métodos de fabricación, pero no todos, aunque tenga el potencial adicional de complementar muchos de los métodos que no puede sustituir.

Ventajas y limitaciones

Hoy en día, es un hecho ampliamente reconocido que la fabricación de piezas metálicas con la tecnología de FA es una alternativa interesante a otros procesos convencionales de fabricación, debido a su capacidad para fabricar piezas complejas con su geometría final, con diseños altamente versátiles, que hacen factible la fabricación de estructuras ligeras y de nuevas funciones, como, por ejemplo, los complejos canales internos. Además, los procesos que permiten acercarse a la geometría final de la pieza suponen un menor consumo de materia prima, unas veinticinco veces inferior que en los procesos sustractivos, lo que reviste importancia en el caso de las aleaciones costosas o difíciles de mecanizar y aporta, asimismo, importantes ventajas desde el punto de vista medioambiental [2], [4], [6].

Tal como se ha mencionado anteriormente, la FA está preparada para conferir grandes ventajas a una amplia gama de aplicaciones y causará un impacto positivo en los aspectos sociales, económicos y ambientales del desarrollo sostenible. Las principales ventajas de las tecnologías de FA en la

Tabla 2-1.

Tabla 2-1. Ventajas de las tecnologías de fabricación aditiva.

Ventajas de las tecnologías de FA
<ul style="list-style-type: none">➤ Aceleración de su salida al mercado y rápida adaptación a las exigencias de un mercado en continua transformación.➤ Personalización del producto con total flexibilidad creativa y constructiva.➤ Máximo ahorro de material, ya que este no se sustrae, sino que se añade. La producción de componentes que se acercan a su geometría final minimiza el desperdicio de material y reduce las etapas de procesamiento posterior.➤ La necesidad de recurrir a procesos adicionales (como el mecanizado) es baja. Reducción de los plazos de ejecución y de los costes.➤ Las piezas se obtienen directamente del modelo CAD en 3D, por lo que no es necesario usar perforadores, moldes u otras herramientas.➤ Posibilidades de diseño abiertas (exenta de las restricciones de la fabricación convencionales). Diseños personalizados, funcionales y ligeros.➤ Grado de densidad total en las piezas acabadas (sin porosidad residual).➤ Posibilidad de fabricar canales con formas libres, cavidades internas, paredes finas, así como diferentes formas de estructuras reticulares (aligeradas).➤ Tecnología de fabricación ecológica, más simplificada y versátil.

Estas tecnologías de FA, dadas sus características generales, se recomiendan en la actualidad para producir piezas personalizadas en series cortas.

El efecto del tamaño de la serie y la personalización de las piezas en los costes de producción se analiza más detalladamente en el Gráfico 2-4. Por un lado, cuando se aplica la FA, el tamaño de la serie tiene una influencia reducida en los costes. Por otro lado, la FA permite fabricar piezas funcionales, personalizadas y complejas con un menor impacto en

los costes que la fabricación tradicional. Por lo tanto, **cuanto más compleja sea la geometría final, más probabilidades hay de que la FA sea provechosa.**

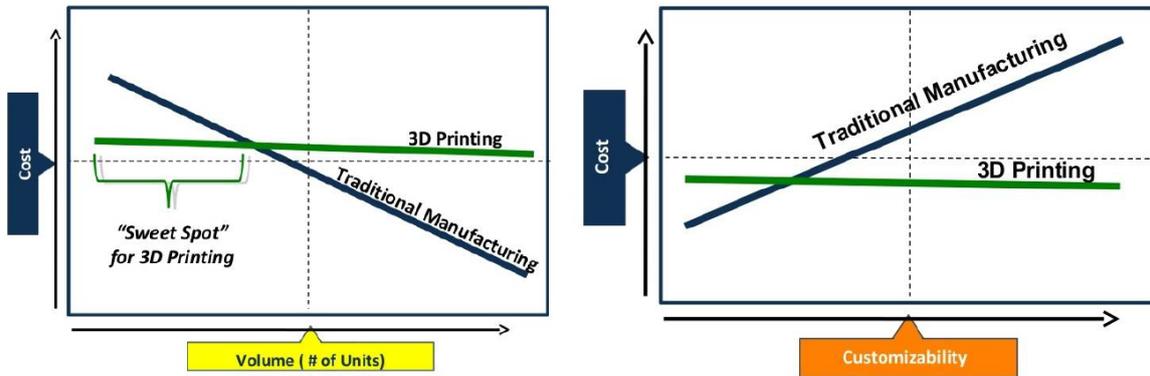


Gráfico 2-4. Influencia del tamaño de la serie en los costes de producción (expresado en número de unidades o volumen de producción) (en la izquierda), e influencia de la personalización en los costes de producción (en la derecha).

Aparte de estas ventajas, para aprovechar al máximo las tecnologías de FA, es importante tener en cuenta también sus **limitaciones** (Tabla 2-2).

Tabla 2-2. Limitaciones de las tecnologías de fabricación aditiva.

➤ Limitaciones de las tecnologías de FA

- Tamaño de la pieza: En las tecnologías que trabajan con un lecho de polvo: el tamaño de las piezas está condicionado por el tamaño del lecho de polvo (sistemas de lecho de polvo estándar: 250x250x250 mm). En las tecnologías de deposición de energía dirigida (o de deposición de metal por láser): el tamaño de las piezas está condicionado por los costes y por el excesivo tiempo de producción como causa del reducido espesor de las capas de polvo.
- Series de producción cortas. Se sigue prefiriendo el moldeo y la fundición para producir grandes volúmenes.
- Consideraciones de diseño. En el caso de las tecnologías que trabajan con un lecho de polvo, se necesitan estructuras de soporte extraíbles cuando el ángulo del voladizo es inferior a 45 °. La orientación de la pieza influye en la calidad de su superficie, el tiempo de fabricación y su coste.
- Capacidad de transformación de los diferentes materiales. Aunque se dispone de muchas aleaciones, los metales insoldables no se pueden transformar por medio de la fabricación aditiva y es necesario recurrir a planteamientos específicos para aleaciones difíciles de soldar.
- Propiedades del material: las piezas fabricadas con la tecnología aditiva tienden a mostrar anisotropía en el eje Z (dirección de la construcción). Además, existe una variabilidad del proceso: las propiedades del producto final dependen de un gran número de parámetros como la velocidad de fabricación o la orientación de la pieza.
- Procesamiento posterior: generalmente es necesario quitar los soportes de material después de la fabricación. En algunos casos, es necesario el mecanizado posterior para obtener un mejor acabado superficial o asegurar la precisión dimensional de la pieza.
- Falta de normalización específica.

Clasificación de las tecnologías de fabricación aditiva

En el marco de las tecnologías de FA, es posible identificar diferentes procesos, en los que se aplican diversos materiales (como plásticos, metales, cerámicas o materiales compuestos), distintas técnicas de deposición y distintas modalidades de fusión/solidificación de los materiales. Las tecnologías de FA se basan tradicionalmente en uno de los siete **procesos primarios de fabricación** (los cuales pueden adoptar más de 30 variaciones). El Comité F42 de la American Society of Testing Materials (Sociedad Americana de Ensayos y Materiales), en adelante ASTM, por sus siglas en inglés, estableció la siguiente clasificación de procesos de FA [7]:

1. Fotopolimerización en tanque: un material fotopolimérico líquido que es curado selectivamente mediante polimerización activa por luz.

2. Inyección de material: se depositan pequeñas gotas de un material base (fotopolímero) y materiales secundarios (por ejemplo, cera) sobre una superficie de construcción. La luz UV solidifica el fotopolímero para formar piezas curadas. El material de soporte se elimina en una etapa de procesamiento posterior a la fabricación.

3. Extrusión de material: el material termoplástico es dispensado por medio de una boquilla caliente y depositado sobre una superficie de construcción. El material se funde y se extruye a través de dicha boquilla para formar cada capa del objeto.

4. Laminación de hojas: las láminas de material (plástico o metal) se unen entre sí para formar un objeto usando una variedad de métodos (como el pegamento o la soldadura ultrasónica). Se utiliza un láser o un cuchillo para cortar el borde de la parte deseada y eliminar el material innecesario.

5. Fusión de lecho de polvo: una fuente de energía térmica, tal como un láser, funde selectivamente las partículas del material. Una vez fundida una capa, se crea una nueva capa por dispersión de polvo sobre la parte superior del objeto. El material sin fundir se utiliza como soporte del objeto fabricado.

6. Inyección de aglutinante: un adhesivo líquido es depositado selectivamente para unir partículas del material. Una vez que se forma una capa, se crea una nueva capa esparciendo polvo sobre la parte superior del objeto y se repite el proceso. El material suelto se utiliza como soporte del objeto fabricado.

7. Deposición de energía dirigida: energía térmica focalizada para fundir el material mientras está siendo depositado. Los sistemas de deposición de energía dirigida pueden emplear materiales de construcción en diversos estados como el hilo o el polvo.

En el Gráfico 2-5 se incluyen otros datos pertinentes, que abarcan los tipos de materiales, mercados principales y algunos ejemplos de empresas que emplean cada uno de los siete procesos. Las tecnologías de *fusión de lecho de polvo* (PBF) y *deposición de energía dirigida* (DED) son las más relevantes en el campo de la FA de metales. Los polímeros generalmente se transforman por inyección del material, extrusión del material y

fotopolimerización en tanque. Las cerámicas de alto rendimiento generalmente se transforman mediante tecnologías de fotopolimerización.

Process	Example Companies	Materials	Market
Vat Photopolymerization	3D Systems (US), Envisiontec (Germany)	Photopolymers	Prototyping
Material Jetting	Objet (Israel), 3D Systems (US), SolidScape (US)	Polymers, Waxes	Prototyping, Casting Patterns
Binder Jetting	3D Systems (US), ExOne (US), Voxeljet (Germany)	Polymers, Metals, Foundry Sand	Prototyping, Casting Molds, Direct Part
Material Extrusion	Stratasys (US), Bits from Bytes, RepRap	Polymers	Prototyping
Powder Bed Fusion	EOS (Germany), 3D Systems (US), Arcam (Sweden)	Polymers, Metals	Prototyping, Direct Part
Sheet Lamination	Fabrisonic (US), Mcor (Ireland)	Paper, Metals	Prototyping, Direct Part
Directed Energy Deposition	Optomec (US), POM (US)	Metals	Repair, Direct Part

Gráfico 2-5. Clasificación de los procesos de FA, proveedores y fabricantes relacionados, tipos de materiales aplicados y sectores comerciales [4].

Además, en el Gráfico 2-6, los procesos de FA se clasifican en función del estado del material base utilizado (es decir, líquido, sólido o polvo) y de conformidad con los procesos primarios descritos con anterioridad [8]. En lo que respecta a las tecnologías de PBF y DED, se suele establecer una subdivisión dependiendo del estado del metal de relleno (hilo o polvo) y del aporte de energía (láser, haz de electrones o arco).

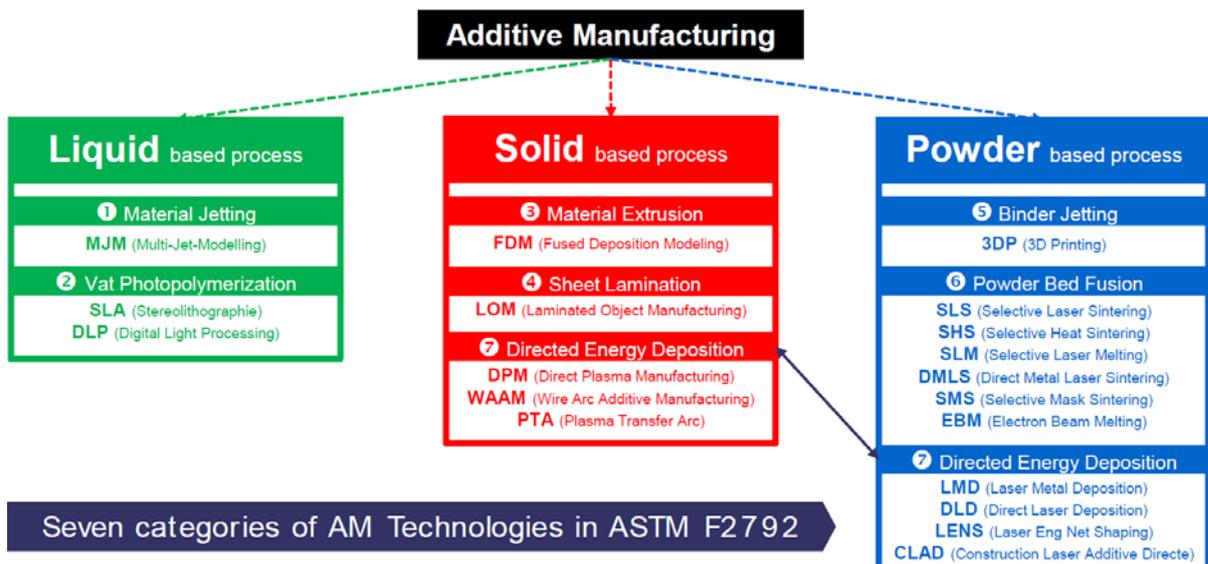


Gráfico 2-6. Procesos de fabricación aditiva, ASTM F2792/ ISO17296-2 [8].

En el Gráfico 2-7 se muestra una clasificación de tecnologías de FA concretamente para piezas metálicas, que incluye el nombre de los procesos que ha adoptado cada una de las máquinas fabricadas[9].

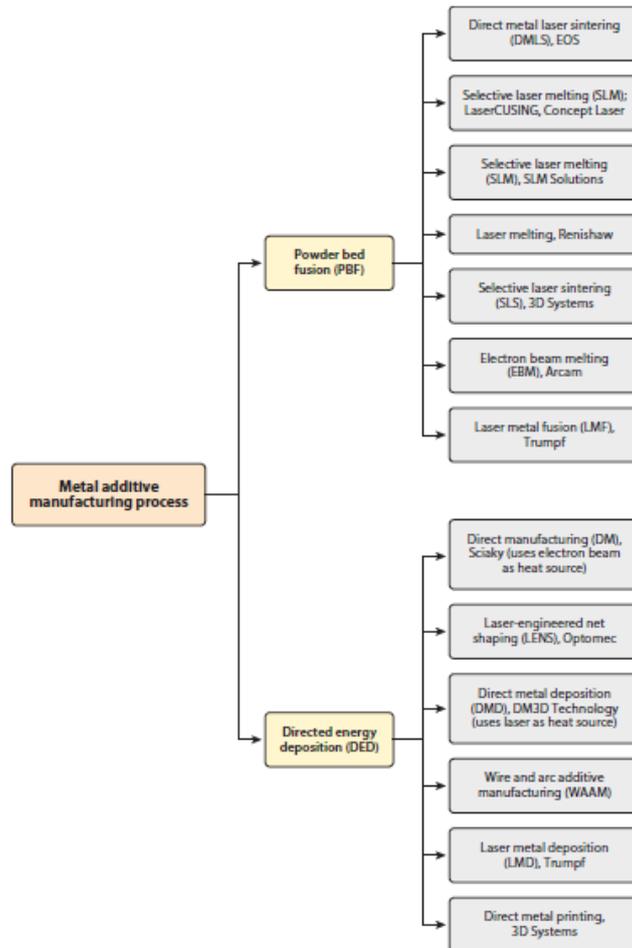


Gráfico 2-7. Clasificación de los procesos de fabricación aditiva metálica.

El Gráfico 2-8 muestra una descripción de algunas de estas tecnologías, junto con algunas aplicaciones representativas [10].

	DEPOSITION			POWDER BED	
	LARGE SCALE DEPOSITION	FINE SCALE DEPOSITION		POWDER BED	
DESIGNATED ICON					
PICTURE					
DESCRIPTION	Deposition of wire fused using laser beam or plasma in a chamber to produce part	Deposition of wire fused using laser beam in a chamber to produce part	Deposition of powder fused using laser and local shielding to produce part	Laser beam selectively fuses powder on a bed in a chamber to produce part	Electron beam selectively fuses powder on a bed in a chamber to produce part
APPLICATIONS	<ul style="list-style-type: none"> • High material throughput deposition systems • Focus on Ti Large-scale pre-forms • Initial cost-driven introduction • Applications including large aero structure components 	<ul style="list-style-type: none"> • Lower material throughput deposition systems • Focus on Ti and Ni alloys • Add-ons and features • High value component repair and modification • Broad range of medium-size components; fabrications 	<ul style="list-style-type: none"> • Lowest material thru-put • Ti, Ni and steel alloys • Nearest-net • Intricate complex hi-value components 	<ul style="list-style-type: none"> • Low material thru-put • Ti6-4 • Highly net-shape • Small – medium prismatics 	

Gráfico 2-8. Descripción de las tecnologías de FA metálica [10].

Cadena de producción de la fabricación aditiva

La FA debe considerarse como parte de un proceso integrado. En el Gráfico 2-9 se puede observar una representación de todo el proceso de fabricación. La fabricación de una pieza metálica con tecnologías de fabricación aditiva comienza con la modelización en 3D: Modelización en 3D con sistemas CAD, escaneado tridimensional (ingeniería inversa) y creación de datos en formato STL (triangulación). A continuación, se organiza la preparación de los datos, que incluye definir la orientación de las piezas, el posicionamiento de las estructuras de soporte y el rebanado del modelo. Una vez creados los datos de control, tiene lugar la producción de las piezas. Una vez fabricadas las piezas, es necesario llevar a cabo operaciones de procesamiento posteriores: eliminación del polvo y las estructuras de soporte, tratamientos térmicos, mecanizado y acabado superficial, ensayos no destructivos, etc.[11]

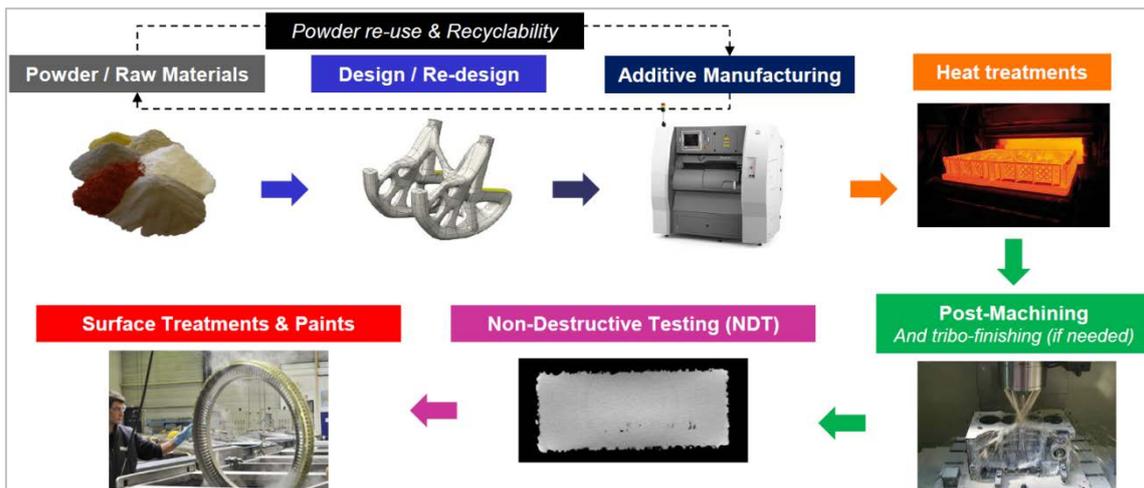
Se pueden considerar diferentes etapas en la cadena de valor de la FA:

- **Materia prima.** Se debe tener en cuenta la etapa de la producción de los polvos metálicos porque en los procesos de FA se requiere un elevado grado de pureza y una distribución granulométrica estrecha. Las propiedades finales de la pieza dependen fundamentalmente de la calidad del polvo, por lo que se deben cumplir unas sólidas especificaciones sobre materiales en polvo para garantizar una buena reproducibilidad. El cumplimiento de estos requisitos resulta complicado, especialmente en el caso de pedidos pequeños (que no tienen mucho

atractivo para los grandes proveedores). Actualmente las materias primas las venden los proveedores del sistema de FA.

- Sistema. Cabe destacar que los proveedores del sistema ofrecen un nivel de integración vertical bajo. Asimismo, los componentes normalizados están fabricados generalmente por subcontratistas.
- Programas informáticos. Es importante diferenciar entre el control de procesos y el programa informático de mejora. El control de procesos lo proporcionan normalmente los proveedores del sistema. Los programas informáticos complementarios para, por ejemplo, generar automáticamente las estructuras de soporte u optimizar el diseño, los proporcionan normalmente las empresas especializadas.
- Diseño de la aplicación. En cuanto al diseño de la aplicación para prestar asistencia a los clientes finales, se debe señalar que puede ser una tarea compleja y exigente. Es una cuestión complicada, de la que se encargan generalmente los proveedores de sistemas, desarrolladores de programas informáticos o proveedores de servicios. Pero no todos los proveedores de servicios tienen capacidad para diseñar aplicaciones.
- Producción. Se pueden distinguir varios escenarios productivos en el mercado: grandes fabricantes de equipos originales, fabricantes/proveedores de servicios subcontratistas o fabricantes de piezas especializadas.

En general, cabría destacar que el mercado de la FA está fragmentado, y se compone de varios actores pequeños en todos los sectores. El tamaño de estos actores limita la inversión en I+D (ningún actor puede desarrollar su actividad en todos los campos). En consecuencia, los proveedores de los sistemas de FA se encargan de una gama de actividades mayor.



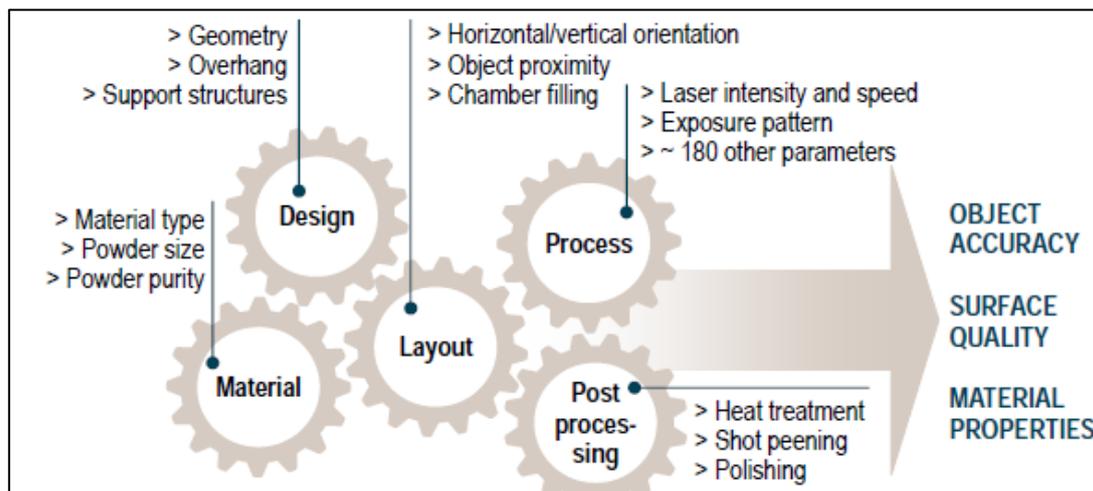


Gráfico 2-9. Todo el proceso de fabricación aditiva de una pieza metálica incluyendo las distintas etapas [8] [11].

2.2 Tecnologías de fabricación aditiva mediante la fusión de un lecho de polvo

La fusión de un lecho en polvo (PBF) es el término reconocido por la ASTM para designar el proceso de fabricación aditiva mediante el cual una fuente de energía fusiona o funde selectivamente una sección de un lecho de polvo.

La fusión de lecho de polvo es la técnica más usada para la impresión de objetos metálicos. Para fundir determinadas secciones del lecho de polvo, los sistemas de PBF, o bien utilizan un rayo láser (con mucha frecuencia), o bien un haz de electrones (con muy poca frecuencia). La PBF mediante la acción de un haz de electrones permite aumentar la velocidad de fabricación, pero la calidad del acabado superficial y la selección de los materiales se ven más condicionados.

Fusión selectiva por láser (SLM)

La fusión selectiva por láser (SLM, por sus siglas en inglés) es una tecnología de fabricación aditiva que consiste en crear un producto añadiendo el material por capas y fundiendo las finas partículas de polvo metálicas con un láser de gran potencia como fuente de energía térmica. Permite elaborar piezas tridimensionales complejas a partir de los datos de un fichero CAD, con una alta precisión ($\pm 0,1$ mm en 25 mm) y una alta calidad en el acabado superficial (5-15 μ m). Esta fabricación inteligente en capas optimiza el diseño de la estructura de la pieza [12], [13].

En lo que respecta a tecnología de SLM, se aplica primero una capa de polvo en la plataforma de trabajo con un recoater (cuchilla o rodillo) y a continuación un haz de láser funde selectivamente secciones de la capa de polvo. Después, la plataforma desciende el espesor de 20 a 100 μ m (dependiendo de los requerimientos de fabricación de la pieza y del acabado deseado) y se aplica una nueva capa de polvo. Esta operación de fusión con haz de láser se repite sucesivamente. Después de que transcurran algunos miles de ciclos,

dependiendo de la altura de la pieza, se retira la pieza del lecho de polvo. En el Gráfico 2-10 se incluye una representación esquemática del proceso.

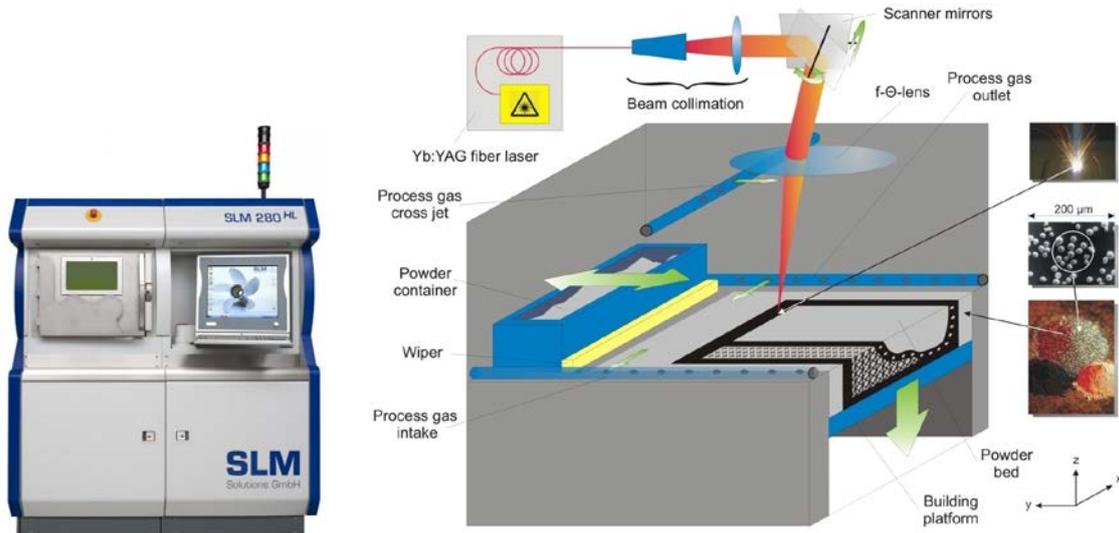


Gráfico 2-10. Representación esquemática del proceso de fusión selectiva por láser (SLM) [14].

En la SLM es posible adoptar diferentes estrategias de escaneo. Los patrones de escaneo láser influirán en el grado de porosidad, la microestructura y la rugosidad de la superficie. La anchura del vector de escaneo define el patrón de rayas, es decir, la anchura de la línea, el espacio entre líneas adyacentes y la dirección del escaneo, así como la superposición con las divisiones vecinas. En cada capa, se pueden emplear varias configuraciones de escaneo con láser (o patrones de líneas). Los parámetros de escaneo se representan esquemáticamente en el Gráfico 2-11.

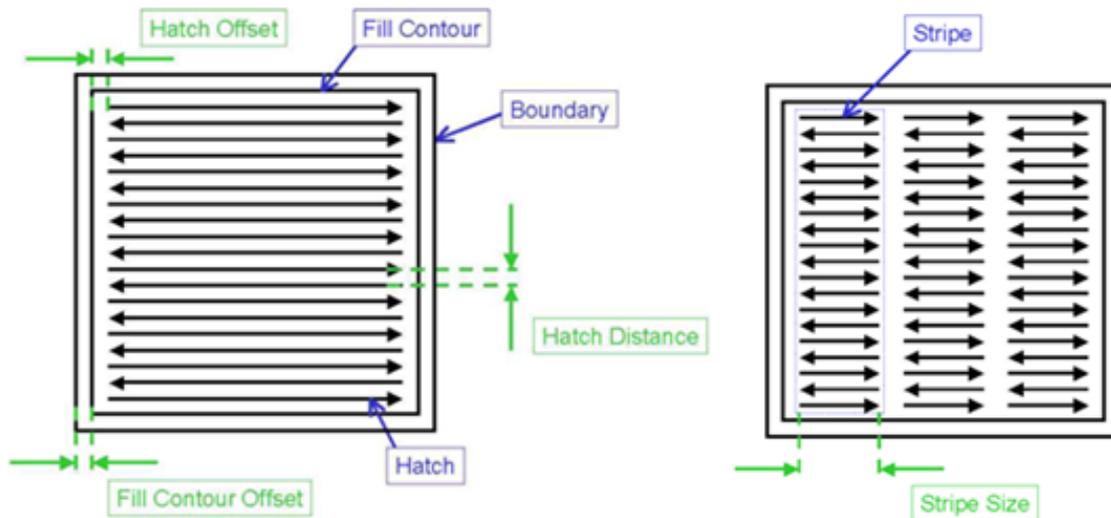


Gráfico 2-11. Parámetros de escaneo representados esquemáticamente

En el gráfico 2-12 se incluye un ejemplo de una pieza industrial fabricada con la tecnología PBF-SLM en el Centro de Investigación IK4-LORTEK.



