

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

Trabajo Fin de Máster

TÍTULO Evaluación de la aplicabilidad e idoneidad de la
Fabricación Aditiva en la manufactura de componentes
de Sistemas de generación de energía eólica

AUTOR Héctor Villalobos Casado

TUTOR Álvaro Rodríguez Prieto

CO-TUTOR

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

UNIVERSIDAD NACIONAL DE EDUCACIÓN A DISTANCIA

Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

TÍTULO Evaluación de la aplicabilidad e idoneidad de la
Fabricación Aditiva en la manufactura de componentes
de Sistemas de generación de energía eólica

AUTOR Héctor Villalobos Casado

TUTOR Álvaro Rodríguez Prieto

CO-TUTOR

DEPARTAMENTO: Ingeniería de Construcción y Fabricación

(A rellenar por la Comisión Evaluadora)

COMISIÓN EVALUADORA

PRESIDENTE:

VOCAL

SECRETARIO

FECHA DEFENSA ___ de _____ de _____

CALIFICACIÓN _____

Vocal

Presidente

Secretario

Fdo.: _____

Fdo.: _____

Fdo.: _____

CÓDIGOS UNESCO

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

--	--	--	--	--	--	--

LISTA DE SIGLAS Y ABREVIATURAS

3D	Tridimensional
ABS	Acrilonitrilo butadieno estireno
AM	<i>Additive manufacturing</i>
AMIE	<i>Adjustable Manufacturing Integrated Energy</i>
BAAM	<i>Big Area Additive Manufacturing</i>
BJ	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CLIP	<i>Continuous Liquid Interface Production</i>
CNC	Controlados numéricamente por computadora
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
DLP	<i>Digital Light Processing</i>
DPP	<i>Daylight Polymer Printing</i>
EPI	Equipo de protección individual
FA	Fabricación aditiva
HAWT	<i>Horizontal Axis Wind Turbines</i>
IA	Inteligencia artificial
IoT	<i>Internet of Things</i>
IR	Infrarrojo
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i>
MC	Manufacturado convencional
RP	<i>Rapid prototyping</i> (Creación rápida de prototipos)
SLA	<i>StereoLithogrAphy</i>
SLM	<i>Selective Laser Melting</i>
STL	<i>Stereolithography</i>
SWIFT	<i>Scaled Wind Farm Technology</i>
TFM	Trabajo Fin de Master
TIC	Tecnologías de la información y la Comunicación
TPP	<i>Two-photon polymerization</i>
UE	Unión Europea
UNE	Una Norma Española
UNED	Universidad Nacional de Educación a Distancia
UV	Ultravioleta
VAWT	<i>Vertical Axis Wind Turbines</i>
WHAM	<i>Wide High Additive Manufacturing</i>

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Triangulación empleada en la metodología, A) áreas de estudio B) Prospectiva.	10
Figura 2. Evolución de publicaciones para los dominios seleccionados.	11
Figura 3. La metodología de revisión sistemática (Mourtzis, 2019).	11
Figura 4. Imagen CAD de una taza con más imágenes que muestran los efectos de la construcción con diferentes espesores de capa (Gibson <i>et al.</i> , 2015).	15
Figura 5 Proceso estándar de la FA, mostrando las ocho etapas que la componen (Thompson, 2019).	16
Figura 6 (a) Esquema de estereolitografía de proyección de máscara de abajo hacia arriba (MPSL). (b) Esquema de la estereolitografía tradicional basada en láser (SLA). (c) Esquema de dos fotones polimerización (TPP) (Zhang <i>et al.</i> , 2021).	22
Figura 7 Esquema de la impresora de Inyección de material (Tyagi <i>et al.</i> , 2021)	23
Figura 8 <i>Binder jetting system schematic</i> (Ziaee & Crane, 2019).	24
Figura 9 Esquema de un proceso de fusión de lecho de polvo basado en láser: (a) rodillo para la preparación del lecho de polvo; (b) espejo móvil para el escaneo láser sobre la superficie del lecho de polvo; (c) fuente de láser; (d) almacenamiento de polvo usado para alimentar el polvo al rodillo por el movimiento del pistón inferior; (e) cámara de construcción que alberga el lecho de polvo para la acción de fusión del rayo láser, el pistón en la parte inferior baja el lecho para albergar nuevas capas de polvo; (f) muestra de fabricación; (g) depósito para recoger el exceso de polvo de la formación de la capa (Soundararajan <i>et al.</i> , 2021).	25
Figura 10 Esquema de laminación de hojas (Ramanathan <i>et al.</i> , 2022).	26
Figura 11 Esquema de deposición de energía directa (Svetlizky <i>et al.</i> , 2021).	27
Figura 12. Comparación entre <i>Offshore</i> y <i>Onshore</i> (Eolivertical, 2019).	31
Figura 13. Generador de turbina eólica (Horton, 2020)	32
Figura 14. Principales tipos de aerogeneradores (Sharma <i>et al.</i> , 2022).	33
Figura 15. Pala eólica de una turbina eólica (<i>World Energy Trade</i> , 2019).	35
Figura 16. Componentes de una pala eólica (Post <i>et al.</i> , 2017).	35
Figura 17 Molde impreso en BAAM (Castro, 2021).	36
Figura 18 Modelo conceptual de molde de pala ORNL/TPI FA (Post <i>et al.</i> , 2017b).	37
Figura 19. Secciones del molde (Post <i>et al.</i> , 2017b).	37
Figura 20. Sección 1 lateral de baja presión impresa en la impresora BAAM CI (Mann <i>et al.</i> , 2017).	38
Figura 21. Unidades de calentador ORNL/TPI integradas en la sección del molde de la pala (Post <i>et al.</i> , 2017b).	38
Figura 22. Flujo de aire en la sección de un molde (Post <i>et al.</i> , 2017b).	39
Figura 23. Moldes finales (Alta presión y baja presión) (Post <i>et al.</i> , 2017b).	39
Figura 24. Pala eólica finalizada (Post <i>et al.</i> , 2017b).	40
Figura 25. Partes de la góndola: 1-transformador; 2-alternador; 3-caja de cambios; 4-equipos hidráulicos; 5-sistema de regulación de paso de pala; 6-sensores meteorológicos; 7- sistema de guiñada (Sainz, 2015).	41
Figura 26 Etapas de la fabricación de una cubierta de góndola cableada de materiales compuestos (Jung, 2020),	42
Figura 27. Estructura ORNL AMIE (Mann <i>et al.</i> , 2017)	43
Figura 28. Estructuras funcionales en el proyecto AMIE (Malviya <i>et al.</i> , 2021).	44
Figura 29. Demanda mundial estimada de neodimio, praseodimio, disprosio y terbio para aerogeneradores,	45

Figura 30. Proceso de prensado y sinterizado, para la fabricación de imanes. Se presentan ventajas y desventajas a la derecha (Wang <i>et al.</i> , 2022).	46
Figura 31. Diversidad de materiales magnéticos blandos: materiales comunes comparados en términos de coste (a) y propiedades magnéticas (b) (Tiismus <i>et al.</i> , 2022)	48
Figura 32. Procedimiento experimental para reciclar imanes adheridos impresos aditivamente (Gandha <i>et al.</i> , 2019).	51
Figura 33. Categorización de intercambiadores de calor obtenidos mediante FA (Kaur <i>et al.</i> , 2020).	53
Figura 34. Intercambiador de calor de microcanal múltiple (Zhang <i>et al.</i> , 2018).	54
Figura 35. El cierre de ciclo mediante la remanufactura (Aziz <i>et al.</i> , 2021).	57
Figura 36. Proceso de remanufactura (Aziz <i>et al.</i> , 2021).	57
Figura 37. Aplicaciones de la impresión 3D durante la propagación de COVID-19 (a) Válvulas utilizadas para convertir las máscaras faciales de esnorquel en ventiladores (b) Válvulas para dispositivos respiratorios (c) Hisopos nasofaríngeos (d) Jeringas (e) Maniqués médicos para hisopos (f) Máscaras de silicona (g) protectores faciales (h) equipo respiratorio de emergencia (i) gafas de seguridad (j) manijas de puertas sin contacto (k) salas de aislamiento (l) casas de aislamiento equipadas con una cama, ducha e inodoro (Wang <i>et al.</i> , 2021)	59
Figura 38 Modelo de las cinco fuerzas de Porter aplicado a la FA en una economía del conocimiento (Dias <i>et al.</i> , 2022).	63
Figura 39. Cálculo, para FA y MC, (a) del coste de fabricación y (b) el tiempo de maquinado para una sola pieza (Price <i>et al.</i> , 2021).	70
Figura 40. Curva de tendencia e información de la tecnología (O’Leary, 2008).	78
Figura 41. Curva de tendencia de la FA (V., 2019).	79
Figura 42. Vista frontal de INGERSOLL – MASTERPRINT® 3X (INGERSOLL - MasterPrint® 3X, 2022)	80
Figura 43. Simulación de INGERSOLL – MASTERPRINT® 3X (INGERSOLL - MasterPrint® 3X, 2022).	80
Figura 44. Pala eólica impresa en 3D (Post <i>et al.</i> , 2017b).	81
Figura 45. Patrón de relleno para palas eólicas impresas en BAAM 91 (Seokpum <i>et al.</i> , 2018).	82
Figura 46. Turbina eólica a media escala. Impresa con un PrintrBot de bajo coste (Bassett <i>et al.</i> , 2015).	82
Figura 47. AML3D’s ARCEM.	83
Figura 48. Impresión de una torre de aerogenerador (COBOD, 2020).	83

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Clasificación ASTM (Reddy & Dufera, 2019).....	19
Tabla 2. Materiales y sus procesos FA correspondientes (Guo & Leu, 2013).....	28
Tabla 3. Materiales comunes de imanes permanentes para aplicaciones de máquinas eléctricas (Kallaste <i>et al.</i> , 2017).	49
Tabla 4. Ventajas y desventajas del proceso de reparación y restauración convencional y automatizado (Aziz <i>et al.</i> , 2021).	58
Tabla 5. Tecnología de fabricación menos costosa por tamaño de pedido y pieza (Price <i>et al.</i> , 2021).....	71

ÍNDICE

CONTENIDOS.....	7
1. Introducción.....	7
1.1. Objetivos.....	9
1.2. Metodología.....	9
2. Revisión de la FA y su aplicación en aerogeneradores	13
2.1. Estado del arte de la tecnología de FA	13
2.1.1. La fabricación aditiva	13
2.1.2. El proceso estándar para la FA	16
2.1.3. Las ventajas e inconvenientes de emplear FA.....	18
2.1.4. Clasificación de procesos de FA	19
2.1.5. Materiales utilizados en FA.....	27
2.1.6. Presencia industrial.....	29
2.1.7. Estándares de las tecnologías de FA.....	29
2.2. Sistemas de generación de energía eólica	31
2.2.1. La energía eólica.....	31
2.2.2. Aerogenerador	32
2.2.1. Clasificaciones de aerogeneradores.....	33
2.3. Tecnologías actuales de FA y futuras aplicaciones en aerogeneradores	34
2.3.1. Punto de situación.....	34
2.3.2. Moldes de palas eólicas	34
2.3.3. Cubiertas de las góndolas	41
2.3.4. Imanes.....	45
2.3.5. Intercambiadores de calor.....	52
2.3.6. Reparación y remanufactura.....	56
2.3.7. FA y el COVID-19	59
3. Prospectiva	61
3.1. Economía de la FA	61
3.1.1. La Industria 4.0 como propulsor de la FA.....	61
3.1.2. Las cinco fuerzas de Porter aplicadas a la FA	61
3.1.3. Costes de fabricación.....	65
3.1.4. Modelo de costes	68
3.1.5. Casos adicionales de estudio	69
3.2. Comparativa del desarrollo de la energía eólica offshore	72
3.2.1. Punto de situación.....	72
3.2.2. Recursos eólicos marinos europeos	72
3.2.3. Recursos eólicos marinos estadounidenses	74
3.2.4. Recursos eólicos marinos chinos	75
3.2.5. Comparativa	76
3.3. Aplicaciones futuras	78
4. Conclusiones.....	85
REFERENCIAS	88
CURRÍCULUM VITAE DEL AUTOR	99

CONTENIDOS

1. Introducción

Un suministro eléctrico estable es uno de los objetivos fundamentales de cualquier sociedad. Esta estabilidad está relacionada en gran medida con las fuentes de energía explotadas. Las fuentes de energía basadas en combustibles fósiles cuentan con la ventaja de emplear tecnologías maduras ampliamente testadas y estudiadas, que generan un suministro constante, estable y a medida de las necesidades del mercado. En su contra tienen dos grandes desventajas, son inherentemente contaminantes y no son renovables. Los combustibles fósiles son una de las principales fuentes de emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero, uno de los grandes motivos del cambio climático. Además, no hay que olvidarse de los residuos radiactivos de las centrales nucleares que, aunque provocan una contaminación de menor alcance geográfico, su alcance en el tiempo es inigualable. Es sin duda la segunda desventaja la que más efectos tiene en el corto y medio plazo. Los combustibles fósiles no son un recurso renovable y el acceso a ellos no es el mismo para todos los interesados. Las fluctuaciones del mercado, los intereses políticos y los conflictos sociales pueden encarecer, dificultar o eliminar el suministro. Estos condicionantes afectan a dos de las tres variables deseadas para un mercado eléctrico, la constancia y la estabilidad. Si no se ofrece una alternativa esta situación desemboca en una rápida reducción de los recursos disponibles y dependencia económica.

Una de las opciones disponibles para reducir y potencialmente resolver esta situación son las energías renovables. Son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Se caracterizan por su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier punto del planeta. Uno de sus grandes detrimentos ha sido la madurez de las tecnologías y los altos costes asociados. Esto ha cambiado en los últimos años donde la evolución de los costes se reduce de manera sostenida, a diferencia de los costes de los combustibles fósiles cuya tendencia es al alza, al margen de su volatilidad coyuntural. Aunque estos rasgos son comunes entre las distintas energías renovables no todos son ciertos en igual medida. Que un recurso sea renovable no implica que sea igual de abundante y explotable en cualquier punto de la geografía y el tiempo. No todas las fuentes de energía están presentes en suficiente cantidad como para que su explotación suponga un cambio de paradigma. Por supuesto una de las ventajas de las energías renovables es que no son excluyentes una de otra y siempre hay margen de aprovechamiento. Pero la abundancia o la ausencia de ella si condiciona el crecimiento. Un ejemplo es la energía hidroeléctrica ya que no todas las regiones cuentan con agua suficiente o las condiciones para aprovecharla, esto es evidente en el caso de los pantanos con su limitación geográfica y estacional.

Una de las energías que más recorrido tiene es la energía eólica. El viento se haya presente en cualquier parte de la geografía terrestre y es aprovechable tanto a pequeña como a gran escala. La energía eólica es una de las fuentes de energía renovable más fiable y sostenible. Es por tanto lógico que se la considere una fuente de generación de electricidad clave para conseguir un cambio del modelo energético tradicional hacia uno más limpio y sostenible. La energía eólica se obtiene del viento, se aprovecha la energía cinética producida por el efecto de las

corrientes de aire para impulsar las palas de un aerogenerador. El proceso de extracción se realiza principalmente gracias al rotor, que transforma la energía cinética en energía mecánica, y al generador, que transforma dicha energía mecánica en eléctrica. La evolución de la energía eólica ha consistido en desarrollar aerogeneradores cada vez más eficaces y eficientes que puedan aprovechar el máximo recurso eólico durante el mayor tiempo posible. Pero el agrandamiento y optimización de los aerogeneradores en una línea de desarrollo que pronto se verá limitada por las características que ofrecen los componentes del aerogenerador. Es en este punto donde los beneficios de aplicar una tecnología innovadora como la fabricación aditiva (FA) pueden dar mayores resultados. Si los componentes que forman un aerogenerador poseen mejores especificaciones técnicas, redundara en una mejora a su vez de estos sistemas de generación de energía eólica.

La fabricación aditiva (FA) es un conjunto de tecnologías que desde sus inicios ha demostrado un gran potencial que no solo ha alcanzado, sino que ha superado al encontrar una y otra vez sectores en los que es posible aplicarla. Hoy en día se la puede encontrar en multitud de áreas, desde la industria automovilista a la industria espacial. Pero si se ubica en el largo plazo es posible decir que esta tecnología aún no está madura y que todavía le queda un largo recorrido. Han pasado casi cuatro décadas desde que los primeros sistemas de estereolitografía empleados para el prototipado rápido aparecieron en el mercado. En este escaso tiempo la FA no solo se ha convertido en algo relativamente común en los ámbitos de la ciencia, la educación e industria, sino que ha pasado de ser un método para obtener rápidamente un modelo visual a ser un nuevo paradigma de fabricación.

Se consideraron varias preguntas de investigación para responder a los objetivos principales y abordar el alcance de esta revisión con respecto a la aplicación de la FA en sistemas de generación de energía eólica. Las preguntas incluyen:

- **Pregunta 1:** ¿Cuál es el estado actual de la aplicación de fabricación aditiva en sistemas de generación de energía eólica?
- **Pregunta 2:** ¿Qué efectos tiene la fabricación aditiva en la economía?
- **Pregunta 3:** ¿Cómo está siendo impulsado el aprovechamiento del recurso eólico?

Con base en estas preguntas de investigación, se realizó una revisión sistemática identificando la literatura relevante adquirida de los motores de búsqueda, principalmente de la base de datos *ScienceDirect*. La metodología para la revisión sistemática se explica en detalle en la Sección 1.2.

1.1. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Máster (TFM) es el desarrollo de un estado del arte sobre las aplicaciones de las tecnologías de fabricación aditiva en aerogeneradores en el periodo comprendido entre 2017-2022. Entendido este análisis como una recopilación de las tendencias y estudios establecidas hoy en día en la industria y la comunidad científica sobre dicho tema. A continuación, se enumeran los dos bloques principales de objetivos específicos:

- Enmarcar la situación de la fabricación aditiva en la economía. La introducción de nuevas tecnologías en el mercado, conlleva un cambio de paradigma para las empresas al que deben adaptarse con rapidez para no quedarse atrás. Esta transición supone una serie de costes y la necesidad de nuevas estrategias comerciales. Entender estos cambios es tan importante para un desarrollo exitoso como las aplicaciones de la propia tecnología.
- Estudiar y comparar la situación actual de la legislación y predisposición hacia la energía eólica marina en los entornos de Europa, Estados Unidos y China. Facilitar la explotación del recurso eólico y potenciarlo económicamente es un vector primordial para el desarrollo de cualquier tecnología asociada. La demanda genera oferta.

1.2. Metodología

Para la realización de este TFM el procedimiento que se ha empleado es un método inductivo, en el que se parte de premisas particulares para obtener una conclusión general. La información se ha recopilado siguiendo un enfoque cualitativo, el cual parte del estudio de métodos de recolección de datos de tipo descriptivo y de observaciones para descubrir de manera discursiva categorías conceptuales. Este enfoque es multidisciplinar y ha permitido aunar información de las distintas disciplinas consultadas para el documento, ingeniería, economía y jurídica.

En las investigaciones cualitativas la dificultad de valorar algunos criterios pone en duda factores como la objetividad, la validez o la aplicabilidad. Para aumentar la calidad, validez y fortaleza del documento se ha aplicado la triangulación. Este término se refiere a al uso de varios métodos, de fuentes de datos, de teorías, de investigadores o de ambientes en el estudio de un fenómeno (Okuda & Gómez, 2005). En la figura 1 se puede observar en el apartado A) la triangulación entre las distintas áreas de estudio empleadas, ingeniería de materiales, ingeniería de la energía y la tecnología de fabricación aditiva y en el apartado B) los bloques de información cruzados para obtener la prospectiva.

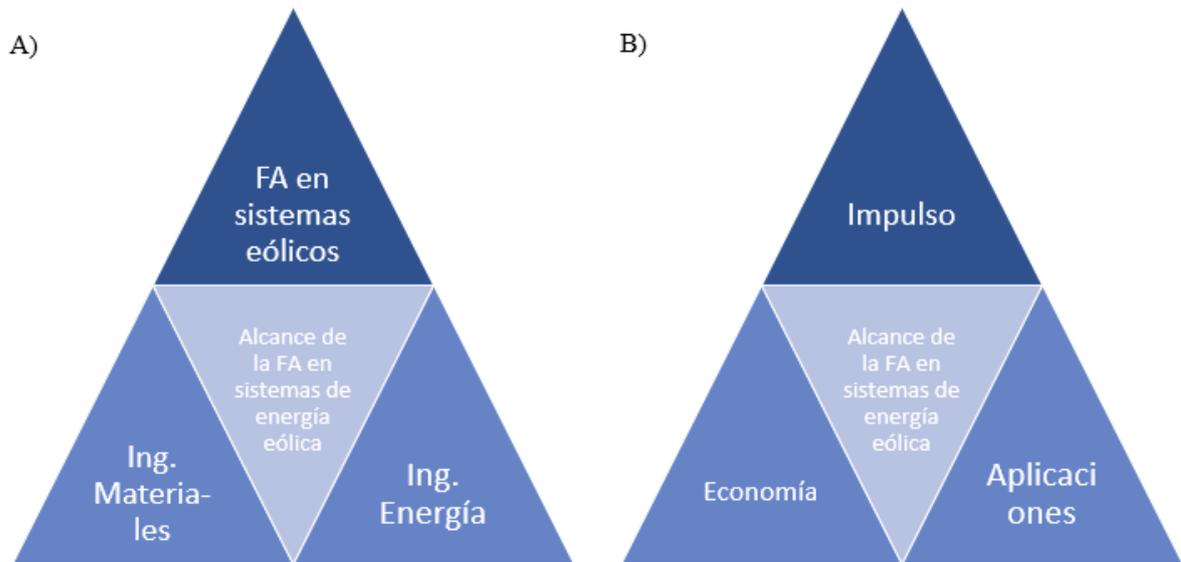


Figura 1. Triangulación empleada en la metodología, A) áreas de estudio B) Prospectiva.

Se realizó una revisión sistemática para lograr el objetivo y también para responder a todas las preguntas de investigación que se destacan en la sección anterior. La revisión se inició identificando palabras clave basadas en dos temas principales relacionados con los sistemas de generación de energía eólica utilizando tecnología de FA. El ámbito identificado a partir de las palabras clave coincidentes actúa como un dominio de búsqueda para encontrar la literatura relevante. Los primeros tres dominios de búsqueda se diseñaron explícitamente para aplicaciones de tecnología de fabricación aditiva en sistemas de generación de energía eólica. A su vez el dominio de búsqueda n.º 4 se centra en la relación entre la economía y la FA. Por último, el n.º 5 acota información de la normativa y legalidad en recursos eólicos offshore. Los cinco dominios de búsqueda se componen de diferentes ámbitos y diferentes combinaciones de palabras clave. El proceso de búsqueda también se ha filtrado en función de las áreas temáticas coincidentes que incluyen "Ingeniería", "Energía" y "Ciencias de los materiales" y se han centrado en artículos de investigación. Se han recogidos datos entre el 2010-2022 en las que se ve una tendencia al alza en el número de publicaciones acotado por los dominios, lo que demuestra el interés creciente por estas áreas de estudio. Por supuesto no todos los artículos son relevantes, pero como se observa en la figura 2 el crecimiento anual indica que aún hay espacio para más investigación y desarrollo.

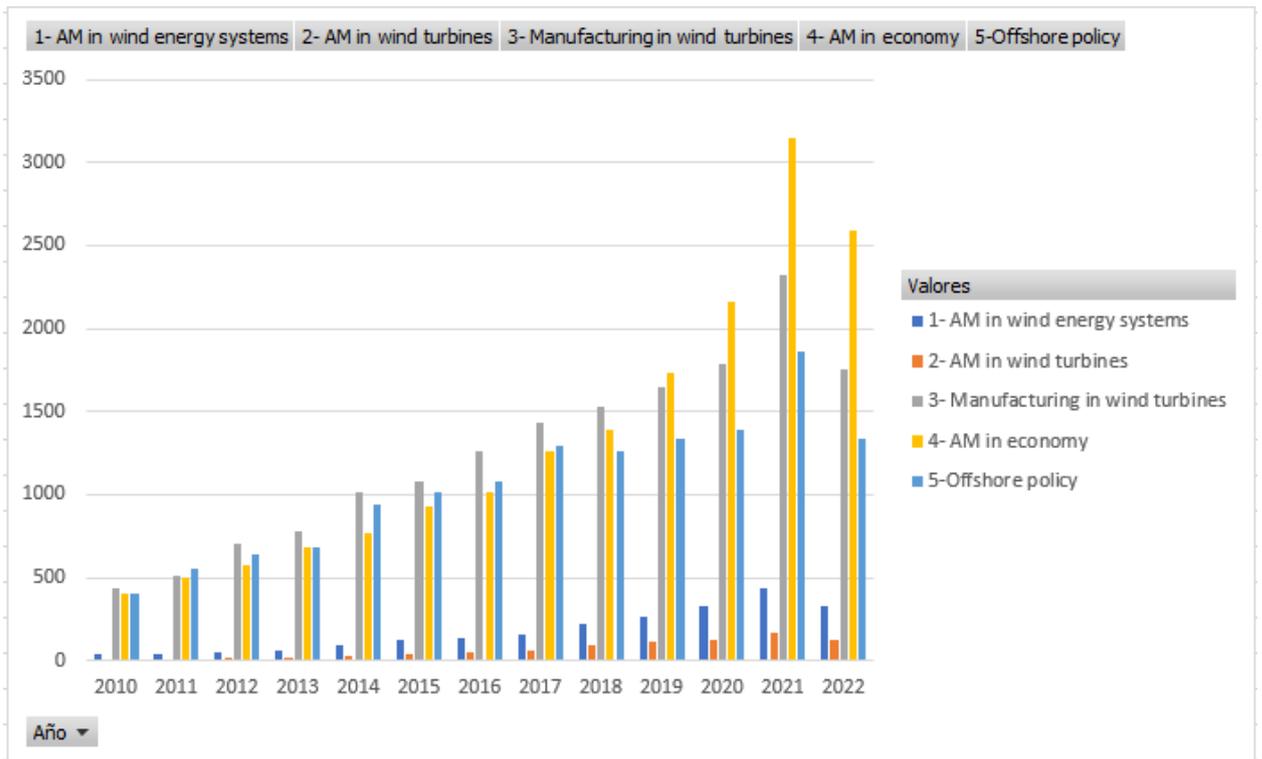


Figura 2. Evolución de publicaciones para los dominios seleccionados.

La metodología empleada para la revisión de la información se llevó a cabo en tres etapas: identificación de las palabras clave y dominio de búsqueda en bases de datos como *ScienceDirect*, identificación de artículos relevantes mediante lectura rápida de los resúmenes, y lectura en profundidad de literatura relevante para la citación y agrupación en temas de investigación. El procedimiento de tres etapas se representa en la figura 3.

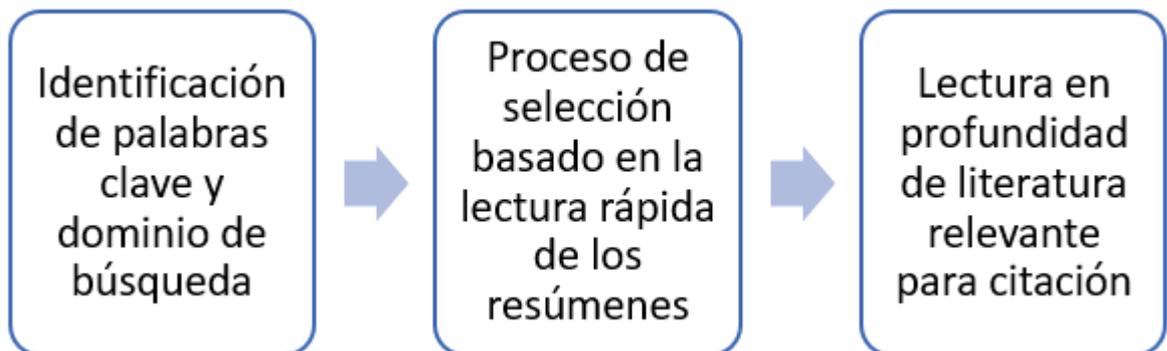


Figura 3. La metodología de revisión sistemática (Mourtzis, 2019).

El presente trabajo se ha abordado como una línea temporal. El pasado coincidiría con el contexto de la FA y los sistemas de generación de energía eólica. El presente está compuesto por el estado del arte de la tecnología FA y las aplicaciones desarrolladas para sistemas de generación de energía eólica. El futuro consistiría en un agrupamiento de hipótesis futuras, como influye la inclusión de la FA en la economía, que impulso está recibiendo la explotación de recursos eólicos marinos y que aplicaciones de Fa en sistemas de generación de energía

eólica están por llegar. Esta división temporal coincide con los tres capítulos que componen el documento.

2. Revisión de la FA y su aplicación en aerogeneradores

El segundo capítulo desarrolla pormenorizadamente el estado del arte de la tecnología de FA, revisa los conceptos básicos de la energía eólica y los aerogeneradores y por último aúna estas secciones en una enumeración de las aplicaciones de la FA en sistemas de generación de energía eólica.

2.1. Estado del arte de la tecnología de FA

En el siguiente apartado se expone una revisión pormenorizada de la tecnología de FA, entre sus apartados se encuentran la definición del término de fabricación aditiva, la enumeración del proceso estándar empleado, las ventajas e inconvenientes, una clasificación de los distintos procesos existentes, los materiales que se pueden emplear, el alcance industrial de la tecnología y los estándares actuales.

2.1.1. La fabricación aditiva

El término fabricación aditiva o *Additive manufacturing (AM)* surge de la formalización de la tecnología conocida anteriormente como creación rápida de prototipos (*Rapid prototyping (RP)*) y que generalmente se conoce como impresión 3D. El RP se desarrolla como un medio para reducir los tiempos y costes en el diseño de productos mediante la rápida creación de un sistema o representación de piezas antes de su lanzamiento comercial, acelerando así su llegada al mercado. Esencialmente se centran los esfuerzos en agilizar la creación de un prototipo que servirá de base para futuras iteraciones que eventualmente resultarán en el producto final. Esto se enfrenta a la postura tradicional de la industria, donde la creación de cada prototipo requería herramientas de un coste muy similar al empleado en la producción en masa. Posteriormente estos prototipos serían evaluados y probados y cualquier problema o modificación resultaría en un nuevo diseño y fabricación de un nuevo prototipo hasta obtener el producto final. Este ciclo podía extenderse desde seis meses a varios años lo que repercutía directamente en los costes. Con la impresión de prototipos físicos directamente de los datos obtenidos por un diseño asistido por ordenador o CAD (del inglés, *Computer-Aided Design*) el RP suponía la oportunidad realizar rápidamente múltiples diseños e iteraciones con sus correspondientes estudios de mercado. Los beneficios de esta tecnología permiten a las compañías ser aún más competitivas, condición vital en un momento en el que los ciclos de vida de los productos son más reducidos que nunca (Horn & Harrysson, 2012).

