**Últimas tendencias en el ámbito científico sobre procesos de fabricación aplicados a la construcción de aeronaves**

**David Blanco Gómez1,A, Eva María Rubio Alvir1, José Manuel Sáenz De Pipaon Sáenz De Pipaon1, Amabel García Domínguez1**

1 Departamento de Ingeniería de Construcción y Fabricación, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Nacional de Educación a Distancia (UNED), St/Juan del Rosal 12, E28040 Madrid, España. dblanco78@alumno.uned.es; erubio@ind.uned.es; jm@saenzdepipaon.com.

A Programa de Doctorado en Tecnologías Industriales

**Resumen**

La industria aeroespacial se ha centrado tradicionalmente en reducir la masa de las aeronaves mediante el uso de materiales estructurales ligeros, pero este tipo de materiales y los procesos de fabricación y mecanizado asociados están en continua evolución. Por ello, el presente estudio busca responder a la pregunta de cuáles son las últimas tendencias en procesos de fabricación y mecanizado orientados a la fabricación y ensamblaje de aeronaves. Para ello se realiza una revisión sistemática de la literatura científica asociada de los últimos 10 años, concluyendo la tendencia actual hacia el estudio de aleaciones de titanio, superaleaciones de níquel y aceros, incluidas en un 22%, 16% y 14% de los estudios respectivamente. También existe interés predominante por la fabricación aditiva presente en el 52% de los estudios, superior al 32% de estudios sobre fabricación sustractiva, revisándose ambas tecnologías y presentado los resultados en tablas resumen como soporte a investigadores interesados.

**Palabras clave:** revisión sistemática; procesos de fabricación; multimateriales; aeronáutica

**Abstract**

The aerospace industry has traditionally focused on reducing aircraft mass by using lightweight structural materials, but these materials and the associated manufacturing and machining processes are continuously evolving. Therefore, this study seeks to answer the question of what are the latest trends in manufacturing and machining processes focused on aircraft manufacturing and assembly. For that purpose, a systematic review of the related scientific literature of the last 10 years is conducted, concluding that titanium alloys, nickel-based superalloys and steels are included in 22%, 16% and 14% of the studies, respectively. There is a predominant interest in additive manufacturing present in 52% of the studies, higher than the 32% of studies on subtractive manufacturing, both technologies are reviewed and the results are presented in summary tables to support interested researchers.

**Keywords:** systematic review; manufacturing processes; multi-materials; aeronautics

# Introducción

El estudio busca responder a la pregunta inicial de cuáles son las últimas tendencias sobre procesos de fabricación y mecanizado enfocados a la fabricación y ensamblaje de aeronaves, y lo hace mediante una revisión sistemática imparcial de literatura científica reciente y representativa con el objetivo de establecer conclusiones fiables sobre las últimas tendencias en procesos de fabricación convencionales y no convencionales asociados al sector aeronáutico.

Los materiales empleados en la fabricación de aeronaves evolucionan continuamente buscando optimizar la relación entre su resistencia estructural y su masa con el objetivo de reducir el consumo y emisiones contaminantes, y esta evolución conlleva un continuo desarrollo de los procesos de fabricación asociados [1]. Las crecientes exigencias en materia medioambiental empujan a todas las industrias, incluida la aeronáutica, a orientar todos sus procesos hacia la sostenibilidad y la eficiencia. Por ejemplo, cada nueva generación de aviones Boeing es entre un 15% y un 25% más eficientes que la precedente [2] , y respecto a Airbus, el modelo A350 está fabricado con un 53% de materiales ligeros y compuestos, y ahorra un 25% de combustible en comparación con el modelo precedente, por otro lado, la familia de aeronaves A220 es la más eficiente de su clase [3]. Es frecuente que estos nuevos materiales posean características que los hagan difíciles de mecanizar como es el caso de las aleaciones de titanio [4], [5] , las superlaciones de Ni [6], [7] o los polímeros reforzados con fibras [8], [9]. También es frecuente que se analicen nuevas aleaciones para las que es necesario optimizar los procesos de mecanizado [10]–[12], o que se investiguen procesos productivos asociados a multimateriales creados para alcanzar en conjunto unas características finales mejoradas [13].

Por otro lado, a las técnicas de mecanizado sustractivas convencionales, como el taladrado [8], [9], [14], [15], torneado [14]–[16], fresado [5], [17]–[19] o rectificado [6], [7], [14], [20], se han unido en estas últimas décadas las técnicas de fabricación aditivas, para las que, además, es necesario tener en cuenta las particularidades y problemáticas de cada uno de sus procesos, como en el caso de LPBF (del inglés, laser powder bed fusion) [21]–[26], SLM (del inglés, selective laser melting) [10], [13], [27]–[29], WAAM (del inglés, wire arc additive manufacturing) [30]–[32] o EBM (del inglés, electron beam melting) [33], [34]. Dentro de esta temática de la fabricación aditiva destaca el número de artículos enfocados al análisis de la vida a fatiga de materiales estructurales como las aleaciones de titanio [22], [33]–[35] o los aceros [23], [36].