Gráfico 2-12. Pieza industrial fabricada con la tecnología SLM en el Centro de Investigación IK4-LORTEK.

En lo que respecta a las ventajas y limitaciones de la tecnología SLM, se exponen las características más importantes de los procesos en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Ventajas y desventajas de la tecnología de SLM.

Ventajas de la tecnología de SLM	Desventajas de la tecnología de SLM
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Piezas y herramientas funcionales con formas complejas y únicas de polvos metálicos o cerámicos. ➤ Propiedades superficiales funcionales. ➤ Estructuración superficial, incluida la microestructuración y la nanoestructuración. ➤ Estructuras de peso ligero y composición graduada (potencialmente). ➤ Piezas multimaterial (en desarrollo). ➤ Grado elevado de reciclado de la materia prima en polvo. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Gran rugosidad superficial. ➤ Propiedades anisotrópicas. ➤ Aporte de calor muy localizado: elevadas tensiones residuales. ➤ Precisión de fabricación versus duración. ➤ Ausencia de control de calidad en línea. ➤ Dificultades de evacuación del polvo dentro de los canales de tamaño reducido. ➤ Alto precio de las máquinas para la SLM.

En lo que respecta a la disponibilidad de los materiales, actualmente la fabricación con SLM tiene capacidad para transformar diversos materiales. Se incluye un resumen en la Tabla 2-4.

Tabla 2-4. Descripción de los materiales que se transforman mediante SLM.

Material	Propiedades	Sectores industriales	Aleaciones
Acero inoxidable	Resistencia a la corrosión Buenas propiedades mecánicas	Automoción Construcción Industria química Medicina Bienes de consumo	1,4404 1,4410
Acero para herramientas	Gran dureza Gran resistencia al desgaste Dureza a altas temperaturas Buena maquinabilidad	Producción de moldes de inyección Implantes biomédicos Para corte, prensado, extrusión y acuñación de metales y otros materiales	1,2344 1,4542 1,7228 1,4541 1,4313
Aleaciones de cromo-cobalto	Gran dureza Gran resistencia al desgaste Buena resistencia a la corrosión Propiedades mecánicas adecuadas Biocompatible	Implantes biomédicos Odontología Aplicaciones a altas temperaturas	CoCr (ASTM F75:Co212f)
Superalloys	Gran resistencia a la corrosión Gran resistencia mecánica a	Aeroespacial (motores de turbina)	Inconel 625 Inconel 718

basadas en níquel (Inconel)	altas temperaturas Buena soldabilidad	Generación de energía Tratamiento químico y petroquímico	Inconel HX
Aleaciones de titanio	Resistencia a la corrosión Buenas propiedades mecánicas Biocompatible Maquinabilidad adecuada	Biomedicina Aeroespacial Alta mar Diseño y joyería	Ti6Al4V TiAl6Nb7 Titanio (grado 1)
Aleaciones de aluminio	Propiedades mecánicas atractivas Aleaciones ligeras	Automoción Aeroespacial Bienes de consumo	AlSi12 AlSi10Mg AlSi7Mg AlSi9Cu3 AlMg4 5Mn0.4

Teniendo en cuenta los fabricantes de maquinaria para SLM, hay una amplia oferta de fabricantes de láseres de fusión para lechos de polvo de metales, entre otros: 3D Systems (EE. UU.), Concept Laser (Alemania), EOS (Alemania), Matsuura (Japón), Realizer (Alemania), Renishaw (Reino Unido) o SLM Solutions (Alemania).

Fusión por haz de electrones (EBM)

El proceso de fusión por haz de electrones (EBM, por sus siglas en inglés), representado de manera esquemática en el gráfico 2-13, se considera similar al proceso de fusión selectiva por láser (SLM). En este caso, el aporte de energía se hace por medio de un haz de electrones, en lugar de un láser.

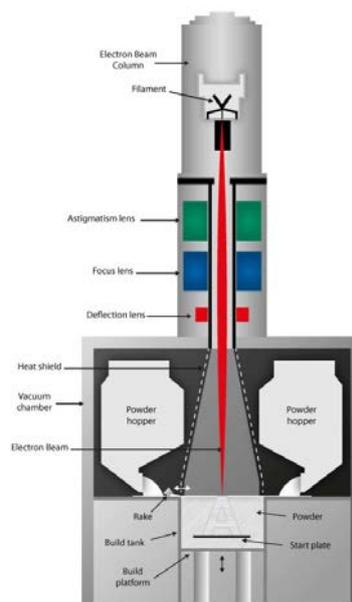


Gráfico 2-13. Imagen de un equipo de fusión por haz de electrones [15].

Durante el proceso de fusión por haz de electrones (EBM), se liberan los electrones de un filamento de tungsteno en el interior de la columna, los cuales se concentran y deflexan

con precisión mediante campos electromagnéticos. Cuando los electrones chocan contra el polvo metálico a gran velocidad, la energía cinética se convierte instantáneamente en energía térmica, elevando la temperatura de las partículas de polvo por encima de su punto de fusión. La tecnología EBM fabrica las piezas en vacío para evitar la pérdida de energía que provocaría el choque de los acelerados electrones con moléculas de aire o gas. El vacío presenta dos ventajas: el proceso tiene una eficiencia energética del 95 %, lo que supera a la tecnología con láser en unas cinco a diez veces, y además, permite procesar aleaciones metálicas reactivas, como es el caso de las aleaciones de titanio o aluminio, es decir, mantiene la composición química del material y proporciona un excelente ambiente para las piezas en construcción. Una de las características más interesantes de este método de fabricación radica en las condiciones del proceso. Por ejemplo, cuando se fabrican piezas de titanio, que presentan generalmente elevadas tensiones residuales, se realiza un precalentamiento del lecho de polvo entre 600 y 700 °C para obtener un gradiente térmico inferior durante la solidificación y evitar dichas tensiones elevadas [13], [16], [17].

La fusión por haz de electrones (EBM) se caracteriza por su gran velocidad de fabricación comparada con otros procesos de lecho de polvo como la SLM (hasta 60 cm³/h), debido a la eficiencia del haz de electrones de alta potencia (véase Tabla 2-5). También son necesarias menos estructuras de apoyo cuando se crea la pieza. Otra limitación de los sistemas de fabricación en lechos de polvo es el tamaño del componente en construcción, que debe ceñirse al tamaño del lecho, el cual restringe su aplicación a componentes relativamente pequeños, normalmente con menos de 400x400x400 mm de longitud, ancho y altura. Por otro lado, las piezas fabricadas con la tecnología EBM se caracterizan por presentar un acabado superficial muy pobre (principalmente porque el espesor de capa que se emplea durante el proceso de fabricación es más grueso), así como más desviaciones dimensionales; los materiales disponibles para esta tecnología también son limitados si se compara con los procesos de fusión de lecho de polvo con láser (apenas titanio Ti6Al4V, titanio Ti6Al4V ELI, titanio del grado 2 y cromo-cobalto ASTM F75).

Tabla 2-5. Comparación de procesos mediante EBM y mediante SLM.

Characteristic	Electron beam melting	Selective laser melting
Thermal source	Electron beam	Laser
Atmosphere	Vacuum	Inert gas
Scanning	Deflection coils	Galvanometers
Energy absorption	Conductivity-limited	Absorptivity-limited
Powder pre-heating	Use electron beam	Use infrared heaters
Scan speeds	Very fast, magnetically-driven	Limited by galvanometer inertia
Energy costs	Moderate	High
Surface finish	Moderate to poor	Excellent to moderate
Feature resolution	Moderate	Excellent
Materials	Metals (conductors)	Polymers, metals and ceramics

Cabe destacar también que la tecnología EBM ha sido particularmente eficaz en el sector de la medicina para la creación de implantes.

En la Tabla 2-6 se incluye una descripción de las propiedades de los diferentes materiales metálicos disponibles para su transformación mediante SLM y EBM. Existe una amplia gama de materias primas que pueden resultar interesantes para la industria aeroespacial.

Tabla 2-6. Descripción de las propiedades físicas y mecánicas de los materiales metálicos disponibles para los distintos procesos de FA: Fusión de lecho de polvo con láser y fusión de lecho de polvo con electrones, así como diferentes empresas.

Nombre comercial	Tecnología de FA	Empresa	Densidad [g/cm ³]	Resistencia a la tracción [MPa]		HV	Dilatación térmica [K ⁻¹] x 10 ⁻⁶		Conductividad térmica [W/m·K]
				Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	
Titanio puro	SLM	SLM Solutions	4,5	290	n.a.	200 HV	n.a.	n.a.	22,6
		RENISHAW	4,5	290	-	n.a.	n.a.	n.a.	22,6
Titanio Ti6Al4V	SLM	SLM Solutions	4,43	972	n.a.	366 HV	n.a.	n.a.	7,1
		EOS	4,41	1180	1280	320 HV	n.a.	n.a.	n.a.
		RENISHAW	4,43	1061	1121	366 HV	n.a.	n.a.	7,1
		ARCAM	4,43	1020	1020	327 HV	n.a.	n.a.	n.a.
Titanio Ti6Al7Nb	SLM	SLM Solutions	4,52	1020	n.a.	386 HV	n.a.	n.a.	7
		RENISHAW	4,52	1155	1215	386 HV	n.a.	n.a.	7
Titanio Ti6Al4V (muy bajos en elementos intersticiales)	ELI EBM	ARCAM	4,43	970	970	318 HV	n.a.	n.a.	n.a.
Titanio (grado 2)	EBM	ARCAM	4,5	570	570	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Acero 1.4404 (316L)	SLM	SLM Solutions	8	595	655	237 HV	n.a.	n.a.	15
		RENISHAW	8	595	655	237 HV	n.a.	n.a.	15
Acero 1.2344 (H13)	SLM	SLM Solutions	7,8	1700	1760	578 HV	n.a.	n.a.	25,6
		RENISHAW	7,8	1700	1760	578 HV	n.a.	n.a.	25,6
Acero 1.2709	SLM	SLM Solutions	8	1080	1140	528 HV	n.a.	n.a.	15
Acero 1.4410	SLM	RENISHAW	8	730	770	237 HV	n.a.	n.a.	15
Acero inoxidable GP1	SLM	EOS	7,8	800	900	230 HV	14	14	13
Aluminio AlSi12	SLM	SLM Solutions	2,7	389	429	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
		RENISHAW	2,7	310	350	110 HV	n.a.	n.a.	n.a.
Aluminio AlSi10Mg	SLM	EOS	2,67	410	465	126 HV	n.a.	n.a.	103

Nombre comercial	Tecnología de FA	Empresa	Densidad [g/cm ³]	Resistencia a la tracción [MPa]		HV	Dilatación térmica [K ⁻¹] x 10 ⁻⁶		Conductividad térmica [W/m·K]
				Mín.	Máx.		Mín.	Máx.	
Cromo-cobalto CoCr F75	SLM	SLM Solutions	8,25	1030	1070	346 HV	n.a.	n.a.	12,5
		RENISHAW	8,25	1030	1070	346 HV	n.a.	n.a.	12,5
	EBM	ARCAM	8,25	960	960	471 HV	n.a.	n.a.	n.a.
Cromo-cobalto MP1	SLM	EOS	8,3	1250	1450	392 HV	13,6	15,1	13
Inconel (2.4665)	HX SLM	SLM Solutions	8,22	910	910	95 HV	n.a.	n.a.	11,6
Inconel 625	SLM	SLM Solutions	8,44	680	680	n.a.	n.a.	n.a.	11,4
		RENISHAW	8,44	680	680	n.a.	n.a.	n.a.	11,4
		EOS	8,4	940	1040	302 HV	n.a.	n.a.	n.a.
Inconel 718	SLM	SLM Solutions	8,19	1200	1200	n.a.	n.a.	n.a.	11,5
		RENISHAW	8,19	1200	1200	n.a.	n.a.	n.a.	11,5
		EOS	8,15	1010	1110	310 HV	12,5	17,2	n.a.

2.3 Deposición de energía dirigida para la FA metálica

La técnica de deposición de energía dirigida (DED) para la fabricación aditiva metálica no está tan generalizada como otras tecnologías de FA, principalmente porque los productos obtenidos con esta tienen una precisión menor y hay que someterlos a un acabado final.

En una máquina de DED típica, una boquilla montada en un brazo robótico de varios ejes deposita el material de aporte sobre una fuente de energía, que se funde y se extruye sobre una superficie especificada y se solidifica. La tecnología DED emplea la acción de una fuente de energía focalizada para unir el material con el sustrato a medida que la boquilla va depositando el material. El principio adoptado es similar a los sistemas de extrusión de material, pero en este caso, la boquilla puede moverse en múltiples direcciones y no está sujeta a un eje específico. El material de aporte en los procesos DED es el hilo o el polvo. Los resultados con hilo son menos precisos dada la naturaleza del diseño preformado, pero el material es más eficiente que el polvo, puesto que solo se utiliza la cantidad requerida. El método para la fusión del material es diferente en función de si se emplea un rayo láser, un haz de electrones o un arco eléctrico (arco plasma, gas inerte de tungsteno o procesos de arco metálico en gas inerte).

La mayoría de los sistemas utilizan un sistema de motor de 4 o 5 ejes o un brazo robótico para colocar un cabezal de deposición, por lo que el proceso no está limitado a la fusión sobre sucesivas capas horizontales. Mientras que en la mayoría de los casos el movimiento se atribuye al brazo y el objeto en construcción permanece en una posición fija, existe la posibilidad de invertir este proceso de manera que se atribuya el movimiento a una plataforma y el brazo permanezca en una posición fija. La elección dependerá de las características exactas de la aplicación y el objeto que se esté imprimiendo. No obstante, la

libertad creativa es menor que en los procesos con lecho de polvo PBF. Además, normalmente es necesario aplicar tratamientos térmicos y mecanizados posteriores a la deposición para conseguir las propiedades mecánicas y las tolerancias geométricas adecuadas.

Se aplica por lo general en reparaciones y mantenimiento de piezas estructurales. Estos procesos se utilizan principalmente para agregar nuevas características en estructuras existentes o para reparar piezas dañadas o desgastadas.

Fabricación directa (EBAM™ o fabricación de formas libres por haz de electrones (EBF³))

La empresa SCIAKY, con sede en Chicago, Illinois, es un importante proveedor de sistemas de fabricación basados en la tecnología de soldadura por haz de electrones [18]. La fabricación aditiva por haz de electrones (EBAM™) de SCIAKY es una tecnología de impresión tridimensional que recrea las principales ventajas de la FA mencionadas con anterioridad, es decir, mejora la velocidad de fabricación, reduce el desperdicio de material, acorta el tiempo de mecanizado y adelanta los plazos de comercialización. Además, el proceso de fabricación mediante EBAM™ destaca por producir a gran escala estructuras metálicas construidas con elementos metálicos de gran valor añadido; se aplican aleaciones de titanio, tantalio y níquel para producir piezas con muy poco desperdicio de material en cuestión de días. Asimismo, el proceso de fabricación EBAM™ se puede utilizar en cualquier fase del ciclo de vida del producto: tanto en prototipos rápidos y piezas de fabricación como en aplicaciones de reparación y refabricación.

La creación de un modelo 3D con un programa CAD es el paso previo al proceso de fabricación aditiva, que consiste en la deposición de metal mediante una pistola de haz de electrones (usando como material de aporte un hilo), capa por capa, hasta que la pieza casi alcance la geometría final y esté lista para el acabado (tratamiento térmico y mecanizado). Las tasas brutas de deposición oscilan entre 3 y 9 kg de metal por hora, dependiendo del material seleccionado y las características de las piezas. En el gráfico 2-14 se incluye una representación esquemática del proceso de fabricación EBAM™.

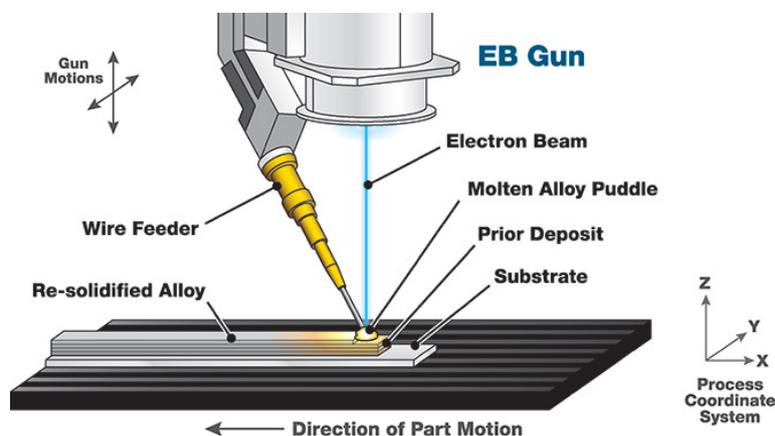


Gráfico 2-14. Representación esquemática del proceso de fabricación EBAM™ [18].

Deposición de metal por láser (LMD)

En el proceso de deposición de metal por láser (LMD, por sus siglas en inglés), una boquilla montada en un brazo de varios ejes deposita el material en el punto de aplicación de una fuente de energía sobre una superficie especificada, donde se funde y solidifica. Los sistemas de alimentación con polvo soplan el polvo a través de esta boquilla, el cual se funde por acción de un rayo de láser en la superficie de la pieza. Este proceso se basa en el aporte automatizado de capas de material con un espesor que oscila entre 0,1 mm y algunos milímetros. La unión metalúrgica del material de aporte con el material del sustrato base y la ausencia de socavados son algunas de las características de este proceso. En el Gráfico 2-15 se incluye una representación esquemática de un proceso de fabricación con LMD.

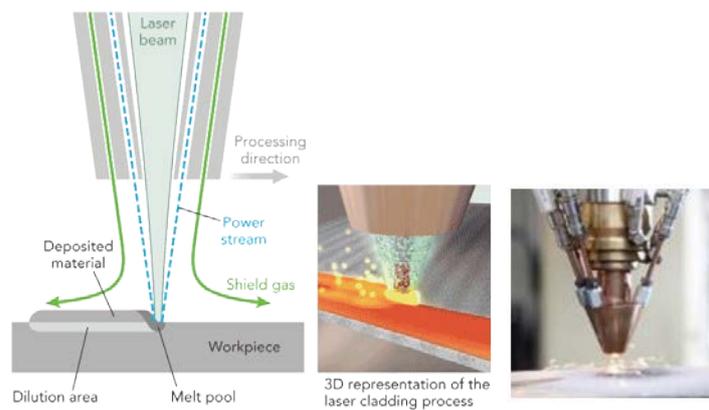


Gráfico 2-15. Representación esquemática de un proceso de deposición de metal por láser.

Por otro lado, en los sistemas que alimentan hilo, como la deposición de metal por láser en estado sólido (LMD-w), la boquilla deposita el hilo sobre el láser, que blinda la operación con un gas inerte tanto en entornos abiertos (el gas se proyecta alrededor del punto de fusión), como en cámaras de gas o recintos sellados. Este proceso favorece una mayor velocidad de deposición en comparación con los procesos que emplean el lecho de polvo y la inyección de polvo en DED.

En general, con la tecnología LMD se alcanza una mayor productividad que con la SLM y también es posible producir piezas más grandes, pero la libertad en el diseño está mucho más limitada; a modo de ejemplo, con este sistema no se pueden fabricar las estructuras reticulares ni los canales internos. En la Tabla 2-7 se incluye un resumen con las ventajas y limitaciones de los procesos que emplean LMD.

Tabla 2-7. Ventajas y desventajas de la tecnología de deposición de metal por láser.

Ventajas de la tecnología LMD	Desventajas de la tecnología LMD
-------------------------------	----------------------------------

- | | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> ➤ Buena adhesión entre el sustrato y el material de aporte: unión metalúrgica. ➤ Gran variedad de aleaciones. ➤ Bajo nivel de dilución. ➤ Velocidad del depósito relativamente alta. ➤ Capacidad elevada de reproducción de procesos. ➤ Impacto menor en las propiedades del sustrato. ➤ Gran flexibilidad en el tamaño de la pieza (longitud de la altura casi <i>ilimitada</i>). ➤ Puede emplearse como recubrimiento con láser para mejorar las propiedades superficiales. | <ul style="list-style-type: none"> ➤ Elevado coste del equipo. ➤ Elevado coste de la materia prima en polvo. ➤ Libertad de creación limitada comparada con los procesos que usan un lecho de polvo. ➤ Etapas de procesamiento posterior necesarias para obtener una buena alineación de la superficie. |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

Fabricación aditiva mediante soldadura plasma (WAAM)

Las tecnologías de fabricación aditiva mediante soldadura plasma (WAAM, por sus siglas en inglés) combinan el aporte de energía mediante arco eléctrico con el aporte de materia prima mediante un hilo y desde la década de 1990 se llevan a cabo investigaciones para su aplicación en la FA, aunque la primera patente se presentó en 1925. La tecnología WAAM utiliza equipos de soldadura: fuente de alimentación de la soldadura, sopletes y sistemas de alimentación con hilo. El movimiento se proporciona, o bien mediante sistemas robóticos, o bien mediante pórticos para soldadura con control numérico por ordenador. Cuando es posible, el gas inerte de metal (MIG, por sus siglas en inglés) es el proceso de elección: el hilo es el electrodo consumible y su naturaleza coaxial al soplete allana la ruta de la herramienta. Por otro lado, la transferencia de metal en frío (CMT, por sus siglas en inglés), una variante modificada de la soldadura por arco metálico en gas inerte (GMAW, por sus siglas en inglés), que se basa en un mecanismo controlado de transferencia de cortocircuito, también ha sido aplicada ampliamente en los procesos de FA debido a su elevada tasa de deposición con baja intensidad de calor. En otros casos, también se aplican otros procesos como el gas inerte de tungsteno (TIG, por sus siglas en inglés) o la soldadura por arco de plasma (PAW, por sus siglas en inglés). En el Gráfico 2-16 [57] se muestra un diagrama esquemático de las aplicaciones de soldadura GMAW, GTAW y PAW.

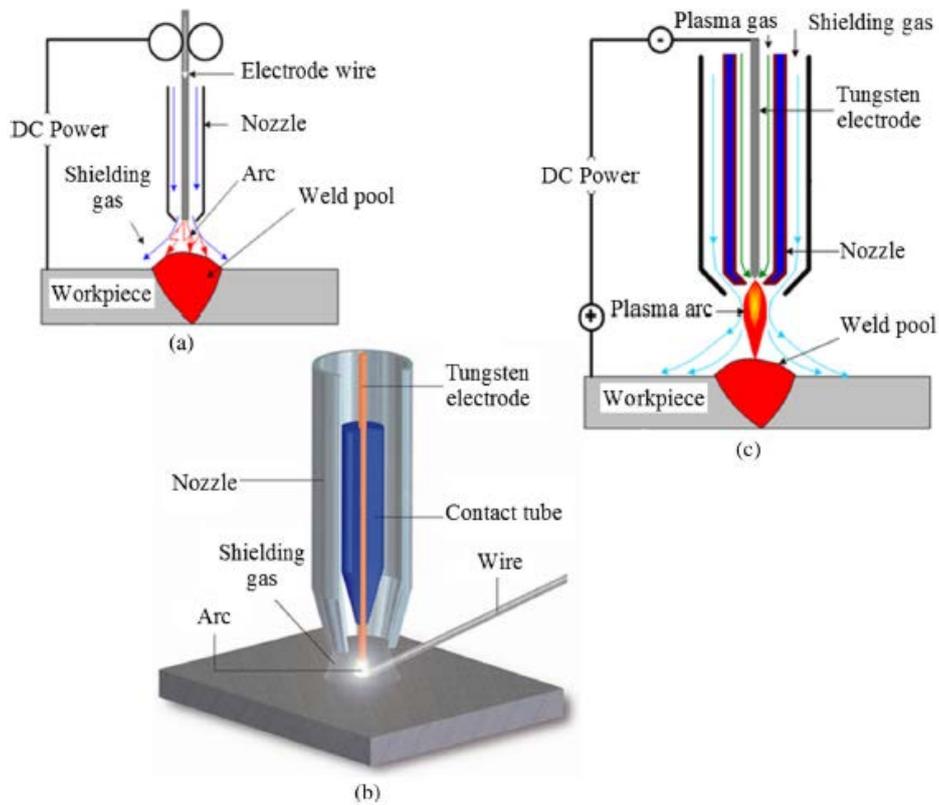


Gráfico 2-16. Diagrama esquemático de los procesos con a) GMAW, b) GTAW y c) PAW [57].

Las elevadas tasas de deposición, los materiales y equipos de bajo coste y la buena integridad estructural del resultado convierten la fabricación aditiva mediante soldadura plasma en un candidato adecuado para reemplazar el actual método de fabricación con palanquillas sólidas o grandes piezas forjadas, especialmente en lo que respecta a las piezas de complejidad medio-baja. Esta tecnología de FA se puede aplicar con un gran abanico de materiales, como el acero y las aleaciones de níquel y titanio. La tecnología de fabricación WAAM es especialmente prometedora para la producción de grandes piezas (véase Gráfico 2-17) y tiene un coste de capital bajo en comparación con otros procesos de FA [58].

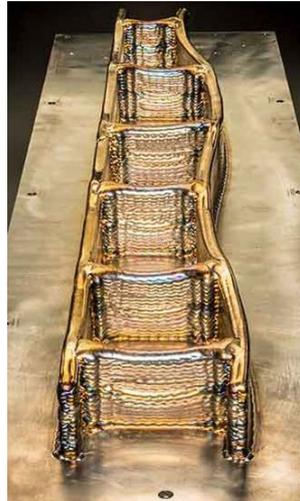


Gráfico 2-17. Pieza de titanio (larguero de BAE Systems) fabricada por medio de un proceso de WAAM [58], [59].

Las principales ventajas y desventajas de la tecnología WAAM se enumeran en la Tabla 2-8.

Tabla 2-8. Ventajas y desventajas de los procesos que emplean la tecnología WAAM.

Ventajas de la tecnología WAAM	Desventajas de la tecnología WAAM
<ul style="list-style-type: none"> ➤ Costes de capital inferiores en comparación con otras tecnologías de FA. ➤ Coste del material y empleo. El hilo de soldar es un material de aporte más barato que el polvo. ➤ Arquitectura abierta. El usuario final puede combinar fuentes de energía y manipuladores de cualquier marca. Control total sobre la máquina. Los programas informáticos se pueden adaptar a los equipos específicos disponibles. ➤ Tamaño de la pieza. El tamaño máximo de la pieza está condicionado únicamente por la capacidad de alcance del manipulador o el tamaño de la envoltura interna de la cámara en el caso de materiales reactivos. ➤ Gran velocidad de los depósitos, que oscila entre 1 kg/h y 4kg/h en acero y aluminio. Se pueden alcanzar valores de 10 kg/h. 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Las tensiones residuales y las distorsiones suponen una gran preocupación para una producción a gran escala con WAAM. Las tolerancias de la pieza pueden verse afectadas. Los fallos prematuros también pueden representar un problema. ➤ Precisión. El rebanado también afecta a la precisión. Se han notificado errores como el <i>desajuste en la descomposición en capas</i> y el efecto <i>escalera</i>. La precisión es 10 veces inferior a la tecnología que emplea un lecho de polvo. ➤ Acabado superficial. La rugosidad superficial está relacionada con la geometría del cordón de soldadura.

No obstante, las limitaciones están relacionadas con la producción de componentes más pequeños de geometrías complejas, ya que los impulsos con una alta intensidad de calor generan unas distorsiones considerables, además de tensiones residuales. Las distorsiones

causan tolerancias bajas, mientras que las tensiones residuales afectan al comportamiento mecánico del componente. Asimismo, es necesario realizar operaciones de procesamiento posteriores debido al deficiente acabado superficial obtenido con la tecnología WAAM.

2.4 Comparación de las tecnologías que emplean la fusión en lecho de polvo (PBF) y las tecnologías de deposición de energía dirigida (DED)

La fusión de un lecho de polvo con láser es la tecnología dominante en el campo de la fabricación aditiva metálica, ya que permite obtener una mayor precisión, calidad superficial y libertad de diseño. Los espesores típicos de fabricación de las capas con la tecnología PBF son de 20-100 μm y las piezas fabricadas pueden alcanzar una precisión dimensional de $\pm 0,05$ mm y una rugosidad superficial de 9-16 μm . Además, es posible producir piezas con materiales graduados funcionalmente (FGM, por sus siglas en inglés). No obstante, la velocidad de deposición de la tecnología PBF es extremadamente baja, normalmente de alrededor de 10 g/m, lo que limita su aplicación a la fabricación de componentes de un tamaño mediano o grande.