El término de creación rápida de prototipos también se emplea para describir un proceso de desarrollo de soluciones de software y empresariales que permite a los clientes y las consecuentes partes interesadas testar sus ideas y aportar opiniones durante el proceso de desarrollo. Por lo tanto, en el ámbito de desarrollo de productos el RP abarcaba todas aquellas tecnologías que creaban prototipos físicos directamente a partir de modelos de datos digitales. Con los avances los usuarios de las tecnologías RP se han dado cuenta de que este término ya no se ajusta a la realidad actual ya que no refleja de manera eficaz las aplicaciones más recientes de la tecnología. Las máquinas empleadas han mejorado tanto la calidad de su producción que su uso tiene una relación más estrecha con el producto final que únicamente la

creación de prototipos. Esto ha dado lugar a que muchas de las piezas se fabriquen con estas máquinas lo que invalida la palabra “prototipos” de la definición del término. A su vez esta definición obviaba que el principio básico de que todas estas tecnologías empleaban en la fabricación un enfoque aditivo. Es con todos estos puntos de vista en la mesa con los que un Comité Técnico formado dentro de ASTM International acordó que debería adoptarse una nueva terminología. Este término es fabricación aditiva (ASTM *Committee F42*, 2019).

La FA se sustenta en la fabricación directa de un modelo, normalmente generado a partir de un software CAD 3D, sin la necesidad de planificar el proceso. Aunque esta tecnología entraña también cierta dificultad reduce ampliamente el proceso de fabricación de objetos 3D a partir de datos procedentes de softwares CAD. Otros procesos de fabricación ven necesario un análisis meticuloso y detallado de la geometría de la pieza para poder así seleccionar correctamente cosas como el orden en el que se puede fabricar las distintas características, que herramientas usar o que accesorios extra pueden ser convenientes para completar la pieza requerida. En cambio, FA destaca en que solo necesita unos conocimientos básicos de cómo opera la maquinaria FA y los materiales empleados, así como los detalles dimensionales básicos del modelo.

El quid de cómo funciona la FA consiste en que las piezas se fabrican agregando material en sucesivas capas. Cada una de las capas es una sección transversal delgada de la pieza definida en los datos CAD originales. La diferencia entre el entorno virtual y el mundo físico es que cada una de las capas debe contar con un grosor finito por lo que la pieza resultante será una aproximación de su homóloga virtual, como se puede observar en la figura 4. Cuanto más reducido sea el grosor de las capas más se parecerá la pieza resultante al modelo CAD. La maquinaria de FA que se ha comercializado emplea un enfoque de fabricación en capas, lo que diferencia unos equipos de otros son los materiales que emplean, cómo se crean las capas y cómo se unen las distintas capas entre sí. Estas variables determinan factores como las propiedades del material, las propiedades mecánicas, la precisión de la pieza resultante, la necesidad de mecanizado posterior u otros factores como la velocidad de fabricación, el tamaño de la maquinaria o el coste total del equipamiento y proceso (Gibson *et al.*, 2015).



Figura 4. Imagen CAD de una taza con más imágenes que muestran los efectos de la construcción con diferentes espesores de capa (Gibson *et al.*, 2015).

2.1.2. El proceso estándar para la FA

El proceso estándar de la FA se puede desglosar en una secuencia de ocho pasos que van desde una figura en un entorno CAD hasta la pieza física resultante. Cada producto puede involucrar la FA en distinto grados y maneras. Los productos de un gran tamaño o complejos con un gran énfasis en la importancia de la ingeniería emplearán la FA durante varias etapas e iteraciones a lo largo del desarrollo, mientras que productos pequeños y relativamente simples solo emplearán la FA para su visualización y comprensión. No todos los procesos de desarrollo necesitarán una pieza cuidada, sino que requerirán de piezas en bruto y recurrirán a la FA por su velocidad. En cambio, otros procesos necesitarán en sus últimas etapas de una pieza perfectamente mecanizada y recurrirán a esta técnica por la versatilidad que tiene para obtener piezas complejas y de gran tolerancia. Todos los procesos de FA implican una de las etapas mostradas en la Figura 5 (Thompson, 2019).

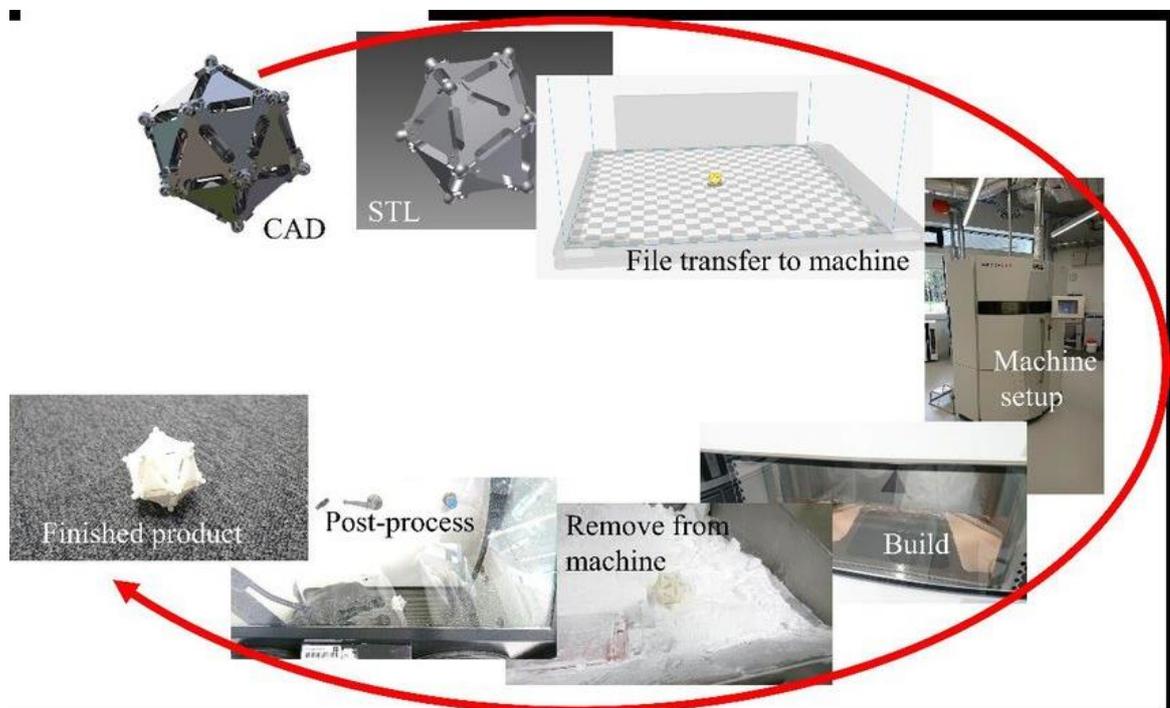


Figura 5 Proceso estándar de la FA, mostrando las ocho etapas que la componen (Thompson, 2019).

2.1.2.1. Etapa 1: CAD

El inicio de todas las piezas fabricadas mediante FA es un modelo CAD que describa su geometría en su totalidad. Para obtener este modelo se puede emplear cualquier software del mercado que modele sólidos CAD. Otra forma de obtener el modelo CAD es digitalizar una pieza ya existente mediante ingeniería inversa, por ejemplo, mediante escaneo óptico y laser.

2.1.2.2. Etapa 2: Conversión al tipo de archivo aceptado por FA

Es habitual que en los múltiples campos que cubren los softwares se estandarice un formato de archivo común que todos puedan ejecutar. En el caso de la FA el formato que admiten todas las máquinas y se ha asentado como la norma es el archivo STL (del inglés, *Stereolithography*).

Este archivo traduce la superficie en el modelo CAD a una malla de triángulos. El número de triángulos controla la precisión de las superficies redondeadas. El software CAD permite al usuario controlar el número y el tamaño de esos triángulos (Reddy & Dufera, 2019).

2.1.2.3. Etapa 3: Transferencia a máquina y manipulación del archivo STL

En el archivo STL se describe la pieza de trabajo que para su correcta interpretación por la máquina de FA. En este paso puede producirse alguna manipulación para adecuar el tamaño, la posición y la orientación oportuna para su construcción.

2.1.2.4. Etapa 4: Configuración de la máquina

Es de suma importancia configurar la máquina correctamente antes del proceso de fabricación. Las configuraciones tendrán en cuenta parámetros como la fuente de energía, las restricciones del material o el grosor de la capa entre otros.

2.1.2.5. Etapa 5: Construcción

Una vez imputada toda la información necesaria la maquina puede construir la pieza siguiendo un proceso automatizado, siendo necesario solo la supervisión mínima para corregir situaciones al margen del proceso como la reposición de material, un corte de energía o fallos de software entre otros.

2.1.2.6. Etapa 6: Retirado de la pieza

Finalizada ya la pieza la maquina debe facilitar el retirado de la pieza. En este punto es probable que deba de haber interacción con la máquina para gestionar las distintas medidas de seguridad, como enclavamientos para evitar un movimiento inesperado o controlar que la temperatura es la adecuada para su manipulación.

2.1.2.7. Etapa 7: Post-procesado

Aunque no es necesario un mecanizado como tal las piezas pueden requerir una limpieza adicional previa a su uso. En este punto las piezas pueden todavía no haber adquirido todas sus propiedades o necesitar de la eliminación de las características de soporte. Este punto necesita de mano de obra especializada.

2.1.2.8. Etapa 8: Producto final

En este punto la pieza puede estar lista para usarse, pero en muchos casos se da la necesidad de realizar un tratamiento final para obtener el acabado preciso para la aplicación en el que se va a emplear la pieza. Este tratamiento final puede consistir en un acabado superficial como aplicar una imprimación y pintura o el ensamblaje junto a otras piezas o componentes ya sean mecánicos o electrónicos.

La fabricación de la pieza no es un proceso automático infalible, requiere de un cuidado mantenimiento con verificaciones periódicas de la maquinaria, así como un entorno adecuado libre de suciedad y ruido. Este punto también afecta a la materia prima, pues muchos materiales necesitan ser conservados en unas condiciones muy específicas que de no cumplirse pueden dañar sus propiedades o su vida útil. Aunque muchos en varios casos se puede reaprovechar el material es de rigor implementar un procedimiento para mantener la calidad mediante el reciclaje y así evitar que la reutilización degrade el material y por tanto la pieza final.

2.1.3. Las ventajas e inconvenientes de emplear FA

La *FA* ahora se conoce con frecuencia como una de una serie de tecnologías disruptivas que están cambiando la forma en que se diseñan productos y se establecen nuevos negocios. Es por tanto interesante enfrentarla a la fabricación sustractiva tradicional para entender cuáles son en verdad las ventajas reales de esta tecnología. La *FA* tiene varias ventajas sobre la fabricación sustractiva. Primero, la cantidad de material requerido es menor que para un método sustractivo tradicional donde el material se elimina de un bloque hasta que se logra la geometría de la pieza. Como la pieza se construye en capas aditivas durante la *FA*, la cantidad de material se puede controlar de manera más precisa. En segundo lugar, la *FA* es capaz de producir piezas u objetos que los métodos más tradicionales no pueden realizar fácilmente, como la creación de piezas de múltiples materiales y objetos biomédicos, incluidos órganos. En tercer lugar, la *FA* puede reducir el tiempo y el coste de fabricación, la aceleración de todo el proceso de desarrollo de productos se basa en gran medida en el hecho de que se emplean ordenadores en todo momento. Dado que se utiliza CAD 3D como punto de partida y la transferencia a *FA* es sencilla, se reducen los inconvenientes en la conversión de datos o la interpretación de la intención del diseño. La fluidez también se puede ver en términos de la reducción de los pasos del proceso. Independientemente de la complejidad de las piezas a construir, la construcción dentro de una máquina *FA* generalmente se realiza en un solo paso. La mayoría de los demás procesos de fabricación requerirían etapas múltiples e iterativas para llevarse a cabo. A medida que incluye más funciones en un diseño, el número de estas etapas puede aumentar drásticamente. Incluso un cambio relativamente simple en el diseño puede resultar en un aumento significativo en el tiempo requerido para construir usando métodos convencionales. Por lo tanto, *FA* puede verse como una forma de predecir de manera más efectiva la cantidad de tiempo para fabricar modelos, independientemente de los cambios que se implementen durante esta etapa formativa del desarrollo del producto. De igual manera, la cantidad de procesos y recursos necesarios se puede reducir significativamente cuando se usa *FA*. Los talleres que adoptan la tecnología *FA* pueden ser mucho más limpios, más eficientes y más versátiles que antes. La *FA* tiene inconvenientes. Si bien es relativamente rápido y económico de producir en pedidos pequeños, la producción de piezas a gran escala generalmente no es rentable debido al tiempo excesivo y la mala calidad de las piezas en comparación con los métodos más tradicionales. Gran parte de los métodos aditivos tienen propiedades de material anisótropo debido al enfoque de capas inherente y ciertas geometrías producidas por la *FA* tienden a ser inferiores a las que se producen a partir del fresado o el torneado (Bhushan & Caspers, 2017).

Aunque las ventajas son múltiples, no es siempre el enfoque predilecto para todas las aplicaciones y como en cualquier otra tecnología también existen limitaciones y desventajas. Entre estas se incluyen la producción en masa en las que la fabricación tradicional funciona más rápido con menores costes y producen una mejor calidad de material. Los estándares de calidad tienen aún muy poco recorrido y están sujetos a cambios a medida que se controlen y conozcan mejor los procesos y el desempeño de los materiales. Las propiedades mecánicas obtenidas son inferiores debido a defectos y anisotropía, se obtiene un acabado rugoso y hay variación de propiedades y dimensiones según el proceso utilizado. Por último, el coste de las impresoras de alta calidad y los materiales requeridos aún es muy caro y todavía existen limitación para mejorar la velocidad de deposición. Muchas de estas limitaciones se deben a que la tecnología FA aún está en desarrollo (Nath & Nilufar, 2020).

2.1.4. Clasificación de procesos de FA

La clasificación es siempre un apartado en ciencias que puede variar en gran medida según los autores consultados. En el caso de la FA existen también distintos métodos. Un enfoque ampliamente empleado es clasificar según la tecnología de referencia, es decir, si el proceso utiliza láser, tecnología de impresora, tecnología de extrusión, etc. Otro enfoque es reunir los procesos según el tipo de entrada de materia prima. Estos agrupamientos pueden dar lugar combinaciones extrañas o que algunos procesos que parecen producir resultados similares terminen siendo asignados a agrupaciones distintas. Se seguirá por tanto lo indicado en la norma ASTM 52900. Existen siete técnicas de FA, ver tabla 1, que se utilizan para imprimir diferentes materiales y producir distintas resoluciones/precisiones (Qian *et al.*, 2022).

Tabla 1 Clasificación ASTM (Reddy & Dufera, 2019).

Proceso	Descripción breve	Tecnologías relacionadas	Compañías	Materiales
Fusión de lecho en polvo	La energía térmica fusiona selectivamente regiones de un lecho de polvo	Fusión por haz de electrones, sinterización selectiva por láser, sinterización selectiva por calor, sinterización directa de metal por láser	EOS (Alemania), 3D Systems (EE.UU.), Arcam (Suecia)	Metales, Polímeros
Deposición de energía directa	La energía térmica enfocada se usa para fusionar materiales derritiéndolos a medida que el material se deposita	Deposición de energía dirigida Deposición láser de metal	Optomec (EE.UU.), POM (EE.UU.)	Metales, Polímeros

Extrusión de material	El material se distribuye selectivamente a través de una boquilla u orificio pasante	Extrusión de materiales Modelado de deposición fundida	Stratasys (Israel), Bits from Bytes (RU)	Polímeros
Polimeración en tanque	El fotopolímero líquido en una tina se cura selectivamente por polimerización activada por luz	Estereolitografía, procesamiento de luz digital		Fotopolímeros
Inyección aglutinante	Se deposita selectivamente un agente adhesivo líquido para unir materiales en polvo	Lecho de polvo y cabezal de inyección de tinta, impresión 3D a base de yeso	3D Systems (EE.UU.), Ex One (EE.UU.)	Polímeros, Metales, arena de fundición
Inyección de material	Gotas de material se deposita selectivamente	Ondas de polímeros	Objet (Israel), 3D Systems (EE.UU.)	Polímeros, ceras
Laminación de hojas	Láminas de material se unen para formar un objeto	Fabricación de objetos laminados, consolidación ultrasónica	Fabrisonic (EE.UU.), Meor (Irlanda)	Papel, Metales

2.1.4.1. Polimerización en tanque

La tecnología de impresión 3D de fotopolimerización abarca varios procesos diferentes que se basan en la misma estrategia básica: un fotopolímero líquido contenido en una cuba (o tanque) se cura selectivamente mediante una fuente de calor. Capa por capa, se construye un objeto físico 3D hasta su finalización.

La polimerización en tanque emplea una tina de resina de fotopolímero líquido, a partir de la cual se construye el modelo capa por capa. Se utiliza una luz ultravioleta para curar o endurecer la resina donde sea necesario, al mismo tiempo una plataforma desciende bajando el objeto después de curar cada nueva capa. Como el proceso utiliza líquido para formar objetos, no hay soporte estructural del material durante la fase de construcción, a diferencia de los métodos basados en polvo, donde el soporte se obtiene del material no unido. En este caso, a menudo será necesario agregar estructuras de soporte. Las resinas se curan mediante un proceso de fotopolimerización o luz ultravioleta, donde la luz se dirige a través de la superficie de la resina con el uso de espejos controlados por motor. Cuando la resina entra en contacto con la luz, cura o endurece (Zhang *et al.*, 2021): Existen varias tecnologías de impresión 3D de fotopolimerización en tanque, las más empleadas incluyen las siguientes (Qian *et al.*, 2022).

- *StereoLithogrAphy* (SLA) SLA también se conoce como SL, fabricación óptica, fotosolidificación o impresión de resina. Durante el proceso de fabricación de SL, un haz concentrado de luz ultravioleta se libera de un cabezal laser y se enfoca sobre la superficie de un tanque lleno de un fotopolímero líquido. El rayo o láser se enfoca, creando cada capa del objeto 3D deseado mediante la reticulación o degradación de un polímero. Se puede ver el proceso en la figura 6 junto con otras dos tecnologías.
- Procesamiento de luz digital (DLP) Para el proceso de impresión 3D DLP, se utiliza una pantalla de proyector digital para proyectar una sola imagen de cada capa en toda la plataforma a la vez. Debido a que el proyector es una pantalla digital, la imagen de cada capa se compone de píxeles cuadrados, lo que da como resultado una capa formada por pequeños ladrillos rectangulares llamados vóxeles. DLP puede lograr tiempos de impresión más rápidos para algunas partes, ya que cada capa completa se expone de una vez, en lugar de extraerse con un láser.
- Producción continua de interfaz líquida (CLIP) por carbono La técnica de fotopolimerización en tanque CLIP utiliza un tanque de resina como material base. Parte del fondo de la tina es transparente a la luz ultravioleta y, por lo tanto, se llama ventana. Un haz de luz ultravioleta brilla a través de la ventana, iluminando la sección transversal precisa del objeto. La luz hace que la resina se solidifique. El objeto se eleva a una velocidad adecuada como para permitir que la resina fluya por debajo y mantenga el contacto con la parte inferior del objeto. Una membrana permeable al oxígeno se encuentra debajo de la resina, lo que crea una zona muerta. Esta interfaz líquida persistente evita que la resina se adhiera a la ventana, lo que significa que se inhibe la fotopolimerización entre la ventana y el polimerizador. A diferencia del SLA estándar, el proceso de impresión 3D es continuo y más rápido.
- Impresión de polímeros a la luz del día (DPP). En lugar de utilizar un láser o un proyector para curar el polímero, el proceso de fabricación de DPP utiliza una pantalla LCD

(pantalla de cristal líquido). Esta técnica, también llamada impresión 3D LCD, utiliza pantallas LCD sin modificar y un polímero especialmente formulado.

- Polimerización de dos fotones (TPP). A diferencia de SLA, que emplea un láser UV para producir un patrón 2D de material fotosensible capa por capa, TPP utiliza un láser infrarrojo (IR) bajo el cual la mayoría de los materiales fotosensibles se vuelven transparentes. Por lo tanto, mediante la aplicación de pulsos con láser IR, la polimerización de dos fotones se puede iniciar directamente dentro del pequeño volumen de material en lugar de realizar una polimerización 2D capa y capa

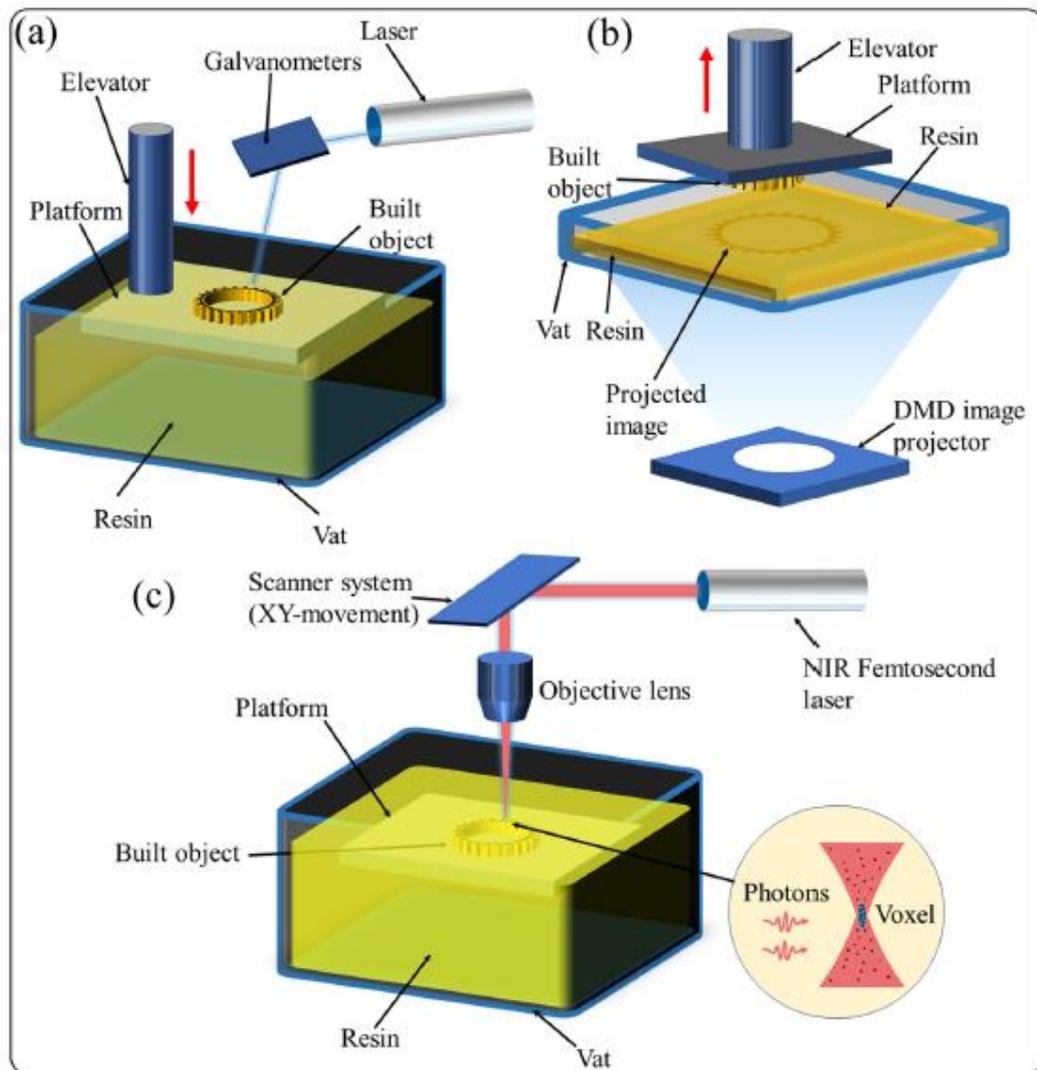


Figura 6 (a) Esquema de estereolitografía de proyección de máscara de abajo hacia arriba (MPSL). (b) Esquema de la estereolitografía tradicional basada en láser (SLA). (c) Esquema de dos fotones polimerización (TPP) (Zhang *et al.*, 2021).

2.1.4.2. Inyección de material (*Material Jetting*)

El proceso de inyección de material es también conocido como impresión de inyección de tinta 3D. Se basa en una tecnología que es la combinación del proceso de inyección de tinta y la fotopolimerización. Puede ser descrito como gotas de fotopolímero que se dejan caer en un área seleccionada y se curan con luz ultravioleta para producir una capa, el esquema del proceso está representado en la figura 7. La fabricación de la pieza consiste en una repetición de este proceso. La altura típica de la capa es de aproximadamente 16 a 32 μm . En la inyección de material, los soportes están hechos de un material soluble, se retiran durante el procesamiento posterior y se imprimen simultáneamente durante la pieza. Para áreas de superficie más extensas, el proceso de inyección de material proporciona un mejor rendimiento de productos con menor complejidad de fabricación en comparación con la polimerización en cuba. El proceso de inyección de material se puede utilizar en la fabricación de alta resolución de estructuras algo voluminosas. La ventaja significativa que poseen las piezas fabricadas con inyección de material es que sus propiedades mecánicas son homogéneas y tienen una alta precisión dimensional en comparación con otros procesos y un buen acabado superficial. Otra ventaja de la inyección de material es que a medida que aumenta la inclinación de la superficie de la impresión, la rugosidad de la superficie disminuye, lo que no ocurre en otros procesos de FA. En la industria este proceso utiliza materiales como fotopolímeros acrílicos, polímeros cerosos, etc. También se están investigando otros materiales entre los que se encuentran los metales, las cerámicas y los polímeros (Tyagi *et al.*, 2021).

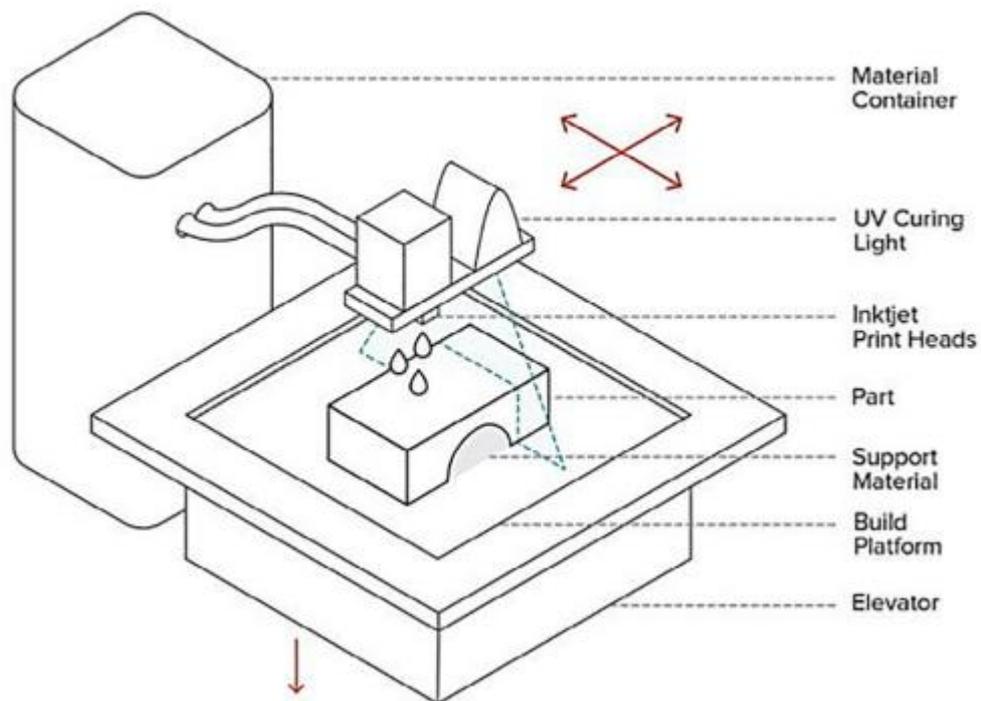


Figura 7 Esquema de la impresora de Inyección de material (Tyagi *et al.*, 2021)

2.1.4.3. Inyección aglutinante (*Binder Jetting*)

Binder jetting (BJ) es un proceso basado en inyección de tinta para crear objetos tridimensionales empleando polvos. Esta tecnología consiste en esparcir finas capas de polvo, con el cabezal de impresión expulsando y depositando selectivamente gotitas de aglutinante en el lecho de polvo capa por capa para producir la pieza escogida, el esquema se representa en la figura 8. Entre todas las tecnologías de FA, BJ permite un alto nivel de libertad de diseño y facilidad de ampliación. Una de sus características es la ausencia de estructuras de soporte y la compatibilidad con una amplia gama de materiales. BJ posee una tasa de construcción relativamente alta en comparación con otras tecnologías FA y se pueden construir objetos grandes (más de 1 m³). La velocidad de impresión con este proceso podría alcanzar hasta 1,1 pulgadas por hora (dirección z), independientemente del tamaño, la forma o la cantidad de objetos, lo que suele ser 10 veces más rápido que otros procesos FA. Entre sus inconvenientes están la baja densidad de empaque y, por tanto, la baja densidad sinterizada de las piezas finales. Una superficie con un acabado deficiente podría ser el resultado de un espesor de capa limitado y un polvo grueso ya que la fluidez es un requisito en este proceso (Qirong *et al.*, 2022).

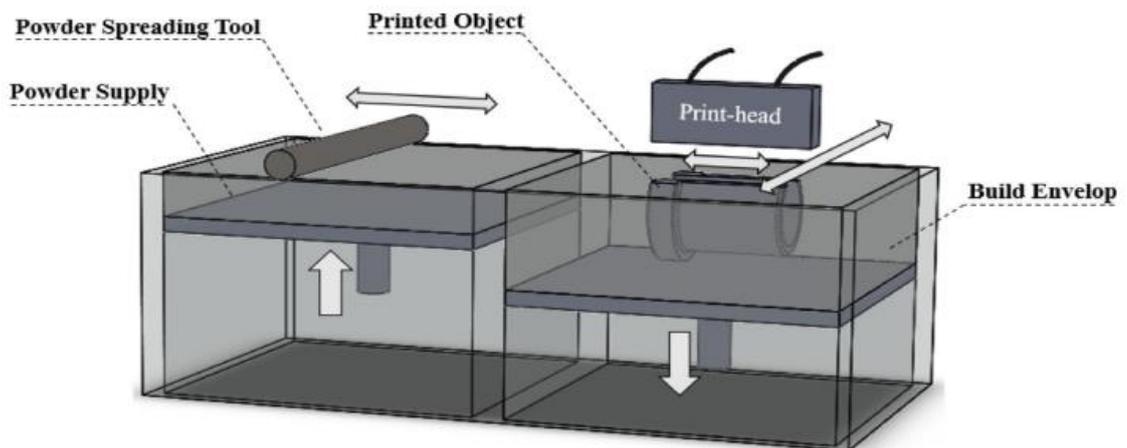


Figura 8 *Binder jetting system schematic* (Ziaee & Crane, 2019)

2.1.4.4. Extrusión de materiales

La extrusión es un proceso utilizado para crear objetos con sección transversal definida y fija. El material se empuja o se extrae a través de un troquel de una sección transversal deseada. Cuando se lleva esta idea a la FA en el caso de los polímeros el proceso consiste en introducir un filamento termoplástico en una boquilla calentada donde se funde el plástico. A continuación, el plástico derretido se extruye desde la boquilla, con la impresión por delante controlada para permitir la formación de capas mediante la fusión de líneas extruidas, y luego para formar objetos 3D mediante la fusión de capas. Para lograr esto, la temperatura debe controlarse para permitir la fusión de líneas y capas adyacentes sin calentar demasiado para evitar producir degradación del material y/o la pérdida del control geométrico (Zhuo *et al.*, 2021).