Por otro lado, para asegurar la calidad e imparcialidad en la selección y el análisis de la literatura, se ha establecido un protocolo previo en el que se definen los criterios de inclusión y exclusión de literatura científica a seleccionar, y la información de potencial interés a extraer de los artículos para su análisis mediante preguntas cerradas.

Finalmente se ha llegado a una selección de los 50 artículos con mayor número de citas por año de publicación, publicados en revistas Q1 (80%) y Q2 (20%), que analizan procesos de fabricación y mecanizado convencionales y no convencionales orientados al sector aeronáutico. La selección final tiene un promedio por artículo de 22,22 citas/año de publicación, y un total de 4562 citas, a fecha de la última búsqueda bibliográfica realizada el 16.03.2022.

Del análisis realizado se extraen interesantes conclusiones para investigadores relacionados con el tema, como la tendencia actual en el estudio de aleaciones de titanio, superaleaciones de níquel y aceros, incluidas en un 22%, 16% y 14% respectivamente de los estudios seleccionados, el interés actual predominante por la fabricación aditiva presente en el 52% de los estudios, por encima del 32% de estudios sobre fabricación sustractiva. El LPBF y SLM son las técnicas aditivas más estudiadas, y presentes en el 23% y 19% respectivamente de los estudios de fabricación aditiva. El fresado y el rectificado son las técnicas sustractivas más analizadas, presentes en el 50% y 38% de los artículos sobre fabricación sustractiva.

Además, el análisis de la información se presenta mediante tablas resumen por tipo de fabricación, sustractiva o aditiva buscando aportar la máxima información y claridad a investigadores interesados.

# Metodología

Con objeto de realizar una selección y el posterior análisis de la literatura científica reciente, imparcial y representativa que permita responder a la pregunta inicial de cuáles son las últimas tendencias en el ámbito científico en el empleo de procesos de fabricación para la construcción de aeronaves, se establecen los siguientes criterios previos aplicables a las fases de selección y análisis; se seleccionan los 50 trabajos con mayor número de citas por año de publicación, y publicados en los últimos 10 años en revistas científicas Q1/Q2 relacionadas con la ingeniería aeronáutica, mecánica o de fabricación. Los trabajos están publicados en inglés y en Open Access. El motor de búsqueda empleado es WoS (del inglés, Web of Science), y la búsqueda está definida mediante las ecuaciones booleanas Ecuación 1, Ecuación 2 y Ecuación 3, definidas más abajo.

La primera ecuación tiene por objetivo identificar literatura general sobre fabricación y montaje, la segunda ecuación está dirigida a los procesos de mecanizado convencionales, y la tercera a identificar los procesos de mecanizado no convencionales en el sector aeronáutico. En los 3 casos la búsqueda está focalizada en el sector aeronáutico.

La última búsqueda se realiza a fecha 16.03.2022, y los artículos seleccionados para análisis tienen un promedio de citas por artículo de 22,22 citas/año publicadas y un total de 4562 citas a fecha de la última búsqueda.

**Ecuación** **1**

TS=((aeronaut\* OR aircraft OR airline OR aerosp\* OR air transport OR aviation) AND (manufact\* OR production\* OR fabricat\* OR construction\* OR making OR forming OR shaping OR moulding OR stamping OR assembl\* OR install\* OR erection OR join\* OR connecting OR union))

**Ecuación 2**

TS=((aeronaut\* OR aircraft OR airline OR aerosp\* OR air transport OR aviation) AND (drill\* OR turning OR lathing OR cutting OR milling OR machinability OR machining OR grinding))

**Ecuación 3**

TS=((aeronaut\* OR aircraft OR airline OR aerosp\* OR air transport OR aviation) AND (Electric\* discharge machining OR wire Electric\* discharge machining OR Ultrasonic Machining OR Water jet machining OR Abrasive water jet machining OR Electrochemical machining OR Chemical machining OR Laser machining OR Electron Beam Machining OR wire EDM OR broaching))

La selección final contiene los 50 artículos con mayor número de citas por año de publicación en revistas Q1 (80%) y Q2 (20%) sobre procesos de fabricación y mecanizado convencionales y no convencionales orientados al sector aeronáutico.



Figura 1. Distribución temporal de artículos seleccionados.

A partir de esta selección se realiza un análisis mediante preguntas cerradas predefinidas al inicio del estudio, y se extrae la información a una base de datos simple para su análisis posterior.

A partir del análisis de la literatura seleccionada se establecen conclusiones sobre las tendencias en los procesos de fabricación, procesos de mecanizado convencionales y no convencionales, materiales y temas de interés dentro de los estudios, presentando los resultados mediante diferentes tablas que ayuden a comprender y analizar esta tendencia a investigadores interesados.