En la FA alimentada con hilo, en lugar del polvo metálico, se utiliza un hilo metálico como material de aporte. La deposición del metal en estado sólido se puede aplicar sobre tres fuentes de energía diferentes: el láser, la soldadura plasma y el haz de electrones. La eficiencia en el uso del material en la FA alimentada con hilo es mayor, y llega a alcanzar el 100 % del material del hilo depositado en la pieza. Por lo tanto, es un proceso más respetuoso con el medio ambiente. Además, los hilos metálicos son más baratos y están disponibles con más facilidad que los polvos metálicos con propiedades adecuadas para la FA. Los procesos DED que basan su tecnología en el empleo del hilo como materia prima de aporte alcanzan velocidades de deposición mucho mayores que las tecnologías que se alimentan con polvo. No obstante, es justo decir que cuando se selecciona el tipo de proceso de FA que se emplea sobre un determinado componente, existe una solución de compromiso entre la elevada resolución y las velocidades de deposición alta.

En la Tabla 2-9 se incluye una comparación entre la fusión de un lecho de polvo y la deposición de energía dirigida.

Tabla 2-9. Comparación de procesos de FA: fusión en lecho de polvo y deposición de energía dirigida [2], [22], [23]

	PBF - SLM	DED - LMD	DED - WAAM	DED - EBF3
MATERIALES	Menos experiencia y más limitada en contraste con la DED	Mayor diversidad de materiales		Elementos metálicos con un alto valor añadido
TAMAÑO DE LA PIEZA	Condicionado por la cámara de transformación, 500x280x325 mm		Condicionado por el sistema de tratamiento, 2000x1500x750 mm	

COMPLEJIDAD DE LA PIEZA	Casi ilimitada	Limitada		
PRECISIÓN DIMENSIONAL	±0.04 mm	≥0.1 mm	±0.2 mm	Baja
VELOCIDAD DE FABRICACIÓN	1-3 mm ³ /s	3-10 mm ³ /s	1-4 kg/h	3-9 kg/h
CALIDAD DEL ACABADO SUPERFICIAL (RUGOSIDAD, Rz)	5 - 15 μm	30 - 200 μm	200 μm	Elevada
ÁREA DE FOCALIZACIÓN	- Prototipado rápido - Fabricación directa de las piezas	- Reparación de componentes desgastados - Modificación del utillaje para usos posteriores - Fabricación directa de las piezas		

2.5 Estado de desarrollo de las tecnologías de FA

Actualmente, la fabricación aditiva está considerada como una fabricación disruptiva en diferentes niveles de requisitos (aplicaciones, materiales), y en función de estos se han desarrollado diferentes tecnologías. El objetivo de esta sección es ofrecer información relevante sobre el estado de desarrollo de cada una de las tecnologías de FA.

Tecnologías de fabricación aditiva mediante la fusión de un lecho de polvo

Las tecnologías analizadas en función del grado de desarrollo de la fusión del lecho de polvo son: SLM y EBM.

Tabla 2-10. Estado de desarrollo de la SLM

Fusión selectiva por láser (SLM)
Antigüedad de la tecnología:
18 años
De la más antigua a la más reciente

Fockele & Schwarze
Fecha de irrupción en el mercado:
1999
Número de proveedores
19
Uso más extendido
La SLM es la tecnología más extendida en el sector médico y el sector del utillaje. En el sector aeroespacial, las aplicaciones más corrientes son los inyectores de combustible, los elementos estructurales y los álabes.
Información de interés adicional
Se empezó a utilizar para elaborar prototipos de plástico. El estado de desarrollo de la fabricación con tecnología SLM depende de los materiales y de su aplicación. En lo que respecta al uso de SLM en el sector aeroespacial, el nivel de madurez tecnológica oscila entre 5-7, como puede observarse en el Gráfico 1. Esto depende en gran medida del material y la aplicación.
<p>Aerospace > Fuel injection > Structural elements > Blades</p> <p>Tooling > Tooling inserts</p> <p>Automotive > Air ducts > Formula 1 components</p> <p>Medical > Crowns and copings > Artificial hip joints > Medical instruments</p> <p>Examples</p> <p>10 Full-rate production 9 Low-rate production 8 Pilot line capability demonstrated 7 Capability in operational environment demonstrated 6 Systems produced (simulated environment) 5 Basic capabilities shown (simulated environment) 4 Technology validated in laboratory environment 3 Manufacturing proof of concept developed 2 Manufacturing concept identified 1 Basic manufacturing implications identified</p>
Gráfico 1. Nivel de madurez tecnológica de la SLM en diferentes sectores [88].

Tabla 2-11. Estado de desarrollo de la EBM

Fusión por haz de electrones (EBM)
Antigüedad de la tecnología:
19 años

De la más antigua a la más reciente
ARCAM «EBM S12» y las nuevas son ARCAM Q10 y Q20
Fecha de irrupción en el mercado:
1998
Número de proveedores
1
Uso más extendido
Álabes para motores de avión e implantes.
Información de interés adicional
La tecnología EBM con titanio en el sector aeroespacial se encuentra en el nivel 9 de madurez tecnológica. Igual que en el caso de la tecnología SLM, el estado de desarrollo de la tecnología EBM depende de los materiales y las aplicaciones.

Tecnologías de deposición de energía dirigida

Las tecnologías analizadas en función del grado de desarrollo de la fusión del lecho de polvo son: LMD, EBAM® y WAAM.

Tabla 2-12. Estado de desarrollo de la LMD

Deposición de metal por láser (LMD)
Antigüedad de la tecnología:
19 años
De la más antigua a la más reciente
Optomec LENS
Fecha de irrupción en el mercado:
1998
Número de proveedores
8
Tecnología más popular

Polvo inyectado e hilos
Uso más extendido
Inicialmente para aplicaciones de revestimiento y reparación.
Información de interés adicional

Tabla 2-13. Estado de desarrollo de la EBAM

Fabricación aditiva con haz de electrones (EBAM®)
Antigüedad de la tecnología:
8 años
De la más antigua a la más reciente
EBAM de Sciaky
Fecha de irrupción en el mercado:
2009
Número de proveedores
1
Uso más extendido
Componentes estructurales de titanio para aviones
Información de interés adicional
Excelente selección para aleaciones refractarias y materiales disímiles

Tabla 2-14. Estado de desarrollo de la WAAM

Fabricación aditiva mediante soldadura plasma (WAAM)
Antigüedad de la tecnología:
Esta técnica de fabricación emplea diferentes tecnologías de soldadura electrógena: Soldadura TIG (soldadura por arco de tungsteno y gas), GMAW (soldadura por gas inerte de metal) y PAW (soldadura por arco de plasma). Estas tecnologías han sido ampliamente desarrolladas para los procesos de unión. El uso de estas tecnologías en la fabricación aditiva fue patentado por Baker en el año 1920, y consistía en la producción de piezas metálicas 3D mediante la superposición de cordones de soldadura utilizando la soldadura por arco manual. Gracias a la inserción de brazos robóticos fue posible desarrollar piezas

<p>más precisas y automatizadas. En los años 90, la tecnología WAAM fue impulsada por el Centro de Investigación de Ingeniería de Soldaduras de la Universidad de Cranfield (Welding Engineering Research Center).</p>
<p>De la más antigua a la más reciente</p>
<p>Métodos TIG de 1940, métodos MIG de 1950.</p>
<p>Fecha de irrupción en el mercado:</p>
<p>Esta tecnología se comercializa desde hace mucho tiempo para procesos de soldadura. La innovación en este campo procede del desarrollo de las tecnologías centradas en la estabilidad del arco para la soldadura de los diferentes materiales y las velocidades de deposición. La investigación y la innovación que se está desarrollando en diferentes lugares (universidades y centros tecnológicos en estrecha colaboración con grandes fabricantes), no se ha aplicado todavía a nivel industrial.</p>
<p>Número de proveedores</p>
<p>Máquinas industriales en período de desarrollo</p>
<p>Tecnología más popular</p>
<p>GTAW, GMAW y PAW</p>
<p>Uso más extendido</p>
<p>El objetivo de aplicar de estas tecnologías en el campo de la fabricación aditiva es construir piezas grandes con una velocidad de deposición elevada y más eficientes desde el punto de vista de la cantidad de material empleado, que permitan el uso de materiales de alto coste con una complejidad medio-alta.</p>
<p>Información de interés adicional</p>
<p>Norsk Titanium empezó a fabricar piezas de metal con tecnología PAW para que Boeing obtuviese las certificaciones.</p>

2.6 Simulación numérica en la fabricación aditiva

Introducción

En la actualidad, la fabricación aditiva (FA) está revolucionando la fabricación de productos gracias a cuatro ventajas principales [70]:

- La FA ofrece más libertad de diseño de los objetos en comparación con los procesos clásicos (fundición y otros);
- La FA es ecológica, porque solo se emplea el material necesario para fabricar el producto (esto es cierto en parte, teniendo en cuenta que siempre se malogra cierta cantidad de polvo);

- Las máquinas de FA son adaptables: pueden producir cualquier producto (no están destinadas a crear un único tipo de fabricación/producto). Las dimensiones de la pieza son el único factor que limita esta técnica.
- Permite personalizar las piezas para adaptarse perfectamente a las necesidades del usuario.

A pesar de todas sus ventajas, la fabricación aditiva se enfrenta a algunos problemas relacionados con el desconocimiento que existe sobre las capacidades de los procesos de FA. Esto genera una diferencia entre la geometría esperada (en la teoría) y la geometría real producida [1]. Para resolver este problema, es necesario realizar algunas operaciones de acabado adicionales o modificar sucesivamente el diseño teórico de cara a alcanzar la geometría esperada. De cualquier manera, esto implica unos cargos adicionales sobre el coste de producción.

La diferencia que existe entre los 2 diseños se debe principalmente a [71]:

- Falta de conocimiento sobre los fenómenos físicos que ocurren durante el proceso de fabricación. Dado que no se conocen completamente estos fenómenos durante el proceso de producción, es muy difícil pronosticar la calidad final del producto;
- Los fenómenos físicos implícitos descansan en el proceso de fabricación y en la planificación del proceso utilizada. Todos los parámetros deben integrarse lo antes posible en el proceso de diseño.

El la deposición láser con polvos de metal (LMD-P, por sus siglas en inglés), los principales parámetros vinculados al proceso de fabricación son el material, la potencia del láser, el flujo del polvo, el chorro de gas y la velocidad de soldadura [72].

La orientación de la pieza durante la fabricación y la estrategia de escaneo seleccionada también influyen en las características finales del producto. Considerando el proceso con un «lecho de polvo» y utilizando los mismos parámetros de fabricación, Bo [73] comparó dos tipos de estrategias de escaneo, una en secuencia de «barrido» y otra en «espiral» para fabricar la pieza de una turbina. El resultado de la comparación de las dos estrategias de escaneo fue incuestionable: no es posible fabricar la pieza empleando la técnica de escaneo en secuencia de «barrido». Debido a unas condiciones térmicas demasiado estrictas, la pieza quedó inutilizable durante el proceso de fabricación. La diferencia en la intensidad y la localización de las condiciones térmicas inducidas en cada estrategia de escaneo depende también del proceso de fabricación. Foroozmehr [74] llegó a la misma conclusión sobre la influencia de la estrategia de escaneo estudiando el proceso de proyección del polvo.

Por último, la fabricación aditiva también influye en algunos parámetros del producto fabricado: su acabado superficial (rugosidad, curva irregular, pero con forma de «escalera», etc.), su resistencia a las condiciones termo-mecánicas, las deformaciones inherentes (Bikas [75]), etc., que deben tenerse en cuenta a la hora de modelar el proceso de fabricación que es necesario en este tipo de fabricación. No obstante, solo es posible aprovechar los resultados numéricos si el modelo numérico se acerca lo suficientemente al comportamiento real de la pieza.

En la fabricación aditiva, son numerosos los parámetros que influyen y caracterizan el proceso (como la velocidad del láser, el flujo de polvo, la potencia del láser, etc.), el producto final fabricado (deformaciones residuales, entre otros), la posición de la pieza durante la soldadura, etc. En el caso de que se considere necesario una simulación numérica, en estos momentos, en el campo de la fabricación aditiva, es imposible elaborar un modelo de una pieza completa teniendo en cuenta todos los parámetros implícitos [70]. Aunque estos aspectos han sido investigados en los últimos años, no hay ningún método o herramienta que permita simular la fabricación de una pieza compleja en un tiempo razonable. El que sea «compleja», lleva implícito que la pieza no está formada por un cordón de soldadura recto (con una o múltiples capas rectas). Esta falta de herramientas numéricas es debida a la relativa juventud de estos procesos de fabricación, pero también al conocimiento parcial que se tiene de todos los fenómenos multifactoriales involucrados. Además, la complejidad de estos fenómenos hace que la creación de los modelos numéricos y su solución se complique, incrementando el tiempo necesario para resolver las ecuaciones (Kumar [76]).

Simulación por elementos finitos

Durante los últimos diez años, se han publicado muchos estudios sobre la modelización directa de los fenómenos físicos implícitos en la fabricación aditiva. Estos fenómenos se combinan e interaccionan entre sí. En la proyección de polvo, la geometría final de las piezas depende principalmente de dos factores:

- La evolución de la geometría local de la soldadura durante la fabricación;
- Los desplazamientos y las deformaciones inherentes inducidas por la fabricación.

La evolución de la geometría local de la soldadura depende directamente de las dimensiones del depósito de material fundido creado por el láser sobre el sustrato de base. También está condicionado por el flujo de polvo, en lo que respecta a su cantidad y distribución. Por otro lado, las deformaciones residuales y los desplazamientos dependen de los gradientes de temperatura y de las propiedades termo-mecánicas de los materiales que se utilizan.

En este sentido, Toyserkani [77] desarrolló un modelo 3D para estudiar la influencia de los principales parámetros del proceso en las características del área fundida. Cho [78] completó el modelo introduciendo el factor de la influencia de la temperatura latente de un dominio semiinfinito. La comparación de los resultados numéricos y experimentales en una capa de cordones (gotas) de soldadura muestra una coincidencia significativa entre ellos.

En cuanto a los desplazamientos y tensiones inherentes debidas a los campos térmicos, ya se han realizado también algunos estudios. Ghosh [79] desarrolló un modelo en el que abarca el cambio de fase de los materiales para determinar las tensiones inherentes a la fabricación de una capa formada por un cordón de soldadura. Foroozmehr [74] tuvo en consideración el aporte continuo de material activando poco a poco los elementos de la malla de la pieza. De esta manera, se obtienen modelos de todas las deformaciones residuales de una capa completa de un cordón de soldadura.

En la mayoría de los estudios sobre fabricación aditivos, la deformación de la pieza se calcula con la siguiente ecuación:

$$\epsilon_{i,j} = \epsilon_{i,j}^M + \epsilon_{i,j}^P + \epsilon_{i,j}^T \quad (1)$$

Siendo $\epsilon_{i,j}^M$, $\epsilon_{i,j}^P$ y $\epsilon_{i,j}^T$ las deformaciones debidas a la tensión mecánica, a la plasticidad del material y al gradiente de temperatura respectivamente. Generalmente se considera que existe una relación lineal entre tensión/deformación:

$$\sigma_p = D_{p,i,j} \cdot \epsilon_{i,j} \quad (2)$$

Siendo σ_p la tensión elástica y $D_{p,i,j}$ el tensor de rigidez del material usado.

Los estudios que se centran en el vínculo entre las tensiones y las deformaciones de las piezas suelen formar parte de los resultados experimentales que validan el modelo térmico. No obstante, la mayoría de ellos se realizan sobre geometrías simples, tales como los cordones de soldadura rectos con una o varias capas.

Para definir la geometría local de la soldadura, ya existe una multiplicidad de planteamientos. En la investigación de Morville [80], un modelo 2D determina la geometría local de la soldadura deformando la malla original de conformidad con las fuerzas de capilaridad y de termo-capilaridad inducidas por los gradientes de temperatura (el efecto «Marangoni»). Otros autores como Toyserkani [77] también crean modelos de la soldadura, pero lo hacen en 3D. Para ello, definen los contornos del depósito de material fundido en cada uno de los intervalos de tiempo y modelan el aporte de material en el área de depósito con la siguiente ecuación:

$$\delta h(x,y) = \delta t \cdot m_p / \rho \cdot S_{powder} \quad (3)$$

Siendo δt el intervalo de tiempo de la simulación, m_p el caudal másico, ρ la densidad del polvo y S_{powder} la superficie de la proyección del chorro de polvo sobre la pieza.

Este modelo ha sido reutilizado en algunos estudios, reforzando la validez de su aplicación para un cordón de soldadura con una capa, pero también para cordones de soldadura con múltiples capas (Alimardani [81], Fallah [82]). Sin embargo, la simulación de piezas complejas es ocasional, porque es necesario emplear mucho tiempo para resolver los modelos. Actualmente, para simular un cordón de soldadura recto con una longitud equivalente a unas pocas decenas de milímetros, el tiempo necesario para la modelización varía entre unas pocas horas y varios días, dependiendo del ordenador y los modelos empleados.

Programas informáticos más utilizados

Hay diferentes maneras crear modelos de piezas para fabricar aditivamente usando diferentes programas de simulación. En los textos de referencia, podemos observar algunos:

- Toyserkani [77] determinó las ecuaciones analíticas de los diferentes fenómenos involucrados. Luego, utilizó los programas MATLAB y FEMLAB para resolverlas. Se utilizó una malla de tetraedro con un sistema de ajustes paso a paso.
- Cho [78] utilizó el programa ABAQUS. Se centró en el calor latente y en su efecto sobre la fabricación aditiva. Desarrolló un modelo completo de fabricación aditiva.
- Al igual que Foroozmehr [74], Fallah [83] utilizó Ansys APDL para resolver su modelo numérico. Representó el principio «aditivo» de la fabricación gracias a la adición/eliminación de elementos de la malla. También se tuvieron en cuenta los comportamientos termomecánicos.
- Alimardani [81] utilizó COMSOL Multiphysics 3.2a para desarrollar sus propios modelos numéricos gracias a que pudo realizar acoplamientos con los códigos MATLAB.

Los programas informáticos que se usan habitualmente para hacer simulaciones mecánicas no han sido desarrollados para realizar simulaciones de fabricación aditiva (Ansys, Abaqus, Matlab, CodeAser), por lo que resultan menos interesantes. No obstante, se han desarrollado nuevos programas informáticos con vistas a cumplir con las especificaciones de las simulaciones de fabricación aditiva:

- Virfac de GeonX. Se basa en simulaciones de cordones de soldadura y está adaptado para trabajar con procesos de fabricación en lecho de polvo; pronto se integrará al programa un nuevo módulo que simule el proceso de la proyección del polvo;
- Simufact Additive Manufacturing parece un programa muy completo simulando todo el proceso aditivo de cara a determinar las deformaciones inherentes en el producto final;
- SolidThinking Inspire;
- 3DSIM: con ExaSIM, dedicado al sinterizado láser.
- Project Pan: se centra en los procesos de fabricación mediante lechos de polvo y mediante deposiciones directas de polvo o sólidas. No obstante, también ofrece un módulo que proporciona los parámetros de fabricación para limitar las deformaciones inherentes en el producto final.

2.7 Optimización topológica

Introducción

La optimización topológica es una técnica que trata de buscar la distribución óptima del material en una pieza para obtener el diseño óptimo. Para ello se tienen en cuenta tanto la finalidad del objeto como las diferentes tensiones aplicadas. Se crean modelos de las características de diseño, como el número, ubicación y forma de los agujeros, etc. (Driessen [83]).

La optimización topológica se utiliza para redefinir la topología de la pieza manteniendo solo el material necesario (contornos, número de agujeros, etc.) e incrementar el potencial de optimización. Takezawa [84] considera que, entre los diferentes tipos de optimización mecánica, la optimización topológica es la que ofrece mejores resultados cuando se trata de buscar el diseño funcional óptimo de la pieza. Normalmente se consideran dos maneras de hacer esto: el planteamiento de la optimización topológica de estructuras continuas y el planteamiento de la optimización topológica de estructuras discretas.

El planteamiento de la optimización topológica de estructuras continuas o método de homogeneización (Bendsoe y Sigmund [85]) es un método corriente basado en el método de densidades. La pieza se divide en un número infinito de variables infinitesimales. El espacio de diseño (en azul en el gráfico 2-18) se divide en volúmenes infinitesimales. Se asocia una variable a la densidad de cada volumen. Las variables pueden tener dos valores: 1 si el valor de densidad es positivo (el volumen se mantiene; representado en rojo en el gráfico 18); y 0, si el valor de densidad es nulo (el volumen se elimina, representado en blanco en el Gráfico 2-18). Así, después del proceso de optimización, la geometría de la pieza es la que está formada por los volúmenes infinitesimales que tienen una densidad positiva. La principal ventaja de este método es que el diseño óptimo no depende de la geometría inicial. El planteamiento no está influenciado por sesgos negativos o positivos. El método arroja geometrías muy diferentes a los diseños habituales que nos imaginamos en primera instancia.

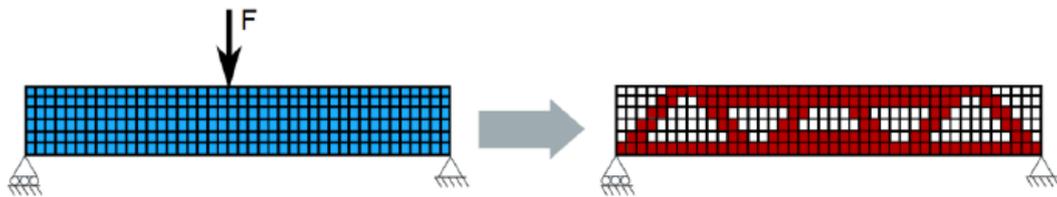


Gráfico 2-18. Ilustración del proceso de optimización topológica de estructuras continuas.

El segundo planteamiento se basa en elementos discretos. Tiene en cuenta los elementos básicos de la mecánica estructural (viga, armazón, etc.). Este método es una combinación de múltiples tipos de optimización (escala, forma y topología) más que una técnica de optimización topológica por sí sola. La modificación de la estructura se realiza mediante adición o eliminación de algunos elementos. De esta manera, el diseñador trata con elementos con los que trabaja habitualmente y es más fácil para él predecir el impacto de los cambios en el comportamiento de la estructura al completo. Por otro lado, el resultado final depende claramente de la geometría inicial. Para ilustrar este método, se utiliza el mismo ejemplo del gráfico 2.19. El modelado de la viga inicial se completa con el montaje de varias barras pequeñas. El diseñador puede elegir mantener o no las barras pequeñas. El resultado final del gráfico 19 queda cerrado al proceso continuo, pero tiene más dependencia de la geometría inicial y la posición inicial de las barras pequeñas.

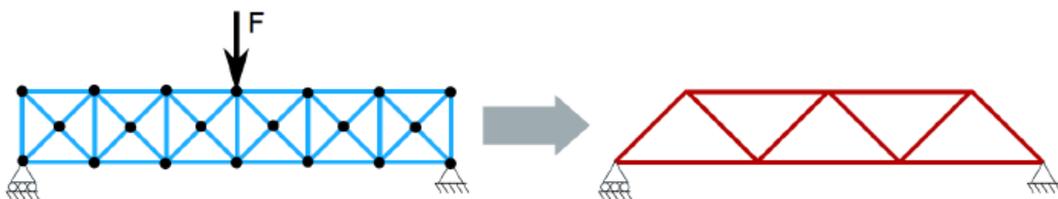


Gráfico 2-19. Ilustración del proceso de optimización topológica discreta.

Teniendo en cuenta los diferentes tipos de problemas de optimización que suelen presentarse, el proceso de optimización topológica continua parece que es el que mejor se ajusta para aprovechar las oportunidades de la fabricación aditiva (Ponche [70]). De hecho, este método es el mejor teniendo en cuenta que el espacio de diseño inicial no

afecta al resultado final. Esta es la razón por la que nos centramos en este tipo de optimización.

Técnicas de optimización continua

Uno de los métodos más utilizados es la penalización (material sólido isotrópico con penalización) expuesto por Bendsoe [85]. Este método utiliza un modelo de rigidez penalizado para interpolar el módulo de elasticidad del material:

$$(x) = x_e^p E_0 \quad (4)$$

En donde (x) es el módulo de elasticidad del elemento e ; x_e^i las variables de diseño o densidad de los elementos; E_0 el módulo de elasticidad de un elemento sólido; y p el parámetro de penalización.

En la metodología del material sólido isotrópico con penalización (SIMP, por sus siglas en inglés), el valor del parámetro de penalización que se elige generalmente es superior a 1 (frecuentemente =3). Este método de interpolación origina densidades intermedias que no son adecuadas debido a su baja rigidez en comparación con su densidad (Driessen [83]). Algunos autores como Zegard [86] utilizan una versión diferente del modelo para salvar algunas dificultades.

La técnica del vacío-sólido también se utiliza habitualmente con el algoritmo de optimización BESO (siglas en inglés de optimización estructural evolutiva bidireccional) para la optimización de la fabricación aditiva, ya que proporciona resultados muy interesantes. Existen otros métodos como los algoritmos genéticos o el método del conjunto de nivel, pero su capacidad para resolver los problemas de manera significativa no ha sido probada todavía (Brackett [87]).

En la actualidad, se están desarrollando programas informáticos de optimización topológica para dar respuesta a las principales limitaciones inducidas por los procesos de fabricación convencionales. Uno de los intereses más importantes de la fabricación aditiva es precisamente que la mayoría de las restricciones de fabricación no son aplicables a este proceso aditivo. De hecho, la fabricación «capa a capa» permite todas las geometrías, en particular, las que son imposibles de producir con técnicas de fabricación convencionales: el proceso de fabricación apenas constriñe los diseños de la pieza, solo lo hacen las necesidades del usuario (resistencia de los materiales, formas, etc.). Gracias al proceso de impresión, el aumento de la complejidad de las piezas no da lugar a un aumento de su precio: el coste de fabricación es casi el mismo que en los procesos convencionales, o puede incluso ser más barato si no se utilizan estructuras de apoyo.

Principales dificultades de la optimización topológica en la fabricación aditiva

Dimensión de la malla

La primera restricción que presenta la optimización topológica en el proceso de fabricación aditivo es el tamaño máximo de los elementos de la malla para obtener una

optimización topológica que signifique algo. En efecto, la fabricación aditiva permite que el espesor de la pared sea muy fino. En contraste, la optimización topológica exige un mínimo 2 o 3 elementos para cada espesor. Esto entraña que los elementos sean muy pequeños y que se necesite un gran número de elementos para representar la pieza al completo en la malla; por lo que el tiempo necesario para optimizar la topología de la pieza aumenta drásticamente.

Limitaciones de fabricación

Algunos diseños requieren estructuras de apoyo debido a sus ángulos de inclinación (con el plano horizontal) y al método de fabricación utilizado (el gradiente de temperatura es más o menos importante). Dependiendo del ángulo de inclinación, existe un valor de distancia máximo compatible con la fabricación aditiva. Por ejemplo, el estudio de Brackett [87] demuestra que, con un ángulo de 25°, la distancia máxima es de 15 mm; con un ángulo de 30°, la distancia máxima es de 20 mm; y, si el ángulo es superior a los 45° no existe límite. En los otros casos, es necesario el uso de estructuras de apoyo.

El acabado superficial de las piezas fabricadas es generalmente insatisfactorio. Si se desea obtener un producto funcional, es necesario considerar una etapa de acabado. Esto significa que es necesario tener acceso a todas estas superficies, lo que no siempre es factible.

La optimización topológica se basa en una forma discreta de la pieza, desde la cual, se pueden eliminar algunos elementos. Generalmente es necesario suavizar las superficies después de la optimización topológica. Algunos programas informáticos como Materialize Magics, Netfabb Studio y Marcam Autofab exportan la geometría suavizada; en caso contrario, tiene que hacerlo el propio diseñador en CAD. El módulo OSSmooth de Optistruct también lo hace. Este módulo permite la modificación directa de la geometría o la mezcla entre diseños optimizados y diseños locales de CAD (importados en formato .STL).

Finalmente, es importante subrayar que se debe realizar la simulación de cada nuevo diseño dos veces: una primera vez, para simular la fabricación y definir las deformaciones inherentes, y la segunda, para comprobar la resistencia del material.

¿Fabricación con un solo material o con una multiplicidad de materiales?

Algunos procesos de fabricación están más adaptados a la fabricación con una multiplicidad de materiales que otros. Los procesos de fabricación que emplean el chorro (impresión 3D) o la extrusión son especialmente adecuados para una producción con multiplicidad de materiales, mientras que los procesos que emplean las técnicas de fusión en lecho de polvo, fusión selectiva por láser, sinterizado selectivo por láser y estereolitografiado son procesos de un solo material (Brackett [87]).

Programas informáticos

Entre los programas informáticos disponibles, Brackett [78] ha probado TOSCA (FE Design). Este programa informático comercial no está adaptado para hacer una optimización topológica de las paredes de piezas de fabricación aditiva porque solo

existen 2 capas de refinamiento posibles para cada espesor. Además, el nivel de regeneración de la malla necesario en piezas de fabricación aditiva no es suficiente.

En la actualidad, el espesor del cordón de soldadura es la única limitación que debe tenerse en cuenta en una optimización topológica. Se puede encontrar esta restricción en el programa Optistruct (y 3-MaticSTL para postratamiento de la geometría antes de la fabricación) de Altair y Nastran (MSC).