2.1.4.5. Fusión por lecho de polvo

La tecnología de *powder bed fusion* (PBF), también conocida como fusión por lecho de polvo, es una técnica de FA basada en la deposición de sucesivas capas de material en polvo, para fundirlas con una fuente de energía como puede ser un láser o un haz de electrones. Los métodos de fusión por haz de electrones requieren vacío, pero se pueden usar con metales y aleaciones en la creación de piezas funcionales. El esquema del proceso está representado en la figura 9. Esta tecnología implica siempre la distribución del material en polvo sobre capas anteriores, existen diferentes mecanismos para permitir esta etapa, incluyendo un rodillo o una cuchilla. Una tolva o un depósito debajo de un lado de la cama proporciona suministro de material fresco. Por lo tanto, este proceso puede dividirse en dos pasos básicos, esparcimiento/recubrimiento de polvo y fusión de polvo (Chen *et al.*, 2022).

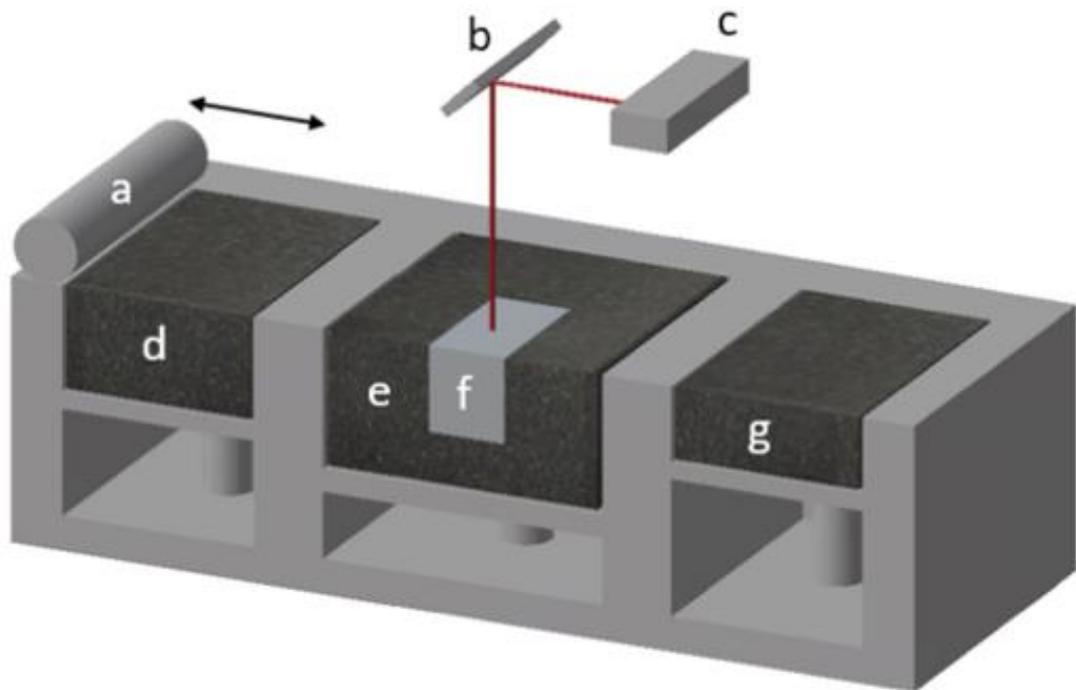


Figura 9 Esquema de un proceso de fusión de lecho de polvo basado en láser: (a) rodillo para la preparación del lecho de polvo; (b) espejo móvil para el escaneo láser sobre la superficie del lecho de polvo; (c) fuente de láser; (d) almacenamiento de polvo usado para alimentar el polvo al rodillo por el movimiento del pistón inferior; (e) cámara de construcción que alberga el lecho de polvo para la acción de fusión del rayo láser, el pistón en la parte inferior baja el lecho para albergar nuevas capas de polvo; (f) muestra de fabricación; (g) depósito para recoger el exceso de polvo de la formación de la capa (Soundararajan *et al.*, 2021).

2.1.4.6. Laminación de hojas

La laminación de láminas, también conocida como FA ultrasónica o fabricación de objetos laminados, es un proceso de FA que apila láminas delgadas de material y las une mediante soldadura ultrasónica, unión o soldadura fuerte (ver figura 10). A medida que se acumulan las capas, el objeto toma forma. Una vez cohesionadas las láminas se realizan operaciones de fresado mediante una máquina CNC o un cortador láser que elimina el exceso de material y

crea la pieza final de una forma casi neta. Al emplear múltiples capas esta tecnología permite superponer varios materiales a un coste más bajo que otros procesos de FA. Aunque la laminación de hojas es económica requiere un procesamiento posterior, que puede afectar a los tiempos y los costes. Su empleo está limitado a materiales que puedan procesarse en forma de hoja como el plástico o el meta (Ramanathan *et al.*, 2022).

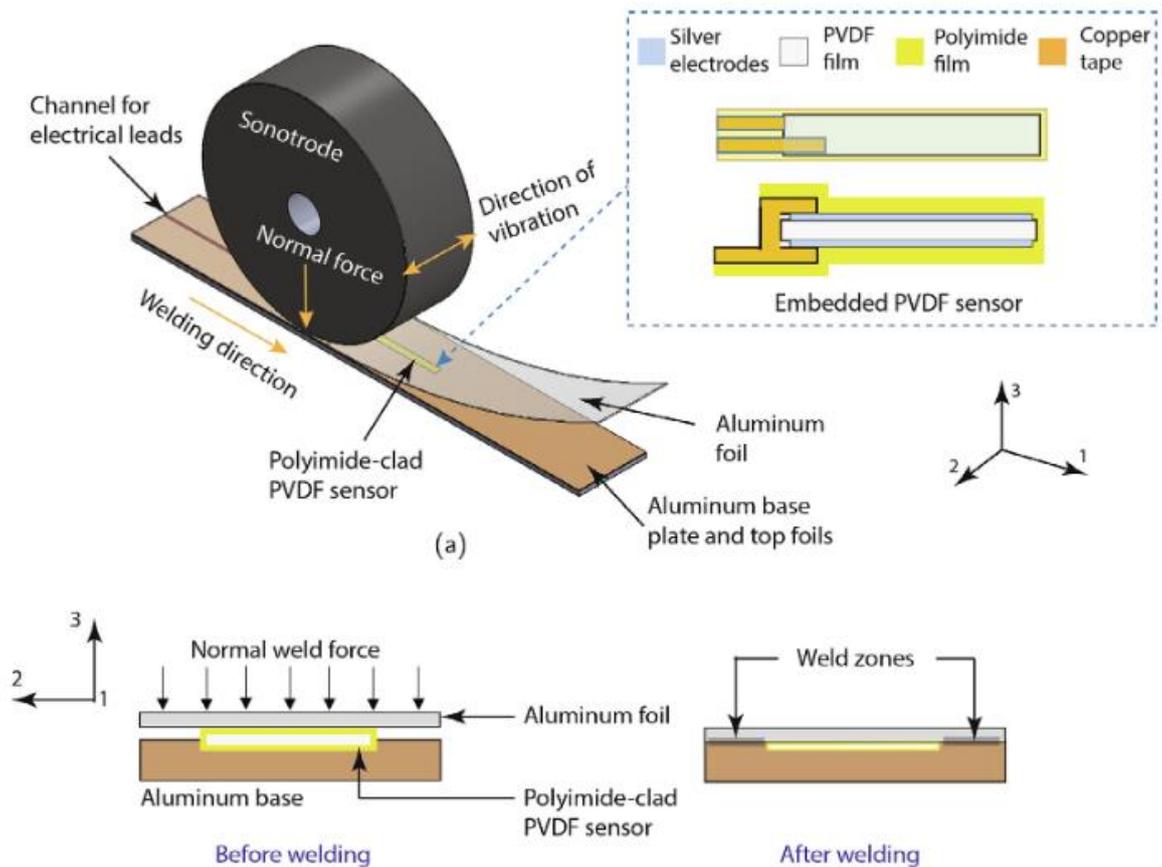


Figura 10 Esquema de laminación de hojas (Ramanathan *et al.*, 2022).

2.1.4.7. Deposición de energía directa

La deposición de energía dirigida (DED) es una rama de los procesos de FA en los que un material de alimentación en forma de polvo o alambre se entrega a un sustrato sobre el que se encuentra una fuente de energía como un rayo láser, un rayo de electrones o plasma/eléctrico. el arco se enfoca simultáneamente, formando así un pequeño charco de fusión y depositando material continuamente, capa por capa (representado en figura 11). DED tiene varias ventajas únicas en comparación con otros procesos FA, como la deposición y reparación específicas del sitio, el diseño de aleaciones y la impresión tridimensional de formas complejas. DED tiene grandes ventajas en el desarrollo de nuevos materiales de alto rendimiento y el procesamiento de múltiples materiales, por un lado, y la fabricación rápida de piezas grandes con forma casi neta con buenas propiedades mecánicas, por el otro. Los procesos DED tienen las siguientes desventajas: la contracción, la tensión residual y la deformación pueden ocurrir debido a las

diferencias de temperatura locales; tienen una resolución dimensional más baja (ya veces precisión) en comparación con PBF con un rayo láser, con una ondulación de superficie más grande; en los sistemas de polvo soplado, se obtiene una mayor rugosidad de la superficie en comparación con el PBF de haz láser; la complejidad de las piezas puede ser limitada, en particular en máquinas limitadas a tres grados de libertad; a menudo se requiere mecanizado posterior a la fabricación; menor eficiencia y reciclabilidad del polvo en comparación con PBF, en particular cuando se imprime una mezcla de polvos (Svetlizky *et al.*, 2021).

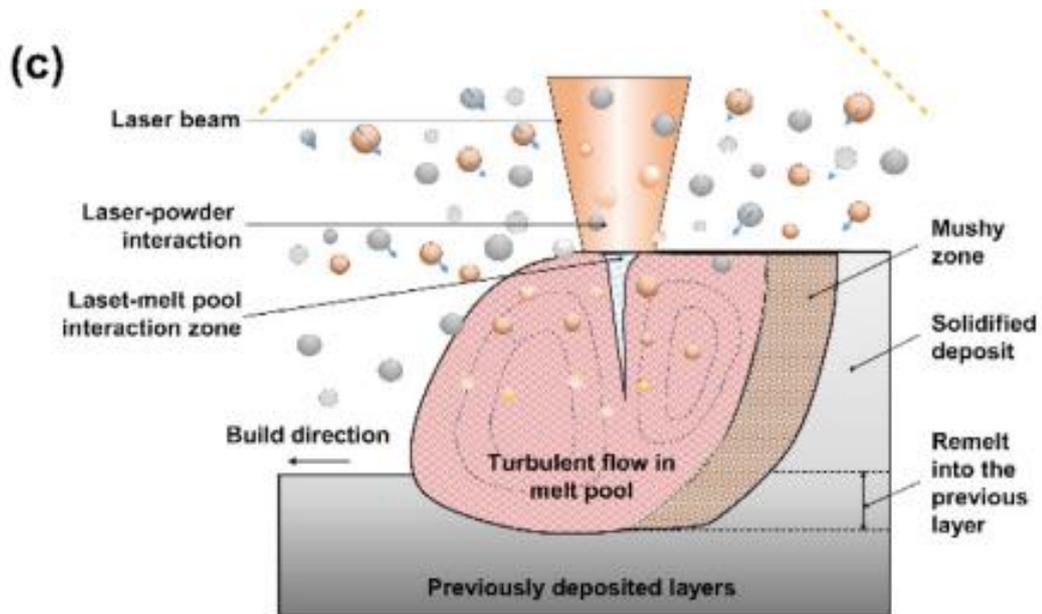


Figura 11 Esquema de deposición de energía directa (Svetlizky *et al.*, 2021).

2.1.5. Materiales utilizados en FA

Aunque en FA se pueden emplear las cuatro familias de los materiales, la cantidad de materiales disponibles es en realidad muy limitada. Uno de los focos de investigación es la incorporación de nuevos materiales en la FA, lo que abre la posibilidad de nuevas aplicaciones y la obtención de materiales ya disponibles con mejores propiedades. En la tabla 2 pueden observarse los procesos asociados a cada una de las familias, así como los materiales concretos más utilizados. Los tipos de materiales se analizan brevemente a continuación (Guo & Leu, 2013).

- Los polímeros consisten en una molécula grande compuesta de unidades estructurales repetitivas, que incluye una gran clase de polímeros naturales y sintéticos. Son el material más empleado en FA. En particular, el nailon es el polímero más utilizado porque se funde y se adhiere mejor que otros polímeros.
- Los metales pueden emplearse de forma "directa", fundiendo partículas de metal para obtener la pieza o de forma "indirecta", uniendo las partículas de metal con un aglutinante para formar una pieza 3D que necesitara un mecanizado posterior. Además, existe la opción de fabricar los moldes o núcleos mediante FA para procesos de fundición.

- Las cerámicas son materiales inorgánicos, no metálicos y sólidos. Se utilizan en FA debido a sus estructuras químicas y resistencia a altas temperaturas. Sus desventajas radican en que estos materiales pueden ser quebradizos, lo que dificulta su fabricación, especialmente si se trata de geometrías complejas. Los ejemplos de cerámica incluyen alúmina, sílice y circonita.
- Los materiales compuestos consisten en la combinación de dos o más materiales, esto puede ocurrir de forma natural o diseñada. Estos materiales pueden ser mezclados de manera uniforme o no uniforme para obtener diferentes compuestos.

Tabla 2. Materiales y sus procesos FA correspondientes (Guo & Leu, 2013).

Tipo de material		Procesos FA	Materiales
Polímeros	Termoestable	SLA, MJM	Fotopolímeros
	Termoplástico	MJM	Cera
		SLS	Poliamida 12, poliamida GF, poliestireno
		FDM	ABS, PC-ABS, PC, ULTEM
		3DP	Plásticos acrílicos, cera
Metales		SLM	Acero inoxidable GPI, PHI y 17-4, cromo cobalto MPI. titanio Ti6Al4V, Ti6Al4V ELI y TICP, IN718, SLM acero martensítico MSI, AIS 20Mg
		LDM/LENS	Acero H13, 17-4 PH, PH 13-8 Mo, 304, 316 y 420, aluminio 4047, titanio TICP, Ti-6-4, Ti-6-2-4-2 y Ti6 2-4-6, IN625, IN617, aleación de Cu-Ni, satélite de cobalto 21
		EBM	6Al4V, Ti6Al4V ELI, cromo cobalto
Cerámicas		SLA	Suspensión de zirconia, sílice, alúmina u otra cerámica ANS partículas en resina líquida
		FDM	Alúmina, PZT, Si3N4, circonita, sílice, biocerámica FDM
		SLS	Alúmina, sílice, circonita, ZrB2, biocerámica, grafito, biovidrio y varias arenas
		3DP	Zirconita, sílice, alúmina, Ti3SiC2, biocerámica y varias arenas
Materiales compuestos	Compuestos uniformes	FDM	Polímero-metal, polímero-cerámica, reforzados con fibras cortas
		3DP	Compuestos reforzados con fibra de matriz polimérica, metal-cerámica, cerámica-cerámica de fibra corta

		LOM	Compuestos de matriz polimérica, matriz cerámica, fibra y reforzados con partículas
		SLS, SLM	Metal-metal, metal-cerámica, cerámica-cerámica, matriz polimérica, composites reforzados con fibras cortas
	FGM	LMD/LENS	CoCrMo/Ti6Al4V, TiC/Ti, Ti/TiO, Ti6Al4V/IN718
		FDM	PZT
		FEF	Al ₂ O ₃ /ZrO ₂

2.1.6. Presencia industrial

Aun siendo una tecnología en desarrollo la FA ya cuenta con presencia en varios sectores industriales.

- **Aeroespacial:** los componentes espaciales suelen tener geometrías complejas y acostumbran a estar fabricados con materiales avanzados, como aleaciones de titanio, superaleaciones de níquel, aceros especiales o cerámicas de temperatura ultra alta, que son difíciles, costosos y lentos de fabricar. A esto se suma que las series de producción aeroespacial suelen ser pequeñas, limitadas a un máximo de varios miles de piezas. Por lo tanto, la tecnología FA es muy adecuada para aplicaciones aeroespaciales (Shelare et al., 2021)
- **Automotriz:** se emplea la FA como herramienta en el diseño y desarrollo de componentes automotrices porque permite acortar el ciclo de desarrollo y reducir los costes de producción y producción. También se emplea para fabricar pequeñas cantidades de piezas estructurales y funcionales, como escapes de motores, ejes de transmisión, componentes de cajas de cambios y sistemas de frenado para vehículos de lujo de bajo volumen (Naidu et Al., 2020).
- **Biomédica:** en el campo biomédico la FA se emplea para fabricar a productos tales como implantes ortopédicos, órganos artificiales, dispositivos médicos, redes de microvasculatura o chips biológicos (Yan et al., 2018).
- **Energía:** Las oportunidades para aprovechar la FA en el sector energéticos son amplias, entre ellas conseguir un rápido desarrollo y fabricación de prototipos para reducir el coste y el tiempo de ejecución de la investigación y el desarrollo de nuevos productos. En el presente trabajo se tratarán las aplicaciones de la FA en aerogeneradores.

2.1.7. Estándares de las tecnologías de FA

Para conseguir una correcta diseminación del conocimiento, respaldar a la industria y promulgar e incentivar la investigación y la educación es necesario regirse por unos estándares comunes para todos. Estos estándares tienen como objetivo definir la terminología, medir el desempeño de los distintos procesos de producción, asegurar la calidad de los productos finales obtenidos y especifican procedimientos para la calibración de las máquinas y equipos empleados (Gardan, 2015). En el caso de la FA estos estándares han sido creados por *International Organization for Standardization* (ISO). En España existe un conjunto de normas

equiparables creadas por Una Norma Española (UNE), de entre los cuales se pueden destacar las principales:

- UNE-EN ISO 17296-2:2017: Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas. Esta norma describe los fundamentos del proceso de FA y los diferentes tipos de materiales usados.
- UNE-EN ISO 17296-3:2017: Fabricación aditiva. Principios generales. Parte 3: Características principales y métodos de ensayo correspondientes. En esta norma se engloban los principales requisitos aplicados a los ensayos de piezas fabricadas mediante procesos de FA, así como los procedimientos de prueba apropiados y las recomendaciones.
- UNE-EN ISO/ASTM 52910:2020 Fabricación aditiva. Diseño. Requisitos, directrices y recomendaciones. Reúne las buenas prácticas en diseño para obtener productos con una calidad acorde con los estándares.

Existen otros estándares que especifican la terminología en FA o los requisitos para las piezas FA adquiridas en el mercado. También se pueden encontrar estándares para sectores o industrias específicos o adaptados para un tipo de material en concreto. Al igual que ocurre en otras tecnologías estos estándares son creados, revisados y actualizados a medida que pasa el tiempo y se alcanzan nuevos avances. En la actualidad la UNE cuenta con 87 norma cobijadas dentro del paraguas CTN 324 FABRICACIÓN ADITIVA (UNE - Busca tu norma, 2022)

2.2. Sistemas de generación de energía eólica

En el siguiente epígrafe se trata los principios básicos de los sistemas de generación de energía eólica, definiendo brevemente la energía eólica, la composición de un aerogenerador y la clasificación de los mismos.

2.2.1. La energía eólica

La sociedad actual afronta con el cambio climático un reto inevitable, la rápida industrialización, el crecimiento económico y la crisis energética agrandan y dificultan este problema. El desarrollo sostenible se ha convertido en un objetivo y en una necesidad global, los recursos energéticos tradicionales como el gas, petróleo y carbón son limitados y su consumo provoca la emisión masiva de gases de efecto invernadero. Es por tanto una necesidad el reconducir el consumo energético hacia energías renovables y limpias, entre estas energías se encuentra la hidráulica, solar, eólica y geotérmica, entre las cuales la energía eólica es más adecuada debido a su bajo costo y gran escala industrial (Li *et al.*, 2020). Como fuente de energía limpia, ambientalmente preferible y literalmente inagotable, la energía eólica se ha explotado durante cientos de años. Las aplicaciones más antiguas de la energía eólica incluyen la extracción de agua de pozos, la fabricación de harina a partir de cereales y otras aplicaciones agrícolas (Pramod, 2016). En las últimas décadas, la energía eólica se ha extendido ampliamente para la generación de electricidad en todo el mundo. La capacidad total de energía eólica mundial es ahora de hasta 837 GW, lo que ayuda al mundo a evitar más de 1200 millones de toneladas de CO₂ al año, el equivalente a las emisiones anuales de carbono de América del Sur. Sin embargo, este crecimiento debe cuadruplicarse para el final de la década si el mundo quiere mantenerse en el camino hacia un camino de 1.5 C y cero netos para 2050. (G.W.E.C., 2022).

2.2.1.1 Localización

La energía eólica se puede clasificar en dos tipos en función de donde y como se genera la energía eléctrica. La producción de energía eólica en tierra se conoce como *Onshore*, mientras que la producción situada en el mar es denominada energía eólica *Offshore* (Eolivertical, 2019). Los parques eólicos terrestres tienen como desventaja los problemas visuales sobre el paisaje. Los parques eólicos marinos, por otro lado, ofrecen menos problemas visuales, pero también mayores costos de instalación y mantenimiento (Ladenburg *et al.*, 2020). La figura 12 representa las ventajas y desventajas de cada localización.

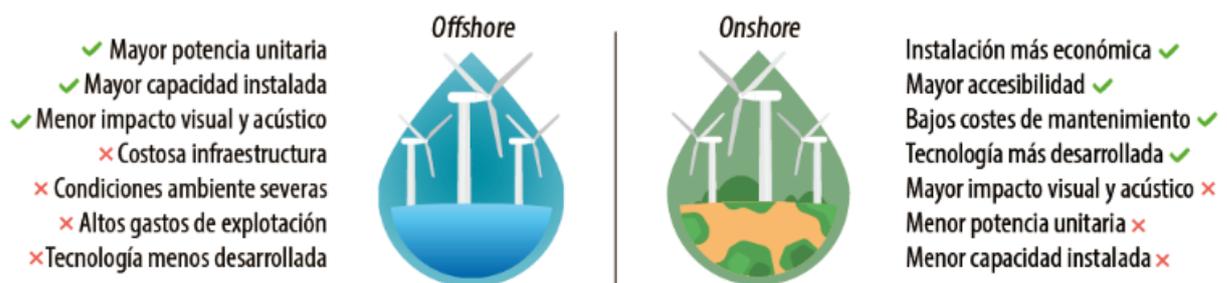


Figura 12. Comparación entre *Offshore* y *Onshore* (Eolivertical, 2019).

2.2.2. Aerogenerador

Un generador de turbina eólica tiene cuatro componentes principales como se puede ver en la figura 13. El primer componente son las palas de las turbinas eólicas que transforman las corrientes de viento en movimiento giratorio sobre un eje. El segundo componente es la caja de engranajes y el generador que transforma el movimiento giratorio del rotor y las palas en electricidad. El tercer componente es la góndola que es el alojamiento del generador, proporcionando estructura para acoplar el generador al componente final, la torre (Horton, 2020). Pero para obtener estas partes hay otros componentes detrás que afectan a sus características y en los que aún es posible obtener muchas mejoras.

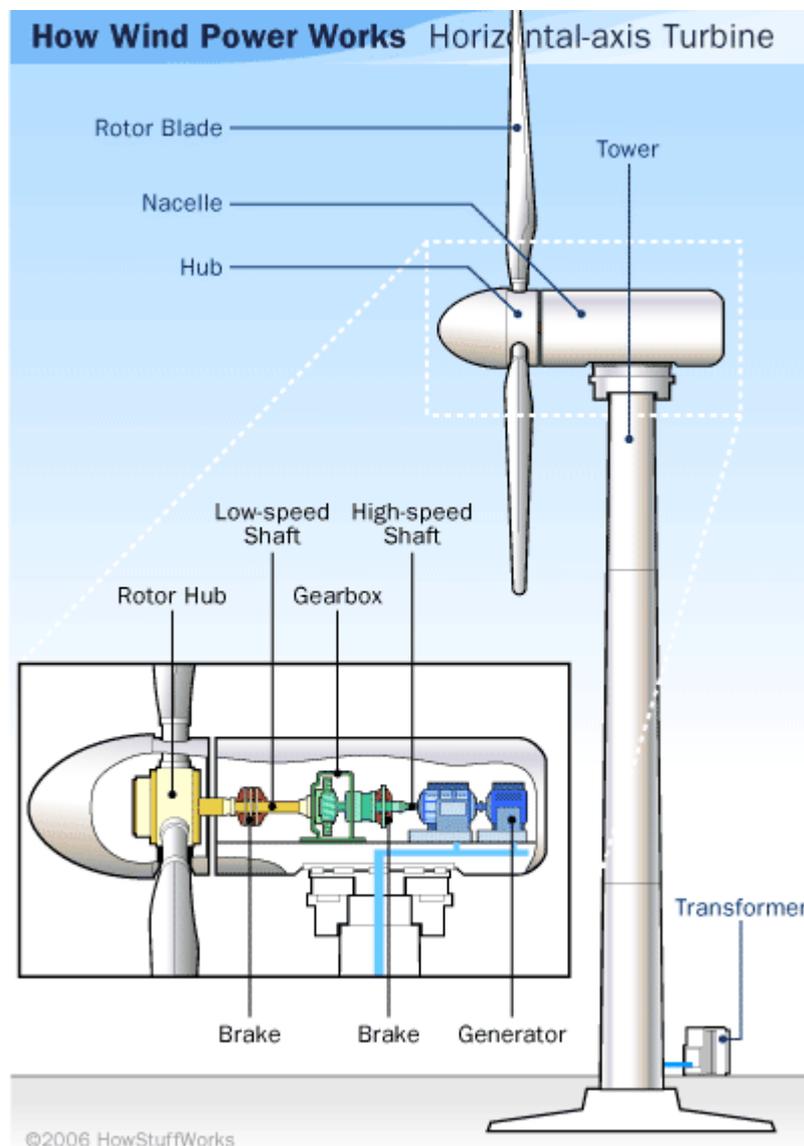


Figura 13. Generador de turbina eólica (Horton, 2020)

2.2.1. Clasificaciones de aerogeneradores

Los aerogeneradores se clasifican según la orientación del eje de rotación. Siguiendo esta división existen por tanto dos tipos de turbinas eólicas, las que constan de un eje horizontal (HAWT, del inglés *Horizontal Axis Wind Turbines*) y las que disponen de un eje vertical (VAWT, del inglés *Vertical Axis Wind Turbines*). Los VAWT se emplean principalmente para generar electricidad a partir del viento de baja velocidad, mientras que Los HAWT se emplean para generar electricidad a partir del viento de alta velocidad (Sharma *et al.*, 2022).

Los HAWT se usan habitualmente para capacidad de potencia mediana y grande, esto engloba desde 500 kW a 8 MW. Una cualidad que se ha descubierto es que son más efectivos en áreas rurales abiertas como parques eólicos a gran escala. Unas de sus limitaciones principales son la complejidad de su diseño, las condiciones de fatiga a las que están sometidas las palas que suele dar lugar a averías y por tanto a altos costes de mantenimiento. Los VAWT no están sometidos a estas limitaciones y sus resultados en un flujo turbulento son superiores. En áreas residenciales, se prefieren los VAWT a los HAWT. Esto se debe en gran parte a que los VAWT tienen una naturaleza omnidireccional, por lo que son capaces de capturar la energía eólica en todas las direcciones. Esta es una de las mayores ventajas de VAWT sobre HAWT (Möllerström *et al.*, 2019).

Los VAWT puede dividirse a su vez en dos tipos denominados aerogenerador Savonius y aerogenerador Darrieus, representados en la figura 14. Los aerogeneradores Savonius son dispositivos de arrastre que giran en contra de la dirección del viento. Los aerogeneradores Darrieus son impulsados por el viento de forma similar a los HAWT y son igual de efectivos sin importar la dirección en la que sople el viento. La eficiencia máxima que se puede lograr es mayor para las turbinas Darrieus en comparación con las turbinas Savonius (Möllerström *et al.*, 2019).

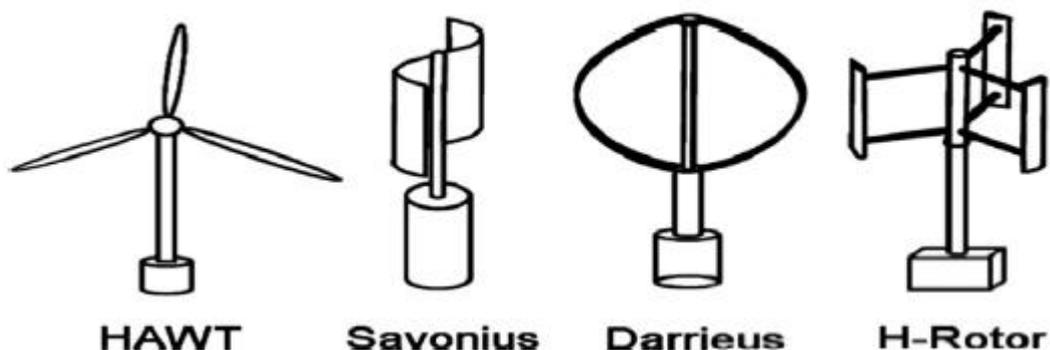


Figura 14. Principales tipos de aerogeneradores (Sharma *et al.*, 2022).

2.3. Tecnologías actuales de FA y futuras aplicaciones en aerogeneradores

A continuación, se presenta la aplicación de las tecnologías de FA en aerogeneradores, enumerando los diferentes avances alcanzados en el momento de la realización del actual trabajo de investigación.

2.3.1. Punto de situación

La energía eólica es una de las fuentes de energía más renovables, fiables y sostenibles del mundo. Aprovechar esta energía consiste en convertir la velocidad natural del viento en electricidad utilizable. Este sector ha visto un crecimiento exponencial debido a sus beneficios, pero desafortunadamente, con las técnicas de fabricación actuales, la fabricación de una turbina eólica a gran escala puede costar entre tres y cuatro millones de dólares (*How much do wind turbines cost?*, 2018). A partir de 2016, la energía eólica aporta el 5,5 % de la electricidad de países tan importantes como EEUU y su gobierno desea que esta cifra llegue al 35 % para 2050 (Perenich, 2021). Con esta demanda interminable de técnicas de energía eólica, la necesidad de una buena fabricación económica y rentable se está volviendo primordial.

El presente apartado pretende identificar y explicar el estado actual de las distintas aplicaciones de las tecnologías de FA para los sistemas de generación de energía eólica. Muchas de estas aplicaciones son económicamente viables para la producción de herramientas y componentes de la industria eólica, tanto a pequeña como a gran escala. Si la situación actual de gran expansión que está viviendo la energía eólica se aprovechará como objetivo para desarrollar e implementar las tecnologías de FA, estas verían incrementadas su eficiencia y reducidos sus costes, pudiendo lograr así aplicaciones con mayores beneficios económicos y medioambientales.

2.3.2. Moldes de palas eólicas

Sin duda lo que diferencia a un aerogenerador de cualquier otra máquina eléctrica son las palas de la turbina eólica (figura 15 y 16) Cada pala se compone de un lado de alta y baja presión, que suele ser fabricado con fibra de vidrio, y que proporciona el diferencial de presión necesario para transformar la energía eólica para levantar la pala. Un larguero corre a lo largo de la pala para proporcionar rigidez y capacidad de carga para transferir las cargas del viento al rotor acoplado al generador. Existen dos métodos principales empleados para la fabricación de palas de turbinas eólicas: preimpregnado e infusión de resina. El proceso de infusión es habitualmente considerado el proceso más rentable debido al menor coste de la lista de materiales. El concepto detrás de la infusión de resina es usar vacío para introducir una resina en las fibras de refuerzo. Claramente, una característica clave de la infusión de resina es la herramienta de molde que proporciona la forma de la pala para el proceso de infusión. Estos moldes suelen ser extremadamente grandes y complejos con elementos calefactores integrados y puertos de vacío integrados (Post *et al.*, 2017).