# Resultados

La fabricación aditiva es el tipo de fabricación que está incluida en un mayor número de estudios, en concreto en un 52%, dividiéndose según la tecnología aplicada durante los ensayos experimentales en LPBF (23%) [21]–[26],SLM (19%) [10], [13], [27]–[29], WAAM (12%) [30]–[32], EBM (8) [33], [34], plasma [37], y FDM (del inglés, fused deposition modeling) (8%) [38][39].

En 2015, Joshi et al. [40] realizan una revisión sobre el progreso y los retos para hacer la fabricación aditiva viable en el sector aeronáutico, señalando como principal necesidad la mejora de la fiabilidad estructural de los componentes fabricados aditivamente. Con este objetivo, numerosos estudios posteriores orientan su investigación a la mejora de las propiedades mecánicas [32] y a fatiga [22], [23], [33]–[36] de este tipo de materiales.

En la Tabla 1 se incluyen las 5 revisiones sobre fabricación aditiva de los últimos 10 años con más citas promedio por año de publicación, incluyendo el tema principal, material y año de publicación.

Otra limitación para un uso generalizado de los componentes de fabricación aditiva es la falta de bases de datos sobre parámetros de proceso y sobre su repetibilidad, esto dificulta la simplificación de los procesos de certificación de componentes críticos en vuelo sometidos a fatiga. Por esta razón, Chern et al. [35] realizan una investigación aplicada al Ti-6Al-4V fabricado mediante EBM recopilando todos los datos de fatiga disponibles de numerosas fuentes en la literatura abierta. Para los autores, los factores más significativos que determinan la tolerancia a la fatiga de las piezas de EBM son la rugosidad de la superficie, los defectos relacionados con la porosidad y la microestructura. Además, el HIP (del inglés, hot isostatic pressing) y los tratamientos de post-mecanizado son los 2 métodos más eficaces para aumentar la resistencia a fatiga. Okaro et al [25], en 2019, utilizan un algoritmo de aprendizaje automático para clasificar la calidad de las fabricaciones L-PBF (del inglés, laser powder bed fusión) basándose en la monitorización y el análisis de patrones de medidas realizadas mediante fotodiodos con el objetivo de simplificar el proceso y reducir el coste de las costosas pruebas de certificación.

Tabla 1. 5 revisiones con mayor promedio de citas sobre fabricación aditiva.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ref. | Tema principal | Material | Año |
| [41] | General | - | 2016 |
| [42] | Estructuras reticulares graduadas | - | 2018 |
| [18] | Fatiga | Aceros | 2019 |
| [35] | Fatiga | Titanios | 2019 |
| [43] | Perspectivas UK | - | 2018 |

Un tema asociado a la vida a fatiga sobre el que se centran numerosos estudios es la existencia de poros y cavidades interiores en piezas fabricadas mediante tecnología aditiva. El poro es un defecto importante ya que es un fuerte elevador de tensión y puede provocar el fallo de las piezas, especialmente bajo carga de fatiga. El tamaño, la morfología y la ubicación de los poros son las principales variables que afectan al rendimiento mecánico de una pieza impresa. Por ejemplo, las muestras fabricadas de forma aditiva que poseen una mayor densidad de poros tienen vidas de fatiga más cortas, y los poros más cercanos a la superficie tienen un efecto más perjudicial en el rendimiento a la fatiga [44]. El proceso HIP no altera la composición química del material, pero sí reduce drásticamente la densidad de poros y vacíos del material, dando lugar a un aumento en la resistencia a la fatiga [33]. Los estudios actuales muestran la importancia de la orientación de la fabricación, el tratamiento térmico, la calidad de la superficie y la densidad de energía del haz sobre la vida a la fatiga de los aceros SLM. Orientación de la construcción tiene un efecto significativo, ya que horizontalmente tienen mejores propiedades mecánicas que las verticales [36], [38], y sobre el comportamiento a fatiga del Ti-6Al-4V por EBM, se reporta que las piezas fabricadas con orientaciones horizontales tienen una resistencia a la fatiga superior a las piezas fabricadas verticalmente, ya que estas últimas son más susceptibles de sufrir la iniciación de grietas como resultado de un acabado superficial rugoso [35]. Además, en este estudio, el tratamiento HIP por sí solo no aumenta la vida a la fatiga de las piezas no mecanizadas, sin embargo, sí reduce la dispersión de los resultados haciendo componentes fabricados más predecibles.

Por otro lado, existen estudios recientes aplicados a aleaciones novedosas como las aleaciones con memoria de forma SMA, (del inglés, shape-memory alloy) de NiTi que poseen interesantes propiedades de memoria de forma y superelasticidad debido a una transformación martensítica reversible, pero actualmente la fabricación con esta aleación se limita a geometrías simples. Por ello, Zeng et al. [45] investigaron en 2020 el uso de WAAM para producir muestras de NiTi ricas en Ti empleando hilo disponible en el mercado. En 2019, Wang et al. [10] habían ya empleado polvos de Ni y Ti premezclados para fabricar piezas de NiTi mediante distintas técnicas para conocer la técnica aditiva más apropiada a esta aleación, y los autores concluyeron que los mejores resultados se obtuvieron mediante DED (del inglés, directed energy deposition).