Entre los programas informáticos comerciales, los más utilizados son:

- Materialise Magics;
- Netfabb Studio;
- Marcam Autofab;
- NX Hybrid Additive Manufacturing (que permite la creación de prototipos, la fabricación y la fijación de productos);
- MI: Additive Manufacturing;
- GENESIS Topology (Ansys);
- 3DSIM (que incluye un módulo de simulación de fabricación).

2.8 Estrategias de escaneo

Como se ha explicado anteriormente, algunos estudios ya han subrayado que la estrategia de escaneo elegida para la fabricación aditiva influye en la geometría final del producto (Bo [73]). Por lo tanto, se han desarrollado varios programas para obtener trayectorias óptimas, tales como:

- PowerCLAD;
- El módulo Grasshopper de Rhino (Duballet [19]); que también puede utilizarse para la optimización topológica (Ren [20]).

PowerCLAD se apoya en los módulos PowerSHAPE y PowerMILL desarrollados por Autodesk (denominado anteriormente Delcam) e IREPA LASER. Desde el módulo PowerMILL, se han invertido las trayectorias de mecanizado y la colisión entre la herramienta y la pieza en bruto para definir las estrategias de escaneo. Esta forma de invertir la estrategia en comparación con los procesos clásicos de fabricación se puede aplicar también en otros programas para la fabricación asistida por ordenador (CAM, por sus siglas en inglés) como CATIA. No obstante, Dassault Systems ha optado por desarrollar su propio módulo Delmia para determinar las trayectorias. De forma similar, Siemens ha introducido un nuevo módulo en su programa CAD NX (dedicado a la fabricación aditiva) denominado Nx Hybrid Additive Manufacturing.

Por último, los fabricantes de máquinas que empleen las técnicas aditivas tienen que proporcionar sus propias soluciones (generalmente, un programa informático no comercial) para generar las estrategias de escaneo. Los más conocidos son Cura 3D y MakerBot Print.

3 FABRICACIÓN ADITIVA: OFERTA TECNOLÓGICA

3.1 Motivación y posibilidades

La fabricación aditiva (FA), conocida popularmente como impresión 3D, promete causar una transformación profunda en el desarrollo de productos, desde su conceptualización hasta la producción de nuevos productos. La tecnología de FA se hizo popular con el prototipado rápido de componentes de polímero, pero su capacidad tecnológica para producir componentes de metal tiene el potencial de convertirse en un verdadero elemento de cambio. Ya no constituye apenas un simple atajo que permite a los diseñadores e ingenieros materializar rápidamente en prototipos físicos sus concepciones a partir de modelos digitales. Por el contrario, el proceso de FA ofrece la posibilidad de crear productos completamente nuevos que no podrían ser fabricados usando métodos de producción convencionales.

Las tecnologías de FA pueden revolucionar muchos sectores industriales en todo el mundo, reduciendo los plazos de comercialización, los costes, los desechos de material, el consumo de energía y las emisiones de carbono. Por otro lado, la FA viene a aportar nuevas metodologías y capacidades de producción, las cuales hasta ahora estaban limitadas al uso de los procesos de producción sustractivos convencionales, y a abrir nuevos caminos en el ciclo de vida de los equipos y componentes, lo que nos permite prolongar la vida útil de las piezas en servicio por medio de metodologías de reparación innovadoras o por medio de la producción de piezas de repuesto sin necesidad de usar unas herramientas en muchos casos ya inutilizables. A modo de ejemplo, podemos citar el caso del sector aeroespacial, donde el uso de una FA con esta capacidad para focalizar la construcción podría causar una reducción de la cantidad de materias primas nuevas requeridas para fabricar un componente que ya esté en servicio, es decir, para acortar el ratio entre el material adquirido y la cantidad final utilizada.

La oportunidad de examinar el potencial que tiene el uso de la FA también podría conllevar el surgimiento de elementos innovadores para las estructuras ligeras, que en primera instancia, podrían encontrar un uso en vehículos aéreos no tripulados, y que, incluso más tarde, podrían llegar a aplicarse en todo el sector aeronáutico en general como una primera etapa de la producción de componentes no estructurales y luego en componentes primarios. A continuación (gráfico 3-1), se muestra lo que sería un ciclo típico de un proceso de FA.



Gráfico 3-1. Flujo de procesos de FA. [39]

La tecnología para la producción de componentes metálicos en la FA se encuentra actualmente en una fase activa de desarrollo, donde ya es posible la producción de componentes técnicos fiables y reproducibles, así como perfectamente funcionales.

No obstante, resulta evidente que solamente se puede explorar el verdadero potencial de la producción aditiva mediante la combinación del diseño virtual del producto, usando métodos como el CFD, el FEM, y otras herramientas de análisis numérico, con la aplicación de principios de diseño optimizados para la FA. Los procesos secundarios del desarrollo de componentes fabricados mediante FA que se usan con más frecuencia se muestran en el gráfico 3-2.



Gráfico 3-2. Tasa de producción de la FA. [40]

Caffrey y Wohlers llegaron a demostrar recientemente que el uso de la FA para producir componentes industriales metálicos está creciendo en popularidad; para esto, hicieron un seguimiento de las ventas anuales de los equipos para la FA metálica. Véase el gráfico 3-3.

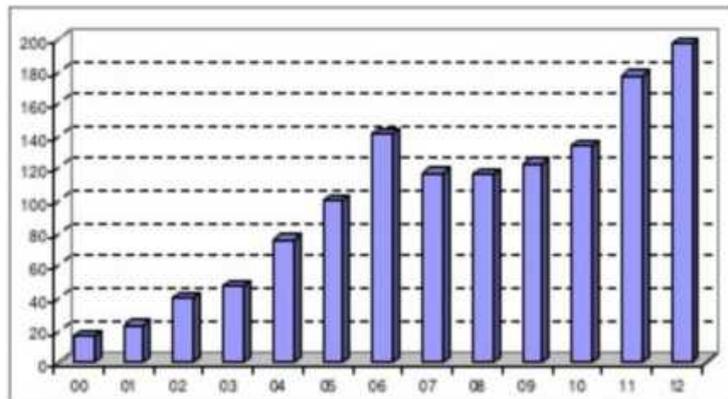


Gráfico 3-3. Venta de equipos para la FA. Fuente: Informe de Wohlers 2013 [41, 42]

En 2010, Holmstrom *et al.* [41] sugirieron que las principales ventajas de la fabricación aditiva en contraste con la fabricación sustractiva son las siguientes:

- No es necesario disponer de utillaje, disminución del tiempo para acelerar la producción;
- Es factible la producción de pequeños lotes, y económicamente viable;
- Se pueden ejecutar cambios en el diseño de manera sencilla y rápida;
- La optimización del producto se centra en la función (por ejemplo, canales de enfriamiento optimizados);
- Se pueden producir geometrías complejas;
- Se puede simplificar la cadena de proveedores, se acortan los tiempos de entrega y las existencias.

En 2014, Ford [42] sugirió que es posible que a medida que la tecnología de la FA vaya evolucionando, se produzcan los siguientes cambios:

- La reducción del tiempo necesario para la comercialización debido a la aplicación de las tecnologías de FA a la producción rápida de prototipos y a los ciclos de diseño, así como la posible eliminación de muchas etapas de fabricación tradicionales, tales como el transporte, la fabricación de moldes y el montaje;
- Una mayor competencia, que daría lugar a un incremento de la diversidad de productos/soluciones por la eliminación de barreras de entrada entre países;
- Unas cadenas de suministro más pequeñas, es decir, más eficientes y más baratas, especialmente para la producción de componentes complejos con un volumen de producción reducido.

3.2 Previsión

Previsiblemente, el sector industrial será completamente diferente en el 2050, que está evolucionando de la producción masiva a bajo coste a una producción personalizada, adaptándose a los variables mercados mundiales [65] [66]. Estas tecnologías permiten una producción limpia, mediante la eficiencia energética y material. En estos años, la industria de la FA ha pasado de la creación de los prototipos a la producción, donde existen unos requisitos de calidad y una complejidad mucho mayores. El informe de Wohlers de 2016 indica que la FA alcanzó un «punto álgido» en el 2012 [67]. Después de este momento se hizo una enorme inversión en investigación y comercialización. En el año 2015 surgieron

muchos fabricantes de equipos y su crecimiento seguirá aumentando notablemente en los próximos 5-15 años [67].

Concretamente, el sector aeroespacial le está dando un impulso a la FA. En este sentido, GE Aviation inauguró un centro de investigación en Pensilvania en 2016, con una inversión de 32 millones de dólares. Uno de sus componentes fabricados con tecnologías de FA fue autorizado por la Administración Federal de Aviación de los Estados Unidos, y será agregado a los 400 propulsores a reacción de las aeronaves comerciales. GE está tratando de conseguir que se autorice también el uso de las toberas construidas con FA para una nueva generación de propulsores a reacción. Estas toberas son un 25 % más ligeras que las convencionales [67]. Se prevé la producción mediante FA de unas 100 000 piezas para motores de avión hasta el 2020. También Airbus tiene previsto el uso de la FA en el futuro. Esta empresa ha hecho un gran esfuerzo en los métodos avanzados de optimización topológica, consiguiendo a veces una reducción de peso del 50 % o más. Sus aeronaves están compuestas por numerosas piezas de polímeros y metales. Tienen previsto fabricar unas 30 toneladas de piezas metálicas mensuales hasta el 2018 utilizando una red de sistemas de FA. Asimismo, la empresa capacitó a unos 300 empleados adicionales para el uso de la FA en 2016 [67].

La escasez de materias primas, la disponibilidad de bases de datos a gran escala [66] y la tendencia a una personalización del producto hacen que la FA sea una alternativa perfecta a la fabricación convencional. La previsión para la tecnología de FA presta atención a diferentes puntos con vistas a mejorar su viabilidad a escala industrial.

- Productividad y flexibilidad
- Obtención de datos
- Normalización de la calidad
- Disponibilidad del material
- Equipos multidisciplinarios y programas de formación

Cabe esperar una reducción de los costes de los equipos de FA del 25-45 % para 2020. El alto coste de los equipos de FA queda justificado con el aumento de la velocidad de fabricación, el empleo de cámaras más grandes y porque la carga y descarga de las piezas en la máquina es más sencilla, entre otras cosas. Para aumentar la velocidad de deposición y la productividad, las investigaciones principales se centran en diferentes puntos clave. Por ejemplo, se están investigando láseres con mayor potencia [68]. También se están considerando los equipos que emplean más de un láser para trabajar en paralelo o para seguir estrategias diferentes, como las estrategias *skin-core*, que utilizan un láser de alta potencia para construir el núcleo y otro con una potencia inferior para construir una superficie que exige mayor precisión. Se están investigando sistemas de despliegue de las deposiciones en múltiples puntos montados en un cabezal de procesamiento similar al de una impresora con extracción de humo y gas de protección alrededor del punto de fusión debido a las ventajas que conllevaría, tales como el aumento de la velocidad de fabricación y la eliminación de las limitaciones del tamaño de cámara. Los conceptos de iluminación completa del lecho de polvo y la fusión con corros múltiples también están en fase de desarrollo. Este sistema utiliza agentes químicos para reducir o amplificar el proceso de

fusión, logrando una alta precisión superficial, así como máscaras para controlar la radiación láser. Otra opción para reducir el tiempo del proceso es el uso de nuevos sistemas que hacen posible una deposición de polvo más rápida, o la realización del proceso de deposición y fusión simultáneamente.

La rugosidad y la precisión superficial pueden optimizarse mediante un tratamiento posterior como el fresado, pulido o mecanizado. Para ello, las máquinas híbridas integran las dos funciones de fabricación aditiva y mecanizado, lo que aumenta la productividad y reduce los tiempos muertos. Además, los conceptos de modularización e integración proporcionan flexibilidad (combinando e integrando los elementos periféricos), cámaras de fabricación más grandes, posprocesamientos y una estación de manipulación o descarga automatizada que puede reducir considerablemente los costes de producción.

Es difícil conseguir componentes complejos de buena calidad. Para ello, es importante crear y seguir las metodologías para seleccionar los parámetros y las estrategias adecuados en función de los diferentes materiales. La integración y la comunicación entre máquinas, para la recogida de datos, y los programas analíticos, para su gestión, son de gran importancia. Además, la simulación es una herramienta útil para predecir y controlar las distorsiones, las tensiones residuales y las microestructuras, lo que limita el número de experimentos.

En el campo de los sistemas de control y supervisión, se han desarrollado diferentes metodologías para poder garantizar un proceso de fabricación sólido sin diferencias en cuanto a la calidad y a las dimensiones entre lotes. El control del proceso en la cámara facilita la supervisión de cualquier irregularidad que se produzca durante la deposición de la capa, pero también los parámetros físicos del láser y el nivel de oxígeno y la presión de la atmósfera. El proceso de control del depósito del material fundido proporciona una supervisión de la temperatura y la forma del depósito en tiempo real con la ayuda de sensores de gran resolución. Esto mejora la trazabilidad, la calidad, la fiabilidad, la capacidad de reproducción y la eficiencia del proceso. También hay programas informáticos de simulación que predicen el depósito fundido y el comportamiento del polvo metálico.

Por otro lado, los ensayos no destructivos (END) garantizan la calidad de los componentes fabricados. En este campo, la tomografía computarizada es una herramienta útil para detectar la porosidad en las geometrías complejas. Debido a que hace poco tiempo que es posible construir piezas metálicas finales mediante FA, las especificaciones en materia de inspecciones todavía están en fase de desarrollo y muchos proveedores de métodos de inspección están examinando nuevas metodologías para aplicar a la FA [67].

La optimización del diseño topológico debe mejorarse con programas informáticos especializados. Los diseñadores adoptarán una manera de diseñar más funcional y menos limitada a la fabricación convencional, lo que les dará más libertad creativa. Los programas informáticos de optimización topológica permiten realizar diseños optimizados y eficientes con estructuras reticulares y biónicas por medio de algoritmos matemáticos. En las estructuras reticulares, los materiales se añaden únicamente en las

áreas útiles y se obtienen estructuras rígidas con la optimización del peso, lo que reduce el consumo del polvo metálico y el tiempo de fabricación.

La falta de estandarización dificulta la certificación y normalización de la fabricación aditiva en campos donde las certificaciones son muy importantes, como el sector aeroespacial. La normalización es necesaria para obtener procesos sólidos. Es posible lograr la normalización del proceso creando una base de datos con las propiedades de las diferentes aplicaciones en función del material y los parámetros, y optimizando las propiedades mecánicas en función de los tratamientos térmicos y los parámetros de proceso. La normalización del diseño exige una definición de las normas de diseño y los criterios de fabricación. Se espera que en el futuro estas normas se unifiquen y se compartan [69].

El número de materiales disponibles continúa creciendo. No obstante, es necesario aumentar las opciones de selección de los materiales. Se han realizado avances en el estudio de la capacidad de procesamiento de nuevos materiales como superaleaciones de níquel, aleaciones de aluminio, metales refractarios y aceros martensíticos, entre otros. La creación de bases de datos con las propiedades de los materiales de construcción específicos de la FA y diferentes procesos pueden proporcionar información para realizar el diseño de nuevas aleaciones adecuadas para esta tecnología.

EXMET desarrolló un proceso para construir piezas metálicas vítreas mediante la FA. Los metales vítreos combinan de una manera única propiedades como una gran resistencia, elasticidad, dureza, resistencia a la corrosión, conductividad y biocompatibilidad, todas ellas muy útiles para futuras aplicaciones de gran valor en los campos de la electrónica, la ingeniería aeroespacial y la mecánica [68].

Está naciendo un nuevo proceso de fabricación para construir componentes multimaterial para realizar funciones específicas. Se fundan en la transición de la materia en un cuerpo durante el proceso de fabricación. Tienen que mostrar compatibilidad entre ambos materiales. Pueden hacerse en dos cámaras diferentes o cambiando el aporte con 3 materiales diferentes en diferentes proporciones.

En el campo de la fabricación con polvos, la tendencia es que se reduzca el precio de los polvos y aumente la producción del volumen de polvo. METALYSIS es un nuevo proceso de fabricación que utiliza la electrolisis. Las ventajas que conlleva su aplicación son la limpieza, el bajo consumo de energía y la reducción de los costes en un 75 % [68]. No obstante, se requiere una metodología que valide el polvo fabricado con las nuevas tecnologías. Además, será necesario realizar un estudio en profundidad sobre la influencia del reciclaje o la reutilización del polvo sin que se sacrifiquen las buenas propiedades de las piezas construidas.

En el futuro, será necesario poner en marcha programas educativos y de formación, lo que es un aspecto fundamental para que haya una oferta de trabajadores cualificados; también será conveniente crear equipos multidisciplinarios para el desarrollo de productos complejos mediante la FA [65]. Para lograr este objetivo, el diseño de los programas de formación, centrado en las técnicas y tecnologías de la FA, desde la etapa escolar hasta la

secundaria, en la universidad y en la formación profesional, adquiere una gran importancia con vistas a abarcar diferentes funciones y un gran número de profesionales cualificados en este campo [67].

3.3 Oportunidades comerciales

En este capítulo se describe la inversión actual en tecnologías de fabricación aditiva a escala mundial.

Europa

En el mercado mundial en su conjunto, la FA superó los 1000 millones de dólares en 2009, generando unos ingresos directos de los sistemas y las ventas de más de 500 millones de dólares.

El 90 % de los equipos de FA vendidos son impresoras 3D que permiten la producción de componentes y equipos basados en polímeros. Cabe señalar que la visibilidad de este tipo de equipos está contribuyendo definitivamente al crecimiento del mercado de la tecnología de FA. A principios de 2010, un colectivo de empresas dirigido por Materialize formó un grupo para llevar a cabo una comercialización de la FA colectiva. Uno de los números recientes de la revista británica *The Economist* mencionó en su portada el potencial de la tecnología de FA y su carácter revolucionario.

Aunque actualmente la mayor parte de todas las actividades que se desarrollan con FA utilizan sistemas basados en polímeros, ha habido también mucho interés y se han desarrollado una gran cantidad de actividades en la fabricación de metales. La fabricación de metales ha suscitado interés principalmente debido a que con esta es posible obtener directamente componentes que se aproximan a su geometría final, e incluso, en algunos casos, no es necesario realizar un acabado final empleando utillajes o mecanizado. En particular, el interés ha provenido del sector aeroespacial, la industria automovilística, especialmente de calidad inferior, y de las industrias biomédicas, debido a la posibilidad de producir componentes de alto rendimiento con un coste total de producción reducido. Investigadores y líderes de la industria en la Unión Europea (UE) han identificado la FA como una tecnología emergente clave.

Desde hace años el conocimiento de la tecnología de FA ha aumentado en diferentes países de fuera de la UE y, en estos momentos, América del Norte está a la vanguardia en cuanto a su adopción. No obstante, la importancia dada a estos sistemas y tecnologías tiende a extenderse rápidamente a otros países, y la FA se encuentra en el centro del desarrollo de su jurisdicción nacional. Por otro lado, la situación de los diferentes países en Europa no es homogénea, como se muestra a continuación:

País	Posibilidades de comercialización
------	-----------------------------------

	El gobierno de la región belga de Flandes invirtió en un programa de FA de los materiales llamados STREAM (Materiales de ingeniería estructural
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Bélgica	mediante FA). En el programa participan universidades, centros de investigación y la industria, y desde el 2014 ha dado origen a tres proyectos financiados. Estos proyectos tienen como objetivo desarrollar la fusión selectiva por láser de polímeros y la fusión selectiva por láser de metales. También se han concebido una serie de iniciativas pedagógicas para difundir la tecnología de FA [43].
Francia	La Association du prototypage rapide fabrique additive (Asociación francesa de prototipado rápido) ha contribuido al aumento de los niveles de normalización de las tecnologías de FA, tanto en el ámbito nacional como internacional [43].
Alemania	Alemania tiene una estrategia para la FA que se desarrolla mediante la colaboración entre la comunidad científica y la industria. El Direct Manufacturing Research Center (DMRC), con sede en la Universidad de Paderborn en Alemania es centro de colaboración entre la industria y las universidades que tiene por objetivo desarrollar las tecnologías de FA. El DMRC y el Estado federado de Renania del Norte-Westfalia hicieron una inversión conjunta de más de 2 millones de euros. El Estado alemán hizo una inversión adicional de 3 400 000 € para complementar la inversión equivalente de la industria, lo que dio lugar a un presupuesto global de unos 11 millones de euros para un plan de desarrollo de la FA a cinco años [43].
Países Bajos	En los Países Bajos, el proceso de desarrollo del producto ha adquirido un protagonismo esencial en la FA. Por ejemplo, el instituto de investigación holandés TNO puso en marcha una iniciativa de desarrollo compartido Penrose con varios socios industriales con el objetivo de desarrollar la próxima generación de herramientas y dispositivos de tecnología de FA para la producción industrial de componentes mediante el proceso de FA [43].
Portugal	La estrategia portuguesa en el campo de la fabricación aditiva se sumó muy rápidamente a las iniciativas europeas sobre el prototipado rápido, en concreto para moldes. También se financiaron proyectos de investigación y desarrollo tecnológico (I+DT) y se creó una red nacional de prototipado rápido (RNPR). La industria se vio impulsada por la curiosidad, pero con resultados limitados. El año 2000 fue crucial para la movilización del prototipado rápido y el desarrollo de sistemas, modelos de negocio, iniciativas y eventos. Después de 2010, la iniciativa «industria 4.0» del Ministerio de Economía y del Ministerio de Ciencia, Tecnología y Enseñanza Superior de Portugal despertaron el interés de diversos sectores de actividad, como la metalurgia, la cerámica, el vidrio, la construcción, la sanidad y la aeronáutica. Hoy en día Portugal está preparado en materia de aplicaciones, pero la provisión de sistemas se encuentra todavía despertando. Actualmente está en curso la Iniciativa Portuguesa de Fabricación de Aditiva (PAMI, por sus siglas en inglés), que conecta a varios centros de investigación en el campo de la fabricación aditiva. En 2016, el ministro de Ciencia, Tecnología y Enseñanza Superior asignó al Centro para el Desarrollo Rápido y Sostenible del Producto (CDRSP, por sus siglas en

portugués) la función de coordinar una plataforma nacional de fabricación aditiva.

España

En España, los centros de investigación privados fueron los primeros en estudiar las aplicaciones industriales de la FA y, en los últimos años, muchas empresas emergentes han participado directamente en el desarrollo de estas nuevas tecnologías. Algunas regiones tienen un papel muy activo y resuelto en las iniciativas europeas, como Andalucía, Asturias, Cataluña y el País Vasco, y abarcan diversos sectores de aplicaciones, como el aeroespacial, la construcción y el transporte. El gobierno español, aparte de canalizar el programa de financiación Horizonte 2020, financia directamente proyectos específicos sobre tecnologías y aplicaciones de FA.

Además, ADDIMAT, la Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D de España, que se apoya en el equipo profesional de AFM, fue fundada a finales de 2014 con un objetivo principal: reunir a todas las fuerzas del sector y acelerar la adopción de la fabricación aditiva por parte de la industria española. Hoy en día, representa a más de 60 organizaciones con diferentes perfiles: fabricantes de equipos, transformadores de materias primas y fabricantes de piezas, usuarios finales, proveedores de servicios, distribuidores y filiales para la comercialización, centros de investigación, universidades y centros educativos. www.addimat.es

Reino Unido

El Reino Unido ha visto una inversión significativa en la FA en varios sectores de la industria, como se desprende de las siguientes cifras: el sector consumo contribuyó con 2 500 000 £ aproximadamente, incentivando una inversión de 7 500 000 £ en ayudas estatales; la industria automovilística contribuyó con unos 3 500 000 £ aproximadamente, incentivando una inversión estatal de 6 500 000 £ en actividades e investigación sobre FA; y, el sector médico garantizó una inversión de 3 000 000 £ para complementar la financiación de 11 500 000 £ en este ámbito. Al mismo tiempo, el sector aeroespacial del Reino Unido invirtió 13 millones de libras en desarrollo en el ámbito de la FA. Más recientemente, el Gobierno británico invirtió 30 millones de libras esterlinas en el desarrollo de una nueva tecnología aeroespacial durante un período de siete años a partes iguales con la industria. El Consejo de Investigación en Ciencias Físicas e Ingeniería del Reino Unido (EPSRC) puso a disposición también un fondo de 4 millones de libras esterlinas para el desarrollo de la FA.

La apuesta por la fabricación aditiva en todo el mundo, y con especial énfasis en Europa, como se pudo comprobar anteriormente, en relación con varias aplicaciones y sectores, debería aprovecharse, porque en este ámbito, las tecnologías, a pesar de sus 27 años de historia y evolución, se encuentran todavía en una fase de germinación. Hay mucho margen para el desarrollo y la afirmación de empresas portuguesas en los campos identificados previamente, desde las aplicaciones al desarrollo y fabricación de sistemas (equipos+ materiales) [43].

Estados Unidos de América

En 2012, el Instituto Nacional de la Innovación para la Fabricación Aditiva de los Estados Unidos de América (NAMII), dirigió 22 proyectos de investigación financiados con 13 500 000 \$ procedentes de la inversión pública y 15 000 000 \$ de inversión del sector. Se encargó también de emprender una serie de proyectos de investigación dirigidos por organismos públicos que recibieron más de 7 000 000 \$ en fondos. En marzo de 2014, el Gobierno federal de los Estados Unidos anunció que aumentaría su compromiso de financiación en 50 millones de dólares [43].

Asia

Los países asiáticos también están invirtiendo en la FA. De hecho, el 26,4 % de todos los sistemas industriales de FA instalados en todo el mundo se encuentran en la región de Asia-Pacífico. La provincia de Anhui (China), Hefei y Bozhóu y Xery3D han invertido juntos unos 245 000 000 \$ por un período de seis años para desarrollar la tecnología impresión en 3D. En abril de 2014, el Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón (METI, por sus siglas en inglés) invirtió más de 36 500 000 \$ en la creación de una nueva asociación para la investigación con vistas desarrollar la tecnología de la fabricación aditiva metálica. En marzo de 2013, el Gobierno de Singapur anunció que invertiría alrededor de 400 000 000 \$ en un período de cinco años en tecnologías de fabricación avanzada. Al mismo tiempo, la Universidad Tecnológica de Nanyang construirá un centro de investigación de FA que tiene asociada una inversión prevista de 30 000 000 \$.

El Ministerio de Ciencia y Tecnología de Taiwán puso en marcha un programa de desarrollo de las tecnologías 3D con una financiación anual de 2 330 000 \$.

Sudáfrica

Durante 2013, se invirtieron en Sudáfrica más de 10 000 000 \$ en la FA y aproximadamente el 80 % de esta inversión se centró en sistemas de FA del ámbito de la impresora personal 3D. Sudáfrica parece tener disposición para aumentar las inversiones en el ámbito de la FA y para explorar áreas específicas, tales como los sectores médico, dental y aeroespacial [43].

Australia

El Centro de Investigación Cooperativa de Fabricación Avanzada (AMCRC, por sus siglas en inglés) es una importante iniciativa para el desarrollo en Australia que ha financiado una serie de proyectos basados en la FA; además, dirige un consorcio para crear un centro nacional para el desarrollo de la FA, que recibirá una inversión estimada de 50 000 000 \$AU durante siete años. Los países europeos también han desarrollado sus competencias nacionales en materia de FA, y se constatan avances en la expansión y comercialización de las tecnologías [43].

3.4 Marco industrial

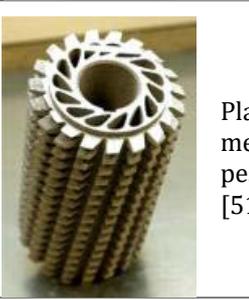
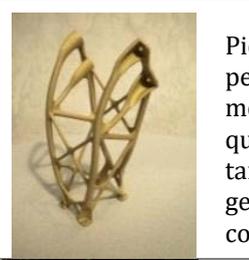
En lo que respecta a la industria aeronáutica, que exige el uso de piezas ligeras, resistentes y geométricamente complejas y, por lo general, una producción en pequeñas cantidades, la aplicación de tecnologías de FA se remonta al año 1988, momento en el que algunas empresas comenzaron a experimentar con estas. Con el paso del tiempo, la adopción de diferentes tecnologías de FA ha aumentado en todos los sectores. Actualmente, según el informe de Wohlers de 2013, la industria aeroespacial contribuye con el 10,2 % de los ingresos globales del sector de la FA en el 2012. En los Estados Unidos exclusivamente, la industria manufacturera aeroespacial (tradicional y aditiva) presentaba un rendimiento del orden de los 157 700 millones de dólares en el 2011. La industria aeroespacial es responsable de aproximadamente el 12,1 % de la producción de aditivos, y alcanza unos valores estimados de aproximadamente 29 800 000 \$, que representa menos del 0,05 % del valor total de la industria aeroespacial de los Estados Unidos.