Figura 15. Pala eólica de una turbina eólica (World Energy Trade, 2019).

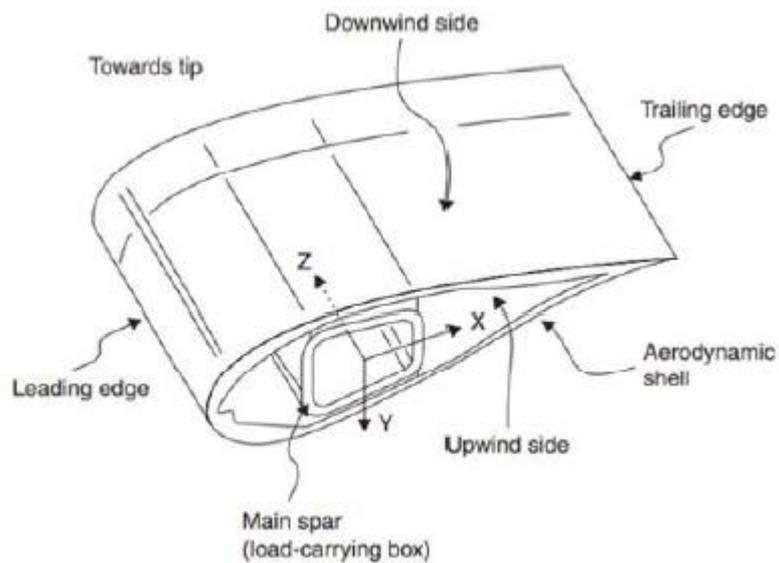


Figura 16. Componentes de una pala eólica (Post et al., 2017).

El herramental es un punto focal para el estado actual de la tecnología FA, ya que los requisitos son menos estrictos en cuanto a gasto de material y ya se han producido moldes de varios tamaños y formas para una variedad de industrias. Sin embargo, el herramental de gran tamaño permanece fuera del alcance hasta el desarrollo de procesos de fabricación de compuestos FA a gran escala como el “Big Area Additive Manufacturing” (BAAM). La Figura 17 muestra el modelo de molde de aspa impreso mediante la unión de múltiples secciones

impresas creadas en la impresora 3D de FA de área grande (BAAM) en el Laboratorio Nacional de *Oak Ridge* (Post *et al.*, 2017a).



Figura 17 Molde impreso en BAAM (Castro, 2021).

El proceso tradicional de fabricación de moldes es un proceso largo y costoso. El primer paso es la creación de un macho mediante fabricación sustractiva a partir de herramental de espuma y resina. El ensamblaje de las piezas se lleva a cabo a lo largo de semanas o meses desde la etapa de diseño CAD. En el siguiente paso el tapón es enviado al fabricante del molde donde se califica y alinea. Después, el fabricante del molde aplica un agente desmoldante y coloca fibra de vidrio de suficiente espesor para soportar las operaciones de moldeo. Metros y metros de cable calefactor se colocan manualmente en la parte inferior del molde y se disponen homogéneamente. En el último paso, se monta manualmente un marco de acero y se fija al molde, antes de retirarlo del tapón. A partir de un conjunto de machos, se pueden producir hasta ocho moldes amortizando el costo. Para la producción de un prototipo de molde, o un pequeño juego de moldes, este costo puede ser prohibitivo (Post *et al.*, 2017b).

2.3.1.1. Molde de la instalación de tecnología de parques eólicos a escala (SWIFT) ORNL-TPI

Existe un proyecto para investigar los impactos tecnológicos de la *FA* en la producción de palas eólicas y la economía a gran escala empleado la tecnología BAAM. Para estudiar el efecto de las estelas en grandes parques eólicos, la instalación SWIFT del Laboratorio Nacional de Sandia emplea un parque eólico a escala. Estas turbinas requieren palas personalizadas para simular la dinámica de sus contrapartes más grandes. Las palas estaban programadas para ser producidas utilizando moldes fabricados aditivamente producidos en asociación entre ORNL y TPI (Mann *et al.*, 2017).

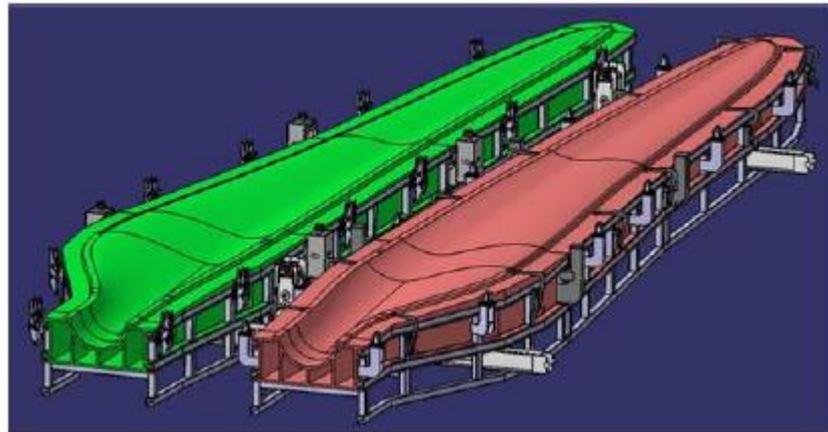


Figura 18 Modelo conceptual de molde de pala ORNL/TPI FA (Post *et al.*, 2017b).

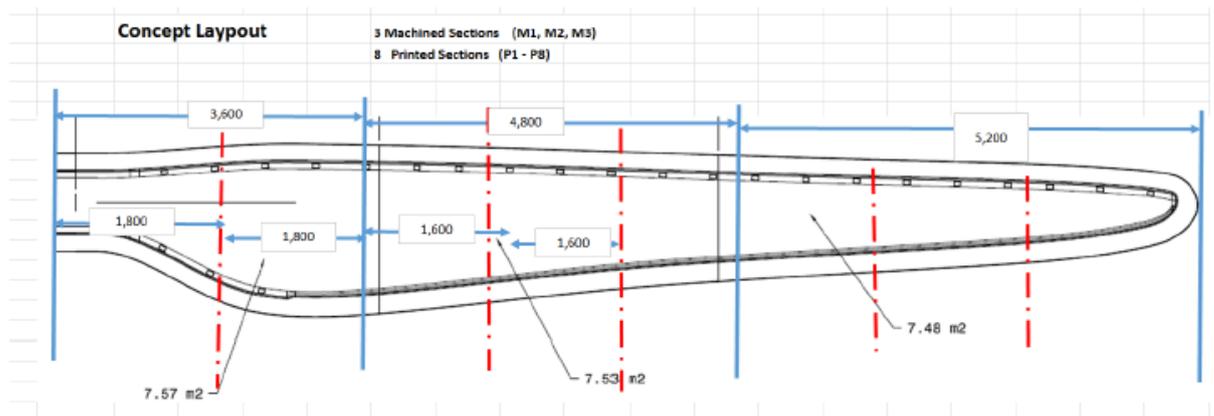


Figura 19. Secciones del molde (Post *et al.*, 2017b).

Al eliminar el paso del macho en el proceso de fabricación del molde, se puede reducir una parte significativa del coste total de producción. En la figura 18 y 19, el molde de cuchillas ORNL/TPI SWIFT usa FA en varias secciones y luego se integra en un marco de acero que se usa para alinear las mitades del molde y permitir la rotación del lado de alta presión sobre el de baja presión. lado. Producido en 16 secciones fabricadas de forma aditiva, el diseño de los canales de calefacción se ha integrado en las propias secciones del molde, reduciendo el coste de mano de obra asociado a la colocación del hilo calefactor para alcanzar la temperatura de moldeo de 50°C. Se imprime cada sección del molde en el extremo para maximizar la resolución del proceso BAAM y reducir el material de soporte requerido, esto se puede observar en la figura 20. La disposición de las unidades de calentamiento en el conjunto de moldes SWIFT para el calentamiento uniforme de la superficie del molde se muestra en la figura 21. El diseño de cada canal tiene la misma superficie para reducir la falta de uniformidad del perfil de temperatura sobre la superficie del molde. El aire caliente circula a través del molde hasta que la temperatura de la superficie alcanza el punto de ajuste deseado, momento en el que el punto de ajuste se reduce a un nivel de mantenimiento (Mann *et al.*, 2017).

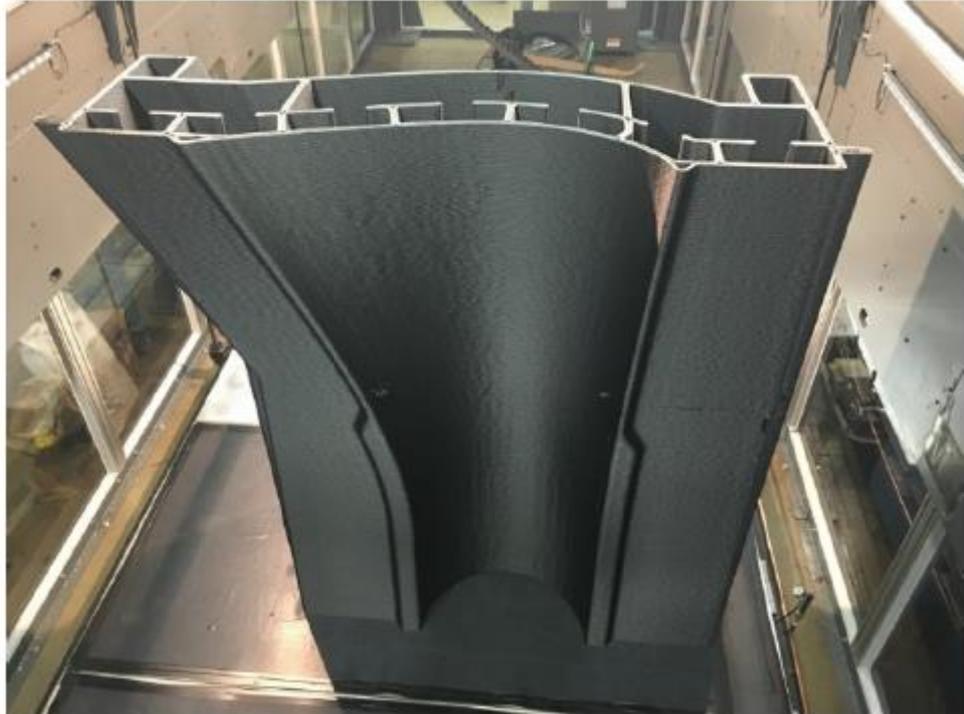


Figura 20. Sección 1 lateral de baja presión impresa en la impresora BAAM CI (Mann *et al.*, 2017).



Figura 21. Unidades de calentador ORNL/TPI integradas en la sección del molde de la pala (Post *et al.*, 2017b).

En la figura 22 se puede observar una vista transversal de la segunda sección del molde. Las flechas describen el flujo de calor. El aire caliente sale de la unidad de calentamiento y fluye a lo largo de la superficie del molde. Luego pierde energía y recircula formando un circuito cerrado. La estructura funcional del componente *FA* se utiliza para lograr la geometría de superficie deseada, proporcionar un alojamiento para la unidad de calefacción y distribuir el calor uniformemente por toda la estructura. *FA* permite una estructura funcional y elimina el trabajo manual asociado con la colocación del sistema de calefacción. Además, una unidad de calentamiento defectuosa se reemplaza fácilmente a través de un bolsillo en la parte inferior del canal de retorno (Mann *et al.*, 2017).

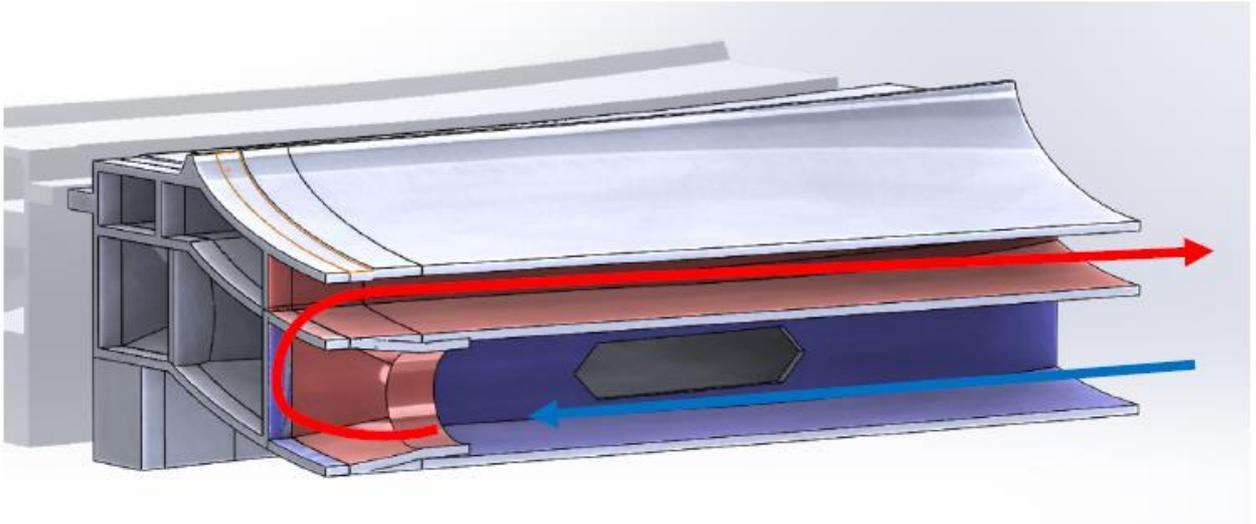


Figura 22. Flujo de aire en la sección de un molde (Post *et al.*, 2017b).

Por último, en la figura 23 se pueden ver los moldes acabados y en la figura 24, la pala eólica obtenida en el proceso.



Figura 23. Moldes finales (Alta presión y baja presión) (Post *et al.*, 2017b).



Figura 24. Pala eólica finalizada (Post *et al.*, 2017b).

2.3.3. Cubiertas de las góndolas

La góndola es la parte del aerogenerador donde se aloja y soporta la mayor parte de los elementos de la turbina. Consiste en un chasis al que se fijan los componentes principales del aerogenerador como se muestra en la figura 25. La estructura de la góndola está cubierta por paneles para proteger todos estos componentes de la meteorología, flora y fauna. Los componentes, como la electrónica de potencia, la caja de cambios o el alternador se suelen obtener mediante proveedores externos especializados, los cuales pueden acabar integrados en la organización para facilitar el suministro a la línea de producción final (Hazır *et al.*, 2010). Este mismo concepto existe para el suministro de materiales de repuesto y mantenimiento (Sainz & Sebastián, 2013). De esta manera se puede tener un férreo control del sistema productivo y se pueden reducir los costes y tiempos de entrega a los clientes aumentando a su vez la calidad. En el montaje de la góndola se pretende optimizar la producción al máximo para ser lo más competitivo posible, reducir gastos, materiales y aumentar la velocidad de fabricación y aspectos cualitativos (Relkar & Nandurkar, 2012).

Para el proceso de montaje, se siguen las siguientes estrategias, especialización de operaciones de planta, combinación de operaciones en una sola estación de trabajo, operaciones simultáneas, mayor flexibilidad, automatización de flujos y almacenamiento de materiales, inspección en línea, control y optimización de procesos, control de operaciones a nivel de planta (Sainz, 2015).

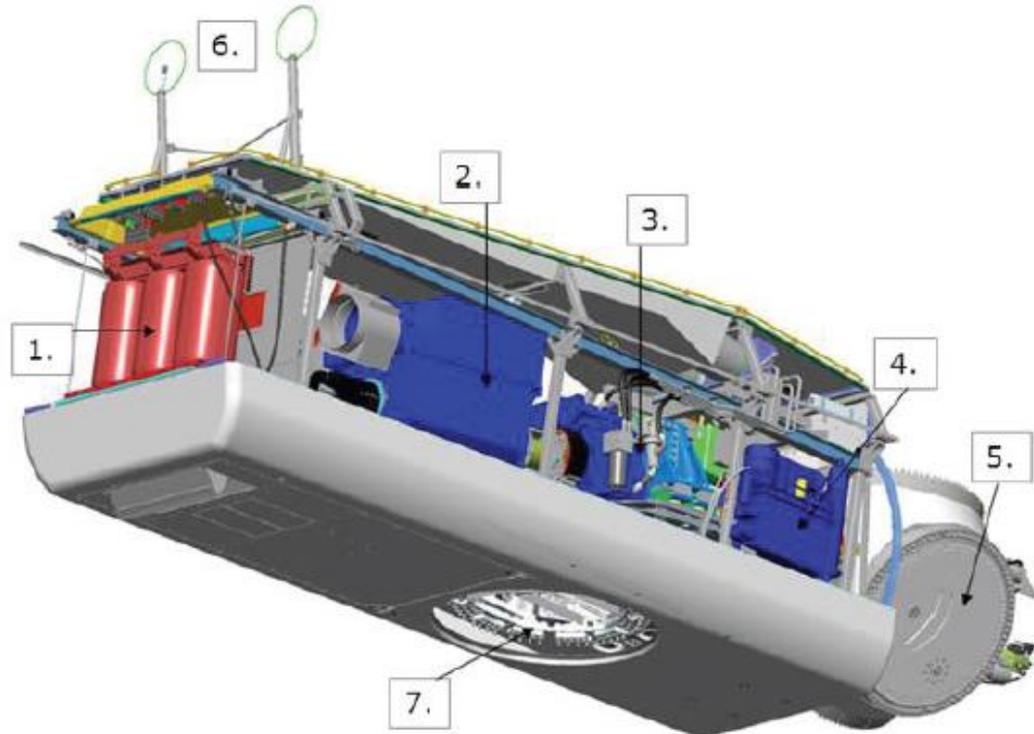


Figura 25. Partes de la góndola: 1-transformador; 2-alternador; 3-caja de cambios; 4-equipo hidráulico; 5-sistema de regulación de paso de pala; 6-sensores meteorológicos; 7- sistema de guiñada (Sainz, 2015).

La cubierta de la góndola normalmente tiene una forma rectangular y esta echa de placas de acero galvanizado (Kim *et al.*, 2003). Los componentes del aerogenerador son muy pesados lo que deja abierto un campo de mejora intentando reducir la carga. Para poder reducir este peso los materiales que pueden remplazar al acero son los materiales compuestos, los cuales, además, son más económicos (Kim & Lee, 2006), se puede ver un ejemplo en la figura 26. El uso de materiales compuestos para aligerar el peso, reduce los costes de envío e instalación de las turbinas en los parques eólicos. Además, los efectos adicionales del aligeramiento pueden posibilitar un cambio en la estructura y el material de la torre, lo que podría conducir a ahorros de costes adicionales (Jung, 2020). Los materiales compuestos a su vez abren la puerta a la FA y todas las mejoras asociadas.



Figura 26 Etapas de la fabricación de una cubierta de góndola cableada de materiales compuestos (Jung, 2020),

2.3.3.1. Góndolas impresas

Como cualquier cubierta la función de la hallada en la góndola es proteger lo contenido en su interior. Pero esto sería primera función, la cubierta debe ser también un escudo aerodinámico que proteja frente a las inclemencias del tiempo y facilite la función del aerogenerador, así como una membrana protectora sobre las partes del aerogenerador y el personal técnico que trabaje en su interior. Los vectores de mejora de las cubiertas de las góndolas mediante *FA* incluyen incentivos técnicos y económicos mejorados en la fabricación de moldes de fibra de vidrio y un cambio de paradigma en su fabricación empleando *FA* directa. Para entender donde se encuentran los puntos de mejoras hay que entender primero que problemas plantean un reto al diseño tradicional de las góndolas. Estos serían la refrigeración pasiva, las defensas contra la climatología, el elevado número de piezas empleado y la ergonomía. Como se mostraba en el apartado anterior la geometría de la góndola es replicable incluso en laboratorio como se puede ver en la figura 26, y también en la estructura de la construcción de energía integrada (AMIE) del mecanismo de fabricación ajustable ORNL que se acerca más a la realidad industrial y se puede observar en la figura 27. Las oportunidades en *FA* directo de la góndola se encuentran en la funcionalización de la estructura para incluir sistemas de flujo de aire pasivo, que son pasacables integrados y bases estructurales para alojar los componentes de la góndola. Algunas de estas características ya se demostraron en el proyecto AMIE y se pueden observar en la figura 28 (Malviya *et al.*, 2021).



Figura 27. Estructura ORNL AMIE (Mann *et al.*, 2017)



Figura 28. Estructuras funcionales en el proyecto AMIE (Malviya *et al.*, 2021).

2.3.4. Imanes

El grupo de elementos conocido como tierras raras son en la actualidad un componente principal en multitud de materiales avanzados. Estos materiales son empleados por industrias de los más variadas como la automoción (Li *et al.*, 2019), las asociadas con las tecnologías de la información y las telecomunicaciones o las energías renovables. Las tierras raras son habilitadoras de velocidad, rendimiento, durabilidad y bajas emisiones de carbono en estas industrias. Se requieren en las aplicaciones diarias de todo tipo debido a sus propiedades químicas y físicas únicas. Su consumo, de la mano de la demanda, ha ido en aumento (figura 23), unidas con las preocupaciones ambientales y su obtención, limitada a unas pocas ubicaciones, suponen un riesgo muy alto de interrupción del suministro (Palle *et al.*, 2022).

En el caso de las turbinas eólicas y los coches eléctricos la futura demanda de tierras raras estará impulsada tanto por los avances de la tecnología y la optimización del uso de materiales como por los escenarios socioeconómicos que puedan darse, mientras que la demanda en otros sectores, como la electrónica y los equipos especializados, se verá influida principalmente por la dinámica del mercado (Alves *et al.*, 2020). Esto puede dar lugar a distintos futuros respecto al consumo y demanda de las tierras raras.

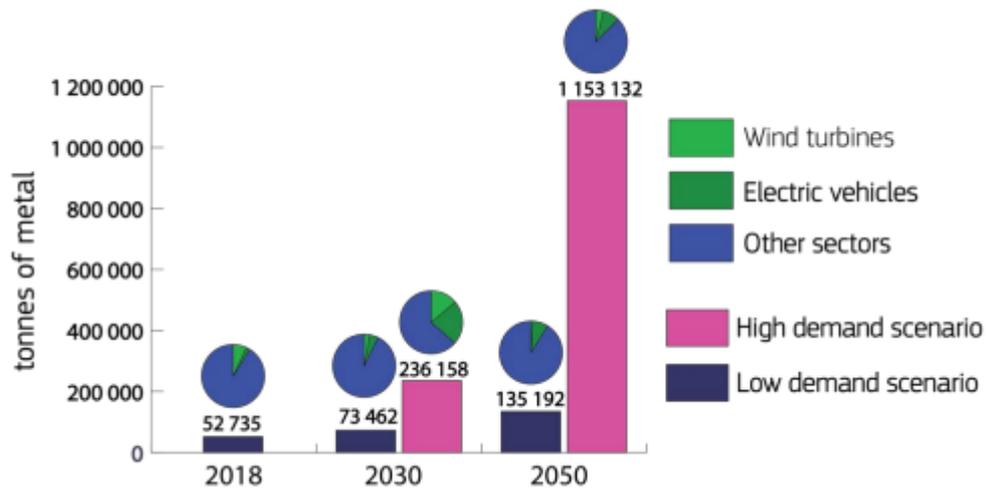


Figura 29. Demanda mundial estimada de neodimio, praseodimio, disprosio y terbio para aerogeneradores, motores para vehículos eléctricos y otros sectores, según escenarios de baja y alta demanda (Alves *et al.*, 2020).

Es en este escenario donde la FA lleva empleándose desde hace unos pocos años para obtener materiales magnéticos. Este método facilita conseguir formas netas y posibilita una mayor eficiencia en el uso de tierras raras. El desarrollo de nuevos materiales magnéticos es primordial e indispensable para mejorar la eficiencia y el rendimiento de los dispositivos en la generación, acondicionamiento, conversión, transporte y otros sectores de la economía que emplean energía eléctrica. Los materiales magnéticos funcionales, como los imanes duros y blandos avanzados, los refrigerantes magnéticos, los sistemas microelectromecánicos, las aleaciones con memoria de forma magnética y los fluidos y elastómeros magnetorreológicos tienen un impacto sustancial en todas las tecnologías contemporáneas de ahorro de energía. De entre todas estas aplicaciones los imanes tienen un papel indisputable en posibilitar

soluciones eficientes, de bajo coste y de tamaño reducido para las tecnologías renovables, entre las que se incluyen los aerogeneradores (Popov *et al.*, 2018).

2.3.4.1. Producción convencional

La fabricación de imanes se puede realizar por numerosas técnicas convencionales, entre las que se encuentran los procesos de fundición, calandrado o extrusión, el conformado en caliente, el moldeo por inyección, el moldeo por inyección de metal, el moldeo por compresión y el más usado que es la pulvimetalurgia. En los últimos tiempos se está empleando prensado y sinterizado para fabricar imanes Nd₂Fe₁₄B, NdFeB sinterizados de productos de alta energía. Este proceso puede observarse en la figura 30. En este proceso, una composición adecuada se pulveriza en polvo fino, es compactada y se calienta para conseguir la densificación mediante la sinterización. Este proceso no permite producir formas intrincadas de imanes, los materiales son más adecuados para formas más simples, mientras que formas como los agujeros, ranuras o chaflanes son difíciles de obtener. Las tolerancias se ven afectadas con formas más complejas que pueden dar problemas en el conformado. Además, el proceso puede dar como resultado un promedio de chatarra de hasta el 25-30% de la materia prima total, lo que permite poca o ninguna oportunidad de capturar y reutilizar materiales costosos (Wang *et al.*, 2022).

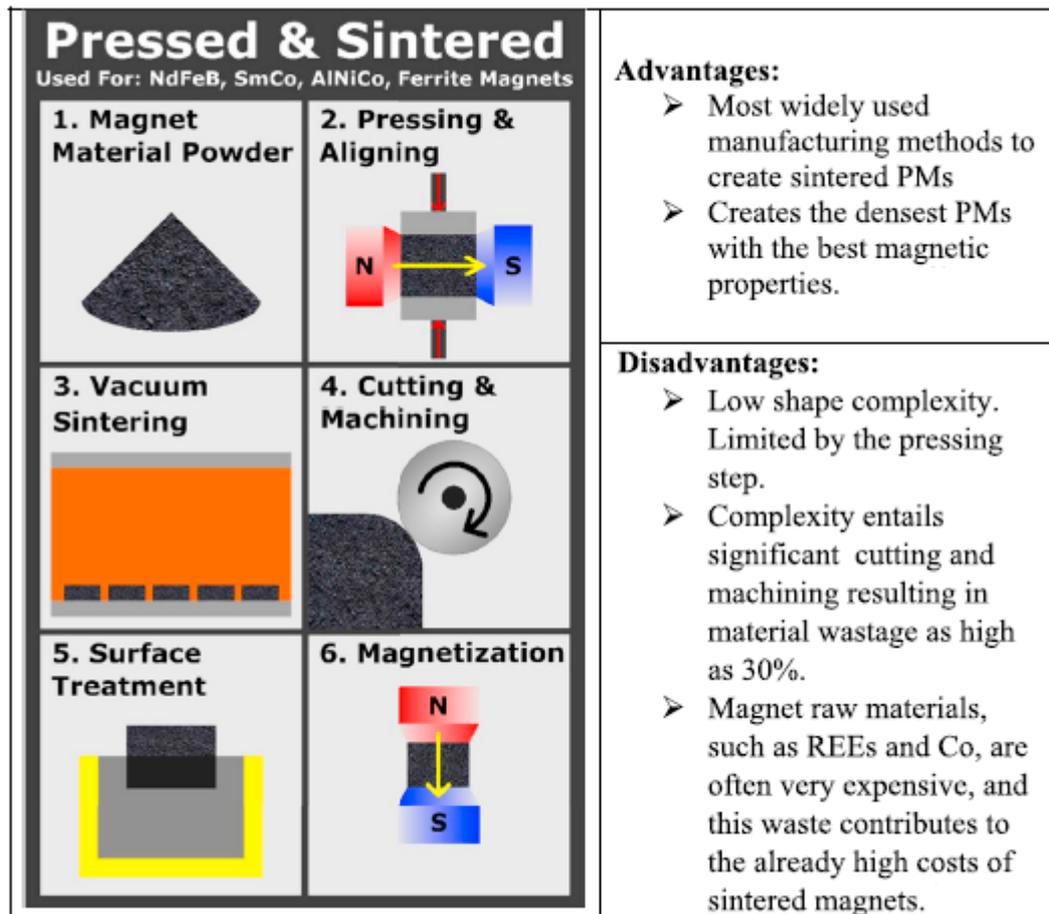


Figura 30. Proceso de prensado y sinterizado, para la fabricación de imanes. Se presentan ventajas y desventajas a la derecha (Wang *et al.*, 2022).

2.3.4.2. Procesos de FA empleados

Los cinco tipos principales de FA comúnmente utilizados para fabricar imanes permanentes son la tecnología de chorro de aglomerante, deposición de energía dirigida, extrusión de material, pulverización en frío, fusión de lecho de polvo (Wang *et al.*, 2022). Para la fabricación de materiales magnéticos blandos los procesos empleados son fusión selectiva por láser (Benack *et al.*, 2018), modelado por deposición fundida (Bollig *et al.*, 2017), inyección aglutinante (Páez-Pavón *et al.*, 2017) y la fabricación de objetos laminados (Wu & El-Refai, 2019).

2.3.4.3. Principales materiales magnéticos

En el caso de los materiales magnéticos duros existen cuatro familias principales, ferrita, NdFeB, AlNiCo y SmCo. Los imanes se componen principalmente del material en el que se basan, pero a menudo contienen pequeñas cantidades de otros elementos o dopantes para mejorar sus propiedades materiales (Cui *et al.*, 2018).

Las opciones para los materiales magnéticos blandos son las mismas para la FA que para las utilizadas en la manufacturación convencional. Estas aleaciones son Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Co y SMCs (Lamichhane *et al.*, 2020).

2.3.4.4. Materiales magnéticos blandos

Los materiales magnéticos blandos se emplean en la construcción de máquinas eléctricas para conducir los campos magnéticos. Estos materiales cuentan entre sus propiedades con una alta permeabilidad y un campo coercitivo bajo lo que permite un uso mínimo de energía para la magnetización cíclica del material (Tiismus *et al.*, 2020). Para las máquinas eléctricas las características más valoradas son la baja pérdida de energía, la alta polarización de saturación y su bajo precio (Goll *et al.*, 2019). Existen numerosas opciones (figura 31) en la familia de materiales magnéticos blandos los cuales varían tanto en su gama de precios como en su rendimiento. Para aplicaciones de baja frecuencia de conmutación (50–60 Hz), el mejor equilibrio entre estas características se puede encontrar en las aleaciones de acero al silicio cristalino. A frecuencias de operación más altas (kHz/MHz), los materiales amorfos y nano cristalinos son muy superiores en términos de pérdidas, lo que justifica su mayor costo. Donde las densidades de potencia más altas son críticas, a menudo se usan aleaciones basadas en cobalto (Tiismus *et al.*, 2022).