Otra aplicación interesante, aunque sobre un material mucho más conocido y empleado, es la fabricación aditiva empleando cobre y orientada a aplicaciones electromagnéticas como los motores eléctricos. En 2019 Chiumenti et al. [26] emplearon cobre puro en un proceso de fabricación aditiva mediante una máquina de fusión de lecho de polvo láser de 200W de potencia media, y con un pequeño diámetro de punto láser de 35 μm. En el estudio se realizaron mediciones de resistividad eléctrica que mostraron una correlación entre la orientación en la fabricación y la resistividad resultante, y se fabricaron bobinas eléctricas de sección transversal variable y con una resistividad de 3,19 µΩ-cm. En la Tabla 2 se incluyen los 5 artículos con mayor promedio de citas sobre fabricación aditiva que incluyen ensayo experimental, incluyendo el tipo de tecnología empleada, el material sobre el que se realiza el ensayo experimental, y el tema principal del estudio.

Tabla 2. 5 artículos con mayor promedio de citas sobre fabricación aditiva que incluyen ensayo experimental.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ref. | Proceso | Material | Tema principal |
| [30] | WAAM | NiTi | Aleaciones con memoria y superelasticidad |
| [37] | Deposición por plasma | Titanio | Plasma |
| [33] | EBM | Titanio | Fatiga |
| [31] | WAAM | Acero | Modelado de cordón de soldadura |
| [21] | LPBF | Inconel 718 | Salpicaduras |

Respecto a los procesos de fabricación sustractiva seleccionados, estos aparecen en un 32% de los artículos seleccionados. Considerando solamente los artículos de fabricación sustractiva, y teniendo en cuenta que en cada artículo puede aparecer más de un proceso sustractivo, los porcentajes de estudios sustractivos dedicados a cada proceso son: fresado 50% [5], [14], [15], [17]–[19], [46], [47], rectificado 38% [6], [7], [12], [14], [20], [48], taladrado 25% y torneado 19% [14]–[16].

Tabla 3. 5 artículos con mayor promedio de citas sobre fabricación sustractiva incluyendo ensayo experimental.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ref. | Proceso | Material | Tema principal |
| [17] | Fresado | Aluminio 7050 | MQL / Flujo de boquilla |
| [5] | Fresado | Ti-6Al-4V | Mecanizado criogénico |
| [6] | Rectificado | Superaleación de níquel | Avance lento |
| [7] | Rectificado | FGH96 superaleación de níquel | Fuerza de rectificado |
| [20] | Rectificado | Acero dulce | Monitorización de proceso |

En 2021, Duan et al. [17], simularon las características de la distribución del flujo de aire en la zona de fresado de piezas aeronáuticas de aluminio 7050. En el experimento ortogonal se incluyeron como parámetros de posible influencia significativa la velocidad y ángulo helicoidal de la fresa, y el tamaño y la forma de la cavidad en el campo de flujo de aire alrededor de la fresa para determinar la configuración adecuada de la boquilla y mejorar el uso de las gotas de aceite lubricante en la zona de contacto entre la fresa y la pieza. El estudio concluye que la distancia al objetivo de la boquilla tiene la mayor influencia significativa con un 55% seguida del ángulo de incidencia con un 30%. Por otro lado, el desgaste de las herramientas de mecanizado puede provocar una baja calidad superficial y una mayor rugosidad de las piezas fabricadas. Cuando no se detecta a tiempo, también puede provocar daños en la máquina de mecanizado, en la herramienta, o incluso accidentes. Por esta razón, son varios los trabajos enfocados a la predicción de RUL (del inglés, remaining useful life). La estimación de la RUL se realiza mediante tres enfoques principales: el pronóstico basado en modelos, en datos y el pronóstico híbrido. En 2015, Benkedjouh et al. [19] proponen con buen resultado un método que aplican sobre datos experimentales obtenidos en ensayos de fresado, en los que previamente habían instalado sensores de vibración, fuerza y acústicos para monitorizar la progresión del desgaste y predecir la vida útil restante de las herramientas de corte. En 2017 Wu et al. [18], tienen como objetivo predecir el desgaste de la herramienta de fresado utilizando tres algoritmos populares de aprendizaje automático: RNA (del inglés, red neuronal artificial), SVR (del inglés, support vector regression) y RF (del inglés random forest). Los autores concluyen que el modelo predictivo entrenado por las RFs puede predecir el desgaste de la herramienta en procesos de fresado con gran precisión. Para finalizar, Gao et al. [49], presentan un estudio en el que se monitoriza el estado de la máquina mediante sensores y sistemas de adquisición de datos, y se recopilan los datos de forma remota. A partir de estas mediciones, se realiza un análisis remoto de los datos y un diagnóstico. El objetivo es proporcionar una mayor accesibilidad y robustez, y mejorar la eﬁciencia computacional y del almacenamiento de datos. Los principales retos del diagnóstico en la nube son la recopilación y gestión de los datos. Es necesario establecer normas para las interfaces, la recopilación, la transmisión y la interoperabilidad de los datos. Además, también es crucial establecer métodos para anonimizar y eliminar la información sensible de los datos. La ciberseguridad debe proteger la información sensible en relación a la propiedad intelectual y la seguridad en red.