La industria aeroespacial está cada vez más atenta a la FA pues ve en ella una oportunidad para intentar reducir el coste del desarrollo de prototipos e incluso una alternativa para crear componentes funcionales. En un intento por reducir el peso de las aeronaves, la industria está desarrollando una proporción cada vez mayor de piezas de aviones en materiales ligeros, que son generalmente caros. Dado que la tecnología de FA tiene la capacidad de reducir la materia prima al mínimo, optimizando así el peso, el coste y la velocidad de fabricación, se presenta como una solución viable. Aunque las tecnologías de FA y sus aplicaciones están en constante evolución, en la siguiente tabla se intentará presentar algunas aplicaciones actuales y futuras para la industria aeroespacial:

Tabla 3-1. Aplicaciones generales de la tecnología de FA en el sector automovilístico, aeroespacial y espacial, así como en la fabricación de moldes [44]

Aplicaciones actuales	Aplicaciones futuras
Prototipado y desarrollo conceptual	Electrónica de integración producida mediante fabricación aditiva directamente sobre las partes
Producción de piezas de repuesto	Fabricación aditiva en alas de avión
Fabricación de las partes con mínimo desperdicio de las materias primas	Producción de los componentes directamente en el lugar de reparación
Producción de componentes con estructuras complejas internas	Producción de piezas de motor complejas

Reto		Producto resultante
Toberas de inyección de combustible motor LEAP de GE (General Electric y Morris)		Tobera de combustible que es un 25 % más ligera y cinco veces más resistente al desgaste que el juego convencional [45].
Motor de reacción GENx (General Electric)		Motor de reacción completamente funcional con capacidad para alcanzar 33 000 rpm [46]
Un vehículo aéreo no tripulado (VANT) más grande, rápido y complejo producido con FA (Stratasys y Aurora Flight Sciences)		Tiempo de desarrollo de ingeniería y producción reducida un 50 % [47]
Tobera del motor de cohete (NASA Aerojet y Rocketdyne)		Desarrollo de ingeniería, producción y ensayos de un componente esencial como es la tobera de motor de cohete con una reducción del coste del 70 % [48]
Soporte de cabina para el Airbus A350 XWB (Airbus y Concept Laser GmbH)		Parte impresa con titanio (Ti) con una reducción del peso superior al 30 % [49].
Demostrador de un modelo de ala (Concept Laser GmbH)		Prototipo de la capacidad de producción de aditivos estructuras ligeras (producidas de una vez) [50].
Gasoducto (RSC Engineering GmbH)		Diseño optimizado de un conductor de emisiones. [51]

Reto	Producto resultante
Modelo del motor (Concept Laser GmbH)	 <p>Modelo completo del motor fabricado en acero inoxidable, incluidos los engranajes y las cubiertas del ala 3D [51].</p>
Cámaras de combustión (Concept Laser GmbH)	 <p>Prototipo de Capacidades del proceso de producción aditiva, demuestran nuestra capacidad para producir y un revestimiento interior en espiral</p>
Conexión universal (Concept Laser GmbH)	 <p>Prototipo de un engranaje funcional</p>
Herramienta de engranaje hueco (VPN Suecia)	 <p>Plazos de entrega más cortos, menos desperdicio y reducción del peso de la herramienta un 40 %. [51]</p>
Soporte multicomponente (Airbus y 3T)	 <p>Pieza única con un 35 % menos de peso. El soporte producido mediante FA es un 40 % más rígido que el componente original, y también reduce los residuos generados con los métodos convencionales. [52]</p>
Motor de tanque M1 Abrams AGT1500 (Optomec)	 <p>Motor de tanque M1 Abrams AGT1500 con el sistema de FA LENS. [53]</p>
Inyectores de combustible en espiral (Morris Technologies)	 <p>Producción de un diseño extremadamente complejo, fabricado en una sola pieza, reducción espectacular del tiempo de producción (2 semanas frente a 6 semanas), reducción de costes en un 50 % y aumento de la robustez. [54]</p>

Reto	Producto resultante
Inestabilidad del moldeo por inyección termoplástico (Renishaw)	 <p data-bbox="979 371 1343 495">Producción de un diseño extremadamente complejo, durabilidad y aumento del rendimiento.</p>
Enfriamiento de conductos para Motosport (Green Team y Renishaw)	 <p data-bbox="963 551 1343 674">Soportes de rueda y conductos de enfriamiento hechos para mejorar la capacidad de enfriamiento, diseño complejo</p>
Inseguridad del moldeo por inyección termoplástico (Linear Moulds)	 <p data-bbox="922 745 1343 801">Tiempo de ciclo optimizado, mayor durabilidad de los insertos.</p>
Punta de escape Koenigsegg One: 1 (Koenigsegg)	 <p data-bbox="922 1003 1343 1160">Koenigsegg superar punta de escape One: 1, fabricada en titanio, aumento de peso de 400 gramos en un tiempo de producción de 3 días. [55]</p>
Turbo de geometría variable Koenigsegg Uno: 1 (Koenigsegg)	 <p data-bbox="932 1211 1343 1335">Turbo de geometría variable fabricado en una sola vez con componentes móviles internos de alto rendimiento [55]</p>
Protección enrollable del ARC titanium para F1 (T RPD ® LTD, Within Technologies)	 <p data-bbox="927 1368 1343 1491">Producción de un diseño extremadamente complejo para la protección del arco aprobado en titanio para F1.</p>

A pesar de los proyectos mencionados anteriormente, que representan importantes avances en la aplicación de tecnologías de FA en los sectores de actividad de las industrias seleccionadas para este proyecto, existen factores tales como las limitaciones de tamaño de los componentes, que han frenado una adopción más amplia de estas tecnologías por parte de la industria. Los problemas con los materiales, la precisión, el acabado superficial y las normas de certificación son retos complementarios que deben solucionarse para que pueda producirse una adopción generalizada de estas tecnologías por parte de la industria. Por lo tanto, el aumento del tamaño y la complejidad de las aplicaciones futuras están impulsando la investigación de mejores controles de los procesos de producción, materiales e inspecciones, para garantizar la seguridad y la trazabilidad de los componentes fabricados con miras a su uso como componentes finales.

Frazier [56] presentó algunos de los retos técnicos específicos de la FA que es necesario superar para darle un uso operativo a esta tecnología en la industria, y esta, especialmente en las fuerzas aéreas, se está convirtiendo en una realidad:

- Debe entenderse y controlarse el efecto de la variabilidad de máquina a máquina;
- Deben desarrollarse especificaciones y estándares industriales para la transformación de los componentes. Para lograr este objetivo, Frazier sugiere que se dé prioridad al desarrollo de procesos integrados, desplegando tecnologías de supervisión y control de los procesos productivos;
- Deben existir alternativas a los métodos convencionales de calificación basados en modelos validados, métodos probabilísticos y piezas estándar, entre otros. Se necesitan nuevos estándares y técnicas no destructivas avanzadas (END) con capacidad para detectar defectos críticos con un alto grado de certidumbre;
- Es necesario elaborar unas nuevas directrices de diseño con características estructurales innovadoras para producir componentes optimizados en términos estructurales y de peso. Se requiere la validación de modelos virtuales basados en modelos físicos para predecir las características de la microestructura y las propiedades mecánicas y electroquímicas;
- Se deben desarrollar nuevos materiales para optimizar el proceso de producción y las propiedades finales de los componentes;
- Se debe desarrollar la comprensión de cómo lograr mejores propiedades a fatiga y mejor acabado superficial.

El verdadero potencial de la FA solo puede lograrse si se optimiza el proceso de desarrollo de la ingeniería y se aprovechan plenamente las ventajas de esta nueva tecnología de fabricación. Sin embargo, esto también significa que los proyectos de componentes existentes actualmente deben ser revisados completamente.

Materiales metálicos disponibles actualmente para la producción aditiva

La selección y el uso de ciertos materiales está marcada fundamentalmente por los requisitos finales del producto; sin embargo, esta selección también está condicionada por la tecnología aditiva utilizada.

Las diferentes tecnologías de producción aditiva ofrecen en su mayoría la posibilidad de usar materiales similares. En este sentido, las superaleaciones de titanio y níquel (por ejemplo, el inconel) y los aceros inoxidables y de alta resistencia son los materiales que se usan más habitualmente en el ámbito de la producción aditiva; así, se pretende aprovechar la producción aditiva para procesar materiales caros que son difíciles de mecanizar, y obtener beneficios por la reducción del material utilizado y la reducción en el tiempo de producción de los componentes.

Se puede decir que las tecnologías que utilizan láser, haz de electrones y arco de plasma pueden transformar la mayoría de los metales, pero es necesario seguir investigando para tener garantías de que se comprende y conoce completamente el comportamiento de cada uno de estos procesos con cada uno de los materiales disponibles; esto le permitiría a la industria centrarse en la fabricación de piezas a medida con precios más atractivos, lo que resultaba complejo llevando a cabo el procesamiento convencional. Los procesos de deposición de material en polvo ofrecen enormes posibilidades, ya que se pueden utilizar

múltiples boquillas de deposición de materiales, lo cual permite cambiar la composición química del material depositado, dentro de la misma pieza, además de distintas velocidades de deposición y precisiones dependiendo del tamaño y uso de la pieza [64].

3.5 Tendencias en el sector aeroespacial

Introducción

Hoy en día, la FA hace posible una revolución tanto en el campo del diseño como en la industria de diversos sectores como el aeroespacial, automovilístico, energía, medicina, utillaje y bienes de consumo. En el gráfico 3-44, se ha incluido una distribución actual de las tecnologías de FA en función del sector industrial. En particular, en el caso del sector aeroespacial, se pudo observar una tendencia al crecimiento de las tecnologías de FA del 9,9 % al 16,6 % en el período de 2011 a 2016 [1].

El sector aeroespacial fue uno de los primeros en adoptar la FA y comenzó a explorar sus aplicaciones poco después de que la tecnología se comercializara. Boeing y Bell Helicopter comenzaron a usar piezas de polímero creadas mediante FA para aplicaciones de producción no estructural a mediados de los años noventa. Boeing ha instalado decenas de miles de piezas de producción para vuelos, lo que representa más de 200 piezas únicas en 16 aviones comerciales y militares diferentes. La NASA, la Agencia Espacial Europea, SpaceX y otras organizaciones están estudiando el uso de la FA para arrancadores, inyectores y cámaras de combustión en motores de cohetes.

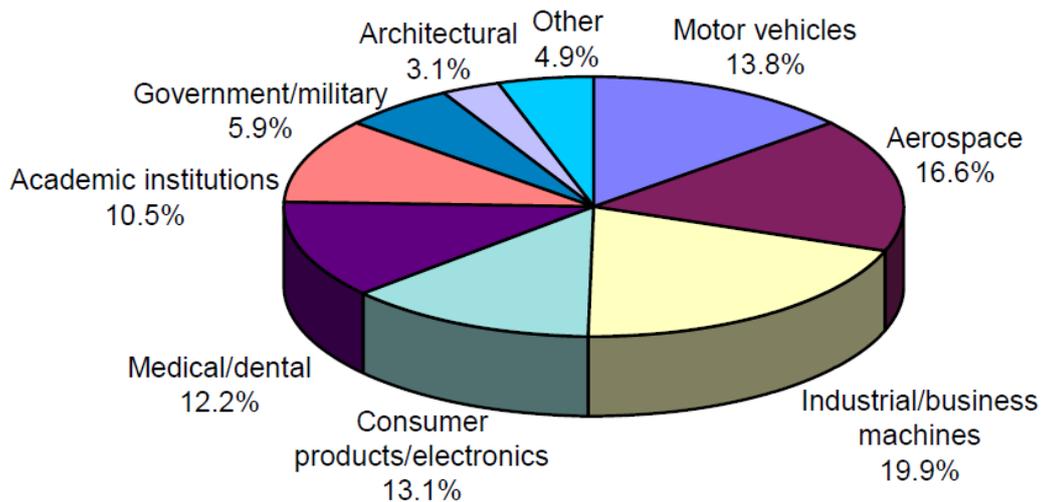


Gráfico 3-4. La FA aplicada a los sectores industriales principales [1].

En general, la industria aeroespacial se enfrenta a unas exigencias rigurosas en cuanto a la constante presión que recibe para mejorar la eficiencia de las aeronaves, la reducción de la contaminación atmosférica y acústica y la sostenibilidad y el control de las emisiones. Estos aspectos le exigen operar con la máxima eficiencia, y empujan las tecnologías y la capacidad de producción al límite.

En este sentido, la FA es una ruta de fabricación alternativa atractiva para este sector, lo que es debido principalmente a que presenta una alta eficiencia en cuanto a consumo de materiales, así como una gran capacidad para transformar materiales de calidad aeroespacial, como el titanio y las aleaciones de níquel. Además, la FA es vista como una tecnología que facilita la optimización de la ligereza o la topología de la estructura, debido a su libertad de diseño y a su capacidad para crear estructuras complejas; esto puede conllevar ventajas adicionales de mejora del rendimiento y reducción de residuos. Otra área de interés para la aplicación de la FA en la industria aeroespacial se encuentra en las pruebas de diseños complejos o difíciles de aplicar, incluidas las pruebas exhaustivas en instalaciones de un «motor completo».

Los campos de aplicación de la fabricación aditiva (FA) están estrechamente relacionados con la selección de materiales y tecnologías. Algunas de las principales aplicaciones de la tecnología de FA se clasifican por campo de especialización, como en el sector aeroespacial y automovilístico, biomédico, arquitectónico, minorista y de la joyería.

La reducción de peso y el aumento de la relación fuerza/peso son elementos transversales a muchos sectores industriales. El sector aeroespacial es uno de los sectores donde la reducción de peso es clave. La producción de componentes aeroespaciales se hace muy costosa usando procesos convencionales, porque en estos se llevan a cabo operaciones en las que se desperdicia mucho material. Mediante el uso de los procesos de FA en la industria aeroespacial, las partes se pueden rediseñar para que pierdan peso, lo que implica menores costes de fabricación. Además, un menor peso de las piezas estructurales aeroespaciales repercute en la reducción del consumo de combustible.

Las ventajas que ofrece la FA pueden resumirse de la siguiente manera: reducción del uso de materias primas; reducción de la relación entre el material adquirido y el material usado; libre de restricciones geométricas; y, disminución del consumo de energía.

Sin lugar a dudas, las aplicaciones de la FA más interesantes son la fabricación de piezas ligeras y los productos de ingeniería. El objetivo principal de la industria aeroespacial es conseguir fabricar estructuras de bajo peso para garantizar las pruebas de seguridad del sistema. Por otro lado, la tecnología de FA puede fabricar componentes de alto rendimiento con una amplia gama de aleaciones: aceros inoxidable, aceros para herramientas, aleaciones de níquel, titanio Ti64, aleaciones de cobre, aluminio, etc. Diferentes partes tales como los álabes o los tubos de admisión pueden obtenerse tanto con el método SLM como con el método EBM.

Además, de todas las áreas en las que es posible una aplicación de la FA, probablemente la industria del automóvil ofrezca las posibilidades de cambio más significativas en lo que respecta a la forma en que se lleva a cabo la fabricación. Las limitaciones de diseño impuestas actualmente al diseñador de automóviles, debido a las limitaciones del diseño de herramientas, desaparecerán. La industria automovilística deportiva y los fabricantes de automóviles de producción general utilizan la tecnología de FA para muchos productos de usuarios finales.

En resumen, **la FA le ofrece las siguientes ventajas al sector aeroespacial** [24]–[26]:

(1) **Reducción de los plazos de entrega: procesos de desarrollo y plazos de comercialización más cortos.** La FA permite la rápida revisión y validación de los prototipos y diseños conceptuales. Permite omitir el mecanizado y e ir directamente a las partes terminadas. En el caso de producciones de bajo volumen, como la fabricación de los demostradores, la FA reduce o elimina el coste del mecanizado que tiene una pobre amortización. También se adapta bien a la ingeniería colaborativa y a otros aspectos en materia de I+D.

(2) **Flexibilidad en el diseño.** El elevado nivel de complejidad de las piezas, la reducción del peso de los componentes y la mejora del rendimiento y fiabilidad de las piezas. La FA ofrece un diseño topológico optimizado y una flexibilidad superior en términos de geometrías factibles. Se pueden construir componentes complejos. La FA también permite a los diseñadores que aseguren el máximo rendimiento sin necesidad de adaptarse a las limitaciones de fabricación. Además, el sector aeroespacial ya ha logrado fabricar aditivamente con éxito algunos componentes aeroespaciales con geometrías complejas hechos con materiales exóticos como la aleación de titanio Ti6Al4V y el Inconel 718, que son tradicionalmente difíciles de conformar sin que se comprometan sus excelentes (y deseadas) propiedades.

(3) **Reducción de los costes operativos y de los costes de producción.** La mayor libertad de diseño permite disminuir el número de subcomponentes que componen los conjuntos del sistema, por lo que el número de componentes, el tiempo de montaje y los costes se reducen (la FA ayuda a reducir el mecanizado, la soldadura, las existencias y, en algunos casos, líneas de ensamblaje completas). La reducción de peso proporciona también una ventaja competitiva en los costes. Por otro lado, teniendo en cuenta los componentes espaciales, los vehículos espaciales necesitan piezas de diseño intrincado también, para reducir el espacio del embalaje y el peso. Estos componentes se producen en volúmenes muy pequeños, son costosos y consumen mucho tiempo cuando se fabrican de manera tradicional.

(4) **Reducción del impacto negativo de la producción en el medio ambiente.** Como consecuencia de la reducción del peso de los componentes aeroespaciales, se espera también un menor consumo de combustible y menos emisiones de CO₂.

Cabe destacar asimismo, que uno de los principales impulsores en la fabricación de componentes aeroespaciales de gran valor es **la mejora de la relación que existe entre los componentes metálicos adquiridos y los componentes metálicos usados en último término** (con ratios que oscilan entre 5 y 20). En el Gráfico 3-5 subraya por qué la FA es una ruta de fabricación alternativa tan atractiva para este sector, principalmente por su alta eficiencia en el uso de materiales y por su capacidad para transformar materiales de calidad aeroespacial, como el titanio y las aleaciones de níquel.

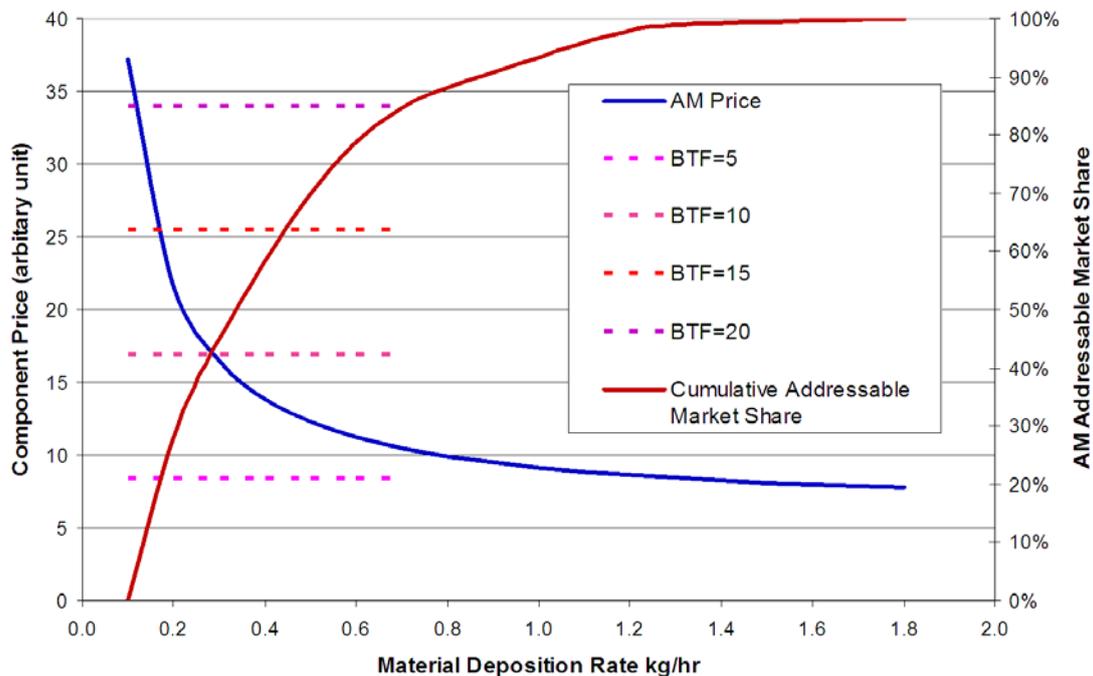


Gráfico 3-5. Análisis del precio de los componentes frente a la tasa de deposición del material (metal) en la FA, con punto de equilibrio, comparado con la fabricación tradicional, y manteniendo las proporciones típicas en el sector aeroespacial entre los materiales adquiridos y los materiales usados en último término [27].

Retos del uso de la fabricación aditiva en el sector aeroespacial

En relación con los retos principales que plantea alcanzar la *calidad en el sector aeroespacial*, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- **Diseño:** las herramientas de diseño actuales no permiten aprovechar al máximo la FA porque no disponen de características específicas para este tipo de fabricación; además, su compatibilidad con las máquinas de FA no está verificada y las normas de diseño para la FA no están completamente establecidas. Por otro lado, los diseñadores se ven limitados por las normas de diseño de los procesos de fabricación convencionales.
- **Materias primas:** las propiedades físicas (morfología, fluidez, granulometría, humedad, etc.) y las propiedades químicas (nivel de impurezas, contenido intersticial, etc.) de los polvos para la FA no están completamente definidas para que puedan ser compatibles con la obtención de la *calidad en el sector aeroespacial*. Además, no existen especificaciones de manipulación o reciclado para garantizar la trazabilidad y evitar la contaminación de la materia prima.
- **Procesamiento:** hoy en día, la solidez, reproducibilidad y fiabilidad del proceso de FA no están completamente garantizadas por los siguientes motivos: dos máquinas del mismo fabricante pueden producir piezas con una calidad diferente, no existe la supervisión de procesos en las máquinas de FA y la influencia del parámetro del proceso en la calidad final del producto aún no se conoce completamente.
- **Post procesado:** actualmente se aplican tratamientos de post proceso a las piezas de FA, incluidos los tratamientos térmicos (horno en vacío, prensado isostático en caliente, etc.), tratamientos superficiales (pulido electroquímico, pulido por mecanizado por flujo abrasivo,

etc.) y procedimientos de limpieza (chorreado abrasivo, granallado, etc.). Sin embargo, no está claro cómo afectan estos tratamientos a las propiedades finales de la pieza.

- **Certificación:** se debe efectuar un cambio en el método clásico de *certificación de la calidad del producto* para las piezas elaboradas con FA por los siguientes motivos: los controles de calidad adyacentes no son totalmente representativos de las piezas, no existen procesos definidos y certificados ni metodologías de verificación y, por último, es necesario establecer una garantía de producto específicamente para las piezas fabricadas con FA.
- **Análisis de fallas:** los anteriores proyectos aeroespaciales han abordado el desarrollo de piezas mediante la FA que hasta ahora no han sido probadas en condiciones reales de vuelo o incluso en condiciones representativas. Por lo general, las solicitudes para medir el grado de madurez tecnológico de las piezas analizadas (TRL, por sus siglas en inglés) es inferior a 4. Por lo tanto, no está claro cómo se comportarán las piezas fabricadas con FA en condiciones de vuelo real y ante una posible fuente de falla. Esta validación se llevará a cabo después de la inspección de las piezas defectuosas de la FA y el reemplazo de los componentes dañados.
- **Diseño percedero:** en el caso de los componentes espaciales, esta concepción implica el diseño intencional de equipos del sistema espacial para que entren completamente en combustión (o se despiquen) durante el reingreso incontrolado en la atmosférica terrestre como medio de eliminación tras una misión. Esto es especialmente necesario en reingresos no controlados. Este concepto está originando el cambio de los materiales con un punto de fusión elevado como el titanio o acero inoxidable por aleaciones de aluminio con gran resistencia (serie 7XXX, aleaciones de aluminio-litio).

En este marco, las actividades de investigación europeas actualmente se están centrando en estudiar la influencia de las materias primas, los parámetros del proceso de FA y los postratamientos de las propiedades finales de piezas fabricadas por Aerospatiale. Por otra parte, otro objetivo importante es definir los procesos y los procedimientos y normas de calificación de los para la FA de piezas del sector aeroespacial.

Tendencias en materia de FA en el sector aeroespacial

Las tendencias actuales en el sector aeroespacial se centran en el diseño de nuevas estrategias para reducir el peso de los componentes fabricados por Aerospatiale que incluyan el diseño topológico y las estructuras reticulares de imitación celular y biónica [23].

El deseo de colocar el material solo donde es necesario para una aplicación específica está estimulando el diseño de modelos para aplicar en estructuras reticulares biónicas y celulares. Desde el punto de vista de la ingeniería mecánica, estos materiales ofrecen una ventaja esencial: tienen una gran resistencia y una masa relativamente baja. Estos materiales pueden proporcionar unas buenas características de absorción de energía y unas buenas propiedades de aislamiento térmico y acústico. Las estructuras celulares diseñadas suelen presentar una fuerte resistencia estructural por unidad de peso en comparación con las estructuras típicas de espuma. No obstante, como son estructuras complejas, son difíciles de generar utilizando los paquetes existentes de CAD. Además, las técnicas de fabricación aditiva metálica, como la fusión selectiva por láser en procesos de PBF, que exhiben una gran capacidad para fabricar estructuras reticulares de metal resistentes y ligeras, siguen enfrentándose a ciertas limitaciones en el proceso en lo que respecta a la capacidad geométrica y a la necesidad de emplear estructuras de soporte en el caso de estructuras reticulares celulares [27]–[29].

Como ejemplo del desarrollo de un diseño optimizado, en el gráfico 3-6 se incluye la optimización del soporte de conectores umbilicales del adaptador de carga útil (ACU) del cohete de lanzamiento VEGA (integrado en el ESA) realizado por CATEC (España). El proceso de desarrollo incluye la sustitución del componente original de 4 partes por una geometría integrada, seguido por la optimización convencional y el diseño biónico de la geometría del componente.

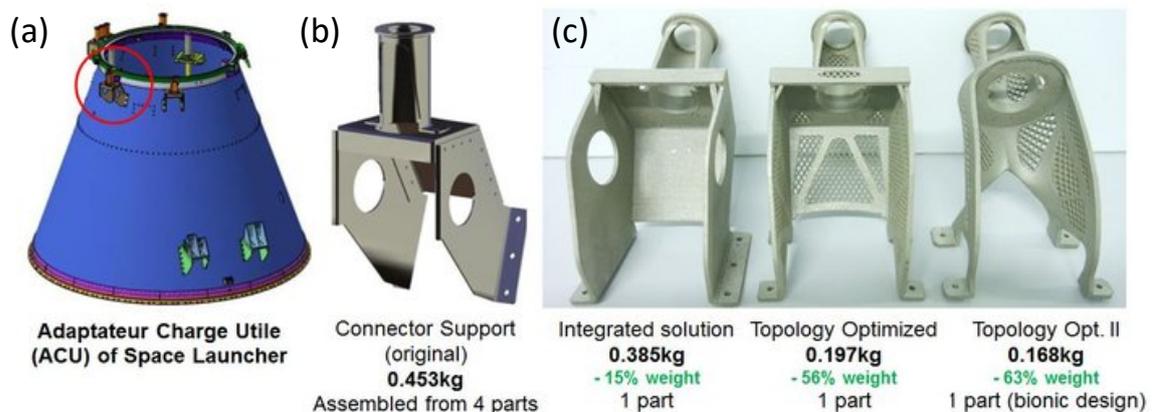


Gráfico 3-6. Aplicación espacial, desarrollada por CATEC y AIRBUS D&S: a) conjunto ACU para el cohete de lanzamiento VEGA, b) soporte de conectores original, c) soportes optimizados: i) fabricación de una sola pieza (montaje integrado), ii) optimización convencional; y, iii) diseño biónico

En el Gráfico 3-7, se incluye también otro componente espacial fabricado con optimización de la topología. En particular, es un accesorio del satélite Hipparcos (perteneciente a). El

accesorio del soporte es parte de la estructura de soporte de los deflectores del telescopio como parte de la carga que protege contra la difusión de la luz.

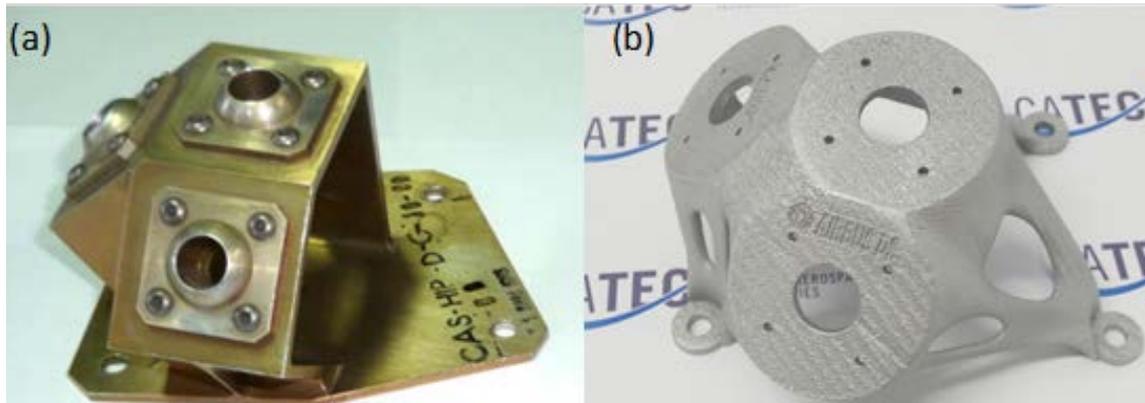


Gráfico 3-7. Aplicación espacial desarrollada por CATEC y AIRBUS D & S: a) Soporte original de Hipparcos, b) Optimización topológica del soporte fabricado mediante SLM.