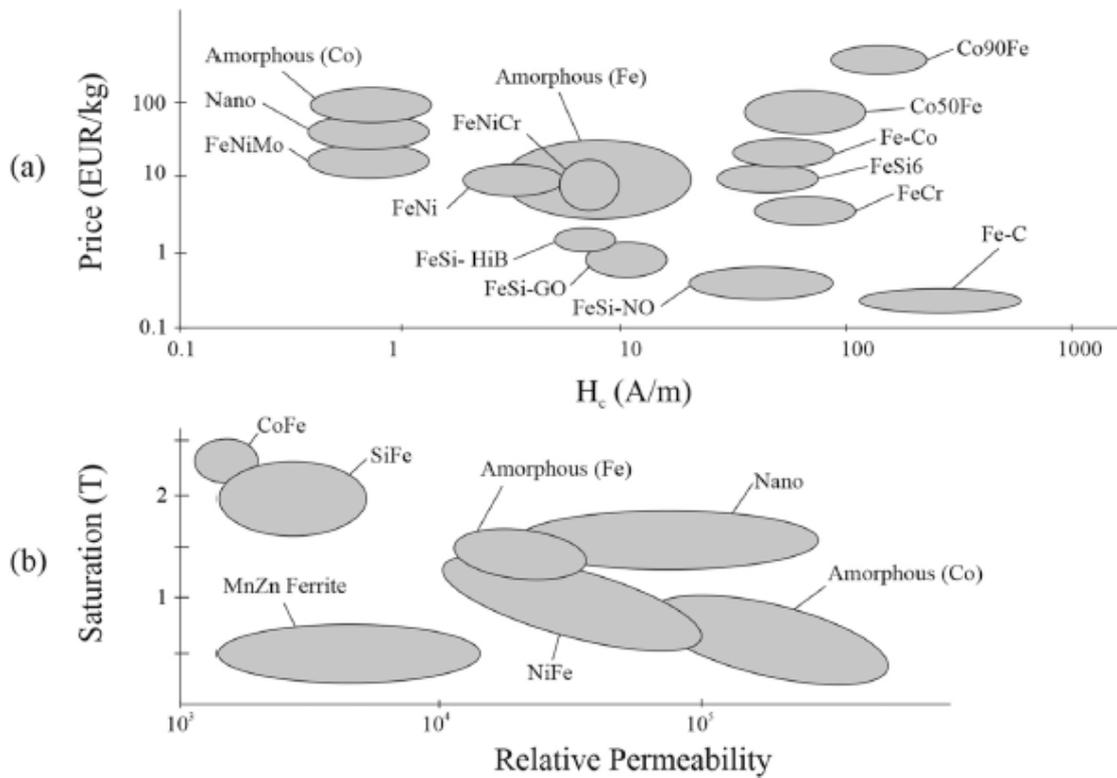


Figura 31. Diversidad de materiales magnéticos blandos: materiales comunes comparados en términos de coste (a) y propiedades magnéticas (b) (Tiismus *et al.*, 2022)

El empleo de *FA* en máquinas eléctricas puede emplear aleaciones magnéticas blandas utilizadas tradicionalmente como Fe-Si, Fe-Ni, Fe-Co y SMCs (Krings *et al.*, 2017). Las ferritas blandas solo se integran en el transformador y la antena, pero no se integran fácilmente en los rotores debido a su baja magnetización y fragilidad. Ahí es donde entra la *FA*, ya que posibilitará los métodos de procesamiento incluso para materiales frágiles, y la mayor resistencia eléctrica de las ferritas blandas las convierte en candidatas alternativas para materiales aislantes en núcleos eléctricos (Lamichhane *et al.*, 2020).

2.3.4.5. Materiales magnéticos duros

Los materiales magnéticos duros o imanes permanentes se emplean en la construcción de máquinas eléctricas para generar flujo sin la aplicación de una corriente eléctrica. Dado que estos materiales se utilizan para almacenar energía magnética, es esencial un área amplia de bucle de histéresis. El parámetro que se emplea para caracterizar un grado particular de material magnético duro es el producto de energía máxima, a mayor $(BH)_{max}$ se obtiene una mayor densidad de potencia del material (Tiismus *et al.*, 2022). Los materiales empleados son aleaciones de elementos de tierras raras con cobalto ferromagnético o hierro entre otras. Se pueden observar las propiedades de los elementos más comunes en la tabla 3.

Tabla 3. Materiales comunes de imanes permanentes para aplicaciones de máquinas eléctricas (Kallaste *et al.*, 2017).

Material	$(BH)_{max}$ (kJm ⁻³)	Br (T)	Hc (kAm ⁻¹)	Comentario
NdFeB	220-500	0,97-1,45	740-1000	Desarrollado en 1980s, Mayor $(BH)_{max}$, Baja resistencia a la corrosión, baja resistencia a la temperatura
SmCo	120-240	0,85-1,1	620-840	Desarrollado en 1960s, Caro, altamente resistente a la oxidación, alta resistencia a la temperatura
Ferrita	7-42	0,2-0,48	120-360	Desarrollado en 1930s, Barato, Bajo $(BH)_{max}$
AlNiCo	10-35	0,6-1,16	40-120	Desarrollado en 1930s, fácilmente desmagnetizado, bajo Hc, bajo $(BH)_{max}$

Los métodos de fabricación tradicionales como la sinterización y unión se ven desafiadas para obtener imanes permanentes complejos con forma neta. Las topologías de imanes factibles se ven claramente limitadas, ya que las técnicas involucran troqueles y herramientas de prensado, y las piezas en verde también experimentan una contracción significativa tras la sinterización (hasta un 25 % vol) (Jaćimović *et al.*, 2017). Es por tanto el paso lógico acercarse a la FA para intentar producir imanes permanentes con formas más complejas. Estos métodos suelen ser basados en la extrusión, pues estos métodos se complementan bien con las propiedades requeridas de los imanes permanentes. En estas piezas las impurezas de la microestructura son ventajosas. Con un tamaño de grano más pequeño y otras impurezas entre dominios, se pueden obtener más sitios de fijación para los dominios magnéticos y se obtiene un campo coercitivo Hc más grande (Ramesh *et al.*, 1988).

2.3.4.6. Las ventajas de la fabricación con FA

Con los métodos tradicionales empleados para el procesamiento los imanes permanentes suelen reducir la tasa de utilización del material y el rendimiento de la forma final (Wu & El-Refaie, 2019). En cambio, los imanes permanentes fabricados aditivamente pueden reducir el gasto de material, reducir el mecanizado necesario y obtener topologías complejas. Otra ventaja es que se puede controlar la textura del grano lo que permite diseñar propiedades isotrópicas o anisotrópicas, lo que da lugar a mejores rendimientos magnéticos sin estar atados totalmente al uso de tierras raras. Algo común en la FA es que con la fabricación rápida de prototipos se puede evitar la fabricación de nuevos moldes y herramientas para cada nuevo

caso, reduciendo el gasto de las operaciones de mecanizado y reduciendo los tiempos asociados con el consecuente ahorro de capital. Al evitar el derroche de material se reducen los gastos en materia prima, en especial con los materiales preciosos como las tierras raras. Toda esta reducción viene asociada con un consumo menor de energía (Li *et al.*, 2017).

2.3.4.7. Reciclado

Un área aún en sus primeros estadios y con mucho recorrido es el reciclaje de imanes permanentes usados y desechados. La FA puede ayudar considerablemente a su progreso, ya que entre sus beneficios están la reducción de desechos al requerir menos aporte de materiales y mecanización. El reciclado y reaprovechamiento de los imanes permanentes es desafío que ha obtenido éxitos limitados (Matizamhuka, 2018). Hoy en día estos esfuerzos han tomado un cariz aún más importante debido a la preocupación reinante por las posibles interrupciones en el suministro de elementos de tierras raras. Existen varios procesos que intentan afrontar este reto, varios de ellos tratan de recuperar los elementos de tierras raras de la chatarra precia al consumo y de la compleja chatarra de imanes permanentes de NdFeB al final de su vida útil (Gutfleisch *et al.*, 2013; Kumari *et al.*, 2018; Okabe *et al.*, 2003; Sheridan *et al.*, 2012; Walton *et al.*, 2015; Yang *et al.*, 2017; Yue *et al.*, 2018; Zakotnik *et al.*, 2008; Zakotnik & Tudor, 2015). Existen también procesos para reciclar imanes sinterizados de NdFeB en imanes unidos, aunque recuperar el polvo magnético de tierras raras se torna complicado (Gutfleisch *et al.*, 2013; Itoh *et al.*, 2004). Estos procesos sufren de la desventaja de ser complicados y su implementación puede dar lugar a unos costes muy elevados que lo serán aún más si el mercado de las tierras raras no acompaña. Esto da lugar a que no se puedan implementar procesos de reciclaje de rutina. Es por todo esto que existe la necesidad de encontrar un método rentable, cuya eficiencia permita reutilizar y reciclar los elementos de tierras raras sin disparar los costes. Existen métodos experimentales como el de la figura 32 que se están desarrollando a día de hoy, pero aún queda mucho camino que recorrer.

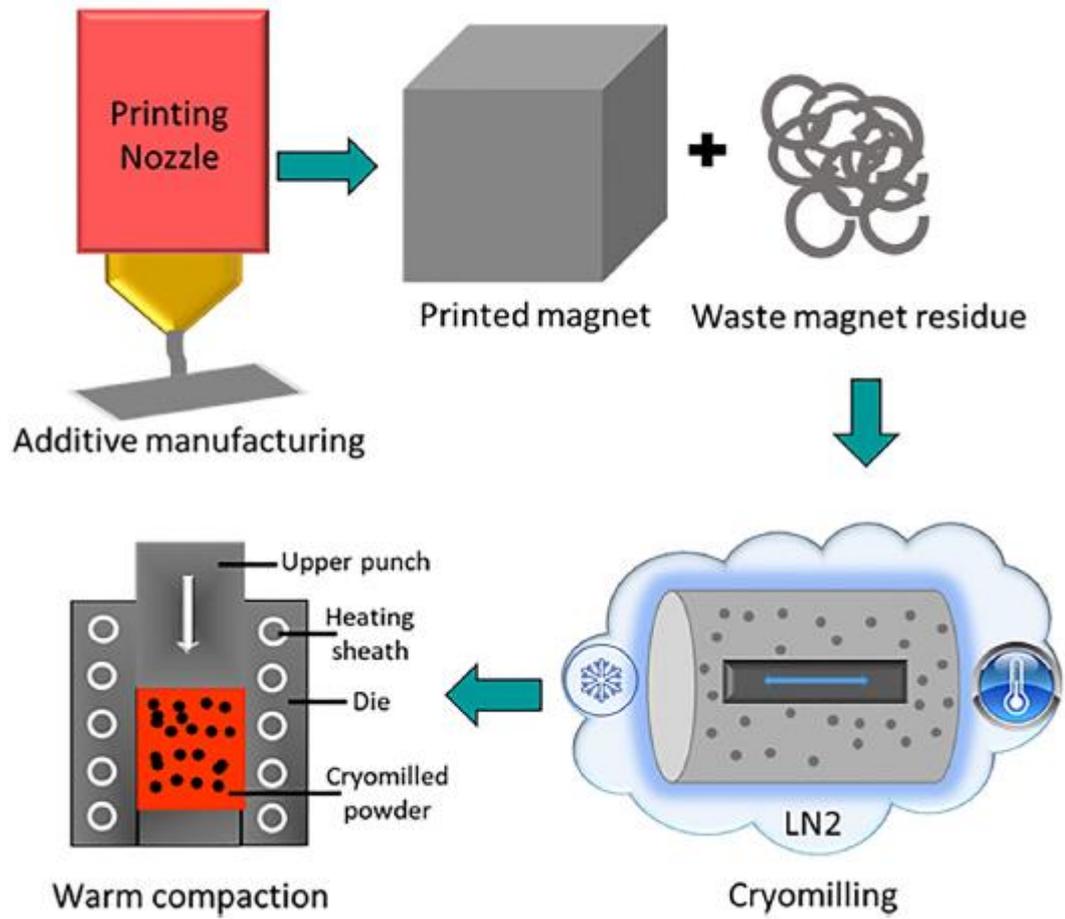


Figura 32. Procedimiento experimental para reciclar imanes adheridos impresos aditivamente (Gandha *et al.*, 2019).

2.3.5. Intercambiadores de calor

La fabricación de intercambiadores de calor tradicional ha usado tecnología sustractiva, entre estas tecnologías se encuentra la fundición y conformado, el taladrado, el cizallado o el fresado. Para ensamblar las piezas se emplean distintos tipos de soldadura. Estos métodos tienen entre sus desventajas el desperdicio de material o pérdidas del fluido de trabajo si no hay una conexión hermética entre las distintas piezas que lo conforman (Kaur *et al.*, 2020). La FA trae consigo la posibilidad de generar estructuras más complejas, lo que ayuda a lograr escalas de longitud pequeña con una precisión aceptable y superan muchas otras deficiencias de las tecnologías convencionales. Los intercambiadores de calor se pueden construir en una sola pieza lo que elimina de raíz la posibilidad de fugas. Además, la construcción capa a capa resulta en cantidades de desecho mucho menores. Los intercambiadores de calor que involucran el uso de inserciones de algún tipo se pueden imprimir directamente en el sustrato que se enfría activamente, esto da como resultado buenas conexiones de interfaz para la conducción de calor frente a la obtenida con la soldadura fuerte convencional. Las nuevas opciones de prototipar y fabricar diseños complejos mediante la FA no están exentas de sus propios retos, la optimización de los parámetros del proceso, el control de la rugosidad de la superficie, la eliminación de la estructura de soporte, los requisitos de procesamiento posterior, las materias primas compatibles y la competitividad de costes frente a los métodos convencionales para la producción en masa son áreas con mucho recorrido por delante. Pero incluso con estos desafíos, las tecnologías FA pueden fabricar intercambiadores de calor con éxito en metales, polímeros y cerámicas (Kaur & Singh, 2021).

Los estudios recientes están trabajando en múltiples líneas de investigación. Deisenroth *et al.* (2017) realizan una revisión de los intercambiadores de calor basados en polímeros y compuestos de polímeros tratando las técnicas de FA y los futuros desafíos. Klein *et al.* (2018) estudiaron los avances en la FA de intercambiadores de calor derivados de materiales metálicos, poliméricos y cerámicos y discutieron la competitividad de costes de los métodos FA. Jafari & Wits (2018) revisan el potencial de la tecnología de sinterización selectiva por láser y detallan una descripción general pormenorizada de las diferentes investigaciones de intercambiadores de calor existentes y traen a la luz la ausencia de estándares para la evaluación de propiedades de intercambiadores de calor obtenidos mediante FA. Nafis *et al.* (2020) trata los disipadores de calor empleando FA para la aplicación de refrigeración electrónica con los logros y retos encontrados.

Los intercambiadores de calor obtenidos mediante FA se pueden clasificar en siete apartados principales como se observa en la figura 33: rugosidad de la superficie, microcanales, promotores de área y turbulencia, materiales celulares, tubos de calor, turbomaquinaria y chorro de impacto (Kaur *et al.*, 2020).

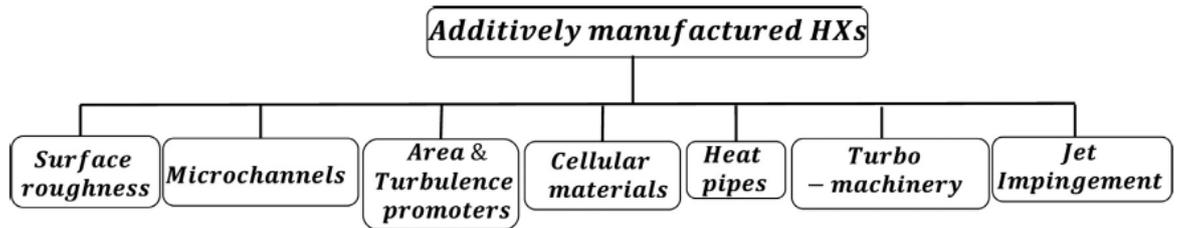


Figura 33. Categorización de intercambiadores de calor obtenidos mediante FA (Kaur *et al.*, 2020).

2.3.5.1 Rugosidad de la superficie

La rugosidad de la superficie es una característica buscada para incentivar la transferencia de calor desde una superficie, esto es así sobre todo en los casos en los que las escalas de rugosidad son lo suficientemente grandes como para romper la capa viscosa cercana a la pared en flujos turbulentos. La rugosidad artificial se puede generar en las dos paredes que interactúan con los fluidos de trabajo mediante la inserción de algunas características que promueven la turbulencia. En el caso de la FA interesa introducir esta rugosidad mientras se fabrica (Kaur *et al.*, 2020).

Existen varias líneas de investigación, varios autores tratan de optimizar los parámetros de varias tecnologías de FA de fusión de lecho de polvo para lograr distintas rugosidades (Majeed *et al.*, 2019; Mohammadi & Asgari, 2018). Otros autores intentan investigar la calidad de la superficie de las piezas fabricadas a base de polímeros y cerámicas, a diferencia de la tendencia que solo lo estudiaba para piezas metálicas (Aravind Shanmugasundaram *et al.*, 2020; Lian *et al.*, 2018).

2.3.5.2. Microcanales

Un punto candente de la industria es la miniaturización de los equipos electrónicos manteniendo todas sus prestaciones. Esto impulsa a su vez al desarrollo de disipadores de calor que funcionen a esta pequeña escala pero que tengan una alta disipación de flujos de calor, garantizando así la prolongación de la vida útil de los sistemas. Es en esta situación en la que se posicionan los microcanales, los cuales han demostrado su capacidad para disipar altas densidades de potencia (Agostini *et al.*, 2007; Dixit & Ghosh, 2015).

Los intercambiadores de calor de microcanales múltiples surgen como la alternativa a los intercambiadores de calor de microcanales, los cuales se caracterizan por grandes caídas de presión derivados de la longitud y posicionamiento de los canales que afectan al flujo de trabajo. La estructura y disposición de los multicanales múltiples se puede observar en la figura 34. Esta estructura mejora las características hidráulicas del cambiador de calor. En la fabricación convencional los microcanales y los colectores son piezas distintas que luego son ensambladas, esta unión puede dar lugar a un aumento del tiempo de entrega y afectar al rendimiento. En la FA estas dos piezas se fabrican como una sola, permitiendo salvar los problemas anteriormente mencionados y llegar a diseños más optimizados.

Los estudios actuales se centran en el desempeño de los intercambiadores de microcanales múltiples (Kempers *et al.*, 2020; Keramati *et al.* 2019; Tiwari *et al.*, 2019)

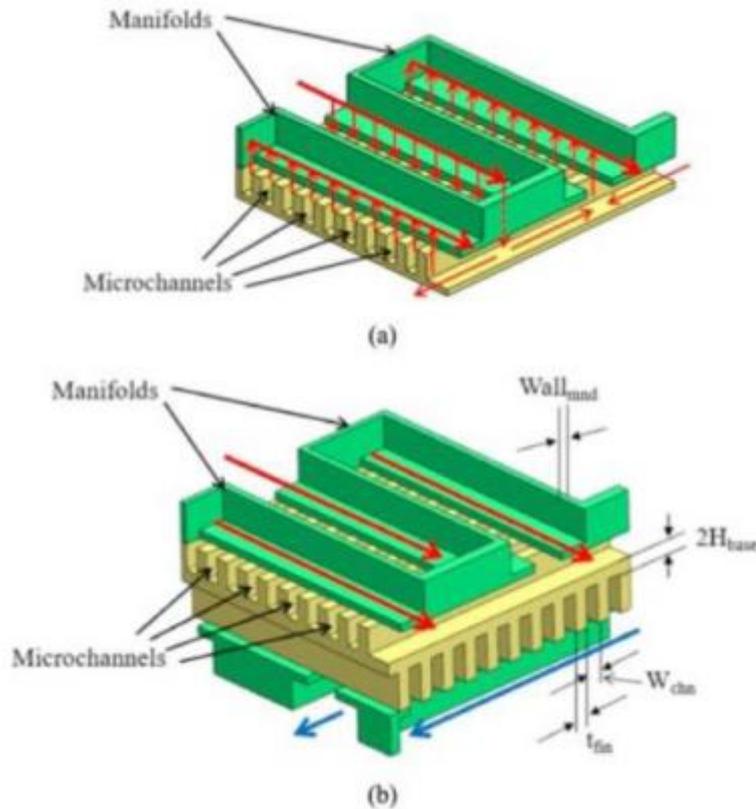


Figura 34. Intercambiador de calor de microcanal múltiple (Zhang *et al.*, 2018).

2.3.5.3. Promotores de área y turbulencia

Una manera clásica que ha tenido la ingeniería para aumentar la transferencia neta de calor desde una superficie es aumentar el área de la superficie mojada o promover la turbulencia y la mezcla entre fluidos. Existen numerosas tecnologías y trabajos al respecto que han conseguido grandes éxitos (Alam & Soni, 2018). En este aspecto la FA puede traer mejoras por tres razones; se pueden crear formas personalizadas complejas que están más allá de las capacidades de las tecnologías tradicionales, es posible trabajar en dimensiones de microescala como lo indicado en el apartado anterior, y se consigue eliminar el proceso de unión al ser posible imprimir directamente en el sustrato (Kaur *et al.*, 2020).

La investigación actual se centra en conseguir nuevas geometrías que mejoren las características de los cambiadores de calor aprovechando las ventajas que ofrece la FA (Moon *et al.*, 2021; Searle *et al.*, 2020; Unger *et al.*, 2019).

2.3.5.4. Materiales celulares

Los materiales celulares contienen vacíos que mejoran las propiedades estructurales y funcionales del material con respecto a su bloque de material monolítico en fase sólida. Un material celular que muestra buenas capacidades de soporte de carga mecánica y térmica son

las espumas metálicas. Este material consiste en una red densa de fibras metálicas que favorecen la mezcla de flujos, la dispersión térmica y exhiben alta permeabilidad, relación área superficial a volumen, conductividad térmica efectiva y coeficiente de transferencia de calor interfacial. Estas espumas se han empleado como intercambiadores de calor y ofrecen una gran gestión térmica, sus principales inconvenientes son la disposición irregular y aleatoria de las celdas debido a los procesos de fabricación tradicionales y la dificultad para unirlos en el sustrato calentado que se va a enfriar (Zhao, 2013). Los materiales celulares de celdas unitarias se han estudiado y se sigue explorando su transferencia de calor, así como las propiedades hidráulicas que distintas morfologías pueden aportar. La FA no solo aporta libertad para preparar redes con parámetros morfológicos personalizados, sino que también imprime toda la estructura celular en el sustrato, eliminando así la resistencia adicional del material de interfaz térmica (Kaur *et al.*, 2020). Actualmente los estudios están ahondando en las distintas morfologías de las células (Chaudhari *et al.*, 2019; Ekade & Krishnan, 2019).

2.3.5.5. Tubos de calor

Los tubos de calor son dispositivos bifásicos pasivos que exhiben altas tasas de transferencia de calor con una caída de temperatura mínima al utilizar el calor latente de vaporización del fluido de trabajo. Su función es actuar como disipadores y difusores de calor para distintos dispositivos (Wang *et al.*, 2020). La FA se puede emplear para fabricar todas las partes de los tubos de calor como un solo componente eliminando así parte de las desventajas que tenía con la fabricación tradicional. Las líneas de investigación se centran en mapear las características de estos elementos al fabricarlos con FA, centrándose sobre todo en la mecha (Jafari *et al.*, 2018, 2020).

2.3.5.6. Turbomaquinaria

La turbomaquinaria se centra en las puertas que ha abierto la FA en tecnologías de enfriamiento. Este apartado gira en torno a las turbinas de gas y su diseño para maximizar su eficiencia (Kaur *et al.*, 2020). Esto compete a la FA, pero no está dentro del campo de la eólica por lo que carece de interés para este documento fuera de la noción de su existencia.

2.3.5.7. Chorro de impacto

La tecnología de chorro de impacto consiste en la incisión de un chorro de fluido sobre una superficie calentada para producir un coeficiente de transferencia de calor de estancamiento muy alto que decae lejos del punto de impacto en la placa objetivo. Esta tecnología se conoce por su alta capacidad para disipar calor. En este ámbito la FA se emplea para conseguir diseños que maximicen los sistemas de enfriamiento. También genera la posibilidad de construir monóticamente los sistemas trayendo la ventaja adicional de reducir el coste de fabricación y el peso del disipador de calor. Son escasos los estudios dirigidos a la fabricación de ensamblajes de impacto de chorro mediante la introducción de conceptos de diseño novedosos, pero la literatura disponible da a entender que el avance de esta área sigue progresando (Kaur *et al.*, 2020).

2.3.6. Reparación y remanufactura

Los problemas medioambientales y la escasez de recursos son problemas cada vez más acuciantes y las tibias medidas tomadas hasta ahora apenas sirven como paliativos. En esta situación es natural que cada vez se tienda más a la inclusión de un modelo de economía circular para los ciclos de vida de los productos que permita ahorrar energía y evitar derroche de materiales (Korhonen *et al.*, 2018; Tam *et al.*, 2019). En la situación actual el final de la vida útil de un producto significa su descarte, con la economía circular se pretende que este final se convierta en un nuevo principio gracias a la reparación y restauración, volviendo así a incluir el producto en el mercado y cerrando el círculo (Bag & Rahman, 2021).

Uno de los pilares fundamentales de la economía circular es la remanufactura. Los estudios indican que además de consumir menos energía, esta técnica es más rentable que otras opciones de recuperación disponibles como el reciclaje (Ohiomah & Sukdeo, 2022; Tam *et al.*, 2019; Wakiru *et al.*, 2018). Por remanufactura se entiende a las actividades llevadas a cabo para restaurar componentes que se encuentran al final de su vida útil a condiciones parecidas a las del original. Con esto se pretende que funcionen dando las mismas prestaciones que dieron una vez fabricados originalmente- Así se consiguen que los productos sean sostenibles y se cierre el ciclo de la economía circular, dando como beneficio un aumento de las ganancias y una reducción de las emisiones de carbono a la atmosfera (Wang *et al.*, 2021).

Las etapas del ciclo de vida de un componente con las opciones de recuperación se pueden ver en la figura 35. El proceso de remanufacturación, ver figura 36, se lleva a cabo al final de la vida útil de componente y se puede desglosar en varias etapas, desmontaje, limpieza, inspección, reparación, montaje y los test para comprobar que todo es correcto (Matsumoto *et al.*, 2016). Si un producto cumple las funciones que se le asignan este en su ciclo de vida útil original o en uno nuevo tras la remanufacturación sigue manteniendo su valor. Sin embargo, existe un paso antes y es la reutilización el cual requiere un proceso mucho menos complejo con escasas pruebas, pero a cambio no goza de una garantía renovada como en la manufacturación. Para facilitar la reutilización, todos los usos o funciones potenciales de los componentes en términos de geometría y propiedades del material deben identificarse en la fase inicial de diseño, como sustitución de las funciones principales cuando sea necesario (Stavropoulos *et al.*, 2019). Por último, el reciclaje cuyo objetivo es devolver los componentes a su estado primigenio. En el caso del reciclaje de metales, aunque el proceso no degrada el material en términos de propiedades, el proceso cambia la utilidad y el valor del producto original. Varias líneas de investigación sugieren que la remanufactura es una buena alternativa para habilitar la economía circular; esto, a su vez, sustentará la economía, la sociedad y el medio ambiente (Sumter *et al.*, 2021; Trollman *et al.*, 2020).

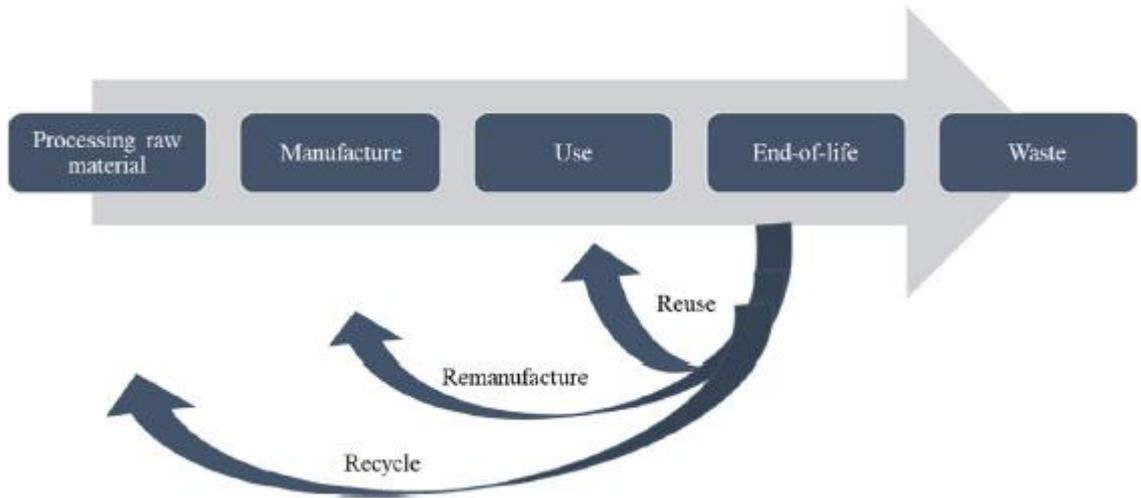


Figura 35. El cierre de ciclo mediante la remanufactura (Aziz *et al.*, 2021).

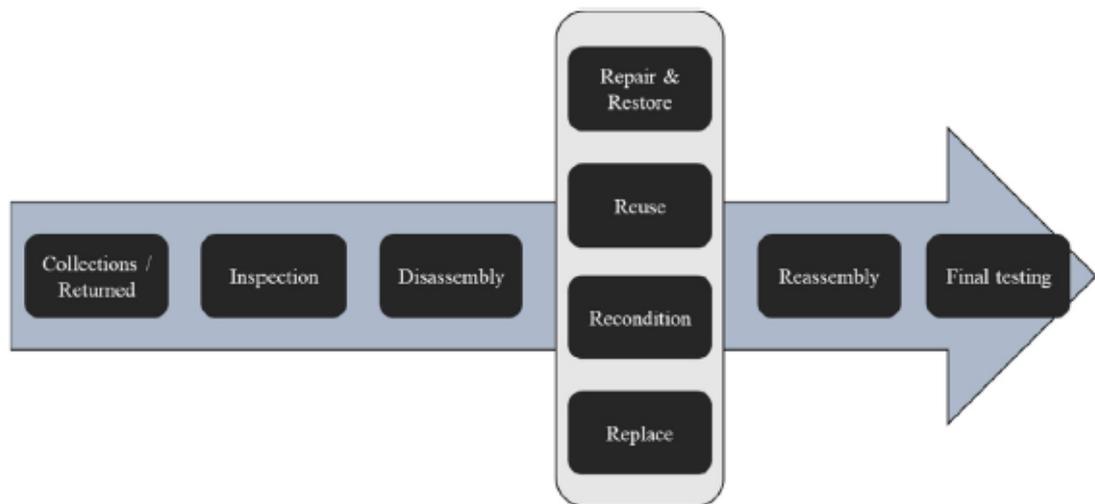


Figura 36. Proceso de remanufactura (Aziz *et al.*, 2021).

Las líneas de investigación de la remanufacturación se centran en la FA para mejorar la eficiencia de la remanufacturación en la producción de productos rentables y de mayor calidad. El empleo de las técnicas de FA trae consigo ventajas para el proceso en la reparación y restauración del componente. Se estima que la FA podría proporcionar beneficios potenciales en términos de sostenibilidad donde la consideración de FA en la remanufactura mejorará la capacidad de extender la vida útil del producto (Boer *et al.*, 2020; Patel *et al.*, 2022). Aun así, la aplicación de la FA requiere todavía de una fuerte investigación para salvar todos los desafíos que afronta. Entre ellos se encuentra la identificación de la configuración correcta de los parámetros del proceso y encontrar materiales adecuados a las necesidades de cada proceso (Al-Handawi *et al.*, 2020; Lahrouer & Brissaud, 2018).