Por otro lado, los fluidos de corte representan el 16% del coste total de fabricación, que puede aumentar hasta el 20-30% en el mecanizado de materiales difíciles de mecanizar, y son origen de enfermedades profesionales, por esta razón una de las líneas de investigación está centrada en reducir su uso aplicando refrigeraciones sostenibles como el mecanizado en seco [16], [46], MQL (del inglés, minimum quantity lubrication) [12], [16], [17] o refrigeración criogénica [5]. En 2016, Shokrani et al. [5] realizan un análisis en operaciones de fresado de piezas de Ti-6Al-4V del efecto del enfriamiento criogénico mediante nitrógeno líquido y utilizan como variable respuesta la calidad superficial final. Las muestras mecanizadas con refrigeración criogénica mostraron menos defectos superficiales, y un mayor aumento de la microdureza.

Respecto a las investigaciones sobre MQL, Benkai et al. [12] plantearon en 2016 una investigación sobre el empleo de distintos lubricantes/refrigerantes de origen vegetal en el rectificado de piezas aeronáuticas de la superaleación de níquel GH4169. Para ello utilizaron como lubrificante/refrigerante: aceite de ricino, aceite de soja, aceite de colza, aceite de maíz, aceite de girasol, aceite de cacahuete y aceite de palma. Los autores concluyen que la viscosidad es el parámetro con mayor influencia, ya que con los aceites vegetales de mayor viscosidad se obtienen mayores efectos de lubricación y las fuerzas de rectificado son significativamente menores. Sin embargo, la alta viscosidad reduce la capacidad de intercambio de calor de los aceites vegetales, por lo que se obtiene una mayor temperatura de mecanizado.

Otro de los temas de interés reciente son los materiales nanoestructurados con gradiente. Esta clase de materiales se caracteriza por una variación gradual del tamaño del grano desde la superficie de la muestra hacia su interior. El interés sobre estos materiales radica en el buen equilibrio entre la resistencia y la ductilidad, resultado de la considerable capacidad de endurecimiento por deformación obtenida en la estructura de gradiente [11], [50]. Para finalizar la fabricación sustractiva, aparecen también tecnologías no convencionales como el mecanizado electroquímico que presenta interesantes ventajas como la independencia de propiedades mecánicas del material, ausencia de desgaste de la herramienta, alta eficacia del mecanizado y bajo coste. Por ello, el mecanizado electroquímico es una tecnología adecuada para componentes con estructuras complejas fabricados con materiales difíciles de cortar [51].

Tabla 4. 4 artículos con mayor promedio de citas sobre artículos de fabricación sustractiva mediante refrigeración sostenible.

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Ref. | Proceso | Refrigeración | Tema principal |
| [17] | Fresado | MQL  | Comprensión de proceso |
| [5] | Fresado | En seco / Criogénica | Comprensión de proceso |
| [12] | Rectificado | MQL | Refrigerantes vegetales |
| [16] | Torneado | En seco / MQL | Aditivos |

Además de los procesos de fabricación convencionales y no convencionales, aparece también estudios asociados a la fabricación inteligente y digitalización de procesos. La fabricación inteligente tiene como objetivo la integración de macrodatos, la analítica avanzada, la informática de alto rendimiento y el internet industrial de las cosas en los sistemas y procesos de fabricación tradicionales para crear productos altamente personalizables, con mayor calidad a menor coste. Para aumentar la productividad de la fabricación y reducir, al mismo tiempo, los costes de mantenimiento, es crucial desarrollar y aplicar estrategias de mantenimiento inteligente que permitan a los fabricantes determinar el estado de los sistemas en servicio y predecir cuándo debe realizarse el mantenimiento. La disciplina que predice el RUL basándose en las condiciones de funcionamiento anteriores y actuales se denomina PHM (del inglés, prognostics and systems health management) [18].

Por otro lado, en el actual entorno empresarial altamente competitivo, los procesos de desarrollo de productos son cada vez más complejos debido a la necesidad de personalización del producto. Esto hace que no sea posible analizarlos mediante métodos matemáticos ni la evaluación analítica de modelos realistas, por lo que es imprescindible estudiarlos mediante la simulación y la fabricación digital que permiten experimentar y validar diferentes configuraciones de productos, procesos y sistemas de fabricación. La simulación y fabricación digital ha evolucionado mucho en los últimos años con la llegada de la Industria 4.0, la digitalización y las nuevas tecnologías emergentes, como los sistemas CPS (del inglés, cyber-physical system), IoT (del inglés, internet of things), la computación en la nube, el diseño de redes de fabricación, la realidad aumentada y virtual, la simulación híbrida y gemelos digitales [52].