Por otro lado, se puede observar un ejemplo de disruptor biónico en el gráfico 3-88. Para las estructuras biónicas, la estrategia de diseño se basa en aprender de la naturaleza, tratando de obtener la suficiente rigidez con el menor peso del componente [30] [31].

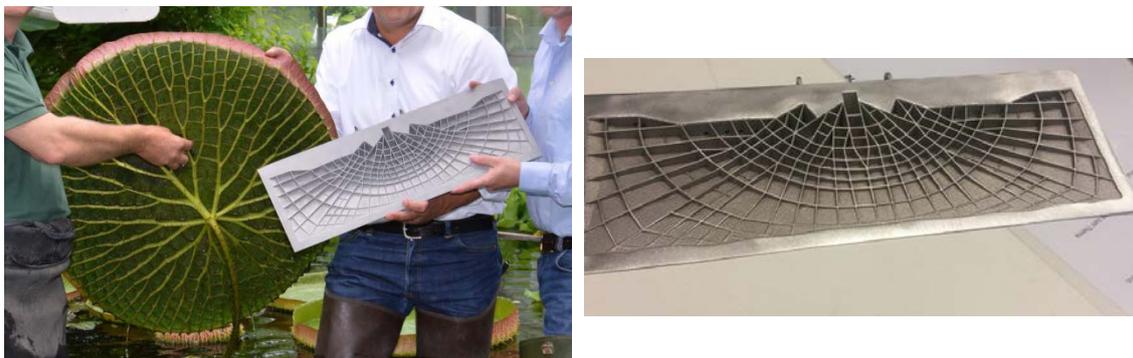


Gráfico 3-8. Disruptor biónico para avión desarrollado por Airbus. El diseño se inspira en el nenúfar [30].

También cabe destacar el componente de cabina de avión impreso en 3D más grande del mundo desarrollado por Autodesk y Airbus: una «partición biónica» para separar la cabina de pasajeros de la cocina del avión. Este diseño innovador imita la estructura celular orgánica y el crecimiento óseo que se puede observar en los organismos vivos (véase el gráfico 3-9). El resultado del proyecto ha generado unas sonadas expectativas: una partición que es muy resistente estructuralmente pero a la vez ligera, que pesa un 45 % (30 kg) menos que los diseños actuales. Esto convierte la partición biónica en un desarrollo nuevo e innovador para un sector en el cual menos peso equivale a menos consumo de combustible. Cuando se aplique a toda la cabina y en todos los aviones A320 pendientes de esta reforma en la actualidad, Airbus estima que con el nuevo modelo de diseño se podrían ahorrar hasta 465 000 toneladas métricas de emisiones de CO₂ al año.



Gráfico 3-9. Se hizo una demostración de la partición biónica de Airbus en Autodesk University [30].

Otra tendencia significativa de la personalización masiva de la construcción ligera en la industria se basa en combinar la tecnología de FA con la tecnología substractiva convencional, para que los dos procesos trabajen juntos en la misma máquina e incluso sobre la misma parte [23], [32], [33]. La fabricación híbrida reduce los riesgos y los costes asociados a la adopción de la tecnología de FA metálica, y proporciona a los fabricantes industriales una vía más pragmática y evolutiva. Aunque esta es una tendencia general en diferentes sectores, para el sector aeroespacial tiene relevancia desde el punto de vista de la reducción del peso.

Por último, en lo que respecta a la industria espacial, cabe destacar la línea de investigación llevada a cabo por el Net Shaping Center de la Escuela de Metalurgia y Materiales de la Universidad de Birmingham (proyecto PhotAM financiado por la ESA) [34]. En la actualidad, si un componente se rompe en el espacio, como un soporte o una bisagra, rectificar el problema puede ser problemático, costoso y potencialmente peligroso. En la Estación Espacial Internacional (ISS), las piezas de repuesto pueden enviarse desde la Tierra. No obstante, a medida que la exploración espacial se proyecta a distancias mucho más lejanas, se hace cada vez menos factible enviar «repuestos» desde la Tierra. El desarrollo de la impresión 3D en el espacio permitirá a los astronautas resolver este problema fabricando el reemplazo con eficiencia, mientras que la investigación actual podría posibilitar la fabricación de algunos equipos en su totalidad en el espacio.

Ejemplos de FA de componentes aeroespaciales

El uso de la FA en el mercado aeroespacial es bastante variado en la actualidad, y se pueden apreciar muchos ejemplos de componentes en nichos específicos que se fabrican y suministran utilizando varias formas de FA (tanto en polímeros como en metales). La FA para aplicaciones aeroespaciales se utiliza en: prototipado, moldeo y mecanizado, fabricación de piezas de repuesto, reparación de componentes existentes y fabricación de piezas completas [35].

La FA ha sido utilizada ampliamente en las primeras etapas del desarrollo de las estructuras, es decir, en actividades de **prototipado** y en la producción de maquetas tridimensionales (mock-ups). Se incluyen algunos ejemplos en el Gráfico 3-10 y gráfico 3-

11). La función del prototipado es proporcionar especificaciones para aplicar a un sistema de trabajo real en lugar de a uno teórico. La verificación del modelo CAD, los apoyos visuales, los modelos de presentación, las escalas, etc. son usos comunes en las actividades de prototipado de la FA. Las maquetas (mock-ups) físicas tridimensionales, un término introducido por primera vez en la industria aeronáutica, se usan para hacer las pruebas finales de diferentes aspectos de las piezas.

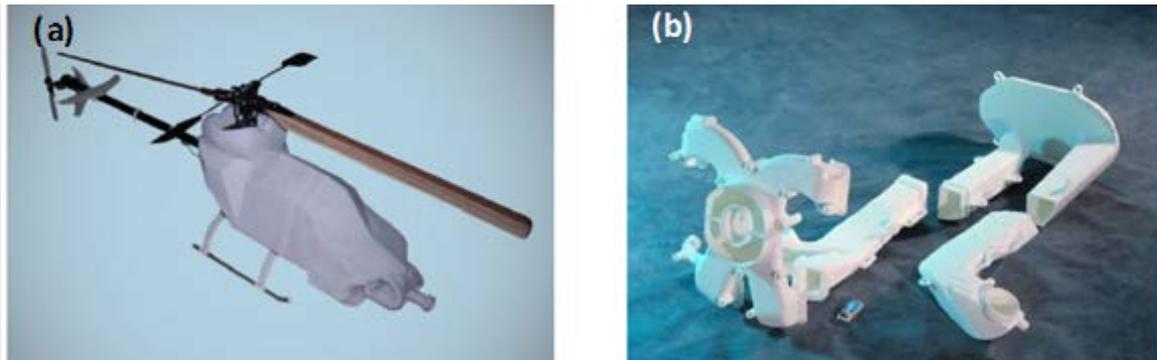
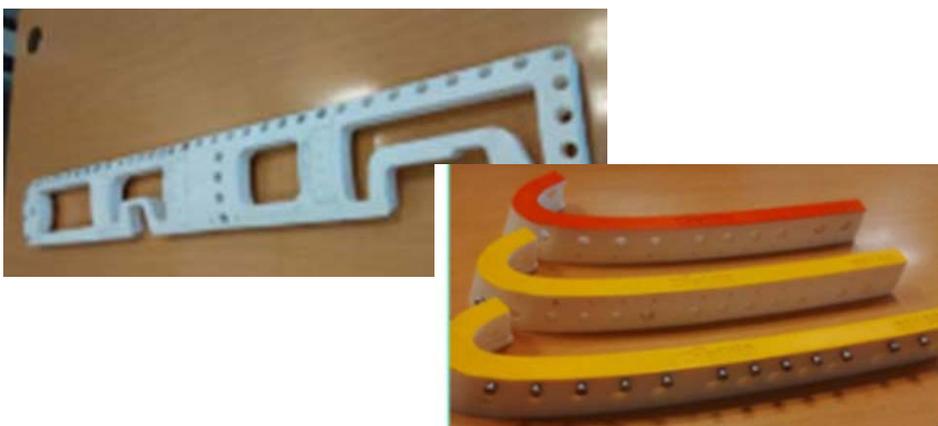


Gráfico 3-10. a) Modelo de diseño de helicóptero; b) Parte de la maqueta del escape de gas [36].



Gráfico 3-11. Prototipo fabricado por SICNOVA.

En lo que respecta al **moldeo o mecanizado** para la industria aeroespacial, hay una amplia variedad de componentes. Se incluyen algunos ejemplos en el gráfico



12.

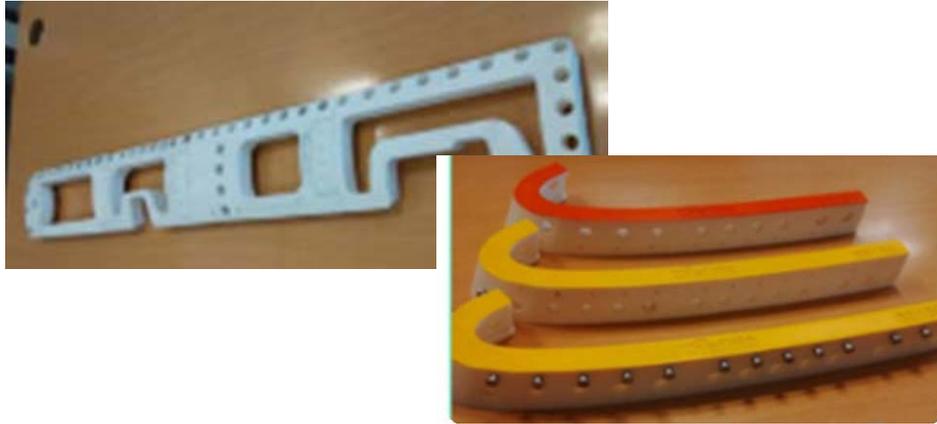


Gráfico 3-12. Algunos ejemplos de piezas industriales para moldeo y mecanizado en el sector de la aeronáutica proporcionados por AERNNOVA.

En el campo de la **reparación y la fabricación de piezas de repuesto**, las tecnologías de fabricación aditiva han dado ejemplo de una gran flexibilidad. Las piezas de repuesto pueden fabricarse *por encargo*, por lo que se evita el almacenamiento. Además, la FA permite fabricar la pieza de repuesto exactamente en la ubicación necesaria. Por otro lado, en el ámbito de la reparación, es posible recurrir a la FA para reparar partes dañadas, agregando material solo donde es necesario. También es notable la capacidad de la FA para agregar nuevas funcionalidades a piezas existentes. Las reparaciones con FA producen una notable reducción de los costes de producción y del tiempo empleado.

En el ámbito de las **piezas finales**, la FA se aplica en: álabes, piezas estructuradas para aviones no tripulados, interiores personalizados para aviones de negocios, helicópteros privados, generadores de vórtices o inyectores de combustible de Morris Technologies, eliminadores de escarcha en parabrisas de AdvaTech, etc. Algunos ejemplos están incluidos en el Gráfico 3-13. Hoy en día, las tecnologías de FA pueden aplicarse para fabricar componentes aeroespaciales con un alto nivel de complejidad geométrica y con propiedades aerodinámicas precisas.

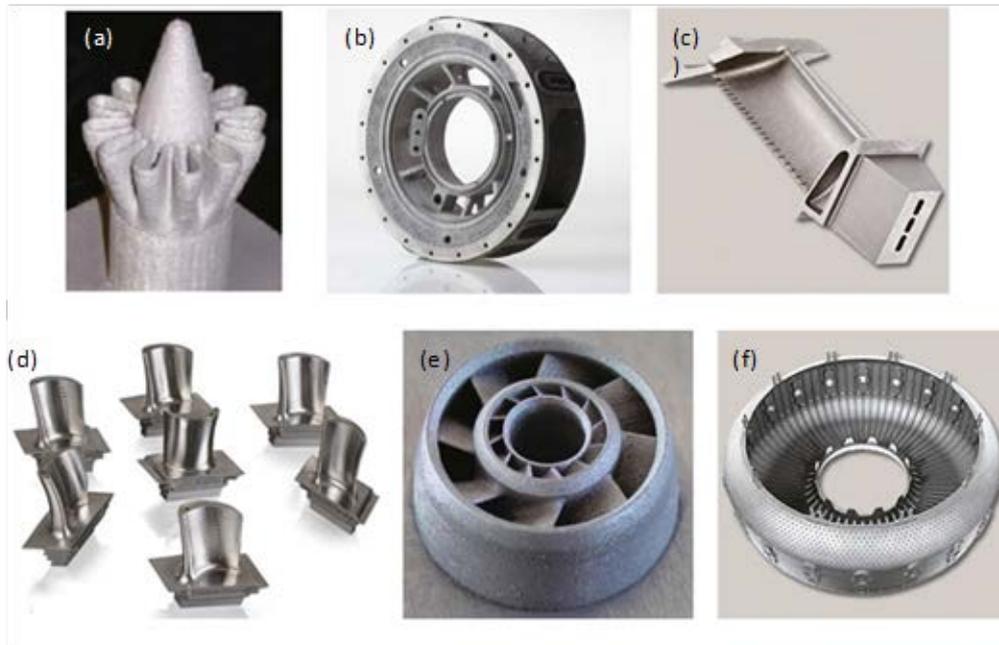


Gráfico 3-13. a) tobera de mezcla para los gases de escape de la turbina producida con DED-LENS de Optomec, b) cárter de compresor producido con PBF-EBM de Arcam, c) álabes producidos con PBF-SLM por Concept Laser, d) álabes fabricados con PBF-SLM de Morris Technologies

En el ámbito de las **aplicaciones espaciales**, se han rediseñado varios equipos de demostración de vuelo y se han fabricado usando la FA, incluidos inyectores, propulsores monolíticos, cámaras, toberas, etc. En este sentido, AIRBUS Group acaba de desarrollar el soporte FLPP ISCAR fabricado con Ti-6Al-4V para el *Ariane5ME* y 6 lanzacohetes con más de un 30 % de reducción en el peso. RUAG Group también ha desarrollado un soporte para *Sentinel1* un 42 % más ligero. Un consorcio dirigido por DMRC ha desarrollado un soporte para una rueda de reacción hecho con AlSi10Mg ahorrando un 56 % de masa y un diseño disruptivo con optimización topológica para el proyecto *Artes5.1*. ESA, TESAT e ILT han establecido una colaboración para aplicar la FA a equipos de radiofrecuencia como arneses con guía de onda, filtros y antenas. Todos estos proyectos han demostrado las posibilidades de las tecnologías de FA en estructuras secundarias y piezas no esenciales. Como ejemplo del desarrollo de estructuras secundarias, se incluye el desarrollo de estructuras de soporte de Airbus D&S para el satélite EUROSTAR3000 en el Gráfico 3-14. Un soporte de telemetría de aluminio ha sido optimizado topológicamente para obtener una reducción del 35 % en la masa.

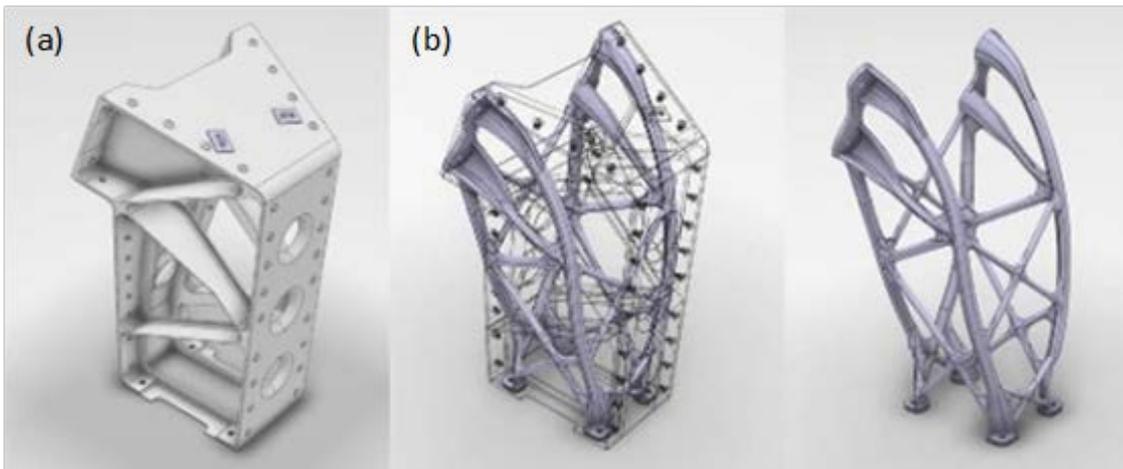


Gráfico 3-14. Soporte de telemetría producido en aluminio, aplicación espacial desarrollada por AIRBUS D&S: a) versión original; b) vista del componente optimizado.

En lo que respecta al desarrollo de estructuras primarias, tanto en aplicaciones de lanzamiento espacial como de sondeo, hay que destacar la labor de CATEC (España) en asociación con AIRBUS D&S (Sistemas Espaciales, Madrid). Algunos de los desarrollos de CATEC-Airbus D&S actualmente en curso se pueden apreciar en el Gráfico 3-15.

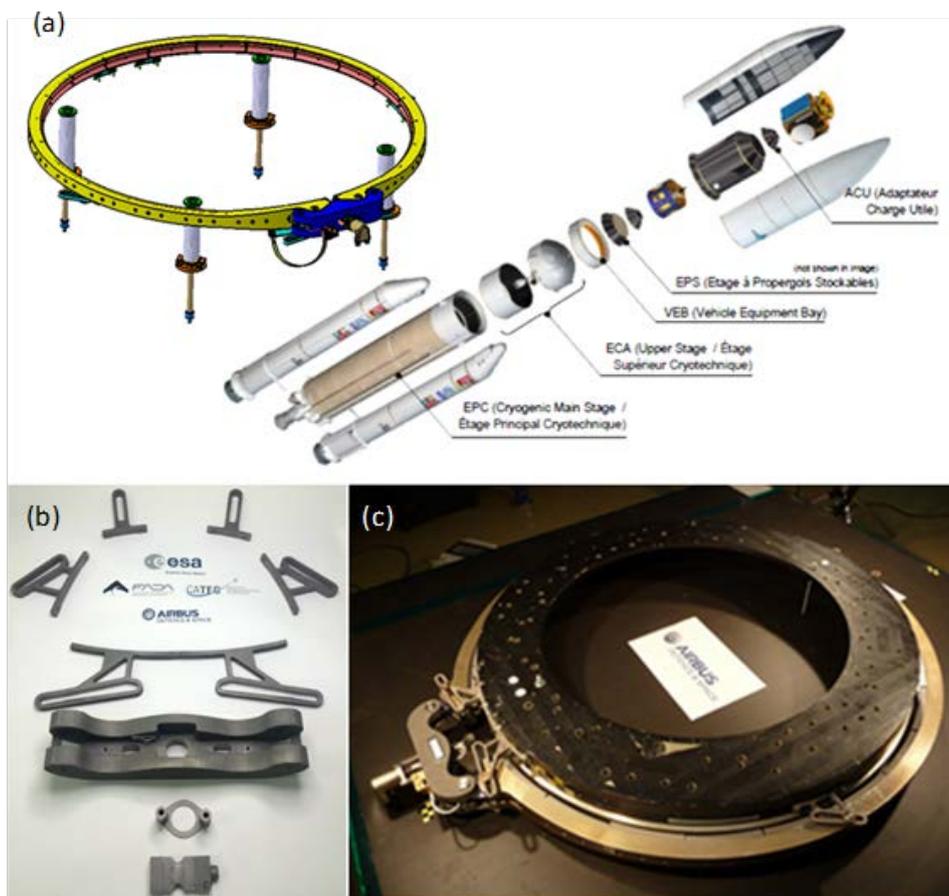


Gráfico 3-15. Desarrollo de la estructura primaria de ARIANE5, por CATEC y AIRBUS D&S: (a) Vista del LPSS y del lanzacohetes ARIANE 5 (la banda se ensambla con el adaptador de carga útil (ACU)), b) componentes fabricados usando la técnica SLM de FA, (c) ensamblaje del sistema, prueba funcional

En este sentido, se debe destacar el trabajo de Airbus y GE en el desarrollo de la FA. En el caso de Airbus, en el Informe Wohlers de 2016, se destaca lo siguiente: «Quizá más que cualquier otro fabricante de equipos originales importante, Airbus está planificando un futuro que integre la FA en los procesos de producción. Una asombrosa variedad de proyectos exploratorios se han realizado utilizando la FA para piezas de metal y polímero, para reparación y mecanizado. Ha hecho un trabajo considerable diseñando y produciendo piezas para sus aviones. La empresa también ha trabajado en el desarrollo de métodos avanzados de optimización de la topología que reducen el material y el peso en los diseños, algunas veces más del 50 %». Por otro lado, GE Aviation está produciendo piezas finales de metal mediante FA para su motor LEAP. Para 2020, la empresa prevé fabricar más de 100 000 piezas empleando la FA para el LEAP y otros motores de avión [1].

3.6 Principales actores del sector de la FAM en la región del SUDOE

La siguiente tabla 3.3 resume casi todo el potencial de la región del SUDOE en materia de tecnologías de fabricación aditiva metálica, e incluye centros de investigación, fabricantes, clientes y distribuidores de valor añadido.

Tabla 3-2. Lista de actores principales en el campo de la fabricación aditiva metálica

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
ACITURRI	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Proveedor del nivel 1 de estructuras de ensamblaje para aviones y del nivel 2 para componentes del motor.	ESPAÑA	www.aciturri.com
AD Industrie	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	AD INDUSTRIE es un grupo industrial especializado en la ingeniería mecánica e hidráulica. Estudio, montaje y prueba de equipos. Industrialización y producción de piezas complejas, materiales metálicos y compuestos, engranajes y transmisiones, electroerosión, tratamientos térmicos, soldadura, uniones, deposición de plasma, análisis magnético, sangrado, radio, ultrasonido.	FRANCIA	http://www.adgroupe.com/
AIRBUS	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Constructor aeronáutico europeo	FRANCIA	http://www.airbus.com/fr/

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
AIRBUS SAFRAN Launchers	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Desarrollo y producción de los lanzadores Ariane 5 y Ariane 6. I+D sobre futuros programas europeos de lanzamiento. Responsable del sistema de misiles balísticos de las fuerzas de disuasión oceánica de Francia: desarrollo, producción y mantenimiento de los diversos componentes.	FRANCIA	https://www.airbusafran-launchers.com/fr
AKKA Technologies	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Ingeniería tecnológica y empresa de consultoría	FRANCIA	https://www.akka-technologies.com/fr
ALESTIS	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	ALESTIS Aerospace, líder en las tecnologías de fabricación de fibra de carbono y materiales compuestos. Responsable del diseño, desarrollo, certificación y fabricación de aeroestructuras de fibra de carbono y servicio de asistencia. Participante en diferentes programas de FAM.	ESPAÑA	www.alestis.aero
ASSYSTEM France	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Ingeniería de innovación y asesoría	FRANCIA	http://www.assystem.com/
ATR	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Fabricación avanzada Turbohélices	FRANCIA	http://www.atraircraft.com/
DASSAULT Aviation	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Diseño, producción y fabricación de aviones civiles y militares y asistencia técnica.	FRANCIA	http://www.dassault-aviation.com/fr/
FIGEAC AERO	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial	Socio del nivel 1 de los principales fabricantes aeroespaciales, subconjuntos aeronáuticos (mecanizado y montaje), piezas estructurales, piezas de motor,	FRANCIA	http://www.figeac-aero.com/

de nivel 1

piezas precisas.

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
Fusia	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Fabricación de componentes de precisión para el sector aeronáutico, espacial y de defensa	FRANCIA	https://www.fusia.fr/
ITP	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	ITP es en la actualidad la novena empresa del mundo fabricante de motores y componentes para aviones desde el punto de vista económico	ESPAÑA	http://www.itp.es
LATECOERE	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Latécoère Group es un actor importante de la industria aeroespacial y desarrolla su actividad en los campos de las aeroestructuras y los sistemas de interconexión en las etapas de la definición, industrialización, fabricación e instalación. El grupo empresarial también realiza actividades de asistencia técnica (reparación, piezas de recambio, etc.).	FRANCIA	http://www.latecoere-group.com/
Prismadd	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Constituida en octubre de 2014 en Montauban, PRISMADD propone una oferta global para sectores industriales muy técnicos, como el armamentístico, el aeronáutico y el nuclear.	FRANCIA	http://prismadd.com/
Rochette Industrie	Empresa aeroespacial/ Proveedor aeroespacial de nivel 1	Metales: acabados, tratamientos térmicos y tratamientos superficiales. Recubrimientos por medio de procesos físicos. Mecanizado de metales, fabricación de subconjuntos mecánicos. Fresado, torneado. Transformación de materias plásticas y mecanizado de transformación posterior.	FRANCIA	http://www.mecanicsud.fr/

**SAFRAN
Group**

Empresa
aeroespacial/
Proveedor
aeroespacial
de nivel 1

SAFRAN es un grupo internacional
de tecnología punta, un proveedor
líder en equipos aeroespaciales y
de seguridad y defensa.

FRANCIA

[https://www.
safran-
group.com/fr
/groupe](https://www.safran-group.com/fr/groupe)

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
SAFRAN Helicopter ENGINES	Empresa aeroespacial/Proveedor aeroespacial de nivel 1	Diseño, fabricación y venta de turbinas para helicópteros, con servicio técnico.	FRANCIA	https://www.safran-group.com/fr/societe/safran-helicopter-engines
AEROSOFT France	Empresa aeroespacial/Proveedor aeroespacial de nivel 1	Especializada en ingeniería de sistemas y estructuras y en configuración de cabinas.	FRANCIA	http://www.aerosoft.it/
CAETANO Aeronautic	Empresa aeroespacial/Proveedor aeroespacial de nivel 1	Diseño, producción y fabricación de componentes para aviones civiles y militares.	PORTUGAL	http://www.caetanoaeronautic.pt
ELEMCA	Empresa aeroespacial/Proveedor aeroespacial de nivel 1	Laboratorio independiente de ensayos, análisis y conocimientos expertos en CND+Metalurgia.	FRANCIA	https://elemca.com/
LAUAK Portuguesa	Empresa aeroespacial/Proveedor aeroespacial de nivel 1	Diseño, producción y fabricación de componentes para aviones civiles y militares.	PORTUGAL	http://www.groupe-lauak.com/
SOGECLAIR Aerospace	Empresa aeroespacial/Proveedor aeroespacial de nivel 1	SOGECLAIR se encarga de proyectos de estudios a gran escala, del codesarrollo de grandes cuentas industriales y del desarrollo de productos innovadores de simulación y realidad virtual.	FRANCIA	http://sogeclair.com/fr/
AIRGRUP	Empresa aeroespacial/integradora	AIRGRUP es una empresa que desempeña su actividad en el campo de la fabricación de sistemas de tuberías para el sector aeronáutico. Participante en diferentes programas de FAM.	ESPAÑA	www.airgrup.com

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
Egile Corporation	Empresa aeroespacial / Proveedor aeroespacial de nivel 1	Es una corporación empresarial de base tecnológica que, dedicándose principalmente a la fabricación de mecanismos de elevada precisión, desarrolla productos, servicios y soluciones para sus clientes. En el sector aeronáutico, Egile desarrolla procesos de producción en nuevas células de trabajo específicas adaptadas a la fabricación aditiva como apuesta estratégica de futuro.	ESPAÑA	www.egile.es
EMBRAER	Integradora aeroespacial	Diseño, producción y fabricación de componentes para aviones civiles y militares.	PORTUGAL	www.embraer.com
STELIA (Airbus Group)	Integradora aeroespacial	STELIA Aerospace ofrece productos globales para fabricantes aeronáuticos y aerolíneas.	FRANCIA	http://www.stelia-aerospace.com/
ADDIMAT	Grupo/asociación	La Asociación Española de Tecnologías de Fabricación Aditiva y 3D, reúne a todos los actores interesados en el desarrollo y la promoción de la fabricación aditiva y 3D.	ESPAÑA	www.addimat.es
2MA Tech	Asesorías	2MAtech es una empresa de ingeniería especializada en mecánica avanzada y materiales.	FRANCIA	http://www.2matech.fr/
3R	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	Diseñador y fabricante de máquinas de ensayo para caracterizar materiales y estructuras.	FRANCIA	http://www.3r-labo.com/fr/
ADDILAN	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	ADDILAN es una nueva empresa de fabricación de máquinas aditivas constituida a finales de 2016, cuya actividad es la fabricación de piezas medianas y grandes con la tecnología WAAM.	ESPAÑA	www.addilan.com

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
ADIRA: productos para conformado de metales	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	Proveedor de equipos y productos, fabricante de equipos de corte de metales, basados en la tecnología láser. Fabricante de impresoras de metal 3D a gran escala, que combina las tecnologías de la fusión en lecho de polvo y de deposición de energía dirigida en la misma máquina. ADIRA cuenta con la mayor área de transformación de polvo de metal y con un sistema que facilita la fabricación de piezas con una dimensión superior a la de la cámara de procesamiento.	PORTUGAL	http://www.adira.pt
CODI	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	Proveedor de equipos y productos. Ingeniería y desarrollo de productos. Fabricación aditiva de componentes con polímeros.	PORTUGAL	http://codi.pt/
IBARMIA	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	Con más de 60 años de experiencia en el negocio de las máquinas herramienta, ha desarrollado su nuevo modelo de centros de mecanizado ZVH ADD + PROCESS que combina la fabricación aditiva con el mecanizado.	ESPAÑA	www.ibarmia.com
KALLISTO	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	Empresa especializada en la comercialización, integración, aplicación de sistemas de diseño, análisis y fabricación directa y otros servicios relacionados con estas tecnologías. Amplia gama de máquinas de prototipado y fabricación directa 3D.	FRANCIA	http://www.kallisto.net/
METALLIED Powder Solutions	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	Productor de polvos de metal para los mercados de fabricación aditiva.	ESPAÑA	www.erasteel.com