2.3.6.1. Comparación entre el proceso convencional y el proceso automatizado usando FA

En la tabla 4 pueden verse las principales ventajas y desventajas entre el proceso convencional y el proceso automatizado usando FA. Aunque algunas de las desventajas son comunes para ambos procesos, no es así en lo concerniente a su efecto que puede ser más acuciado. Un ejemplo de esta situación sería el control de la emisión de humos, cuyo riesgo debe de ser atendido también en la fabricación empleando FA, aunque los trabajadores no estén tan implicados como en el caso del proceso convencional. Esta situación se da también en otros riesgos como el del polvo fino resultante del proceso, que puede ser dañino para la salud de las personas pero que no supone un riesgo directo al estar los trabajadores operando en remoto (Stavropoulos *et al.*, 2018). Por lo tanto, se deben tener en cuenta las ventajas y desventajas generales de los procesos convencionales y FA para evitar desperfectos o fallos innecesarios en los componentes reparados, así como para mitigar su impacto adverso en la calidad ambiental.

Tabla 4. Ventajas y desventajas del proceso de reparación y restauración convencional y automatizado (Aziz *et al.*, 2021).

Tipo de procesos de reparación y restauración	Ventajas	Desventajas
Convencional	Buena calidad superficial de la pieza	Formación de zona afectada por el calor
	Supervisión estrecha por parte del operador	Altamente dependiente de trabajadores calificados
		Emisión de humos del proceso
Reparación y restauración automatizada usando FA	Proceso respetuoso con el medio ambiente	Mala calidad de la rugosidad de la superficie
	Ahorro de tiempo	Baja precisión
	Capaz de construir piezas de geometría compleja	Incompatibilidad de materiales

2.3.6.2. Manufacturación híbrida

La manufactura híbrida combina la FA con la fabricación sustractiva. Esta combinación hereda la capacidad de conseguir formas complejas de la FA y la precisión y calidad obtenidas al final del proceso de la fabricación sustractiva. Esta combinación eleva las posibilidades de remanufacturación a una nueva cota, permitiendo la flexibilidad de añadir o eliminar material. Un punto a tener en cuenta es que este proceso es intercalado y debe ser o adicción o sustracción, por lo que su análisis y planificación es un reto en sí mismo (Zheng & Ahmad, 2020).

2.3.7. FA y el COVID-19

Cuando se estudian los aerogeneradores como es lógico se tratan todos sus sistemas, pero en la gran mayoría de casos se obvian los técnicos que trabajan con ellos y que en muchos casos afrontan riesgos relacionados con trabajos con máquinas eléctricas y en altura. La pandemia del COVID-19 ha supuesto un riesgo más que ha derivado en muchísimos fallecimientos a lo largo del mundo. En esta crisis que ha puesto a los gobiernos del mundo en jaque, uno de los problemas habituales era la escasez de equipos de protección individual (EPIS) (Rothan & Byrareddy, 2020). En esta situación cabe preguntarse como la FA puede ayudar (figura 37). La rápida creación de prototipos y la adaptabilidad digital de la impresión permiten aprovechar esta tecnología para dar una respuesta rápida contra las emergencias. Incluso con cortes en cadenas de suministro e interrupciones de producción, con la FA, su capacidad de personalizar diseños complejos, con código abierto de diseños CAD e impresoras 3D más accesibles a los clientes se puede dar una respuesta. La amplia gama de aplicaciones FA contra el COVID-19 son equipos de protección personal (PPE) (Bishop & Leigh, 2020; He *et al.*, 2020), dispositivos de test (Callahan *et al.*, 2020) y médicos (Iyengar *et al.*, 2020), viviendas de emergencia (Choong *et al.*, 2020), ayudas de visualización y dispositivos de seguridad personal (Wang *et al.*, 2021).

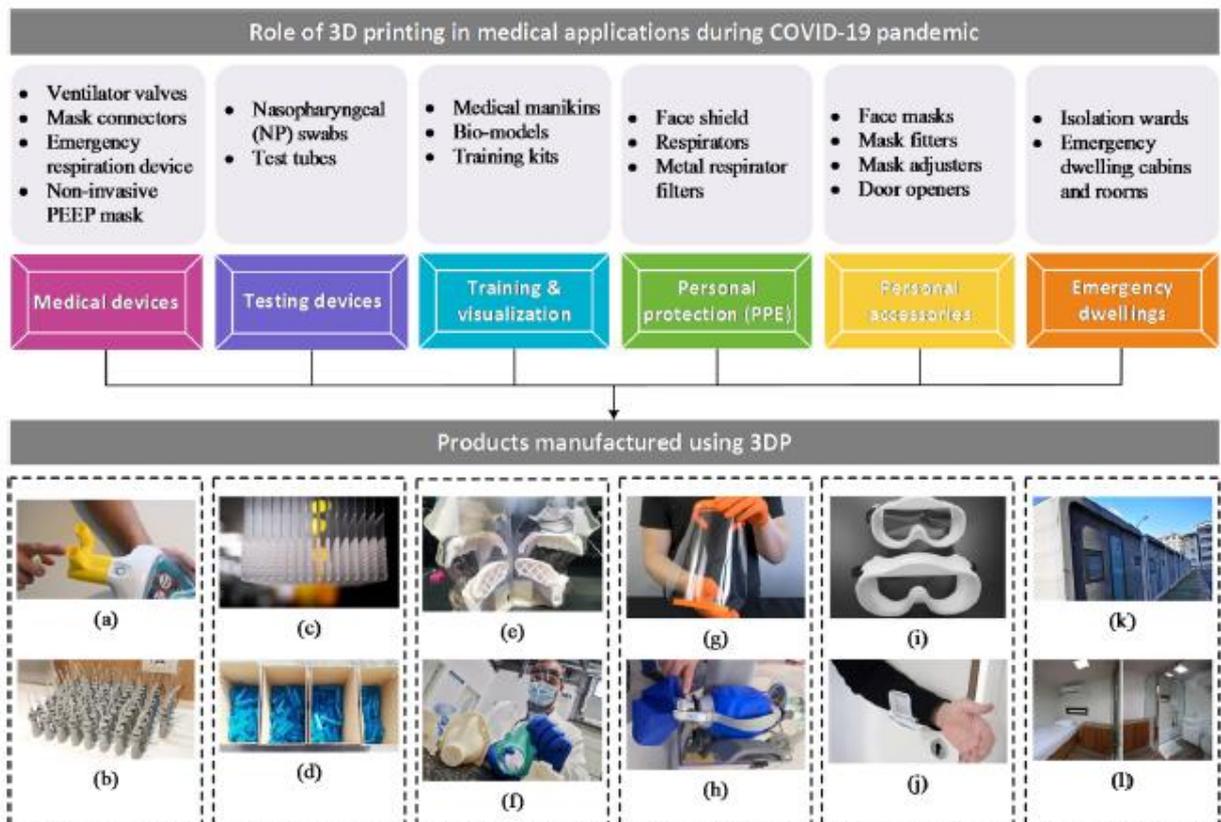


Figura 37. Aplicaciones de la impresión 3D durante la propagación de COVID-19 (a) Válvulas utilizadas para convertir las máscaras faciales de esnórquel en ventiladores (b) Válvulas para dispositivos respiratorios (c) Hisopos nasofaríngeos (d) Jeringas (e) Maniqués médicos para hisopos (f) Máscaras de silicona (g) protectores faciales (h) equipo respiratorio de emergencia (i) gafas de seguridad (j) manijas de puertas sin contacto (k) salas de aislamiento (l) casas de aislamiento equipadas con una cama, ducha e inodoro (Wang *et al.*, 2021).

3. Prospectiva

El tercer capítulo desarrolla la prospectiva de la FA entendida desde distintos puntos de vista que se enmarcan en la hipótesis futura de la economía, el impulso estatal de la energía eólica y las aplicaciones emergentes.

3.1. Economía de la FA

Este epígrafe estudia el alcance de la inclusión de la FA en la industria, contemplando sus costes y efectos en distintos casos de estudio.

3.1.1. La Industria 4.0 como propulsor de la FA

Se conoce a la Industria 4.0 como la Cuarta Revolución Industrial, esta consistiría en combinar técnicas avanzadas de producción y operación con las tecnologías inteligentes o “Smart” para así integrarlas en las organizaciones, personas y activos obteniendo así lo mejor de ambos mundos y por lo tanto mejores resultados de negocio. Dicho de otra forma, la Industria 4.0 es “La transformación tecnológica hacia sistemas físico-digitales en la fabricación”. Las tecnologías innovadoras en las que se basa esta revolución son algunas como la FA, robótica colaborativa, *Cloud Computing*, *Machine Learning*, realidad virtual, internet de las cosas (IoT), *Big Data*, inteligencia artificial (IA), inteligencia operacional, (Yu & Schweisfurth, 2020). Encuadrando la FA dentro del contexto de la Industria 4.0 esta tecnología surge como una imitación de los procesos biológicos, los cuales construyen nuevos “bloques” y con ellos sustituyen los antiguos unos sobre otros, o traduciéndolo a la FA, en capas. Aunque ahora está sufriendo un impulso sin precedentes gracias a su versatilidad y potencial diferenciador respecto a la competencia, la FA no es una tecnología nueva. Este auge coincide con las nuevas regulaciones para reducir la huella ambiental y evitar todas las sanciones relacionadas con emisiones y residuos, dando lugar a otro motivo más para añadir valor y aplicar tecnologías más eficientes (Öberg *et al.*, 2018). Es por tanto que la FA despunta como un referente para esta era digitalizada en la que todo debe ser inteligente, ya que permite un desarrollo muy veloz de los productos a través de un proceso aditivo en lugar de los métodos sustractivos o de moldeo que caracterizan a la fabricación tradicional.

3.1.2. Las cinco fuerzas de Porter aplicadas a la FA

Una vez una tecnología madura y puede ser empleada industrialmente automáticamente es incorporada al entorno empresarial y por lo tanto está sujeta a competir con el resto de soluciones y opciones similares. Como se afronta esta competencia es lo que, en última instancia, definirá el éxito o fracaso en el mercado. Un método muy extendido para analizar y medir la competitividad son las llamadas cinco fuerzas de Porter. El objetivo es identificar los factores críticos y el mejor posicionamiento estratégico para la organización centrando los esfuerzos en aquellos aspectos que sean necesarios. Este análisis de la industria contempla las siguientes fuerzas competitivas, la amenaza de entrada de nuevos competidores, la rivalidad entre competidores existentes, la amenaza de productos y servicios sustitutos, el poder de negociación del proveedor y el poder de negociación del cliente. La influencia de estas cinco

fuerzas determina si una organización tiene la capacidad de prosperar en un entorno específico. Estas fuerzas no son estáticas y pueden variar a lo largo del tiempo y de una industria a otra, pueden ser influenciadas por factores de la industria como los elementos técnicos o las características económicas y por factores externos como los nuevos avances tecnológicos, las políticas gubernamentales o la existencia de otros productos o servicios complementarios (Weil, 1985).

La globalización y el surgimiento de nuevas tecnologías que rompen con el paradigma tradicional provocan que la rivalidad entre empresas se más agresiva que nunca antes. Este tipo de tecnologías, como la FA, permiten una respuesta más rápida a los clientes, la globalización que estos clientes sean conscientes de que existe más variedad que nunca y por tanto un fortalecimiento de la rivalidad empresarial. Es por tanto que el factor diferenciador para llevar a los clientes es ofrecer valor a través de productos y servicios, lo que requiere de un pensamiento innovador. Es en este momento donde la economía da importancia al conocimiento y transacciona de una economía basada en recursos materiales, a una economía basada en el conocimiento. El primer caso depende de líneas de montaje y de los elementos materiales para la producción y el desarrollo económico. En cambio, la economía basada en el conocimiento está impulsada por la información descentralizada y depende de la creación y difusión de conocimiento. Siendo por tanto la materia prima el conocimiento es el capital intelectual que retiene una organización en forma de capital humano, relacional y estructural, es decir, la capacidad de una organización para capturar e institucionalizar el conocimiento apoyado en las Tecnologías de la Información y la Comunicación (TIC). Dando lugar a que las TIC sean más esenciales que un simple medio de apoyo para evaluar las fuerzas competitivas como se describe en el modelo de Porter. Las economías basadas en el conocimiento, como cualquier otra economía, son susceptibles de cambios, en este caso porque el conocimiento es dinámico y renovable. Sin embargo, existen algunas herramientas que permiten a las organizaciones aumentar su agilidad a la hora de responder a esos eventos (Barão *et al.*, 2017).

A lo largo de las últimas décadas, la FA como tecnología ha ido evolucionando, así como su papel en la sociedad actual, siendo ahora considerada como la interfaz entre la economía material y la economía del conocimiento. De ahora en adelante, los productos deben pensarse como productos continuos que requerirán nuevos tipos de modelos comerciales y nuevas formas de producirlos. Esta es una previsión potencial sobre el futuro, ya que el paradigma de la sostenibilidad y la desmaterialización de la economía son ya una realidad inamovible. Las promesas que pueden traer los productos continuos son la posibilidad de realizar actualizaciones haciendo uso de modularidad, es decir, este tipo de productos permitirán la sustitución o reparación de componentes. En consecuencia, esta característica solo es posible mediante el uso de FA junto con el establecimiento de proveedores certificados de *swap 'n' go*, generalmente centros de fabricación. Todos estos cambios pueden estudiarse mediante el modelo de las cinco fuerzas de Porter aplicado a FA representado en la figura 38. En los siguientes apartados se explicará cada una de estas fuerzas (Dias *et al.*, 2022).

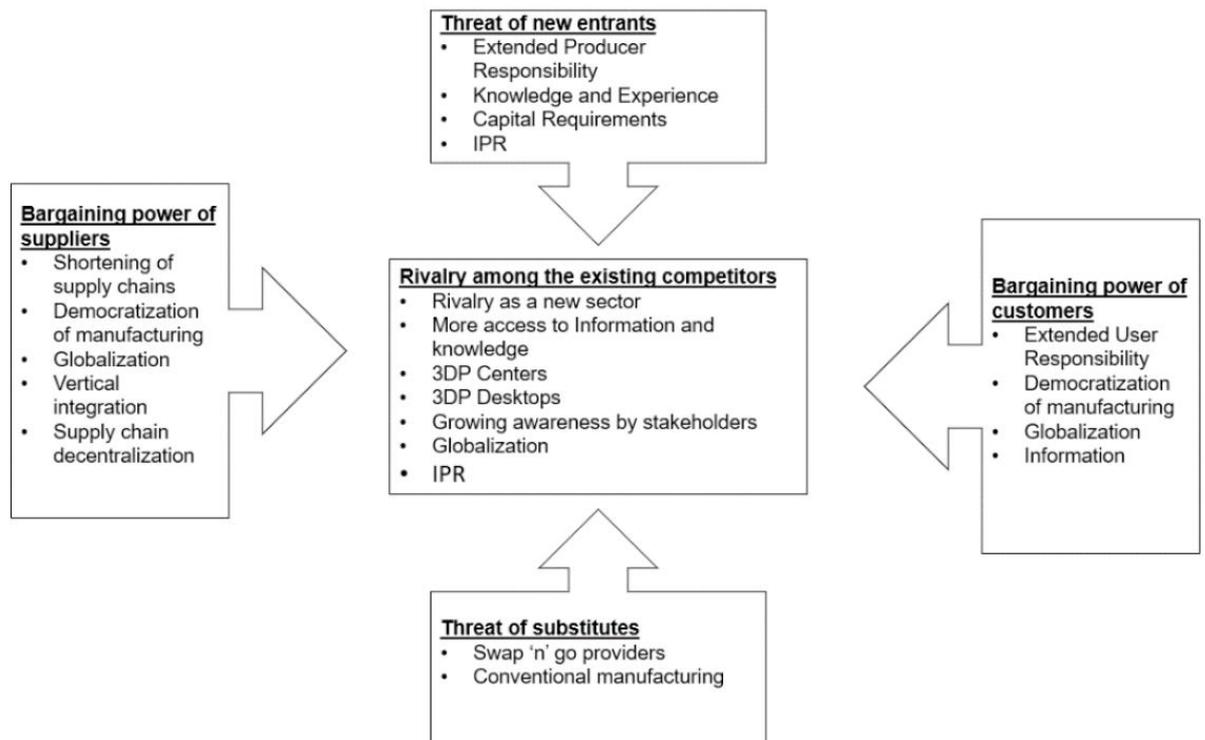


Figura 38 Modelo de las cinco fuerzas de Porter aplicado a la FA en una economía del conocimiento (Dias *et al.*, 2022).

3.1.2.1. Amenaza de nuevos competidores

La amenaza de nuevos competidores está relacionada con la altura de las barreras existentes y las represalias esperadas de las empresas que ya están instaladas en el mercado. Algunos ejemplos de barreras de entrada pueden ser las economías de escala, los requisitos de capital, los costos de cambio, el acceso a la distribución y los insumos necesarios. Por tanto, si las barreras de entrada son altas, los competidores recién llegados tienen más dificultades para penetrar ese mercado y, en consecuencia, eso contribuye a una mayor rentabilidad para las empresas establecidas (Weil, 1985).

Las barreras para entrar en cualquier industria siempre son muy elevadas, en Europa tiene el añadido del concepto de responsabilidad extendida del productor que obliga a los productores a tener recursos para manejar el producto al final del ciclo de vida, ya sea como capacidad de mano de obra, espacio y/o fondos financieros. Otras barreras son el conocimiento adquirido o “know-how” que da ventaja a las organizaciones veteranas, la mano de obra cualificada y los derechos de propiedad intelectual. Facilitar el acceso al conocimiento reduciría la importancia de algunas de estas barreras (Dias *et al.*, 2022).

3.1.2.2. Amenaza de productos y servicios sustitutos

Para entender la amenaza de productos y servicios sustitutos es importante explicar primero que lo que caracteriza a dos bienes como sustitutos es el hecho de que cumplen la misma o similar función y la existencia de una fuerte influencia sobre la estrategia de precios entre los productos o servicios de la industria. Por lo tanto, esto pone un techo a los precios, lo que

significa que la aparición de productos/servicios sustitutos afecta la rentabilidad de la industria. Los cambios tecnológicos también pueden tener un gran impacto en este aspecto, ya que las mejoras invisibles en industrias no relacionadas pueden aparecer repentinamente como un producto sustituto (Weil, 1985).

Para la tecnología FA, en concreto para los productos continuos, existen dos amenazas principales en el apartado de los sustitutos. La primera sería la faceta de modularidad de estos productos favorece la aparición de proveedores de *swap 'n' go*. Un proveedor de *swap 'n' go* es un fabricante calificado que está certificado para realizar actualizaciones de diseño o reparaciones en el producto, lo que permite a las personas no desechar ni reemplazar sus productos. El proceso tendría unos disparadores o alertas que informarían al usuario sobre la necesidad recambio o de un *swap 'n' go*; esto puede iniciarse en respuesta a varios factores, un ejemplo sería un requisito funcional. Una vez informado el producto se imprime para después ser instalado. La segunda amenaza es la incapacidad de la FA para competir con la fabricación convencional en el terreno de la producción en masa, y esto es muy importante en productos clave para la organización afectada (Dias *et al.*, 2022).

3.1.2.3. Poder de negociación del proveedor

El poder de negociación de los proveedores, es más intenso si la concentración del proveedor es mayor que la industria a la que vende, cuando los costes de cambio asociados son altos para las empresas, cuando los proveedores atienden a muchas industrias, cuando se les ofrecen productos diferenciados y no existe ningún sustituto para lo que ofrecen. Por lo tanto, cuando el lado del proveedor tiene más influencia en la negociación, afecta las ganancias potenciales de la industria e incluso puede amenazar a las empresas establecidas con la integración hacia adelante como competidores adicionales (Weil, 1985).

Un efecto importante de la FA en esta fuerza es la descentralización de las cadenas de suministro, cuyo efecto más apreciado es que las acorta. Al poder digitalizar las cadenas de suministro ya que es más fácil enviar el inventario como datos virtuales que en productos tangibles. Esto además implica que se puede automatizar la fabricación y monitorizar a distancia reduciendo el personal necesario. Se reducen las etapas y por tanto acercando el producto al consumidor final y por tanto reduciendo el poder de los proveedores. Por otro lado, la falta de variedad en proveedores de materiales y de tecnologías de información equilibra esta fuerza. También hay que considerar que los proveedores tradicionales también se pueden aprovechar de las ventajas que ofrece la FA con su descentralización (Dias *et al.*, 2022).

3.1.2.4. Poder de negociación del cliente

El poder de negociación de los clientes también puede establecer un tope en la rentabilidad de la industria, es decir, si los compradores tienen mucho poder en la negociación, pueden capturar más valor ejerciendo presión para obligar a bajar los precios. Por otro lado, los compradores también se vuelven más sensibles a los precios cuando los productos constituyen una fracción significativa de su estructura de costes, lo que los obliga a negociar más y si el

producto de la industria es demasiado rentable, en algunos casos, una oportunidad de integración hacia atrás puede amenazar a las empresas establecidas (Weil, 1985).

Esta fuerza se ha visto ampliamente potenciada por el gigantesco desarrollo de las TIC. Los clientes no solo han adquirido potentes herramientas de búsqueda, aumentando la información en su poder, sino que han surgido empresas y otros usuarios especializados en facilitarles esa información. Esto permite obtener una mayor transparencia de precios, costes de cambio reducidos y la capacidad de comparar precios y calidad en cuestión de minutos. Todo ello se suma al empoderamiento del cliente obtenido por el comercio electrónico. Si se enfoca en la FA, la democratización de la producción que ofrece ha permitido que surja una nueva clase de productores llamados "prosumidores". Los prosumidores se describen como consumidores que producen productos para cubrir sus propias necesidades, pero que también pueden venderlos. Si bien su área de acción aún no está regulada, esto puede verse como una ganancia de poder de los clientes frente a los fabricantes. Un último factor que puede añadir valor a esta fuerza es la posibilidad de que se introduzca una legislación de "Responsabilidad extendida del usuario". Esta legislación permitiría a un cliente reparar sus propios productos sin infringir sus garantías y por lo tanto eliminar parte de su dependencia de los fabricantes originales (Dias *et al.*, 2022).

3.1.2.5. Rivalidad entre competidores existentes

Un punto importante para la rivalidad entre los competidores existentes es la intensidad de esta fuerza, la cual está determinada por el crecimiento de la industria, las barreras existentes, los costes fijos, la diversidad de competidores, así como el tamaño y poder que tiene cada competidor. De manera similar a lo que sucede con las otras fuerzas, la intensidad de la rivalidad puede tener un impacto significativo en la rentabilidad de la industria (Weil, 1985).

Esta fuerza se ve ampliamente condicionada por el resto de fuerzas y por la intensidad con la que compiten las empresas, así como sobre qué bases compiten. El mercado FA ha experimentado una expansión de la industria del 7,5 % a casi 12 800 millones de dólares estadounidenses en 2020 a pesar de la pandemia. Aun así, este crecimiento es considerablemente menor dado que FA ha experimentado un crecimiento promedio del 27,4% en los últimos 10 años. No obstante, los analistas predicen que FA tendrá un impacto económico de 550 mil millones de dólares estadounidenses al año para 2025. Esto indica que el mercado FA presumiblemente sufrirá una alta tasa de crecimiento en los próximos años. Si a esto se une la gran adaptabilidad de la tecnología FA, puede a ver una mayor competitividad al poder adaptar las líneas de producción a otros productos con gran inmediatez. Se prevé entonces que la rivalidad un factor con gran alcance (Dias *et al.*, 2022).

3.1.3. Costes de fabricación

Para que una modificación o potencial avance cuaje y se convierta en la norma o una opción viable, en gran medida de los casos es imprescindible que además de los posibles beneficios para el proceso se traduzca en algún tipo de mejora económica. Una buena respuesta del capital invertido frente a los resultados obtenidos no solo facilita su implementación en el

mercado si no que puede alterar considerablemente la velocidad a la que puede ser extendida y desarrollada la tecnología. La FA ya ha demostrado en varias ocasiones la viabilidad de sus propuestas, pero en este apartado se intentará entender la situación en lo referente a la energía eólica. La FA posibilita muchos escenarios en los que se puede mejorar la cadena de suministro de la energía eólica. Si se mira al futuro el primer nodo de aplicación de la AM; y mejora de esta cadena sería en el I+D+I. Otro caso es la personalización. para el recurso eólico en ubicaciones específicas, de personalizar no solo los diseños de componentes sino las propias turbinas eólicas. En lo que a personalización se refiere, se puede ir un paso más allá y modificar múltiples diseños de palas, góndolas, turbinas y torres de parques eólicos individuales. Se podría incluso permitir que los fabricantes de equipos originales y los diseñadores de componentes empleen la FA junto con el modelado aerodinámico avanzado, la interfaz de red y los datos atmosféricos. Todo esto en conjunto puede suponer una explotación de los parques eólicos de una manera más eficiente, incrementando la producción anual de energía y reduciendo el coste nivelado de la energía/electricidad. Uno de los puntos en los que puede suponer un ahorro es en la sustitución del transporte de palas y torres grandes con los consecuentes gastos en operaciones de preparación e instalación de grúas por el transporte de los materiales al emplazamiento donde se realizará la construcción. Es entonces claro que existe gran potencial en la FA para revolucionar el sector eólico que o no ha sido aún introducido o se encuentra en sus primeros estadios. Un punto en común para estudiar y entender como el coste de fabricación afecta a los procesos de FA, sería la siguiente división de las fases del proceso. preprocesamiento, materiales, procesamiento y postprocesamiento. A continuación, se discutirá la relación de cada una de las fases con el coste total de fabricación que se puede esperar en la FA (Mann *et al.*, 2017).

3.1.3.1. Preprocesamiento

En la etapa del preprocesamiento se engloban las fases de diseño de la pieza y la configuración con la que se llevará a cabo la producción. Hay una diferencia importante entre modificar una pieza ya diseñada para la FA, donde la modificación consistirá en escalar la pieza o variar ligeramente los parámetros de diseño, a realizar un ejercicio de ingeniería inversa para adaptar una pieza fabricada con un método tradicional para poder fabricarla mediante FA. Esta segunda opción se categoriza por una elevada dificultad y la necesidad de invertir un gran esfuerzo relacionado directamente con la complejidad de la pieza en cuestión, los cuales se reducen muy considerablemente para el primer caso. Esto da lugar por tanto a una reducción considerable de los gastos de mano de obra para la producción mediante FA.

En esta etapa tiene mucho calado la fase de diseño, pues el resultado impactará considerablemente en la etapa de procesamiento. Un ejemplo sería un diseño que emplea menos volumen de material para conseguir la misma pieza, este caso claramente reduciría proporcionalmente el mismo coste en material, así como en tiempo de procesamiento pues no habría necesidad de emplearlo en primer lugar. Otros costes de preprocesamiento asociados con los consumibles del proceso FA incluyen hojas de construcción, placas de inicio y costes de la energía asociados con la temperatura del sistema FA. La mano de obra de los técnicos para el rebanoado u otros procesos de mecanizado necesarios y la configuración de la máquina también se incluye en los costos de preprocesamiento.

3.1.3.2. Materiales

Los materiales pueden considerarse los costes más sencillos de calcular y escalar para cualquier industria, esto se debe a que su aumento o disminución varía casi linealmente con la producción, en el caso de la *FA* con el volumen impreso. La excepción a esta particularidad serían los costes de los materiales de apoyo. Estos costes dependen del diseño de los voladizos sin apoyo, que superan un ángulo de apoyo mínimo. Los costes de materiales asociados con *FA* se han exagerado significativamente debido a las bajas tasas de producción. Por ejemplo, el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS) que se usa en los sistemas *FA* comerciales a menudo cuesta más de 100 \$/kg. En el moldeo por inyección, el ABS normalmente costará menos de 2,50 \$/kg. El principal motivo de esta diferencia son los volúmenes de producción comparativos y las sensibilidades de los materiales asociados con los filamentos utilizados en *FA*, como el contenido de humedad y la variación en el diámetro. Con el incremento de industrias que empleen la *FA*, es de esperar que los costes de materiales se normalicen y tiendan a los observados en la fabricación convencional.

3.1.3.3. Procesamiento

Para llevar a cabo la ejecución del proceso en sí mismo, se necesita asumir los costes derivados de la adquisición de los equipos y remplazos necesarios. Además de los costes en bienes existen también costes en servicios, contratos de mantenimiento y los costes de la energía requerida para la producción *FA*. Como en muchas otras industrias y procesos la inversión en equipos y mantenimiento suele ser el mayor coste asociado a la producción de *FA*. Se puede evaluar los costes para la mayoría de las plataformas *FA* industriales en torno a 30 dólares por hora de tiempo de procesamiento que, en muchos casos, pueden alcanzar la cifra de más de 100 dólares por hora. Estos costes incluyen la amortización de los costes del equipo, así como los costes aplicados a la mano de obra, instalaciones y gastos generales.

3.1.3.4. Postprocesamiento

Por último, se incluirían los costes del postprocesamiento, que suelen ser obviados en la producción de *FA*. Estos costes se refieren a la retirada del soporte, el postcurado, el prensado isostático en caliente, el maquinado sustractivo, el pulido u otros métodos para mejorar el acabado de la superficial, recubrimientos para mejorar la durabilidad y calificación/certificación de las propiedades del material. Este último punto consiste en la fabricación de probetas a la vez que el resto de piezas, con las que así poder realizar ensayos destructivos. Las probetas se caracterizan y se emplean para averiguar el límite superior e inferior del rendimiento de la pieza. En los casos en donde los costes de materiales son elevados, es habitual incurrir en costes considerables en la etapa de calificación. Por el contrario, los requisitos de herramientas suelen ser bajos y los procedimientos de calificación son menos estrictos. Es por tanto que el mercado de herramientas puede tener barreras de entrada más bajas para el procesamiento *FA*.