El diagnostico se refiere a la previsión del resultado probable de una situación. En él se establecen modelos analíticos para resumir la evolución histórica de la situación y, posteriormente, se tiene en cuenta la información actualizada para predecir la evolución futura de una situación, pronosticando un valor que está asociado a un nivel de conﬁanza, resultado de la incertidumbre del proceso de diagnóstico. El mantenimiento tradicional está basado en el tiempo, las acciones se realizan a intervalos preestablecidos, independientemente del estado de funcionamiento actual de la máquina. Sin embargo, en mantenimiento CBM (del inglés, condition-based maintenance) es una estrategia de mantenimiento que programa actividades basadas en el resultado de las mediciones de la condición sin interrumpir las operaciones normales de la máquina, y conducido a un enfoque de mantenimiento más eficiente denominado IPM (del inglés, inspired property management) [49].

Por otro lado, cuando se evalúa si una aeronave puede realizar la misión encomendada con seguridad, es importante contar con un sistema de supervisión estructural SHM (del inglés, structural health monitoring) que proporcione la información necesaria sobre el estado de los daños de la aeronave para tomar decisiones, como, por ejemplo, de la longitud de las grietas en el ala o de la fiabilidad de piezas críticas. Piezas de aeronaves con las mismas horas de funcionamiento presentan el doble de daños por fatiga que otras, por lo que es deseable que el sistema de SHM adaptado a cada aeronave sea individual [53]. Otras áreas interesantes a analizar sobre la selección bibliográfica realizada son los materiales que despiertan más interés y el origen de los mismos. Como se muestra en la Figura 3, los materiales que aparecen como objetivo de las investigaciones en la selección bibliográfica realizada son las aleaciones de titanio (22%), las superaleaciones de níquel (16%) y los aceros (14%) y los aluminios. Respecto al origen de los estudios seleccionados, en la Figura 2 se muestran como China con 28% de los estudios lidera el interés por este área de conocimiento, seguido por Estados Unidos y Reino Unido, con un 20% y 16% de los estudios.



Figura 2. Materiales incluidos en un mayor número de estudios en la bibliografía científica seleccionada.



Figura 3. Origen de los estudios de la bibliografía científica seleccionada.

# Conclusiones

La industria aeroespacial se ha centrado tradicionalmente en reducir la masa de aeronaves mediante el uso de materiales estructurales ligeros, pero este tipo de materiales y los procesos de fabricación y mecanizado asociados están en continua evolución. Por ello, el presente estudio busca responder a la pregunta de cuáles son las últimas tendencias en el ámbito científico en procesos de fabricación enfocados a la fabricación de aeronaves. Para ello se realiza una revisión sistemática de la literatura científica asociada de los últimos 10 años, concluyendo la tendencia actual en el estudio de aleaciones de titanio, superaleaciones de níquel y aceros incluidas en un 22%, 16% y 14% de los estudios respectivamente. Existe un interés predominante por fabricación aditiva presente en el 52% de los estudios, por encima del 32% de estudios sobre fabricación sustractiva. En la fabricación aditiva se pueden destacar los procesos LPBF, SLM y WAAM que están incluidos en un 23%, 19% y 12% respectivamente de los estudios seleccionados. En el caso de la fabricación sustractiva, los procesos más analizados son el fresado 50%[5], [14], [15], [17]–[19], [46], [47], rectificado 38%, taladrado 25% y torneado 19%. El estudio se completa con una revisión convencional de literatura y la presentación de los resultados mediante tablas resumen como soporte a investigadores interesados.

# Referencias

[1] D. Blanco, E. M. Rubio, R. M. Lorente-Pedreille, and M. A. Saénz-Nuño, “Lightweight Structural Materials in Open Access : Latest Trends,” *Materials (Basel).*, vol. 14, no. 21, p. 6577, 2021.

[2] “2020 Boeing Global Environment Report.” [Online]. Available: http://www.boeing.com/principles/environment/index.page. [Accessed: 03-Jul-2022].

[3] “Airbus Sustainability. Decarbonisation.” [Online]. Available: https://www.airbus.com/company/sustainability/environment/climate-change/decarbonisation.html. [Accessed: 03-Jul-2022].

[4] C. N. Kuo *et al.*, “Microstructure evolution and mechanical property response via 3D printing parameter development of Al–Sc alloy,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 15, no. 1, 2020.

[5] A. Shokrani, V. Dhokia, and S. T. Newman, “Investigation of the effects of cryogenic machining on surface integrity in CNC end milling of Ti-6Al-4V titanium alloy,” *J. Manuf. Process.*, vol. 21, 2016.

[6] Q. MIAO, W. DING, W. KUANG, and C. YANG, “Grinding force and surface quality in creep feed profile grinding of turbine blade root of nickel-based superalloy with microcrystalline alumina abrasive wheels,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 34, no. 2, 2021.