Micronorma	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	Máquinas para trabajar metales a medida. Diseño de productos. Actualmente forma parte de un proyecto para desarrollar procesos basados en la fabricación aditiva con aplicación de láser.	PORTUGAL	http://www.micronorma.pt/
-------------------	-----------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	-------------------------------------------------------------------

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
---------------	------------------	------------------------------	-------------	------------------

PROCUT	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	Fabricante y proveedor de herramientas de corte de carburo, conocido por su utillaje para corte de precisión a medida.	PORTUGAL	www.procut.pt
---------------	-----------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	--------------------------------------------------

Zayer	Proveedor de equipos y productos para la FAM.	Con más de 60 años de experiencia en la fabricación de fresadoras y centros de mecanizado, mantiene líneas de investigación sobre diferentes configuraciones de máquinas híbridas que combinan la tecnología aditiva con la sustractiva.	ESPAÑA	www.zayer.es
--------------	-----------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------	------------------------------------------------

ADDIMEN	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Centra su actividad en el diseño y la fabricación de componentes metálicos funcionales.	ESPAÑA	www.addimen.com
----------------	---------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------	--------	------------------------------------------------------

BBE	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Desarrollo, análisis y diseño de productos; ingeniería asistida por ordenador (IAO); concepción y reestructuración de productos; fabricación de moldes prototipo; sinterización de metales y plástico.	PORTUGAL	http://www.bbe.pt/pt/
------------	---------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	-----------------------------------------------------------

DIMLASER	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Fabricación aditiva de componentes metálicos. Proveedor de productos.	PORTUGAL	http://www.dimplaser.com
-----------------	---------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------	----------	-----------------------------------------------------------------

DURIT	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Producción de componentes de metales duros basada en la metalurgia en polvo.	PORTUGAL	http://www.durit.com/pt/
--------------	---------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------	----------	-----------------------------------------------------------------

EDAETECH	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Desarrollo, prueba y fabricación de prototipos y producción de pequeñas series de componentes metálicos, especialmente para la industria automotriz.	PORTUGAL	http://www.edaetech.pt/
-----------------	---------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------	---------------------------------------------------------------

GNC LASER	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	GNC Laser ofrece servicios de endurecimiento, soldadura y fabricación aditiva basados en la tecnología láser.	ESPAÑA	www.gnclaser.es
------------------	---------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------	------------------------------------------------------

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
I3D CONCEPT	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Gestión de proyectos de FAM. Procesamiento de archivos digitales, fabricación de componentes (prototipos y series), tratamiento posterior y caracterización.	FRANCIA	http://www.i3dconcept.fr/
IBEROMOLDES Group	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Proveedor de ingeniería y productos. Apoyo a las etapas de concepción y desarrollo de productos, con tecnologías de prototipado rápido de vanguardia y productos de fabricación directa para una amplia gama de aplicaciones con una gran variedad de materiales.	PORTUGAL	http://www.iberomolde.s.pt/
INDRAERO / Ebas Group	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Diseño, fabricación y montaje de accesorios para la industria aeroespacial. Amplia experiencia en el uso de plásticos, metales, textiles, espumas y materiales de caucho. Capacitada en tecnologías FAM de revestimiento (deposición de energía dirigida).	ESPAÑA	http://ebasgroup.com/
MIZAR	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Mizar ofrece un servicio especializado en concepción y producción de todo tipo de componentes personalizados.	ESPAÑA	www.mizaradditive.com

GNC LASER	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	GNC Laser ofrece servicios de endurecimiento, soldadura y fabricación aditiva basados en la tecnología láser.	ESPAÑA	www.gnclaser.es
I3D CONCEPT	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Gestión de proyectos de FAM. Procesamiento de archivos digitales, fabricación de componentes (prototipos y series), tratamiento posterior y caracterización.	FRANCIA	http://www.i3dconcept.fr/
IBEROMOLDES Group	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Proveedor de ingeniería y productos. Apoyo a las etapas de concepción y desarrollo de productos, con tecnologías de prototipado rápido de vanguardia y productos de fabricación directa para una amplia gama de aplicaciones con una gran variedad de materiales.	PORTUGAL	http://www.iberomolde.s.pt/
Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
INDRAERO / Ebas Group	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Diseño, fabricación y montaje de accesorios para la industria aeroespacial. Amplia experiencia en el uso de plásticos, metales, textiles, espumas y materiales de caucho. Capacitada en tecnologías FAM de revestimiento (deposición de energía dirigida).	ESPAÑA	http://ebasgroup.com/
MIZAR	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Mizar ofrece un servicio especializado en concepción y producción de todo tipo de componentes personalizados.	ESPAÑA	www.mizaradditive.com
MIZAR: fabricación aditiva metálica	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Empresa especializada en la concepción y producción de cualquier tipo de componentes personalizados. Sectores aeroespaciales, médicos o industriales en general.	FRANCIA	http://mizaradditive.com/fr/
VEROT	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	VEROT, S.A. ofrece servicios de transformación metálica, calderería y fabricación aditiva en metal mediante impresión 3D.	ESPAÑA	www.verot.com

LISI fabricación aditiva aeroespacial	Operador o fabricante de componentes para la FAM.	Componentes y elementos de fijación para montaje en las industrias aeronáuticas.	FRANCIA	https://www.lisi-group.com/
PAMI	Órganos públicos, programas e iniciativas relacionados con la FAM y la industria aeroespacial.	Iniciativa Portuguesa em Fabricação Aditiva	PORTUGAL	www.pami.pt
TOYAL Europe	Polvos de materias primas	Líder en la fabricación de pigmentos de aluminio avanzado y polvo atomizado.	FRANCIA	http://toyaleurope.com
AIMEN	Investigación y desarrollo	AIMEN se especializa en tecnologías láser (corte, tratamiento de superficies, revestimientos y fabricación aditiva).	ESPAÑA	www.aimen.es

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
CATEC	Investigación y desarrollo	Un centro tecnológico que lleva desde el 2004 trabajando en el desarrollo de tecnologías de fabricación aditiva y ha obtenido unos resultados destacados en el sector de la aeronáutica y el sector espacial, proporcionando servicios a las industrias que se basan en las posibilidades de las tecnologías de FAM.	ESPAÑA	www.catec.aero
CATIM	Investigación y desarrollo	Centro de investigación para la industria metalúrgica, que proporciona servicios como ensayos, controles de calidad y metrologías. CATIM está creando un proyecto para formar a sus miembros en las oportunidades que ofrece la fabricación aditiva metálica.	PORTUGAL	http://www.catim.eu/en/

CDRSP - IPL	Investigación y desarrollo	Centro de Investigación de la Escuela de Tecnología y Gestión del Instituto Politécnico de Leiria, centrado en las aplicaciones de prototipado rápido y las tecnologías aditivas.	PORTUGAL	http://cdrsp.ipleiria.pt/
CEA CESTA	Investigación y desarrollo	El Centro de Estudios Científicos y Técnicos de Aquitania (CESTA, por sus siglas en francés) tiene como misión principal garantizar la arquitectura industrial de las armas de las fuerzas disuasorias.	FRANCIA	http://www.cea.fr/
CEIIA	Investigación y desarrollo	Centro de ingeniería centrado en productos para la movilidad de última generación. Producción de componentes y productos para las industrias automovilística y aeronáutica, incluida la fabricación aditiva de piezas de polímero y productos para la movilidad de última generación.	PORTUGAL	https://www.ceiia.com/
CENTIMFE	Investigación y desarrollo	CENTIMFE es un instituto público sin fines de lucro dedicado al desarrollo de actividades precompetitivas de base industrial. Desarrollo de proyectos con tecnologías de fabricación aditiva.	PORTUGAL	http://www.centimfe.com

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
CIRIMAT INP	Investigación y desarrollo	Centro interuniversitario de investigación e ingeniería de materiales.	FRANCIA	http://www.cirimat.cnrs.fr/
CNES	Investigación y desarrollo	El CNES es un establecimiento público de carácter industrial y comercial (EPIC, por sus siglas en francés) a cargo de proponer las políticas espaciales a las autoridades públicas francesas, que desarrolla en 5 áreas estratégicas principales: Ariane, ciencia, observación, telecomunicaciones y defensa.	Francia	https://cnes.fr/fr

ESTIA	Investigación y desarrollo	Desarrollo de una nueva plataforma para la FAM: ADDIMADOUR. Máquina para LMD/P, CMT, robotizado, compuestos, etc.	FRANCIA	http://www.estia.fr
IK4-CEIT	Investigación y desarrollo	CEIT es un centro tecnológico privado especializado en atomización de polvos y tratamientos térmicos (HIP, por sus siglas en inglés).	ESPAÑA	www.ceit.es
IK4-CIDETEC	Investigación y desarrollo	CIDETEC es un centro de investigación privado especializado en tratamientos mecánicos.	ESPAÑA	www.cidetec.es
IK4-IDEKO	Investigación y desarrollo	IDEKO es un centro de investigación privado especializado en las tecnologías de LMD.	ESPAÑA	www.ideko.es
IK4-LORTEK	Investigación y desarrollo	LORTEK es un centro tecnológico privado con una vasta experiencia en el uso de diferentes tecnologías de fabricación aditiva metálica (SLM, LMD, WAAM) y diferentes END.	ESPAÑA	www.lortek.es
IK4-TEKNIKER	Investigación y desarrollo	TEKNIKER es un centro de investigación privado especializado en tecnologías de LMD, END y supervisión.	ESPAÑA	www.tekniker.es

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
IK4-VICOMTECH	Investigación y desarrollo	VICOMTECH es un centro tecnológico privado especializado en programas informáticos de diseño y productos para la inteligencia artificial.	ESPAÑA	www.vicomtech.org
INEGI	Investigación y desarrollo	Instituto de Ciencia e Innovación en Ingeniería Mecánica e Industrial que crea puentes entre la universidad y la industria.	PORTUGAL	http://www.inegi.up.pt/

PRODINTEC	Investigación y desarrollo	PRODINTEC es un centro tecnológico que trabaja en el desarrollo de tecnologías de fabricación aditiva desde 2004.	ESPAÑA	www.prodintec.es
TECNALIA	Investigación y desarrollo	TECNALIA es un centro privado de investigación aplicada y desarrollo tecnológico especializado en la fabricación aditiva metálica.	ESPAÑA	www.tecnalia.com
THALES	Investigación y desarrollo	Equipos y sistemas para: aeronáutica, espacio, transporte terrestre, seguridad y defensa.	FRANCIA	https://www.thalesgroup.com/fr
THALES Alenia Space	Investigación y desarrollo	Thales Alenia Space diseña, integra, ensaya, opera y ofrece innovadores sistemas espaciales.	FRANCIA	https://www.thalesgroup.com/fr/global/
TKNIKA	Investigación y desarrollo	TKNIKA es el Centro Vasco de Investigación e Innovación Aplicada de la Formación Profesional.	ESPAÑA	www.tknika.eus
UPV	Investigación y desarrollo	La Universidad del País Vasco (UPV/EHU), en particular, el Grupo de Fabricación de Alto Rendimiento del Departamento de Ingeniería Mecánica, investiga los procesos de fabricación aditiva con materiales metálicos desde 2004.	ESPAÑA	www.ehu.es/manufacturing

Nombre	Tipología	Actividad/Descripción	País	Sitio web
VLM Robotics	Investigación y desarrollo	Oficina para el estudio de la robótica + desarrollo de la FAM	FRANCIA	http://vlm-robotics.fr/
Ecole des Mines D'Albi Carmaux	Investigación y desarrollo	Escuela Superior (Ingeniero) + Laboratorio de Investigación con la plataforma MIMOSA: máquinas de SLM.	FRANCIA	http://www.mines-albi.fr/

IST	Investigación y desarrollo	Escuela de ingeniería + laboratorio de investigación + centro de investigación.	PORTUGAL	www.tecnico.ulisboa.pt
REDIT	Investigación y desarrollo	La Red de Institutos Tecnológicos de la Comunidad Valenciana es una asociación privada sin ánimo de lucro que nace en 2001 por iniciativa de los Centros Tecnológicos de la región y en colaboración con la Generalitat Valenciana.	ESPAÑA	www.reredits.es
IMH	Investigación y desarrollo + educación	El IMH es a la vez un centro de formación especializada y un centro para fomentar la innovación en la fabricación avanzada con equipos y oferta formativa para la FAM.	ESPAÑA	www.imh.es
Polyshape	Investigación y desarrollo	Poly-Shape es una empresa innovadora especializada en el diseño y la fabricación rápida de piezas de prototipo funcionales y en la producción de series pequeñas.	Francia	Investigación y desarrollo
Pôle formation des industries technologiques	Capacitación	Formación	Francia	https://formation.les-industries-technologiques.fr/
GetReady43D	Capacitación	Formación y transferencia de conocimientos en materia de fabricación aditiva.	PORTUGAL	http://www.getready43d.com

3.7 RESULTADOS DE LA ENCUESTA: FAM PARA EL SECTOR AEROESPACIAL

Introducción

El consorcio ADDISPACE ha realizado una encuesta entre los actores de la región del SUDOE. En esta encuesta participaron 78 entidades aeroespaciales de Francia, España y Portugal, en particular, integradores del sector aeroespacial y proveedores del Nivel 1, proveedores y operadores de la FAM, organismos públicos, grupos y asociaciones, centros de formación y otros agentes en el campo de la investigación e innovación.

El objetivo de la encuesta era calificar e identificar las necesidades de los actores en el campo de la fabricación aditiva metálica (FAM) y dentro del sector aeroespacial.

Resultados

Según las respuestas, esta tecnología tiene impacto en tres sectores importantes: AEROSPACIAL, ESPACIAL Y DE DEFENSA, siendo el primer sector el más representado con el 47 % de las respuestas frente al 37 % y el 14 %, respectivamente.

Los encuestados afirmaron que, en su opinión, un 68 % del mercado mundial estará dominado por EMPRESAS BASADAS EN EUROPA. No obstante, aunque algunas grandes empresas lideran el mercado de la FAM (como General Electric, Airbus, Thales Alenia Space, Boeing o Thales), todavía existen GRANDES RETOS pendientes a los que es necesario hacer frente. En efecto, la certificación (50 % de los encuestados), la fabricación (20 % de los encuestados) y el cambio de las normas de diseño (19 % de los encuestados) son los problemas más recurrentes que afectan a esta tecnología.

Sin embargo, existe una GRAN CONFIANZA en este nuevo proceso de fabricación, ya que más del 96 % de los encuestados cree que la INDUSTRIA AERONÁUTICA DEBE INVERTIR en este. De manera similar, la siguiente curva muestra claramente la confianza de los actores industriales en el desarrollo, la madurez y la apropiación de la FAM para los próximos años:

Estimation of the development and maturity of MAM from the past to the next 20 years

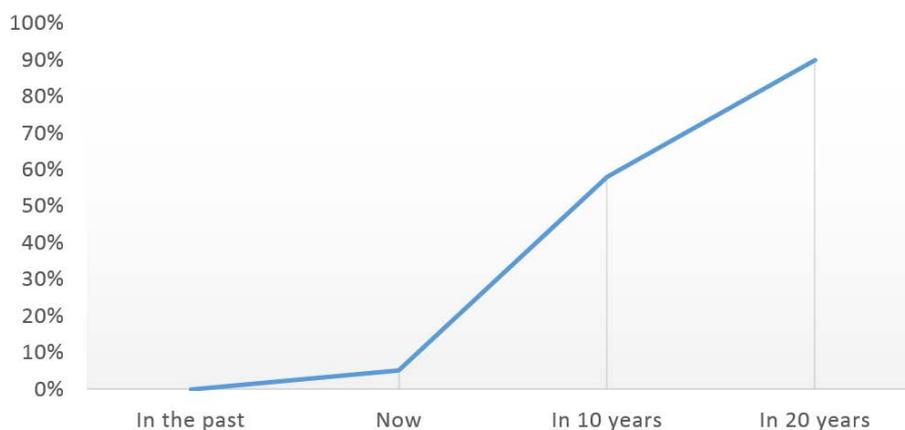


Gráfico 3-16. Estimación de la evolución del desarrollo y la madurez de la fabricación aditiva metálica

En los próximos 20 años, con el fin de convertir la FAM en una tecnología normalizada, fiable y competitiva, es necesario abordar varios OBSTÁCULOS, en particular, el más importante de todos, los «elevados costes de producción» (23 %), pero también «la necesidad de un acabado superficial posterior» (20 %) y el «tiempo de impresión prolongado» (18 %). Por último, pero no menos importante, la «falta de competencias y formación» (14 %) y las «preocupaciones técnicas a respecto del desempeño mecánico» (9 %). Un resultado interesante en la encuesta es el abordaje del «suministro de materiales de origen», que indica una baja influencia (6 %), lo que refleja sin duda un aumento del número de proveedores en todo el mundo.

No obstante, la encuesta revela que hay MUCHAS POSIBILIDADES de que los encuestados adopten esta tecnología en los próximos años. El resultado muestra que el 31 % de las entidades serán titulares de algún EQUIPO DE FAM, de las cuales la gran mayoría (96 %) prevé su adquisición en menos de 5 años. Específicamente, los equipos y tecnologías preferidas son la SLM en procesos de fusión en lecho de polvo (26 % de los encuestados), la LMD en procesos de deposición directa de energía (17 %), la EBM en procesos de fusión en lecho de polvo y la WAAM en procesos de deposición de energía dirigida (15 %).

En lo que respecta a la FABRICACIÓN INDUSTRIAL, el 47 % de los encuestados no tardarán en fabricar prototipos, de los cuales, el 22 % se concentrará en la fabricación de piezas estructurales aéreas, el 18 % piezas de motores y el 17 % piezas de fuselaje.

La encuesta permitía a los encuestados identificar las ventajas y desventajas de la FAM en el sector aeroespacial. Las cinco VENTAJAS principales que favorecen la elección de la FAM en detrimento de los procesos de fabricación convencionales son: la reducción de la masa, la libertad de diseño a la hora de concebir las piezas, la impresión directa por medio de CAD en una misma operación en lugar de un ensamblaje de muchas partes, la relación entre los materiales adquiridos y los materiales empleados claramente favorable a la FAM y la producción por encargo.

Por otro lado, las cinco principales debilidades de la FAM son: el tamaño máximo actual de la pieza (100 cm x 50 cm), la rugosidad superficial de las piezas impresas que requieren acabado, la falta de normas y procedimientos de homologación, la baja velocidad de fabricación de las máquinas actuales y el alto coste del equipo y la materia prima.

También se pidió a los encuestados que especificaran las ÁREAS DE MEJORA en la FAM. Las respuestas recabadas abordan los procesos, las tecnologías, el diseño, las materias primas y la integración con otras tecnologías o procesos, a saber:

- El 68 % de los encuestados mencionó el posprocesamiento (acabado superficial, extracción de las estructuras de soporte y tratamiento térmico), el diseño de las piezas y la configuración de la máquina.
- Actualmente, se considera que la calidad de la materia prima (79 %) y su disponibilidad (57 %) están por encima de lo razonable. Ocurre lo mismo con la calidad de las piezas fabricadas actualmente mediante FAM, que se considera por encima de lo razonable (82 %). No obstante, los costes de producción, los costes de las materias primas y los costes de inspección son demasiado altos según la mayoría de los encuestados (más del 56 %).
- Actualmente, la fabricación aditiva metálica exige que se examinen y se prueben todas las partes producidas. Sin embargo, el 83 % de los encuestados está de acuerdo en que podría utilizarse un método de inspección basado en la tomografía discontinua. Por otra parte, los encuestados han priorizado los ensayos no destructivos basados en la tomografía, ultrasonido, termografía y cámaras infrarrojas sobre rayos X.

La encuesta ha puesto de manifiesto que no se deben ignorar las NECESIDADES DE FORMACIÓN, ya que casi el 59 % de los encuestados cree que la oferta formativa actual no satisface las necesidades de su personal involucrado en actividades de FAM, principalmente ingenieros Industriales, ingenieros eléctricos/mecánicos y técnicos/operadores. Los encuestados señalaron que podrían aumentar el personal destinado a la FAM en los próximos años, principalmente para ocupar funciones de diseño y control. Asimismo, se identificaron las principales lagunas de formación en los ámbitos de la optimización topológica, el proceso y la regulación, las normas de diseño, el control no destructivo y el acabado superficial.

Metodología

Esta encuesta estuvo disponible en línea directamente en el sitio web www.addispace.eu, y también fue distribuida en Lisboa el 1 de febrero de 2017 durante un taller sobre fabricación aditiva y en Albi el 7 de marzo de 2017 durante un día dedicado a la fabricación con SLM organizado por Aerospace Valley.

La encuesta recibió 78 respuestas distribuidas de la siguiente manera:

- Francia: 68 % de las respuestas
- España: 22 % de las respuestas

- Portugal: 10 % de las respuestas

Del total de personas entrevistadas, el 32 % proviene del sector de la investigación y el desarrollo, el 28 % de las empresas aeroespaciales o proveedores del nivel 1, el 15 % del sector de los operadores o fabricantes de componentes mediante la FAM y el 25 % de otros sectores (equipos para FAM, integración aeroespacial, formación, laboratorios, etc.).

También es interesante destacar que el 20 % de los que respondieron a la encuesta consideraron que no tenían experiencia con la FAM, que el 32 % disponía de una experiencia básica, que el 36 % disponía de buena experiencia y que el 12 % se consideraba experto en FAM.

El informe completo sobre el análisis de la encuesta sobre la FAM está disponible en el Anexo.

4 POLÍTICAS REGIONALES DE APOYO A LA FAM EN EL MARCO DE LA RIS3

4.1 Introducción

La Comisión Europea ha definido las tecnologías facilitadoras esenciales (TFE) como las tecnologías necesarias para el desarrollo de actividades intensivas en conocimiento. Las TFE están asociadas a actividades de I+D de gran intensidad, ciclos rápidos de innovación, grandes inversiones de capital y empleos de alta cualificación. Las tecnologías de fabricación aditiva se califican por lo general como TFE. En este contexto, la FAM (fabricación aditiva metálica) tiene unas capacidades que podrían llegar a ser revolucionarias si se aplican a la industria del transporte. Como ejemplo, es un método que puede reducir considerablemente la duración del procesamiento porque omite el fresado, las estructuras de fijación y los procesos de conformado con múltiples etapas. Además, la FAM tiene la capacidad de trabajar formas complejas y mejorar la velocidad de fabricación y los plazos de entrega.

Por otro lado, es sumamente importante la rentabilidad de las TFE, que ponen en evidencia que las inversiones públicas pueden tener un valor muy positivo, al generar una devolución en forma de impuestos y contribuciones a la seguridad social. Por lo tanto, los beneficios obtenidos pueden superar hasta cuatro veces la inversión inicial, así como tener un efecto de palanca determinante en la mejora de la competitividad de las empresas y generar empleo, creando crecimiento y riqueza en la economía.

En los siguientes capítulos se examina el apoyo de las políticas regionales a la FAM. Las tres regiones del SUDOE integradas en ADDISPACE utilizan las **Estrategias de investigación e innovación para una especialización inteligente** (RIS3) como parte integral de sus políticas de apoyo en varios niveles al desarrollo regional de las TFE.

4.2 El alcance de la región SUDOE

El proyecto ADDISPACE aborda las tecnologías FAM en toda la región del SUDOE, representada en el siguiente mapa (gráfico 4.1). La región del SUDOE abarca las regiones geográficas del suroeste de Europa, incluidas todas las comunidades autónomas españolas (excepto Canarias), las seis regiones del suroeste de Francia y todas las regiones continentales de Portugal, el Reino Unido (Gibraltar) y el Principado de Andorra.



Gráfico 4-1. Mapa 1 con las regiones del SUDOE

4.3 Los ejes y prioridades de las RIS3 del SUDOE relativos a la FAM

Este capítulo se centra en la adecuación de los ejes y prioridades de las RIS3 para el desarrollo de las actividades de fabricación aditiva metálica en la región del SUDOE.

País	FRANCIA	Comarca	NOUVELLE AQUITAINE OCCITANIE
EJES Y PRIORIDADES DE LAS RIS3			
Nouvelle Aquitaine :			
- Química, industrialización de materiales y movilización de biomasa y biorrefinerías para la			

industria

- Sistemas con láser, fotónicos y de imagen
- Agricultura de precisión y ecoeficiencia, agroalimentación
- Construcción ecológica con maderas y eficiencia energética de los edificios
- Ciencias geológicas, metrología y supervisión para la gestión sostenible de los recursos naturales
- Programas informáticos integrados y objetos conectados
- Entrega de activos inteligente para el bienestar y la salud
- Pautas de cuidados integrados y técnicas de atención al paciente
- Movilidad limpia e inteligente
- Fábrica competitiva centrada en el factor humano

Occitanie (Languedoc Roussillon - Midi Pyrenees): Todo construcción

- Sistemas integrados
- Innovación de la cadena agroalimentaria territorializada
- Biotecnologías industriales para la recuperación de carbono renovable
- Materiales y procesos avanzados: aeronáutica y diversificación
- Investigación translacional en oncología y gerontología
- Ingeniería celular y medicina regenerativa

VENTAJAS REGIONALES

- Optimización de la gobernanza y aumento de los apoyos de las partes interesadas
- Desarrollo e implementación estrategias de transformación económica:
 - A) la renovación de sectores tradicionales mediante actividades con mayor valor añadido y nuevos nichos de mercado
 - B) la modernización, mediante la adopción y difusión de nuevas tecnologías;
 - C) la diversificación tecnológica en relación con las especializaciones existentes en los campos relacionados;
 - D) el desarrollo de nuevas actividades económicas mediante cambios tecnológicos radicales e innovaciones atrevidas;
 - E) la explotación de nuevas formas de innovación, como la innovación abierta y centrada en los usuarios, la innovación social y la innovación en los servicios.
- Responder a los retos económicos y sociales
- Aumentar la visibilidad regional para los inversores internacionales
- Mejorar los contactos internos y externos de una región
- Promover la difusión del conocimiento y la diversificación tecnológica

OBJETIVOS

La diversificación y la combinación de materiales y procesos avanzados para el sector de la aeronáutica tienen como objetivo poner en contacto las competencias distribuidas por toda la región y establecer sinergias entre ellas.

Las áreas de aplicación en el futuro sobrepasan el sector aeronáutico.

Con 25 establecimientos industriales líderes en el sector, 150 PYME especializadas en la alta tecnología, siete proyectos para futuras inversiones y una cultura establecida en torno a los programas colaborativos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+i), esta especialización contribuye al fortalecimiento y la diversificación de la economía industrial en las regiones.

El proyecto ADDISPACE forma parte de este planteamiento y tiene como objetivo difundir la investigación aplicada en relación con las tecnologías genéricas clave. Todo ello con el fin de promover las capacidades de innovación para lograr un crecimiento inteligente y sostenible.

Realización de un estudio estratégico regional sobre los intereses de la FA (intereses por sector, impacto y potencial regional). La restitución está prevista para este otoño.

Puesta en marcha de un estudio sobre formación en FA (necesidades + propuesta de oferta)

El grupo de trabajo ha identificado nuevas direcciones en la FA, a saber:

Materiales agrícolas/compuestos agrícolas: Identificación de las acciones de estructuración en favor del sector tras la estructuración del CRTCI (Composite Transfer and Resource Centre Innovative) en Tarbes

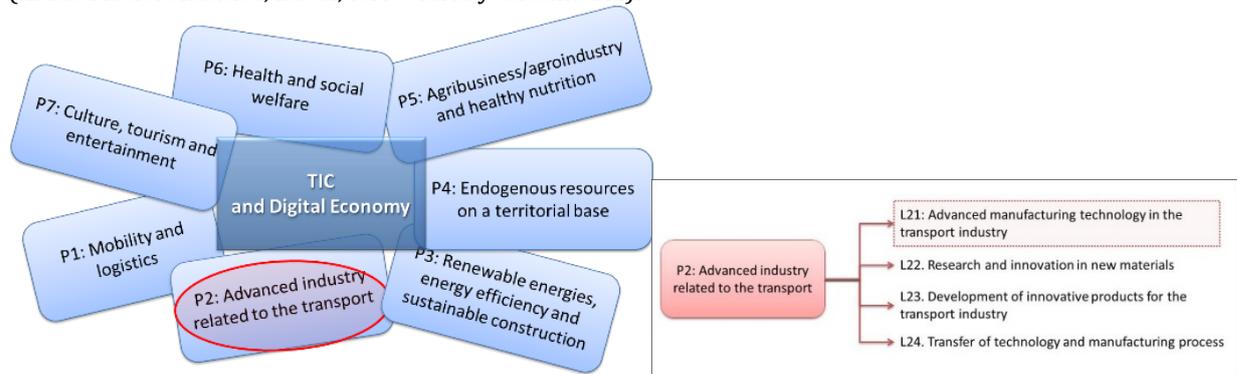
Reciclaje/Valorización: Reflexión en curso para aclarar los intereses/necesidades del sector

EJES Y PRIORIDADES DE LAS RIS3

El documento de orientación «Visión Andalucía 2020» enumera los principales vectores para la innovación, incluidas las dotaciones de recursos y capacidades de Andalucía en el ámbito del contexto global actual y las tendencias futuras.