3.1.4. Modelo de costes

Existen números modelos de coste dependiendo del tipo de empresa o industria, pudiendo llegar a ser tan específicos como sea necesario, esto permite un ajuste de los resultados superior para el caso concreto, pero limita su uso en otras circunstancias. En este texto se presenta el modelo de Ding *et al.* (2021) que se especifica genérico para todas las tecnologías FA disponibles. Se compone de cinco categorías distintas de costes: coste indirecto de la máquina ($C_{máquina}$), coste indirecto no relacionado con la máquina ($C_{non-máquina}$), coste de mano de obra (C_{labor}), coste de material ($C_{material}$) y coste de consumo de energía ($C_{energía}$). Para la ejecución de cada proceso, el coste de fabricación ($C_{proceso}$) es la suma de todos los elementos del costo tal que:

$$C_{proceso} = C_{máquina} + C_{non-máquina} + C_{labor} + C_{material} + C_{energía} \quad (1)$$

Para formular los costes indirectos de la máquina ($C_{máquina}$), se incluyen la tasa de coste de la máquina del sistema FA (C'_{AM}), junto con la tasa de coste de la máquina acondicionadora ($C'_{condición}$). Por lo tanto, el coste indirecto de la máquina depende tanto de las tasas de coste de la máquina como de los tiempos de uso.

$$C_{máquina} = C'_{AM} \times (T_{establecer} + T_{construcción}) + C'_{condición} \times T_{condición} \quad (2)$$

Los costes indirectos no relacionados con la máquina ($C_{non-máquina}$) dependen de una tasa de coste que refleja los costes de infraestructura y los gastos generales ($C'_{non-máquina}$) y el tiempo del proceso.

$$C_{non-máquina} = C'_{non-máquina} \times T_{proceso} \quad (3)$$

Se necesitan actividades específicas de mano de obra durante el proceso de preparación, instalación, eliminación y separación. Por lo tanto, el coste de la mano de obra se puede expresar como la tasa de coste de la mano de obra ($C'_{mano de obra}$) multiplicada por la duración de los pasos del proceso que requieren mano de obra técnica:

$$C_{labor} = C'_{mano de obra} \times (T_{prep} + T_{establecer} + T_{eliminación} + T_{separación}) \quad (4)$$

El coste de los materiales utilizados involucra el precio del material ($p_{material}$) y la masa total del material depositado de los productos finales (m). Debido a que las pérdidas de material y los flujos de desechos ocurren a lo largo del proceso, el coste del material se modifica por un factor de desperdicio (ω). Por lo tanto, el modelo de coste de materiales se puede especificar como:

$$C_{material} = p_{material} \times m \times \omega \quad (5)$$

Debido a que en cada paso están involucrados diferentes sistemas, las tasas de consumo de energía durante la configuración de la construcción ($E'_{configuración}$), la construcción real

($E'_{\text{construcción}}$) y durante el acondicionamiento del producto ($E'_{\text{condición}}$) varían. Por lo tanto, el consumo total de energía se puede expresar como:

$$E_{\text{proceso}} = E'_{\text{instalación}} \times T_{\text{instalación}} + E'_{\text{construcción}} \times T_{\text{construcción}} + E'_{\text{condición}} \times T_{\text{condición}} \quad (6)$$

Juntos, esto permite la estimación de los costes de energía ($C_{\text{energía}}$) basados en un precio de electricidad comercial ($p_{\text{electricidad}}$):

$$C_{\text{energía}} = E_{\text{proceso}} \times p_{\text{electricidad}} \quad (7)$$

El paso final en este análisis es desglosar el coste del proceso hasta el nivel de coste unitario. Suponiendo que los productos fabricados en el proceso sean idénticos, el coste unitario se puede expresar como:

$$C_{\text{unidad}} = C_{\text{proceso}} / N_{\text{construcción}} \quad (8)$$

Este modelo de costes se puede llevar aún más allá si se incluye los costes relacionados con los fallos del proceso, esto se puede realizar incluyendo una variable que permita entender las posibilidades de que se produzca un fallo. Esta variable podría ser la medición del tiempo medio entre fallos ocurridos. Por lo tanto, se podría profundizar más para obtener datos concretos que apenas tengan desviación con la realidad, que serían interesantes para profundizar en futuras líneas de investigación.

3.1.5. Casos adicionales de estudio

Una vez observado y entendido el comportamiento de la economía y la distribución de gastos para la FA, es interesante comprender donde se haya en comparación con otras tecnologías. Hoy por hoy, el proceso aditivo es el principal elemento que genera costes en FA y actualmente no es competitivo con los procesos de fabricación tradicionales (Mann *et al.*, 2017). En los siguientes casos se compara el tiempo y el coste de fabricar un conjunto de piezas mediante las técnicas de manufacturación convencional (MC), SLM y DED. Gracias a los cuales se podrá obtener la viabilidad de la FA en comparación con la manufacturación convencional (Price *et al.*, 2021).

3.1.5.1. Producción de una única pieza

En la comparación de las dos tecnologías (figura 39), la MC ha tenido históricamente una ventaja sobre la FA a la hora de producir una única pieza, en concreto en el tiempo de fabricación. En el caso de SLM se debe al largo tiempo de preparación de capas que afecta a su tiempo de impresión, elevando los costes. La tecnología DED puede llegar a ser competitiva con la MC en algunos casos, gracias a la mejora de sus tasas de deposición, que se prevé que mejore en el futuro.

La tecnología DED puede llegar a ser menos costosa y ser más rápida que la MC para piezas más grandes y que tengan más de 0,5 kg de masa eliminadas durante el mecanizado (M1-M4, F1 y F2, A1-A3). El motivo es que el tiempo de mecanizado se reduce prácticamente a cero para

piezas de forma casi neta. Otra ventaja es que las tecnologías de FA pueden funcionar sin supervisión. En el caso de MC dan mejores datos al ser más rápida y menos costosa en piezas más pequeñas y simples que se produzcan en una sola pieza. Hay que tener en cuenta que en estos casos no se tienen en cuenta factores como la disponibilidad de la maquina o el tiempo de funcionamiento discontinuo que podrían favorecer los datos para la FA.

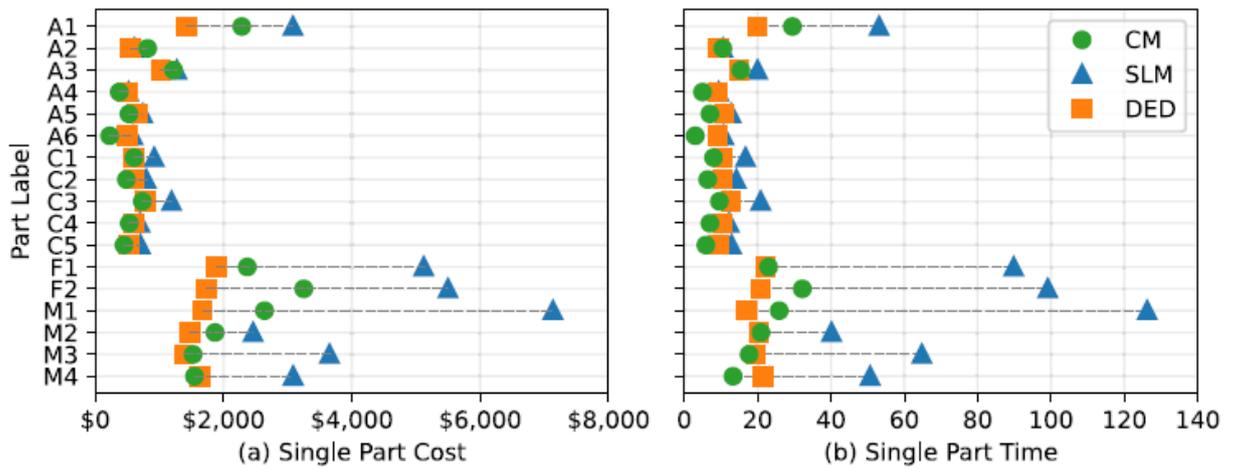


Figura 39. Cálculo, para FA y MC, (a) del coste de fabricación y (b) el tiempo de maquinado para una sola pieza (Price et al., 2021).

3.1.5.2. Producción de múltiples piezas

Para este tipo de fabricación en masa, un factor muy importante es la economía de escala. Los tiempos de fabricación se verán afectados por el ajuste de las máquinas para fabricar únicamente un tipo de pieza. Esto se refleja sobre todo en la MC, al configurar las fijaciones y otros parámetros. Esto reduce directamente el coste en la MC e indirectamente en la FA al afectar de la misma forma para operaciones de mecanizado llevadas a posteriori de la impresión.

En la tabla 5 se puede observar un desglose de que tecnología ha sido menos costosa para cada pieza fabricada según sus características. Para piezas pequeñas (p. ej., A4-A6 y C1-C5), SLM se convierte en la opción más económica con un tamaño de lote de solo dos piezas. Después de 10 partes, SLM se convierte en la opción más económica para todas las partes excepto las partes grandes del motor (M1, M3 y M4) y la Parte A6. Las partes del motor son piezas cilíndricas altas que requieren muchas capas de polvo y un largo tiempo de impresión. La pieza A4 es una pieza de arandela y es muy fácil de fabricar, por lo que MC será la opción más económica incluso teniendo en cuenta la economía de escala. Cada pieza requiere una nueva configuración y requerirá tiempo y costes adicionales para su fabricación. Estos costes adicionales supondrán que la FA sea más factible en general y a escala, especialmente si el mecanizado posterior a la FA se puede lograr sin dañar la configuración.

Tabla 5. Tecnología de fabricación menos costosa por tamaño de pedido y pieza (Price et al., 2021).

Pieza	Masa eliminada (lb.)	Altura de construcción (in.)	Tecnología menos costosa			
			1	2	3	4
A1	18,72	6,906	DED	DED	DED	DED
A2	3,27	0,25	DED	SLM	SLM	SLM
A3	6,84	0,969	DED	SLM	SLM	SLM
A4	0,04	0,08	MC	SLM	SLM	SLM
A5	0,15	0,38	MC	MC	SLM	SLM
A6	0,02	0,375	MC	MC	MC	MC
C1	0,33	1,348	DED	MC	SLM	SLM
C2	0,3	0,813	MC	MC	SLM	SLM
C3	0,36	1,713	MC	MC	SLM	SLM
C4	0,16	0,406	MC	SLM	SLM	SLM
C5	0,28	0,75	MC	MC	SLM	SLM
F1	11,39	15	DED	DED	DED	SLM
F2	2,53	17,25	DED	DED	DED	SLM
M1	64,49	22,71	DED	DED	DED	MC
M2	25	4,06	DED	DED	SLM	SLM
M3	19,46	9,58	DED	DED	MC	MC
M4	26,54	5,75	MC	MC	MC	MC
MC es el menos caro			8	7	3	4
DED es el menos caro			9	6	4	0
SLM es el menos caro			0	4	10	13

3.2. Comparativa del desarrollo de la energía eólica offshore

Los siguientes puntos de investigación tratan la comparativa de los retos y medidas de impulso de la eólica offshore vista desde el ángulo de la Unión Europea, EE.UU. y China.

3.2.1. Punto de situación

Para entender la importancia de revolucionar la industria eólica con nuevas técnicas de manufactura como la FA, es primordial entender que supone hoy en día la energía eólica para el marco energético global y que evolución se espera que se produzca. En la época actual, el desarrollo e implementación de fuentes de energía renovables se ha convertido en una de las principales áreas de la nueva estrategia energética en el mundo. Es un tema de tal importancia que afecta la política interna de muchos países. Tanto es así, que ya es una tendencia que los gobiernos asignen recursos financieros considerables para la implementación de programas para el desarrollo de fuentes de energía alternativas. Los diferentes estados utilizan una variedad de opciones para incentivar el apoyo económico: beneficios fiscales y crediticios, tarifas moderadas, subsidios, etc. (Korolev, 2022). Y es entre todas estas energías renovables, donde la eólica está jugando un gran papel para satisfacer la demanda mundial de electricidad estabilizando los precios a largo plazo y a la vez respaldar la económica local, la mitigación de las emisiones de carbono, la reducción del uso de agua del sector eléctrico y la estimulación de la innovación tecnológica. Todo ello en consonancia con los objetivos detrás del apoyo a las energías renovables, ya que las políticas para apoyar la energía eólica a menudo están diseñadas para alinearse con objetivos más amplios (Saidur *et al.*, 2010).

Dentro del paraguas de la energía eólica se está potenciando la llamada energía eólica marina u “offshore”, esto se debe a que está ofreciendo una contribución cada vez más importante a la producción de energía baja en carbono para compensar el calentamiento global antropogénico. Los avances tecnológicos recientes aumentan la viabilidad de esta industria relativamente nueva y animan a seguir desarrollándola e invirtiendo en su futuro (Peters *et al.*, 2020). En el presente apartado se quiere estudiar y comparar la situación actual de la legislación y predisposición hacia la energía eólica marina en los entornos de Europa, Estados Unidos y China.

3.2.2. Recursos eólicos marinos europeos

La ventaja de Europa como pionera en energías renovables en alta mar puede basarse en el enorme potencial que ofrecen los mares de la Unión Europea, desde el Mar del Norte y el Mar Báltico hasta el Mediterráneo, desde el Atlántico hasta el Mar Negro, así como los mares que rodean la región ultraperiférica de la UE. regiones y los países y territorios de ultramar. Aprovechar este potencial tecnológico y físico es crucial si Europa quiere alcanzar sus objetivos de reducción de emisiones de carbono para 2030 y convertirse en climáticamente neutral para 2050 (European Commission, 2020).

3.2.2.1. Licencias

En Europa se tiende a la racionalización y simplificación del proceso de concesión de licencias. Entre los países europeos más implicados en el desarrollo de proyectos eólicos marinos se han implementado diferentes mecanismos para facilitar el proceso. Por ejemplo, en Dinamarca y Escocia se ha adoptado el llamado sistema *One-Stop-Shop*, en el que un solo organismo se encarga de gestionar todo el proceso de licenciamiento. En Inglaterra se ha reducido el número de organismos encargados de la concesión de licencias y la cantidad de licencias requeridas. Y en otros como Los Países Bajos es el propio gobierno el que realiza investigaciones preliminares para determinar la posibilidad de efectos adversos sobre el medio ambiente (deCastro *et al.*, 2019).

En la Unión Europea el Reglamento de Electricidad es la base que indica las reglas sobre la integración de proyectos renovables a gran escala en el sistema energético y el mercado eléctrico. Para los proyectos nacionales de energías renovables en alta mar, las reglas del mercado son similares a las que definen el mercado en tierra del mercado eléctrico integrado. No hay que olvidar que, aunque los proyectos nacionales seguirán constituyendo una gran parte de los proyectos marinos, se espera que los proyectos renovables marinos transfronterizos más complejos sean cada vez más importantes en la mayoría de las cuencas marinas de Europa en el futuro. Los proyectos innovadores, como las islas de energía o los proyectos híbridos y la producción de hidrógeno en alta mar, enfrentan desafíos específicos y el marco regulatorio actual no se desarrolló teniendo en cuenta dichos proyectos (European Comission, 2020).

A día de hoy, se diseñan los proyectos híbridos de tal manera que sean compatibles con la legislación actual de la UE y beneficiosas para el conjunto de la sociedad. el establecimiento de una zona de licitación en alta mar para un proyecto híbrido se puede llevar a cabo de una manera que sea compatible con las reglas del mercado eléctrico y ser una opción adecuada para una gran ampliación de las energías renovables en alta mar, esto garantiza que las energías renovables puedan integrarse plenamente en el mercado mediante la integración simultánea de energías renovables y el uso de interconexiones transfronterizas para el comercio. De esta manera la electricidad obtenida renovablemente se puede redirigir allí donde se necesita, convirtiéndose en parte de los horarios de electricidad y apoyando la seguridad de suministro regional. Otro beneficio es la reducción de gravosas acciones correctivas posteriores al mercado. Además, proporciona fuertes señales de precios para fomentar el desarrollo de la demanda en alta mar, como el hidrógeno verde de la electrólisis (European Comission, 2020).

3.2.2.2. Medidas de apoyo económico

La Unión Europea se ha marcado como objetivo alcanzar una capacidad instalada de 300-40 GW de energía renovable en alta mar para 2050. Esto requerirá identificar y comenzar a utilizar un número muy alto de lugares para producir energía renovable en alta mar, así como conectarlos a la red de eléctrica. Todo esto respetando el medio ambiente y siendo capaz de convivir con otras actividades de importancia en cada zona como el turismo o la pesca (European Comission, 2020).

Para poder seguir desarrollando estos proyectos es necesario invertir para tener preparada una infraestructura de red lo suficientemente robusta que permita explotarlos con seguridad y garantías. Para ello la Comisión Europea, los estados miembros y los reguladores desarrollarán un marco, a partir de 2021, para realizar inversiones anticipadas en redes marinas para prepararse para la futura ampliación y desarrollo. Además, la Comisión publicará una guía de la UE sobre cómo coordinar el reparto de costes y beneficios a través de las fronteras para proyectos de transmisión de energía combinados con el desarrollo de proyectos de generación de energía que se llevará a cabo a partir de 2023 (European Commission, 2020).

Otra medida económica es movilizar las inversiones del sector privado. La inversión necesaria para alcanzar el objetivo de 2050 está calculada alrededor de los 800.000 millones de euros. De esta cantidad unos dos tercios servirían para financiar la infraestructura de red asociado y el tercio restante para la generación el alta mar. Por lo tanto, se tendrá que canalizar a este sector una cantidad de capital significativamente mayor que la que se ha canalizado en proyectos previos. La inversión anual en redes terrestres y marinas en Europa durante la década hasta 2020 ha ascendido a alrededor de 30 000 millones de EUR, pero debe aumentar por encima de los 60 000 millones de EUR en la próxima década y luego aumentar aún más después de 2030. La mayoría de esta cantidad se espera que sea aportada por inversores privados (European Commission, 2020).

3.2.3. Recursos eólicos marinos estadounidenses

Estados Unidos tiene un enorme potencial, con sus kilómetros y kilómetros de costa sus recursos de energía eólica marina apenas se han explotado. Se calcula que EE. UU. tiene acceso potencial a más de 4000 GW (AWEA, 2022), lo que supondría que puede llegar a aportar hasta cuatro veces la capacidad de generación del sistema eléctrico estadounidense actual, aunque estos valores brutos disminuirían a un 60 % cuando entran en juego la protección del medioambiente y las limitaciones socioeconómicas (deCastro *et al.*, 2019).

3.2.3.1. Licencia

El proceso de concesión de licencias en los Estados Unidos es un sistema complejo que involucra múltiples autoridades y agencias, tanto vertical como horizontalmente, en el que se aplica una gran cantidad de legislación tanto en aguas federales como estatales. La diferenciación entre los proyectos de eólica marina ubicados dentro de las aguas oceánicas estatales y aguas oceánicas federales es importante. Las estatales cubren, en la mayoría de casos con alguna excepción, las primeras tres millas náuticas medidas hacia afuera de la costa, y las aguas oceánicas federales se extienden desde el límite exterior de las aguas oceánicas estatales hasta el límite exterior de la zona económica exclusiva (hasta 200 millas náuticas desde la línea de base) (Tethys | *Environmental Effects of Wind and Marine Renewable Energy*, 2016).

Los interesados en llevar a cabo un proyecto de eólica marina en aguas federales deben obtener un contrato de arrendamiento para la ocupación de la plataforma continental exterior emitido por el BOEM, en caso de ser aguas estatales el órgano que lo adjudica es el propio

estado costero, una licencia hidroeléctrica emitida por la Comisión Federal Reguladora de Energía. Por otro lado, los sitios de arrendamiento se adjudican mediante una subasta. A su vez, los interesados deben participar en otros procesos, como la evaluación ambiental, establecidos por varias regulaciones, así como obtener otros permisos emitidos por diferentes agencias federales. Además, los desarrolladores deben cumplir con otras reglamentaciones, consultas y permisos a nivel estatal y local, ya que según (Lehmann *et al.*, 2017), aunque un proyecto se desarrolle en aguas federales, su cableado discurre por aguas estatales y también puede producir impactos en zonas costeras. A todo esto, hay que sumar, que los estados costeros con un Plan de Manejo de la Zona Costera aprobado por el gobierno federal y las aguas o tierras oceánicas estatales que pueden verse afectadas por un proyecto que recibe permisos o financiamiento del gobierno federal, tiene autoridad para exigir que el proyecto sea consistente con dicho plan federal, de acuerdo con las disposiciones de la Ley de Manejo de la Zona Costera (Dhanju & Firestone, 2009; Lehmann *et al.*, 2017; Portman, 2010).

3.2.3.2. Medidas de apoyo económico

El principal incentivo empleado en EE.UU. son los créditos fiscales a la producción, cuya función ayudar a los promotores a afrontar los costes iniciales de la inversión en eólica marina (deCastro *et al.*, 2019).

Por otro lado, el 29 de abril de 2022 28 miembros de la Cámara de Representantes enviaron una carta a la presidenta Kaptur y al miembro de mayor rango Simpson instando al Subcomité de Asignaciones de Energía y Agua de la Cámara a proporcionar financiamiento sólido para inversiones en transmisión e infraestructura de red en el proyecto de ley del año fiscal 2023. En la carta, los miembros expresaron su apoyo a las disposiciones de transmisión incluidas en la Ley de Inversión en Infraestructura y Empleos recientemente promulgada, que permitió al gobierno federal invertir 2,5 mil millones de dólares en gastos directos para nuevos proyectos de transmisión. Sin embargo, también reconoce que este financiamiento es inadecuado para lograr la descarbonización profunda de su economía necesaria para cumplir con sus objetivos climáticos. Las inversiones federales adicionales para la nueva infraestructura de transmisión interregional adaptarían la red para resistir los efectos del cambio climático, reducir los costes de electricidad para los consumidores y proporcionar un mayor acceso a electricidad limpia (AWEA, 2022b).

3.2.4. Recursos eólicos marinos chinos

Al finalizar el año 2007 China había aportado el 15,17 % del PIB mundial, consumido el 23,18 % de la energía primaria y emitido el 27,61 % del CO₂ del mundo. Esta cifra se aproxima a las emisiones combinadas de EE.UU. y la UE (27,63%) en el mismo año. Para abordar estos problemas y cumplir su compromiso con el Acuerdo Climático de París, China está pasando de los combustibles fósiles como el carbón como fuente de energía a la energía renovable. Debido a su abundante recurso de energía eólica marina, la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma de China identificó la energía eólica marina como una industria emergente estratégica. La mayoría de los parques eólicos terrestres chinos están ubicados en el noroeste y el norte de China, lejos de las regiones de alto consumo de electricidad a lo largo de la costa. Los parques

eólicos marinos en estas regiones ayudarían a satisfacer la creciente demanda de energía utilizando fuentes cercanas. También tienen la ventaja de un impacto visual mínimo visto desde la tierra y conflictos mínimos de uso de la tierra en áreas costeras densamente pobladas (Wei *et al.*, 2021).

3.2.4.1. Licencia

En China se aplican prácticamente las mismas políticas fundamentales para las energías renovables que a la industria de la energía eólica marina. La Ley Nacional de Energías Renovables es el reglamento que rige todas las energías renovables, se promulgó en 2006 y se revisó en 2009. La política de compra de energía total, las reglas de fijación de precios y el Fondo Nacional de Energías Renovables se promulgaron en 2010. Estas políticas generales para las energías renovables no son las únicas que se aplican, existen regulaciones específicas para la industria de la energía eólica marina para abordar su caso concreto dentro de las energías renovables (*The renewable energy law of People's Republic of China*, 2009).

Para gestionar las fuentes de energía renovable marinas se necesita la participación de varios ministerios y agencias, dependiendo de su función y el área administrativa a la que pertenezcan y esto puede generar múltiples retrasos (Chang & Wang, 2017).

3.2.4.2. Medidas de apoyo económico

El programa de concesiones para los años 2010-2015 se consideró un fracaso en este país, debido a los retrasos y las bajas rentabilidades de los proyectos. Esto supuso el lanzamiento de una reforma de la política de precios marcados para la energía eólica en 2014. En mayo, la Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma delegó la aprobación de los proyectos de energía eólica a la autoridad provincial, luego anunció el "*Feed-in-Tariff*" en junio. Los precios en la red para proyectos eólicos marinos en las zonas intermareales y costeras, lo que significaba que los desarrolladores eólicos marinos recibirían estos precios, fueron de 0,75 CNY/kWh y 0,85 CNY/kWh, respectivamente, para los proyectos en operación antes de finales de 2016. Estos precios crearon una división de opiniones, por un lado, se piensa que son unos precios bajos comparados con los ofrecidos en Europa y por otro lado no tiene sentido esa comparación ya que los costes en China son menores y por tanto el precio debe reflejarlo (Wei *et al.*, 2021).

Otros mecanismos utilizados para promover inversiones en renovables son la aplicación de subsidios, préstamos y excepciones fiscales. Además, con la llegada de la Ley Nacional de Energías Renovables de 2009 las compañías de la red eléctrica están obligadas a comprar la toda la energía que se produzca, aunque se compre en pérdidas porque estas serán después compensadas por el gobierno (deCastro *et al.*, 2019).

3.2.5. Comparativa

Queda patente que la situación actual y el futuro de la energía eólica marina está totalmente atado con las decisiones de estas tres organizaciones al tener gran parte de la tecnología y fondos disponibles para su desarrollo. Que la dependencia energética y las emisiones de

carbono sean asuntos cada vez de mayor calado no hace más que impulsar y reafirmar la necesidad de invertir en las energías renovables y en concreto en la energía eólica marina.

La situación enmarca claramente que Europa tiene el conocimiento y la tecnología más avanzados en lo que respecta a la tecnología eólica marina. Todos sus planes dirigen a seguir potenciando este sector que tiene el doble efecto de potenciar su independencia económica y crear multitud de puestos de trabajo, muy necesarios tras la pandemia del COVID-19.

Estados Unidos ha estado liderando en el sector eólico en tierra, pero parece no haber dado el mismo impulso a su sector eólico marino, viendo las evoluciones de otros países y los paquetes de medidas parece que esta tendencia cambiara pronto y con tecnología puntera no hay duda de que es un reto que pueden afrontar.

China tiene un problema de polución que lleva años teniendo en jaque a la población, el gobierno ha dado un giro en su política y su forma de producir energía, dejando los combustibles sólidos de lado por una apuesta a las renovables. Aunque van retrasados en el aspecto tecnológico, la potencia de su economía les permite traer talento y tecnología del exterior para estar al día con las otras potencias.

3.3. Aplicaciones futuras

Para poder entender el futuro de una tecnología emergente como la FA es habitual trasladar su situación a la “Gartner *hype curve*” o curva de tendencia de Gartner. Existen cinco etapas que definen la curva de tendencia: disparador tecnológico, pico de expectativas infladas, valle de desilusión, pendiente de iluminación y meseta de productividad. La figura 40 resume algunos de los tipos de información que están disponibles sobre las tecnologías a lo largo de la curva de exageración y el estado de las tecnologías a medida que se mueven a lo largo de esas curvas. Esta curva está pensada para ayudar a las empresas a decidir cuándo deben o no invertir en una tecnología. Así se puede evitar, por ejemplo, invertir cuando una tecnología vive una época de promoción. Otro aspecto en el que ayuda es en discernir cuando algo está siendo exagerado y determinar aproximadamente cuántas empresas están empleando una tecnología. En la etapa “pendiente de iluminación” menos del 5% de las empresas han adoptado una tecnología. Por tanto, las empresas pueden hacer uso de la curva de tendencia para comprender lo que sus competidores pueden estar haciendo con una tecnología y determinar y caracterizar su propia estrategia con respecto a tecnologías particulares. (Shi & Herniman, 2022).

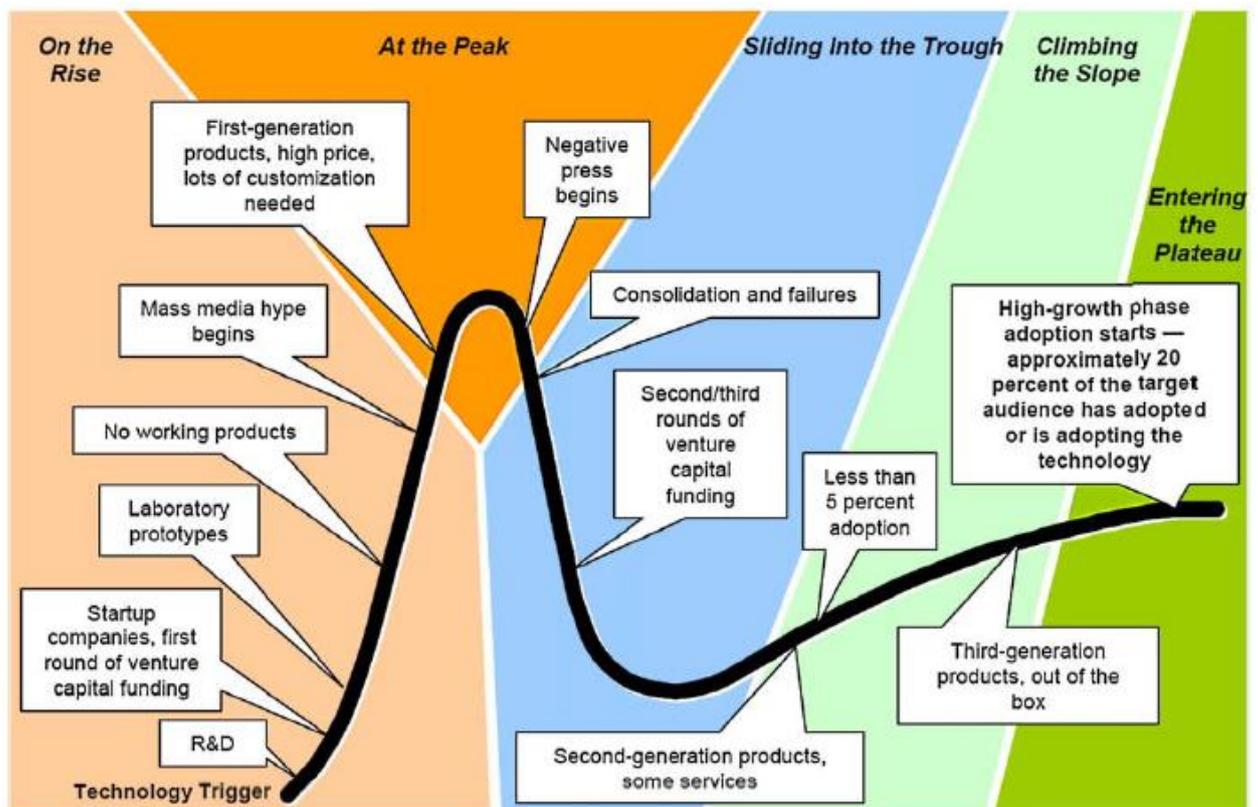


Figura 40. Curva de tendencia e información de la tecnología (O'Leary, 2008).

La curva de tendencia (figura 41) de FA muestra que las principales aplicaciones maduras de la FA se encuentran en las industrias de creación de software y las empresas de servicios que ofrecen impresión 3D. Otra aplicación que se puede considerar para la meseta de productividad es la extrusión de material mediante FA. Y en la “pendiente de iluminación” se encuentran

industrias de herramental o de automoción. Y como se puede ver en la curva, existen muchas otras aplicaciones que se espera que maduren en los próximos años.

A lo largo del 2018 el sector de la salud ha incrementado su uso de FA y pretende seguir creciendo con la creciente demanda de implantes y prótesis. Otras aplicaciones que se esperan que avance es la impresión 3D de metal. Y la tecnología que espera un crecimiento más fuerte es la impresión 4D, que consiste en imprimir objetos en 3D que puedan transformarse después en otra estructura, gracias al dinamismo que promete (V., 2019).