[7] B. LI *et al.*, “Prediction on grinding force during grinding powder metallurgy nickel-based superalloy FGH96 with electroplated CBN abrasive wheel,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 34, no. 8, 2021.

[8] R. Fu *et al.*, “Drill-exit temperature characteristics in drilling of UD and MD CFRP composites based on infrared thermography,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 135, 2018.

[9] C. Bonnet, G. Poulachon, J. Rech, Y. Girard, and J. P. Costes, “CFRP drilling: Fundamental study of local feed force and consequences on hole exit damage.,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 94, pp. 57–64, 2015.

[10] C. Wang *et al.*, “Additive manufacturing of NiTi shape memory alloys using pre-mixed powders,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 271, 2019.

[11] K. Ming, X. Bi, and J. Wang, “Strength and ductility of CrFeCoNiMo alloy with hierarchical microstructures,” *Int. J. Plast.*, vol. 113, 2019.

[12] B. Li, C. Li, Y. Zhang, Y. Wang, D. Jia, and M. Yang, “Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 29, no. 4, 2016.

[13] C. F. Tey, X. Tan, S. L. Sing, and W. Y. Yeong, “Additive manufacturing of multiple materials by selective laser melting: Ti-alloy to stainless steel via a Cu-alloy interlayer,” *Addit. Manuf.*, vol. 31, 2020.

[14] H. S. Yoon *et al.*, “A comparison of energy consumption in bulk forming, subtractive, and additive processes: Review and case study,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 1, no. 3, 2014.

[15] S. N. Melkote *et al.*, “Advances in material and friction data for modelling of metal machining,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 66, no. 2, 2017.

[16] N. Szczotkarz *et al.*, “Cutting tool wear in turning 316L stainless steel in the conditions of minimized lubrication,” *Tribol. Int.*, vol. 156, 2021.

[17] Z. DUAN *et al.*, “Milling surface roughness for 7050 aluminum alloy cavity influenced by nozzle position of nanofluid minimum quantity lubrication,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 34, no. 6, 2021.

[18] D. Wu, C. Jennings, J. Terpenny, R. X. Gao, and S. Kumara, “A Comparative Study on Machine Learning Algorithms for Smart Manufacturing: Tool Wear Prediction Using Random Forests,” *J. Manuf. Sci. Eng. Trans. ASME*, vol. 139, no. 7, 2017.

[19] T. Benkedjouh, K. Medjaher, N. Zerhouni, and S. Rechak, “Health assessment and life prediction of cutting tools based on support vector regression,” *J. Intell. Manuf.*, vol. 26, no. 2, 2015.

[20] V. Pandiyan, W. Caesarendra, T. Tjahjowidodo, and H. H. Tan, “In-process tool condition monitoring in compliant abrasive belt grinding process using support vector machine and genetic algorithm,” *J. Manuf. Process.*, vol. 31, 2018.

[21] J. Yin *et al.*, “Correlation between forming quality and spatter dynamics in laser powder bed fusion,” *Addit. Manuf.*, vol. 31, 2020.

[22] M. Kahlin *et al.*, “Improved fatigue strength of additively manufactured Ti6Al4V by surface post processing,” *Int. J. Fatigue*, vol. 134, 2020.

[23] S. Romano, P. D. Nezhadfar, N. Shamsaei, M. Seifi, and S. Beretta, “High cycle fatigue behavior and life prediction for additively manufactured 17-4 PH stainless steel: Effect of sub-surface porosity and surface roughness,” *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 106, 2020.

[24] S. M. H. Hojjatzadeh *et al.*, “Direct observation of pore formation mechanisms during LPBF additive manufacturing process and high energy density laser welding,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 153, 2020.

[25] I. A. Okaro, S. Jayasinghe, C. Sutcliffe, K. Black, P. Paoletti, and P. L. Green, “Automatic fault detection for laser powder-bed fusion using semi-supervised machine learning,” *Addit. Manuf.*, vol. 27, 2019.

[26] C. Silbernagel, L. Gargalis, I. Ashcroft, R. Hague, M. Galea, and P. Dickens, “Electrical resistivity of pure copper processed by medium-powered laser powder bed fusion additive manufacturing for use in electromagnetic applications,” *Addit. Manuf.*, vol. 29, 2019.

[27] Q. Guo *et al.*, “In-situ full-field mapping of melt flow dynamics in laser metal additive manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 31, 2020.

[28] M. Yakout, M. A. Elbestawi, and S. C. Veldhuis, “Density and mechanical properties in selective laser melting of Invar 36 and stainless steel 316L,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 266, 2019.

[29] M. Chiumenti *et al.*, “Numerical modelling and experimental validation in Selective Laser Melting,” *Addit. Manuf.*, vol. 18, 2017.

[30] Z. Zeng *et al.*, “Wire and arc additive manufacturing of a Ni-rich NiTi shape memory alloy: Microstructure and mechanical properties,” *Addit. Manuf.*, vol. 32, 2020.