Se han seleccionado ocho prioridades de especialización para la ejecución de la estrategia de innovación propuesta en Andalucía (.). El eje P2 («Consolidación de la industria avanzada vinculada al transporte») se encuentra entre las ocho prioridades de ejecución en cuatro líneas de actuación (L21-L24), como se muestra en el siguiente gráfico.

La línea de acción L2 destaca que las tecnologías de FAM pueden contribuir al desarrollo de nuevas metodologías y proporcionar mejoras en los procesos (.), así como a la estrategia de Andalucía para lograr una innovación significativa en los procesos de producción de la industria del transporte, dado su potencial para aumentar la productividad de componentes, piezas y sistemas para el sector aeroespacial y otras industrias (industria aeronáutica, naval, ferroviaria y automotriz).



VENTAJAS REGIONALES

La mayoría de las actividades de investigación y desarrollo en TFE en España se están llevando a cabo en Andalucía, no solo en las universidades, sino también en los centros de investigación.

CATEC dispone de una amplia experiencia en investigación y desarrollo de las tecnologías de FA, especialmente en la fabricación aditiva por capas (técnicas conocidas también como el prototipado rápido (RP), la fabricación directa (RM), la fabricación de formas sólidas libres, fabricación digital, etc.).

Se proponen dos direcciones principales: 1) Convertir Andalucía en una referencia mundial en investigación y desarrollo, y en demostración tecnológica y 2) Estimular el efecto desbordamiento en otros sectores de la economía, promoviendo así el conocimiento y la transferencia de tecnologías.

OBJETIVOS

El sector aeroespacial y la defensa son objetivos para Andalucía. Líneas de ensamblaje de empresas mundiales tractoras, como ADS, el nuevo avión de transporte militar europeo y plantas de fibra de carbono.

Se trabajará en esta línea con el fin de mejorar las actuales tecnologías y sistemas de fabricación avanzada. También se trabajará en el ámbito de la automatización, robotización y digitalización de procesos de producción para las industrias del transporte.

Los beneficiarios de la prioridad P2 (industria avanzada vinculada al transporte) se corresponden a los siguientes grupos objetivo:

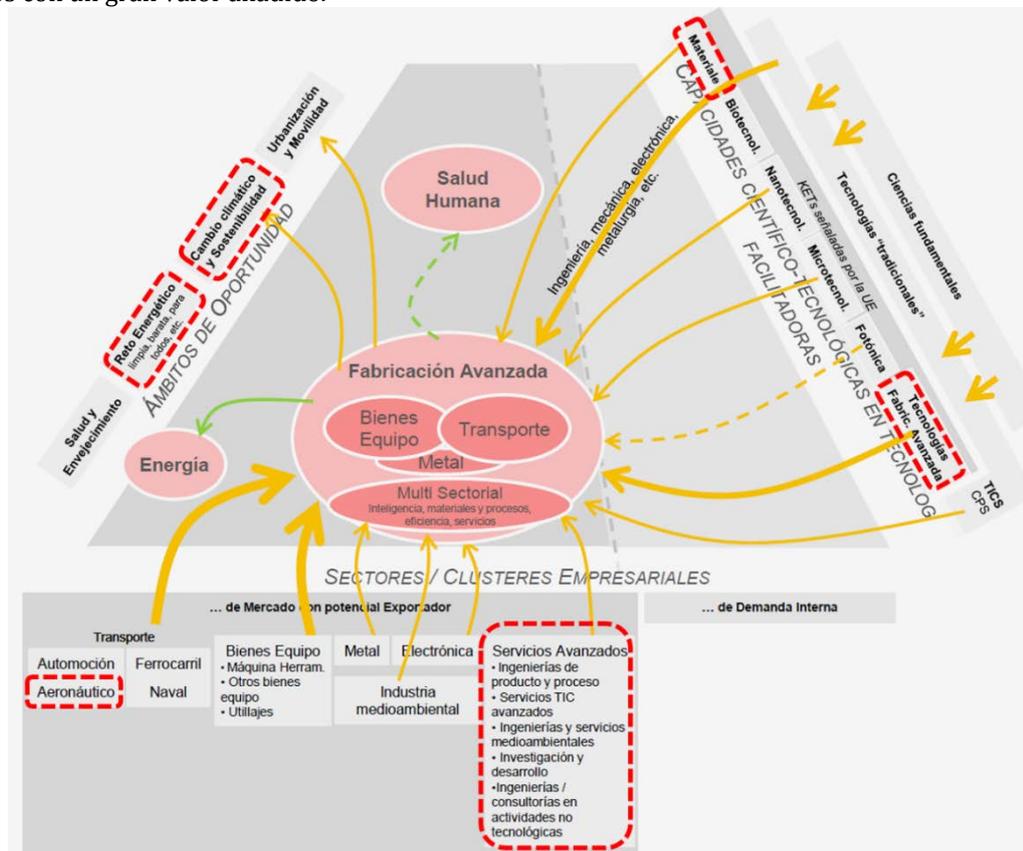
Agentes del Sistema Andaluz del Conocimiento vinculados con la industria avanzada del transporte.

Grupos de investigación de las universidades andaluzas vinculados con el transporte.

Empresas de la industria del transporte.

Empresas de sectores distintos a la industria del transporte, con posibles conexiones con esta industria.

En las Estrategias de investigación e innovación para una especialización inteligente (RIS3) establecidas por el Gobierno Vasco, la fabricación avanzada ha sido definida como una de las TRES METAPRIORIDADES de especialización inteligente, junto con la energía y las biociencias. Es un compromiso con la investigación centrada en la incorporación de la inteligencia a medios y sistemas de producción, el uso de nuevas tecnologías y capacidades en nuevos productos y procesos, la integración de materiales avanzados en productos con mayor valor añadido, o de procesos mejorados, la eficacia y la sostenibilidad de los recursos utilizados y la integración de servicios con un gran valor añadido.



VENTAJAS REGIONALES

La elección de la «fabricación avanzada» como una metaprioridad en el País Vasco se basa en su aplicabilidad transversal, en la marcada tradición industrial de la región, en la fortaleza relativa de un sector empresarial diverso y en la existencia de importantes capacidades científicas y tecnológicas de facilitación de las tecnologías asociadas con las actividades de fabricación.

OBJETIVOS

Áreas de especialización en RIS3 vinculadas al proyecto de ADDISPACE con mayor potencial de desarrollo en la Comunidad Autónoma del País Vasco:
 Desarrollo de materiales y procesos avanzados para la FAM dirigidos a los diferentes subsectores del transporte, como por ejemplo, el sector aeronáutico.

Desarrollo de medios de producción para la FAM, estudio de tecnologías escalables al nivel de la máquina-herramienta (tecnologías LMD y WAAM) y nuevas concepciones de máquinas (hibridación de procesos). Grupos de investigación de las Universidades andaluzas vinculadas al transporte.

Empresas de la industria del transporte.

Empresas de sectores distintos a la industria del transporte, con posibles conexiones con esta industria.

País	ESPAÑA	Comarca	OTRAS REGIONES
------	--------	---------	----------------

EJES Y PRIORIDADES DE LAS RIS3

Además de las regiones destinatarias del País Vasco y Andalucía, cabe señalar que un número significativo de otras regiones españolas consideran el sector aeroespacial o la fabricación aditiva como tecnologías facilitadoras esenciales (TFE), entre sus prioridades estratégicas.

Por ejemplo, las regiones de Madrid, Castilla-León y Castilla-La Mancha consideran al sector aeroespacial entre sus objetivos prioritarios en función de sus capacidades tecnológicas establecidas. La región de Galicia también considera este sector como un nicho de oportunidad para diversificar su sector metalmecánico tradicional.

El número de regiones españolas que describen las tecnologías de fabricación avanzadas entre las TFE prioritarias es numeroso; entre ellas, las siguientes regiones consideran las tecnologías de fabricación aditiva entre sus prioridades de especialización: Aragón, Asturias, Cantabria, Cataluña, Madrid, Navarra y Valencia.

Los principales objetivos de las RIS3 en Portugal se sitúan en ámbitos científicos y tecnológicos en los que Portugal tiene ventajas comparativas o es competitiva.

La visión 2020 de Portugal se basa en 4 pilares fundamentales:

Economía digital;

Ciencia y creatividad;

Capacidad tecnológica industrial;

Mejora de las capacidades y diferenciadores endógenos.

Así como en 5 ejes temáticos:

La promoción del potencial de la base de conocimientos científicos y tecnológicos;

La promoción de la cooperación entre las instituciones públicas y las entidades privadas de I+D, y entre empresas;

La focalización en los bienes y servicios con valor añadido

La promoción del espíritu empresarial, creación de empleo y cualificación de los recursos humanos;

La transición a una economía de bajas emisiones de carbono.

En el ámbito de la FAM (y por lo tanto, de ADDISPACE), tiene una vinculación muy fuerte con algunas de las prioridades y los ejes estructurales mencionadas anteriormente, ya que promueve el desarrollo y difusión de conocimientos científicos y tecnológicos. Las contribuciones complementarias de ADDISPACE se reducen a: la investigación y la difusión de conocimientos entre empresas; la cooperación entre empresas; la creación de grupos de servicios para el sector aeroespacial para causar un efecto multiplicador y mejorar la competitividad de este sector con gran valor añadido.

ADDISPACE encaja en la plataforma de innovación transversal «Soluciones para el desarrollo industrial sostenible» dentro de cuatro áreas prioritarias: «sectores automovilístico, aeroespacial y espacial», «sector de la energía», «sector de las materias primas» y «sector de las tecnologías de producción e industria de productos».

VENTAJAS REGIONALES

Dado que las RIS3 en el Centro de Portugal tienen como objetivo desarrollar procesos, materiales y sistemas sostenibles con mayor valor añadido, la investigación aplicada y las tecnologías facilitadoras esenciales, existe una fuerte adherencia a la fabricación aditiva (FA), y como tal, a la FAM, así como a su integración en equipos y sistemas tradicionales de fabricación. El desarrollo de aplicaciones con las tecnologías de FA en los centros de conocimiento, la transmisión y adopción de estas nuevas tecnologías avanzadas.

En la estrategia regional también se incluye al sector aeroespacial, en su condición de mercado con gran valor añadido, lo que lo vincula en otro aspecto a ADDISPACE.

Las RIS3 para la región también definen como estrategias prioritarias para la región el desarrollo de tecnologías avanzadas o procesos emergentes, los productos innovadores y los ecosistemas con mayor valor añadido.

El desarrollo de las tecnologías de FAM se encuadra dentro de la línea de las RIS3 para la evaluación de la sostenibilidad de los procesos, productos y sistemas, así como dentro de la eficiencia de los recursos y la reducción del impacto medioambiental en los procesos de producción.

El uso de las tecnologías de FAM con un alto grado de sofisticación permite la fabricación de componentes con gran valor añadido de mayor calidad con tiempos de producción cortos y menos costes de fabricación, lo que beneficia claramente a su eficiencia.

OBJETIVOS

Desarrollo de tecnologías de FAM por parte de las empresas de la región central de Portugal, con vistas a desarrollar las actividades económicas locales, crear asociaciones, suministrar componentes, productos y servicios. El objetivo de las RIS3 es fomentar la capacidad de exportación de las empresas locales suministrando tecnologías avanzadas al mercado aeroespacial y así contribuir a aumentar la competitividad de la región. La adopción de las tecnologías de fabricación aditiva por parte de las empresas de la región es un objetivo y una contribución positiva a la sostenibilidad y a la eficiencia en el uso de los recursos, ya que el proceso aditivo reduce el uso de procesos de corte (tecnologías sustractivas), lo que implica una disminución sustancial de los desechos de la pieza. Por lo tanto, los objetivos de ADDISPACE se ajustan a las metas regionales de las RIS3, amparando el uso eficiente de las materias primas, la reducción de desechos y la

eficiencia energética.

Otro objetivo de las RIS3 es mejorar las capacidades de los recursos humanos a través de acciones de difusión y transmisión de conocimientos, así como mediante cursos experimentales y cursos de reciclaje. Una vez más, las tecnologías de fabricación aditiva y ADDISPACE contribuyen con determinación a poner en marcha estas estrategias prioritarias en el marco de las RIS3.

5 GLOSARIO

[FA]	Fabricación aditiva
[FAM]	Fabricación aditiva metálica
[LMD]	Deposición de metal por láser
[LMD-w]:	Deposición por láser de metal en estado sólido
[SDLM]	Sinterización directa por láser de metal
[SLM]	Fusión selectiva por láser
[EBM];	Fusión por haz de electrones
[EBAM]™:	Fabricación de formas libres por haz de electrones (EBF ³)
[WAAM]:	Fabricación aditiva mediante soldadura plasma
[PBF]:	Tecnologías de fabricación aditiva mediante la fusión de un lecho de polvo
[DED]:	Tecnologías de deposición de energía dirigida
[I+D]:	Actividades de investigación y desarrollo
[RIS3]:	Estrategia de investigación e innovación para una especialización inteligente
[CAD]:	Diseño asistido por ordenador
[3D]:	Tridimensional
[NAMII]:	Instituto Nacional de la Innovación para la Fabricación Aditiva de los Estados Unidos de América
[EE. UU.]:	Estados Unidos de América
[ASTM]:	Sociedad Americana de Ensayos y Materiales
[STL]:	STL es el tipo de archivo estándar utilizado en la mayoría de sistemas de fabricación aditiva
[MIG]:	Gas inerte de metal
[TIG]:	Gas inerte de tungsteno

[CMT]:	Transferencia de metal en frío
[GMAW]:	Soldadura con gas inerte de metal
[GTAW]:	Soldadura con gas inerte de tungsteno
[PAW]:	Soldadura por arco plasma
[FGM]:	Materiales graduados funcionalmente
[CFD]:	Herramientas computacionales para la dinámica de fluidos
[MEF]:	Herramientas de modelado con el método de elementos finitos
[METI]:	Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón
[AMCRC]:	Advanced Manufacturing Cooperative Research Center de Australia
[STREAM]:	Materiales de ingeniería estructural por medio del programa de FA
[DMRC]:	Direct Manufacturing Research Centre de Alemania
[TNO]:	Instituto de investigación de los Países Bajos
[RNPR]:	Red Nacional de Prototipado Rápido de Portugal
[FDM]:	Modelado por deposición fundida
[FCT]:	Fundação para a Ciência e a Tecnologia
[PAMI]:	Iniciativa Portuguesa em Fabricação Aditiva
[CDRSP]:	Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto
[EPSRC]:	Engineering and Physical Sciences Research Council del Reino Unido
[END]:	Tecnologías no destructivas
[NASA]:	Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos de América
[HIP]:	Prensado isostático en caliente
[TRL]:	Nivel de preparación tecnológica
[CATEC]:	Centro Avanzado de Tecnologías Aeroespaciales de Sevilla, España
[ESA]:	Agencia Espacial Europea
[FLPP]:	Programa Preparatorio de Futuros Lanzadores de ESA
[ISCAR]:	Soporte para sistema de control de actitud y rotación interna para FLPP
[ACU]:	Adaptador de carga útil para ARIANE

- [FEO]: Fabricante del equipo original
- [LEAP]: CFM International LEAP Motor de aviación tipo turbofan de alto índice de derivación producido por CFM International
- [TFE]: Tecnologías facilitadoras esenciales
- [RP]: Prototipado rápido
- [RM]: Fabricación directa
- [DM]: Fabricación digital
- [CRTCI]: Composite Transfer and Resource Centre Innovative en Tarbes, Francia

6 REFERENCIAS

- [1] T. Wohlers and T. Caffrey, "Wohlers Report 2016. 3D printing and Additive Manufacturing. State of the industry.," *Wohler Assoc.*, 2016.
- [2] "Introduction to Additive Manufacturing Technology. A guide for Designers and Engineers.," Shrewsbury, UK, , 2015.
- [3] "Additive Manufacturing in FP7 and Horizon 2020. Report form the EC Workshop on Additive Manufacturing." European Commission, p. 78, 2014.
- [4] J. Scott et al., "Additive Manufacturing: Status and Opportunities," in *Science and Technology Policy Institute*, 2012, pp. 1–29.
- [5] "Hype Cycle for 3D Printing," *Gart. Inc.*, 2014.
- [6] "Additive manufacturing: opportunities and constraints," Royal Academy of Enineering. UK , 2013.
- [7] "F2792-12a: Standard terminology for additive manufacturing technologies," ASTM International, 2013.
- [8] Y. Cadoret, V. Chastand, A. Tezenas, and W. Maia, "Additive Manufacturing in Thales." Paris, 2015.
- [9] J. J. Lewandowski and M. Seifi, "Metal Additive Manufacturing: A Review of Mechanical Properties," *Annu. Rev. Mater. Res.*, vol. 46, no. 1, pp. 151–186, 2016.
- [10] R. Sharman, "GKN Aerospace. Additive Manufacturing." GKN Aerospace.
- [11] "Additive Manufacturing. A game changer for the manufacturing industry?" Roland Berger Strategy Consultants, Munich, 2013.
- [12] M. Aliakbari, "Additive Manufacturing: state of the art, capabilities and sample applications with cost analysis.," PhD thesis, KTH, 2012.
- [13] A. Biamino, S., Penna, "Electron beam melting of Ti-48Al-2Cr-2Nb alloy: microstructure and mechanical properties investigation.," *Intermetallics*, vol. 19, p. 776, 2011.
- [14] "<https://slm-solutions.com/>," 2016 .
- [15] "<http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melt>," 2016.
- [16] L. E. Murr, "Metal fabrication by additive manufacturing using laser and electron beam technologies," *J. Mater. Sci. Technol.*, vol. 28, pp. 1–14, 2012.

- [17] L. Xue, "Laser consolidation process for the manufacturing of structural components for advanced robotic mechatronic system," *Proc. 6th Int. Symp. Artif. Intell. Robot. Autom. Sp.*, 2001.
- [18] "<http://www.sciaky.com/additive-manufacturing/elect>," 2016 .
- [19] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, "Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2015.
- [20] "WAAM." [Online]. Available: <http://waammat.com/>. [Accessed: 01-Oct-2016].
- [21] S. W. Williams, F. Martina, A. C. Addison, J. Ding, G. Pardal, and P. Colegrove, "Wire + arc additive manufacturing," *Mater. Sci. Technol.*, vol. 836, no. March, 2015.
- [22] J. Ding, F. Martina, and S. Williams, "Production of large metallic components by additive manufacture – issues and achievements," *1st Met. Mater. Process. Ind. challenges*, no. February, 2015.
- [23] "Additive Manufacturing - Next generation." Roland Berger Strategy Consultants, 2016.
- [24] M. M. Cotteleer, M., Holdowsky J., "3D opportunity for aerospace and defense," *Deloitte University Press*, 2014. .
- [25] M. M. Cotteleer, M., Holdowsky J., "The 3D opportunity primer," *Deloitte Univ. Press*, 2014.
- [26] "<http://www.farinia.com/additive-manufacturing/industrial-3d/can-additive-manufacturing-save-the-aerospace-sector/>," 2016.
- [27] M. Tomlin and J. Meyer, "Topology Additive manufacturing technologies optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part," *7th Altair CAE Technol. Conf.*, 2011.
- [28] L. Hao, D. Raymont, C. Yan, A. Hussein, and P. Young, "Design and additive manufacturing of cellular lattice structures," *Innov. Dev. Virtual Phys. Prototyp.*, no. November 2014, pp. 249–254, 2011.
- [29] P. Sanders, "Emerging technologies and Concepts. On the way to Additive Manufacturing." Airbus Group, 2016.
- [30] "<http://www.airbus.com/>," 2016. .
- [31] "<http://www.techworld.com/personal-tech/industrial-3d-printing-transformation-design-says-airbus-innovation-chief-3646683/>," 2016.

- [32] M. Merklein, D. Junker, A. Schaub, and F. Neubauer, "Hybrid additive manufacturing technologies - An analysis regarding potentials and applications," *Phys. Procedia*, vol. 83, pp. 549–559, 2016.
- [33] "<http://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-core-applications/hybrid-manufacturing/>," 2016.
- [34] "<http://www.materialstoday.com/additive-manufacturing/news/3d-printing-in-space/>," 2016.
- [35] "La fabricación aditiva llega a la industria aeronáutica y espacial." Addimat, Hegan, Invema, AEI, Ministerio de Industria, Energía y Turismo (Gov. Esp.), 2016.
- [36] "www.3dsystems.com," 2016.
- [37] J. Shukla, A. Mishra, and R. K. Dwivedi, "Review of Development in 3D Printing and Its Impact on Industrial , Social and Medical," *Amsi 2014*, 2014.
- [38] "<http://journal.hep.com.cn/fme/EN/abstract/abstract4627.shtml#1>," 2016.
- [39] Coykendall, Cotteleer, Holdowsky y Mahto. 3D opportunity in aerospace and defense: Additive manufacturing takes flight, Deloitte University Press, 2014.
- [40] Shawn Kelly y varios autores. Metal Additive Manufacturing for Aerospace Markets, 7th International EWI/TWI Aerospace Seminar, Seattle, WA, sep 17-18, 2014.
- [41] Holmström, J., Partanen, J., Tuomi, J., y Walter, M. 2010. Rapid manufacturing in the spare parts supply chain: Alternative approaches to capacity deployment. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 21 (6), 687-697.
- [42] Ford, Sharon. Additive Manufacturing Technology: Potential Implications for U.S. Manufacturing Competitiveness. *Journal of International Commerce and Economics*. Publicado en línea en septiembre de 2014.
- [43] Wholers, T., y Caffrey, T. 2014. Wholers Report 2014 - 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry. Wholers Associates.
- [44] Varios autores. CSC, 3D printing and the future of manufacturing, Deloitte analysis, 2012.
- [45] <http://www.geaviation.com/company/additive-manufacturing.html>, consultada el 11 de noviembre de 2015.
- [46] <http://www.geaviation.com/company/additive-manufacturing.html>, consultada el 11 de noviembre de 2015.
- [47] <http://www.suasnews.com/2015/11/39747/aurora-flight-sciences-3d-printed-wing/>, consultada el 11 de noviembre de 2015.
- [48] <http://additivemanufacturina.com/2013/07/22/nasa-industrv-test-3d-printed-rocketis-enaine-iniector/>, consultada el 11 de noviembre de 2015.

- [49] <http://additivemanufacturing.com/2014/10/30/concept-laser-gmbh-a-world-first-additively-manufactured-titanium-components-now-onboard-the-airbus-a350-xwb/>, consultada el 11 de noviembre de 2015.
- [50] METAL AM - The magazine for the metal additive manufacturing industry, Vol.1 No.1 Spring 2015, Inovar Communications Ltd.
- [51] <http://www.metal-am.com/news/003141.html>, consultada el 11 de noviembre de 2015.
- [52] http://www.airbusgroup.com/int/en/news-media/press-releases/AirbusGroup/Financial_Communication/2015/03/20150319_airbus_defence_and_space_3d_printing_eurostar_e3000_satellite_platform.html, consultada el 11 de noviembre de 2015.
- [53] http://www.designnews.com/author.asp?section_id=1392&doc_id=274172&itc=d_n_analysis_element&dfpPPParams=ind_183,industry_aero,industry_gov,industry_machinery,bid_27,aid_274172&dfpLayout=blog&dfpPPParams=ind_183,industry_aero,industry_gov,industry_machinery,bid_27,aid_274172&dfpLayout=blog, consultada el 11 de noviembre de 2015.
- [54] Jukka Muhonen, Laser Sintering - AM Solutions from EOS to meet changing market demands and opening up future possibilities, Teknologidag Hpgskolen i Gjovik, 19 de septiembre de 2013.
- [55] <https://3dprint.com/1357/worlds-fastest-car-koenigsegg-one1-to-feature-3d-printed-exhaust-tips/>
- [56] The Army's Role in Additive Manufacturing, NCMS, October 2013 Frazier, William E. 2010.
- [57] Direct Digital Manufacturing of Metallic Components: Vision and Roadmap. Paper read at Direct Digital Manufacturing of Metallic Components: Affordable, Durable, and Structurally Efficient Airframes, at Solomons Island, MD.
- [58] M. Shellabear, O. Nyrhila, DMLS - Development History and State Of The Art, 1EOS GmbH Electro Optical Systems, Germany; 2EOS Finland, Finland.
- [59] R. Udroui, Powder Bed Additive manufacturing Systems and its Applications, Academic Journal Of Manufacturing Engineering, Vol. 10, Issue 4/2012.
- [61] www.eos.info, consultada el 11 de noviembre de 2015.
- [62] E. Herderick. Additive Manufacturing of Metals: A Review, EWI, Columbus, OH USA Materials Science and Technology (MS&T) 2011.
- [63] Kristofer Ek. Additive Manufactured Material. Master of Science Thesis MMK 2014:19 MKN 109 KTH Industrial Engineering and Management Machine Design SE-100 44 STOCKHOLM.

- [64] Gibson, I., Rosen, D.W. y Stucker, B. 2010. Additive Manufacturing Technologies, Springer, London 59.
- [65] The government office for science. The Future of Manufacturing: A new era of opportunity and challenge for the UK, London, 2013.
- [66] European Commission. Advancing Manufacturing- Advancing Europe-Report of the task force on advanced manufacturing for clean production, Bruselas, 2014.
- [67] Wohlers associates, «Wohlers report 2016. 3D printing and manufacturing state of the industry annual worldwide progress report», 2016.
- [68] R. Berger, «Additive Manufacturing – next generation», 2016.
- [69] Bonnín, J.R., Fuchs, E., Vaishav, P., Morgan, M.G., Mendonça, J., «When Risks cannot be seen: regulating uncertainty in emerging technologies», 2015. [70] Ponche R. «Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres». Ecole Centrale de Nantes; 2013.
- [71] Bourell D.L., Leu M.C., Rosen D.W., Beaman J.J. «Roadmap for Additive Manufacturing: Identifying the Future of Freeform Processing». 2009.
- [72] Sakly A., «Fabrication additive de pièces à base d’alliages métalliques complexes». Université de Lorraine; 2013.
- [73] Bo Q., Yu-sheng S., Qing-song W., Hai-bo W. «The helix scan strategy applied to the selective laser melting». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 63, 5–8, 631–40, 2012;
- [74] Foroozmehr E., Kovacevic R. «Effect of path planning on the laser powder deposition process : thermal and structural evaluation». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 51, 5–8, 659-69, 2010;
- [75] Bikas H., Stavropoulos P., Chryssolouris G., «Additive manufacturing methods and modelling approaches: a critical review». The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 83, 1, 389–405, 2015;
- [76] Kumar A., Roy S. «Effect of three-dimensional melt pool convection on process characteristics during laser cladding». Computational Materials Science. 46, 2, 495-506, 2009;
- [77] Toyserkani E., Khajepour A., Corbin S. «3-D finite element modeling of laser cladding by powder injection : effects of laser pulse shaping on the process». Optics and Lasers in Engineering. 41, 6, 849-67, 2004;
- [78] Cho C., Zhao G., Kwak S.-Y., Kim C.B. «Computational mechanics of laser cladding process». Journal of Materials Processing Technology. 153–154, 494–500, 2004;

- [79] Ghosh S., Choi J. «Three-dimensional transient finite element analysis for residual stresses in the laser aided direct metal/material deposition process». *Journal of Laser Applications*. 17, 3, 144-58, 2005;
- [80] Morville S., Carin M., Muller M., et al. «2D axial-symmetric model for fluid flow and heat transfer in the melting and resolidification of a vertical cylinder». *COMSOL Conference*. Paris; 2010.
- [81] Alimardani M., Toyserkani E., Huissoon J.P., Paul C.P. «On the delamination and crack formation in a thin wall fabricated using laser solid freeform fabrication process: An experimental-numerical investigation». *Optics and Lasers in Engineering*. 47, 11, 1160-8, 2009;
- [82] Fallah V., Alimardani M., Corbin S.F., Khajepour A. «Temporal development of melt-pool morphology and clad geometry in laser powder deposition». *Computational Materials Science*. 50, 7, 2124-34, 2011;
- [83] Driessen A.M. «Overhang constraint in topology optimisation for additive manufacturing: a density gradient based approach». *Delft University of Technology*; 2016.
- [84] Takezawa S., Nishiwaki S., Izui K., Yoshimura M. «Structural optimization based on topology optimization techniques using frame elements considering cross-sectional properties». *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 34, 1, 41-60, 2007;
- [85] Bendsoe M.P., Sigmund O. «Topology optimization : theory, methods, and applications». *Springer Verlag*; 2003.
- [86] Zegard T., Paulino G.H. «Bridging topology optimization and additive manufacturing». *Structural and Multidisciplinary Optimization*. 53, 1, 175-92, 2016;
- [87] Brackett D., Ashcroft I., Hague R. «Topology Optimization for Additive Manufacturing». 2011;
- s[88] R. Berger, «Marktchancen und Potentiale des Additive Manufacturing Roland Berger analyzed Additive Manufacturing (AM) technologies , focusing on metal structures for clients in engineered products», 2014, no. September.

Partners



ADDISPACE está cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) a través del programa INTERREG SUDUE 2014-2020.

www.addispace.eu