[31] D. Ding, Z. Pan, D. Cuiuri, and H. Li, “A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM),” *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 31, 2015.

[32] Z. Qi, B. Cong, B. Qi, G. Zhao, and J. Ding, “Properties of wire + arc additively manufactured 2024 aluminum alloy with different solution treatment temperature,” *Mater. Lett.*, vol. 230, 2018.

[33] N. Hrabe, T. Gnäupel-Herold, and T. Quinn, “Fatigue properties of a titanium alloy (Ti–6Al–4V) fabricated via electron beam melting (EBM): Effects of internal defects and residual stress,” *Int. J. Fatigue*, vol. 94, 2017.

[34] T. Persenot, A. Burr, G. Martin, J. Y. Buffiere, R. Dendievel, and E. Maire, “Effect of build orientation on the fatigue properties of as-built Electron Beam Melted Ti-6Al-4V alloy,” *Int. J. Fatigue*, vol. 118, 2019.

[35] A. H. Chern *et al.*, “A review on the fatigue behavior of Ti-6Al-4V fabricated by electron beam melting additive manufacturing,” *Int. J. Fatigue*, vol. 119, 2019.

[36] S. Afkhami, M. Dabiri, S. H. Alavi, T. Björk, and A. Salminen, “Fatigue characteristics of steels manufactured by selective laser melting,” *Int. J. Fatigue*, vol. 122, 2019.

[37] F. Martina, J. Mehnen, S. W. Williams, P. Colegrove, and F. Wang, “Investigation of the benefits of plasma deposition for the additive layer manufacture of Ti-6Al-4V,” *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 6, 2012.

[38] V. Kishore *et al.*, “Infrared preheating to improve interlayer strength of big area additive manufacturing (BAAM) components,” *Addit. Manuf.*, vol. 14, 2017.

[39] Q. Guo *et al.*, “In-situ characterization and quantification of melt pool variation under constant input energy density in laser powder bed fusion additive manufacturing process,” *Addit. Manuf.*, vol. 28, 2019.

[40] S. C. Joshi and A. A. Sheikh, “3D printing in aerospace and its long-term sustainability,” *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 10, no. 4, 2015.

[41] H. Bikas, P. Stavropoulos, and G. Chryssolouris, “Additive manufacturing methods and modeling approaches: A critical review,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 83, no. 1–4, 2016.

[42] A. Panesar, M. Abdi, D. Hickman, and I. Ashcroft, “Strategies for functionally graded lattice structures derived using topology optimisation for Additive Manufacturing,” *Addit. Manuf.*, vol. 19, 2018.

[43] L. E. J. Thomas-Seale, J. C. Kirkman-Brown, M. M. Attallah, D. M. Espino, and D. E. T. Shepherd, “The barriers to the progression of additive manufacture: Perspectives from UK industry,” *Int. J. Prod. Econ.*, vol. 198, 2018.

[44] S. K. Moon, Y. E. Tan, J. Hwang, and Y. J. Yoon, “Application of 3D printing technology for designing light-weight unmanned aerial vehicle wing structures,” *Int. J. Precis. Eng. Manuf. - Green Technol.*, vol. 1, no. 3, 2014.

[45] W. Tan, B. G. Falzon, L. N. S. Chiu, and M. Price, “Predicting low velocity impact damage and Compression-After-Impact (CAI) behaviour of composite laminates,” *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.*, vol. 71, 2015.

[46] Z. Shang, Z. Liao, J. A. Sarasua, J. Billingham, and D. Axinte, “On modelling of laser assisted machining: Forward and inverse problems for heat placement control,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, vol. 138, 2019.

[47] G. ZHAO, H. XIA, Y. ZHANG, L. LI, N. HE, and H. N. HANSEN, “Laser-induced oxidation assisted micro milling of high aspect ratio microgroove on WC-Co cemented carbide,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 34, no. 4, 2021.

[48] X. XI, W. DING, Z. WU, and L. ANGGEI, “Performance evaluation of creep feed grinding of γ-TiAl intermetallics with electroplated diamond wheels,” *Chinese J. Aeronaut.*, vol. 34, no. 6, 2021.

[49] R. Gao *et al.*, “Cloud-enabled prognosis for manufacturing,” *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 64, no. 2, 2015.

[50] J. Li, G. J. Weng, S. Chen, and X. Wu, “On strain hardening mechanism in gradient nanostructures,” *Int. J. Plast.*, vol. 88, 2017.

[51] Z. XU and Y. WANG, “Electrochemical machining of complex components of aero-engines: Developments, trends, and technological advances,” *Chinese Journal of Aeronautics*, vol. 34, no. 2. 2021.

[52] D. Mourtzis, “Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends,” *Int. J. Prod. Res.*, vol. 58, no. 7, 2020.

[53] C. Li, S. MahaDeVan, Y. Ling, S. Choze, and L. Wang, “Dynamic Bayesian network for aircraft wing health monitoring digital twin,” *AIAA J.*, vol. 55, no. 3, 2017.