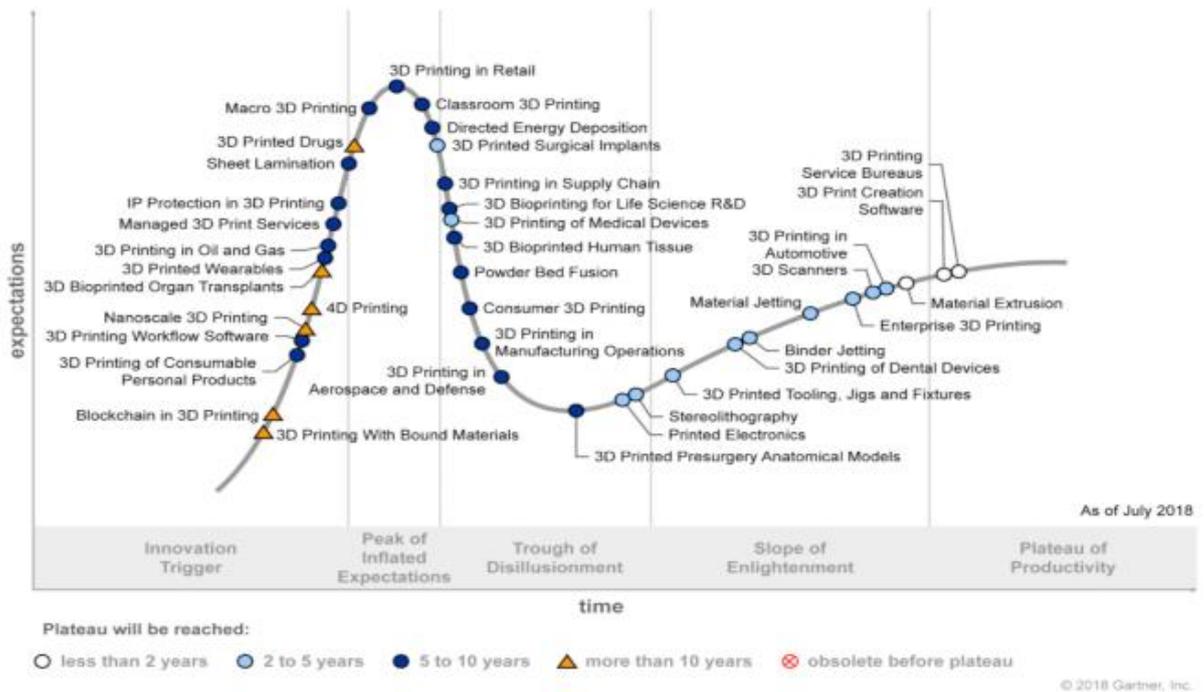


Figura 41. Curva de tendencia de la FA (V., 2019).

En términos de escala, existen nuevos fabricantes de equipos que desarrollan sistemas que son uno o dos órdenes de magnitud más grandes y más rápidos que las capacidades actuales de Cincinnati BAAM. Ingersoll *Machine Tool Company* anunció el desarrollo de *Wide High Additive Manufacturing (WHAM)*, se puede observar en las figuras 42 y 43. El sistema está construido sobre una plataforma de componentes modulares, el tamaño de la máquina se puede personalizar según varias especificaciones. Ingersoll tiene experiencia en el desarrollo de máquinas con zonas de trabajo de hasta 4 pies de ancho, 20 pies de alto y 250 pies de largo. El sistema WHAM incluye un sistema de intercambio automático para la extrusora de impresión con un accesorio de fresado de 5 ejes de alta velocidad para operaciones de acabado sustractivo convencional. Este sistema de escala permite la fabricación directa de piezas (moldes, palas, góndolas, etc.) competitivas con las necesidades actuales de fabricación eólica (Sher, 2018).



Figura 42. Vista frontal de INGEROLL – MASTERPRINT® 3X (INGEROLL - MasterPrint® 3X, 2022)

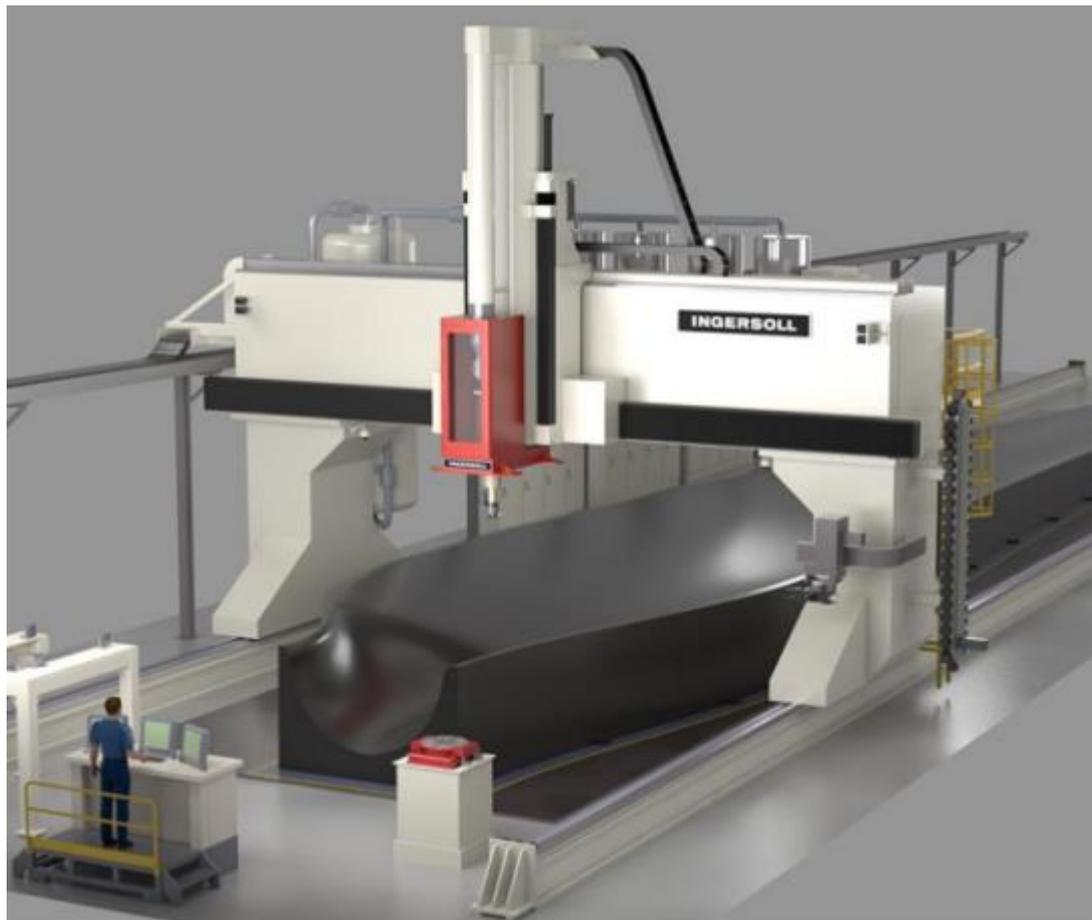


Figura 43. Simulación de INGEROLL – MASTERPRINT® 3X (INGEROLL - MasterPrint® 3X, 2022).

En términos de aplicaciones, existe potencial para fabricar directamente palas de turbinas eólicas (figura 44). Pero tanto los procesos como los materiales requieren aún de más

desarrollo e innovaciones. Ahora mismo se emplea fibra de carbono de corte corto, que confiere gran rigidez, pero no tienen la resistencia necesaria para grandes estructuras. Se está trabajando para obtener sistemas alternativos que den las características necesarias al material. Como un patrón de relleno que se puede ver en la figura 45. También existe un gran potencial para imprimir pequeños aerogeneradores, pero aún requieren de mucho desarrollo para tener una aplicación real, se puede ver en figura 46.



Figura 44. Pala eólica impresa en 3D (Post *et al.*, 2017b).

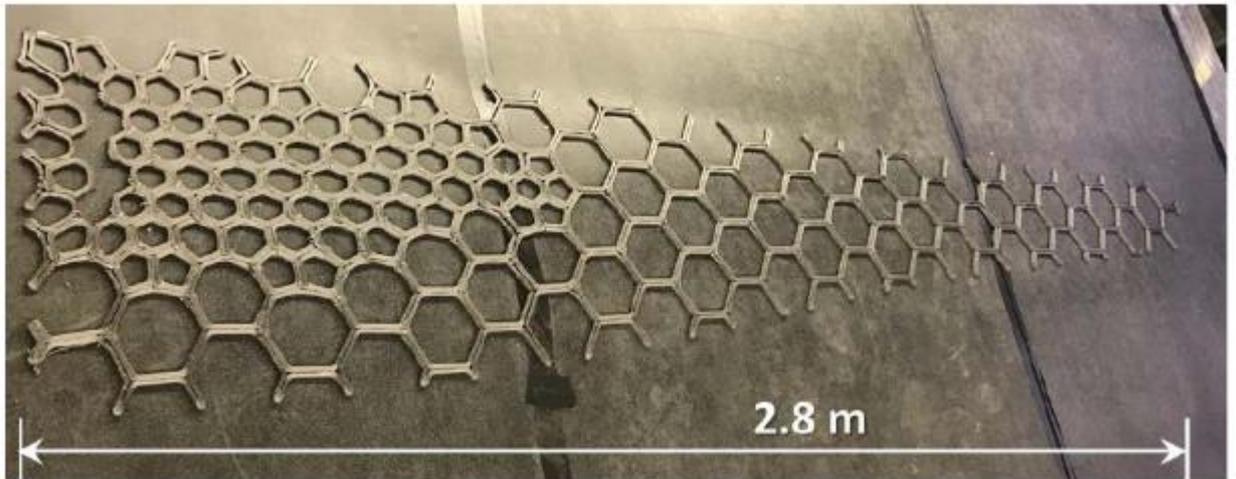


Figura 45. Patrón de relleno para palas eólicas impresas en BAAM 91 (Seokpum *et al.*, 2018)



Figura 46. Turbina eólica a media escala. Impresa con un PrintrBot de bajo coste (Bassett *et al.*, 2015).

Otra tecnología emergente es la impresión de metal a gran escala. Existen ejemplos como Arcemy de la empresa AML3d (figura 47) que puede imprimir metal en escalas de medio a gran tamaño.



Figura 47. AML3D's ARCEM.

Una aplicación que está despertando mucho interés en la impresión de la torre del aerogenerador, mostrada en la figura 48. La división de fabricación de aerogeneradores de GE, *GE Renewable Energy*, ha abierto una nueva instalación de investigación y desarrollo dedicada a la impresión 3D de la base de hormigón de las torres de aerogeneradores. La instalación se encuentra en Bergen, Nueva York y lleva a cabo una investigación sobre la FA de la parte inferior de las torres de turbinas eólicas in situ en varios parques eólicos, ya que la empresa busca reducir los costos de transporte y crear oportunidades de empleo adicionales.



Figura 48. Impresión de una torre de aerogenerador (COBOD, 2020).

4. Conclusiones

El presente trabajo tiene como objetivo el desarrollo de un estado del arte sobre las aplicaciones de las tecnologías de fabricación aditiva en aerogeneradores en el periodo comprendido entre 2017-2022. Su redacción está motivada por un seguimiento continuo de las últimas tecnologías y aplicaciones de esta temática en pleno crecimiento. Para entender mejor no solo la situación actual sino la prospectiva se han estudiado dos bloques de objetivos específicos. El primero pretende indagar en la relación de la industria con la economía y cómo la inclusión de la FA la modifica. El segundo bloque busca estudiar y comparar la legislación y predisposición hacia la energía eólica marina en los entornos de Europa, Estados Unidos y China.

Actualmente se dispone de un gran número de procesos aditivos pero cada tecnología FA tiene sus propias limitaciones de fabricación en función del comportamiento del material y del sistema de solidificación por capas. El uso de FA es importante para mejorar la complejidad de las piezas producidas al mismo tiempo que se reducen los gastos de material y montaje. Las futuras herramientas que empleen FA se podrán utilizar en múltiples pasos de la producción y por lo tanto reducir el gasto de las unidades de salida. Los elementos y sistemas que componen un aerogenerador se pueden modificar completamente, con el uso de varios materiales, con la flexibilidad que ofrece esta tecnología avanzada de fabricación. Esta adaptabilidad y flexibilidad pueden llevar a los aerogeneradores a ser configurados para y en el lugar del recurso eólico correspondiente, empleando el diseño que de mayores beneficios. Esta característica puede impulsar a la industria de la energía eólica a ser más eficiente y eficaz. La industria eólica se puede ver transformada por las tecnologías FA a gran escala. A día de hoy no se ha llegado a ese estado de madurez, pero si se han obtenido avances en varias áreas que indican el camino hacia esa posibilidad. De entre las aplicaciones estudiadas en este trabajo se han extraído las siguientes conclusiones:

- El herramental es un punto focal para el estado actual de la tecnología FA, ya que los requisitos son menos estrictos en cuanto a gasto de material. Ya se han producido moldes de varios tamaños y formas para una variedad de industrias. Sin embargo, el herramental de gran tamaño permanece fuera del alcance hasta el desarrollo de procesos de fabricación de compuestos FA a gran escala como el *“Big Area Additive Manufacturing”*.
- Las cubiertas de las góndolas presentan el mismo problema al depender del uso de FA a gran escala. Si bien el empleo de FA supone la posibilidad de integrar sistemas dentro de esta estructura y dotarla así de más importancia y funcionalidad dentro de la estructura de las turbinas eólicas. El aumento de la tecnología de automatización en el proceso de fabricación de aerogeneradores es una alternativa compleja y que requiere una importante inversión económica, pero se consigue sencillez, economía y aumenta la calidad final de cada aerogenerador. El incremento de la fiabilidad y la optimización de costes son las principales prioridades para mejorar la competitividad del sector de la energía eólica en un entorno internacional cada vez más competitivo.
- Los imanes permanentes fabricados aditivamente pueden reducir el gasto de material, reducir el mecanizado necesario y obtener topologías complejas. Otra ventaja es que

se puede controlar la textura del grano lo que permite diseñar propiedades isotrópicas o anisotrópicas, lo que da lugar a mejores rendimientos magnéticos sin estar atados totalmente al uso de tierras raras. Algo común en la FA es que con la fabricación rápida de prototipos se puede evitar la fabricación de nuevos moldes y herramientas para cada nuevo caso, reduciendo el gasto de las operaciones de mecanizado y reduciendo los tiempos asociados con el consecuente ahorro de capital. Al evitar el derroche de material se reducen los gastos en materia prima, en especial con los materiales preciosos como las tierras raras. Toda esta reducción viene asociada con un consumo menor de energía. Si bien es cierto que aún están lejos de ser tan competitivos como los imanes fabricados convencionalmente, ya que es una tecnología ya muy madura y competitiva. Un punto diferenciador puede encontrarse en el reciclaje de elementos de tierras raras que ha cobrado importancia con la escasez de materias primas por consecuencias de la pandemia de COVID-19 y conflictos militares, aunque aún está en desarrollo y lejos de ser una alternativa viable.

- Los intercambiadores de calor pueden ser una de las aplicaciones de ingeniería más estudiadas y revisitadas en el sector industrial, siendo un campo tan maduro gran parte de sus limitaciones se hayan en las técnicas de fabricación disponibles. La FA trae consigo la posibilidad de generar estructuras más complejas, lo que ayuda a lograr escalas de longitud pequeña con una precisión aceptable y superan muchas otras deficiencias de las tecnologías convencionales. Los intercambiadores de calor se pueden construir en una sola pieza lo que elimina de raíz la posibilidad de fugas. Además, la construcción capa a capa resulta en cantidades de desecho mucho menores. Los intercambiadores de calor que involucran el uso de inserciones de algún tipo se pueden imprimir directamente en el sustrato que se enfría activamente, esto da como resultado buenas conexiones de interfaz para la conducción de calor frente a la obtenida con la soldadura fuerte convencional. Por supuesto tiene la misma cantidad de ventajas que retos aún por superar, entre ellos la competición de la industria tradicional o el control de las propiedades entre otros. Incluso así hoy en día ya se puede fabricar intercambiadores de calor con éxito mediante FA.
- Uno de los pilares fundamentales de la economía circular es la remanufactura. Y con la FA se abre un espectro enorme de posibilidades para hacer posible este concepto. Las líneas de investigación de la remanufactura se centran en la FA para mejorar la eficiencia de la remanufactura en la producción de productos rentables y de mayor calidad. El empleo de las técnicas de FA trae consigo ventajas para el proceso en la reparación y restauración del componente. Se estima que la FA podría proporcionar beneficios potenciales en términos de sostenibilidad donde la consideración de FA en la remanufactura mejorará la capacidad de extender la vida útil del producto. Aun así, la aplicación de la FA requiere todavía de una fuerte investigación para salvar todos los desafíos que afronta. Entre ellos se encuentra la identificación de la configuración correcta de los parámetros del proceso y encontrar materiales adecuados a las necesidades de cada proceso.
- El avance de la FA abre nuevas puertas cada día para la inclusión de más elementos de los aerogeneradores fabricados con esta tecnología. Esto puede observarse con la fabricación a gran escala que puede dar la posibilidad de la fabricación de las palas

mediante impresión 3D, o la creación de sistemas que usen el hormigón como material de fabricación que posibilita la impresión de las torres de los aerogeneradores. Este tipo de situaciones seguirá dándose a medida que la tecnología madure y vea descubierto todo su potencial.

Toda esta evolución de la *FA* que ha derivado y tiene potencial para derivar en aún más aplicaciones demuestra que las organizaciones pueden beneficiarse de esta tecnología. Incluso con todas las barreras aún por superar para poder aprovechar al máximo las oportunidades que ofrece. La *FA* ha impactado directamente en el paradigma de la fabricación y esto está suponiendo a su vez un impacto en los modelos de fabricación y creando nuevos tipos de negocios y organizaciones. Por lo tanto, es importante no centrarse solo en las nuevas aplicaciones si no en cómo afecta esta nueva variable a la economía y a las empresas que emplean métodos de fabricación tradicionales. El rango de opciones que abre la *FA* es una realidad y supone que las empresas deben replantear sus estrategias de negocio y sus planes a futuro. La *FA* no está aún madura y la forma en que se afronte la investigación y la inversión puede determinar el éxito o fracaso de muchos modelos de negocio.

Los estados son otro importante factor en el desarrollo de cualquier industria, como se ha visto en el trabajo, hoy en día se está apostando fuertemente en energías renovables, con especial ahínco para los próximos años en la energía eólica marina. Este desembolso de capital influirá enormemente en el interés de las empresas en desarrollar tecnología cada vez más puntera para poder aprovechar las oportunidades de negocio que se van a presentar. Es aquí donde la *FA* puede suponer un catalizador que cambie la forma de afrontar cómo se explotan los recursos eólicos.

REFERENCIAS

A continuación, se exponen las referencias de todos los documentos consultados para el presente trabajo:

- Agostini, B., Fabbri, M., Park, J. E., Wojtan, L., Thome, J. R., & Michel, B., State of the Art of High Heat Flux Cooling Technologies. *Heat Transfer Engineering*, 28(4), 2007, 258–281.
- Alam, I., & Soni, P. R., Techniques for Heat Transfer Augmentation in A Heat Exchanger: A Review. *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, Volume-2(Issue-3), 2018, 2630–2635.
- Al-Handawi, K., Andersson, P., Panarotto, M., Isaksson, O., & Kokkolaras, M., Scalable Set-Based Design Optimization and Remanufacturing for Meeting Changing Requirements. *Journal of Mechanical Design*, 2020, 143(2).
- Alves, P., Bobba, S., Carrara, S. and Plazzotta, B., The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility, EUR 30488 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2020.
- Aravind, S., Razmi, J., Mian, M. J., & Ladani, L., Mechanical Anisotropy and Surface Roughness in Additively Manufactured Parts Fabricated by Stereolithography (SLA) Using Statistical Analysis. *Materials*, 13(11), 2020, 2496.
- ASTM Committee F42 on Additive Manufacturing Technologies. <http://www.astm.org/COMMITTEE/F42.htm>
- AWEA. Offshore Wind Power Facts. ACP. [Consulta: 26 de mayo de 2022]. Disponible en web: <<https://cleanpower.org/facts/offshore-wind/>>
- AWEA. 28 Members of Congress Support Increasing Transmission Funding in FY23 Budget. ACP. [Consulta: 28 de mayo de 2022]. Disponible en web: <<https://cleanpower.org/news/28-members-of-congress-support-increasing-transmission-funding-in-fy23-budget/>>
- Aziz, N. A., Adnan, N. A. A., Wahab, D. A., & Azman, A. H., Component design optimisation based on artificial intelligence in support of additive manufacturing repair and restoration: Current status and future outlook for remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 296.
- Bag, S., & Rahman, M. S., The role of capabilities in shaping sustainable supply chain flexibility and enhancing circular economy-target performance: an empirical study. *Supply Chain Management: An International Journal*, 2021.
- Barão, A., de Vasconcelos, J. B., Rocha, L., & Pereira, R., A knowledge management approach to capture organizational learning networks, *International Journal of Information Management*, 37(6), 2017, 735–740.
- Bassett, K., Carriveau, R., & Ting, D. K., 3D printed wind turbines part 1: Design considerations and rapid manufacture potential, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 11, 2015, 186–193.
- Benack, N. C., Wang, T., Matthews, K., & Taheri, M. L., Additive Manufacturing Methods for Soft Magnetic Composites (SMCs), *Microscopy and Microanalysis*, 24(S1), 2018, 1066–1067.

- Bhushan, B., Caspers, M., An overview of additive manufacturing (3D printing) for microfabrication. *Microsystem Technologies*, 23(4), 2017.
- Bishop, E. G., & Leigh, S. J., Using Large-Scale Additive Manufacturing (LSAM) as a Bridge Manufacturing Process in Response to Shortages in PPE During the COVID-19 Outbreak, *International Journal of Bioprinting*, 6(4), 2020.
- Boer, J. D., Lambrechts, W., & Krikke, H., Additive manufacturing in military and humanitarian missions: Advantages and challenges in the spare parts supply chain. *Journal of Cleaner Production*, 257, 2020,120301.
- Bollig, L. M., Hilpisch, P. J., Mowry, G. S., & Nelson-Cheeseman, B. B., 3D printed magnetic polymer composite transformers, *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 442, 2017, 97–101.
- Callahan, C. J., Lee, R., Zulauf, K. E., Tamburello, L., Smith, K. P., Previtiera, J., Cheng, A., Green, A., Abdul Azim, A., Yano, A., Doraiswami, N., Kirby, J. E., & Arnaout, R. A., Open Development and Clinical Validation of Multiple 3D-Printed Nasopharyngeal Collection Swabs: Rapid Resolution of a Critical COVID-19 Testing Bottleneck. *Journal of Clinical Microbiology*, 58(8), 2020.
- Castro, I. 5 Opportunities for Additive Manufacturing in the Wind Energy Industry - Materials and Engineering Resources - Matmatch. *Materials and Engineering Resources - Matmatch - Get the Latest in Materials Science and Engineering News, Educational Content and Material Use Cases*. [Consulta: 12 de marzo de 2022]. Disponible en web: <<https://matmatch.com/resources/blog/additive-manufacturing-in-the-wind-energy-industry/>>
- Chaudhari, A., Ekade, P., & Krishnan, S., Experimental investigation of heat transfer and fluid flow in octet-truss lattice geometry, *International Journal of Thermal Sciences*, 143, 2019, 64–75.
- Chang, Y. C., & Wang, N., Legal system for the development of marine renewable energy in China, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 75, 2017, 192–196.
- Chen, H., Sun, Y., Yuan, W., Pang, S., Yan, W., & Shi, Y., A Review on Discrete Element Method Simulation in Laser Powder Bed Fusion Additive Manufacturing. *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, 1(1), 2022, 100017.
- Choong, Y. Y. C., Tan, H. W., Patel, D. C., Choong, W. T. N., Chen, C. H., Low, H. Y., Tan, M. J., Patel, C. D., & Chua, C. K., The global rise of 3D printing during the COVID-19 pandemic. *Nature Reviews Materials*, 5(9), 2020, 637–639.
- COBOD. Prototype: 3D printing the first 10m high wind turbine base. [Consulta: 8 de abril de 2021]. Disponible en web: <<https://www.youtube.com/watch?v=P2gZN9v6jlk>>
- Cui, J., Kramer, M., Zhou, L., Liu, F., Gabay, A., Hadjipanayis, G., Balasubramanian, B., & Sellmyer, D., Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets. *Acta Materialia*, 158, 2018, 118–137.
- deCastro, M., Salvador, S., Gómez-Gesteira, M., Costoya, X., Carvalho, D., Sanz-Larruga, F., & Gimeno, L., Europe, China and the United States: Three different approaches to the development of offshore wind energy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 109, 2019, 55–70.

- Deisenroth, D. C., Moradi, R., Shooshtari, A. H., Singer, F., Bar-Cohen, A., & Ohadi, M., Review of Heat Exchangers Enabled by Polymer and Polymer Composite Additive Manufacturing. *Heat Transfer Engineering*, 39(19), 2017, 1648–1664.
- Dhanju, A., & Firestone, J., Access System Framework for Regulating Offshore Wind Power in State Waters, *Coastal Management*, 37(5), 2009, 441–478.
- Dias, S., Espadinha-Cruz, P., & Matos, F., Understanding how Additive Manufacturing influences organizations' strategy in knowledge economy, *Procedia Computer Science*, 200, 2022, 1318–1327.
- Ding, J., Baumers, M., Clark, E. A., & Wildman, R. D., The economics of additive manufacturing: Towards a general cost model including process failure, *International Journal of Production Economics*, 237, 2021, 108087.
- Dixit, T., & Ghosh, I., Review of micro- and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41, 2015, 1298–1311.
- Ekade, P., & Krishnan, S., Fluid flow and heat transfer characteristics of octet truss lattice geometry. *International Journal of Thermal Sciences*, 137, 2019, 253–261.
- Eolivertical. EÓLICA ONSHORE vs OFFSHORE ¿CUÁL ES MEJOR? [Consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en web: <<http://www.eolivertical.es/2019/08/28/eolica-onshore-vs-offshore/>>
- European Commission, An EU Strategy to harness the potential of offshore renewable energy for a climate neutral future, 2020.
- Gandha, K., Ouyang, G., Gupta, S., Kunc, V., Parans Paranthaman, M., & Nlebedim, I. C., Recycling of additively printed rare-earth bonded magnets. *Waste Management*, 90, 2019, 94–99.
- Gardan, J., Additive manufacturing technologies: state of the art and trends. *International Journal of Production Research*, 54(10), 2015, 3118–3132.
- Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., *Additive Manufacturing Technologies*, Springer, Nueva York, 2015, 487.
- Goll, D., Schuller, D., Martinek, G., Kunert, T., Schurr, J., Sinz, C., Schubert, T., Bernthaler, T., Riegel, H., & Schneider, G., Additive manufacturing of soft magnetic materials and components, *Additive Manufacturing*, 27, 2019, 428–439.
- Guo, N., y Leu, M. C., Additive manufacturing: technology, applications and research needs, *Frontiers of Mechanical Engineering*, 8(3), 2013, 215–243.
- Gutfleisch, O., Güth, K., Woodcock, T.G., Schultz, L., Recycling used Nd-Fe-B sintered magnets via a hydrogen-based route to produce anisotropic, resin bonded magnets, *Adv. Energy Mater.* 3, 2013, 151–155.
- G.W.E.C. (2022, 4 abril). *Global Wind Report 2022*. Global Wind Energy Council. [Consulta: 10 de junio de 2022]. Disponible en web: <<https://gwec.net/global-wind-report-2022/>>
- Hazır, N., Haouari, M., & Erel, E., Robust scheduling and robustness measures for the discrete time/cost trade-off problem, *European Journal of Operational Research*, 207(2), 2010, 633–643.
- He, H., Gao, M., Illés, B., & Molnar, K., 3D Printed and Electrospun, Transparent, Hierarchical Polylactic Acid Mask Nanoporous Filter, *International Journal of Bioprinting*, 6(4), 2020.

- Horn, T. J., Harrysson, O. L. A., Overview of current additive manufacturing technologies and selected applications. *Science Progress*, 2012, 28.
- Horton, J. How the MARS Turbine Will Work. *HowStuffWorks*. [Consulta: 22 de noviembre de 2021]. Disponible en web: <<https://science.howstuffworks.com/environmental/green-science/mars-turbine.htm>>
- How much do wind turbines cost? *Windustry*. [Consulta: 17 de febrero de 2022]. Disponible en web: <https://www.windustry.org/how_much_do_wind_turbines_cost#:~:text=Commercial%20Wind%20Turbines,%243%2D%244%20million%20installed>
- INGERSOLL - MasterPrint® 3X. 2022. Multistation EN. [Consulta: 3 de mayo de 2022]. Disponible en web: <<https://www.multistation.com/en/product/ingersoll-masterprint-3x/>>
- Itoh, M., Masuda, M., Suzuki, S., Machida, K.-I., Recycling of rare earth sintered magnets as isotropic bonded magnets by melt-spinning, *J. Alloy. Compd.* 374, 2004, 393–396.
- Iyengar, K., Bahl, S., Raju Vaishya, & Vaish, A., Challenges and solutions in meeting up the urgent requirement of ventilators for COVID-19 patients. *Diabetes & Metabolic Syndrome: Clinical Research & Reviews*, 14(4), 2020, 499–501.
- Jaćimović, J., Binda, F., Herrmann, L. G., Greuter, F., Genta, J., Calvo, M., Tomše, T., & Simon, R. A., Net Shape 3D Printed NdFeB Permanent Magnet, *Advanced Engineering Materials*, 19(8), 2017, 1700098.
- Jafari, D., Wits, W. W., & Geurts, B. J., Metal 3D-printed wick structures for heat pipe application: Capillary performance analysis, *Applied Thermal Engineering*, 143, 2018, 403–414.
- Jafari, D., Wits, W. W., & Geurts, B. J., Phase change heat transfer characteristics of an additively manufactured wick for heat pipe applications, *Applied Thermal Engineering*, 168, 2020, 114890.
- Jung, D. W., Design Improvement and Manufacturing of Nacelle Cover for Wind Turbine, *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 2020, 177–183.
- Kallaste, A., Vaimann, T., & Belahcen, A., Influence of Magnet Material Selection on the Design of Slow-Speed Permanent Magnet Synchronous Generators for Wind Applications, *Elektronika ir Elektrotehnika*, 23(1), 2017.
- Kaur, I., & Singh, P., State-of-the-art in heat exchanger additive manufacturing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 178, 2021.
- Kaur, I., Singh, P., & Ekkad, S. V., Enhanced thermal hydraulic performance by V-shaped protrusion for gas turbine blade trailing edge cooling, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 149, 2020.
- Kempers, R., Colenbrander, J., Tan, W., Chen, R., & Robinson, A., Experimental characterization of a hybrid impinging microjet-microchannel heat sink fabricated using high-volume metal additive manufacturing, *International Journal of Thermofluids*, 5-6, 2020.
- Keramati H., Battaglia F., Arie M. A., Singer F., Ohadi M. M., Additive Manufacturing of Compact Manifold-Microchannel Heat Exchangers Utilizing Direct Metal Laser

- Sintering, 2019 18th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2019, pp. 423-429.
- Kim J. H., Kim B. S., Nam C. D., Lee Y. H., A study on flow analysis and an estimate of performance for HAWT by CFD, *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, vol. 27, 2003, pp. 906-913.
 - Kim B. S., Lee Y. H., A study on the flow and the aerodynamic performance analysis on the 20kW HAWT by CFD, in *Proc., The Fourth National Congress on Fluids Engineering*, 2006, pp.1243-1246.
 - Klein E., Ling J., Aute V., Hwang Y., Radermacher R., A Review of Recent Advances in Additively Manufactured Heat Exchangers, *Int. Refrig. Air Cond. Conf.* 2018, 1–10.
 - Korhonen, J., Nuur, C., Feldmann, A., & Birkie, S. E., Circular economy as an essentially contested concept, *Journal of Cleaner Production*, 175, 2018, 544–552.
 - Korolev, V. G., Development prospects of wind energy in the Russian energy complex, *The Electricity Journal*, 35(3), 2022.
 - Krings, A., Cossale, M., Tenconi, A., Soulard, J., Cavagnino, A., & Boglietti, A., Magnetic Materials Used in Electrical Machines: A Comparison and Selection Guide for Early Machine Design, *IEEE Industry Applications Magazine*, 23(6), 2017, 21–28.
 - Kumari, A., Sinha, M.K., Pramanik, S., Sahu, S.K., Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects, *Waste Manage*, 75, 2018, 486–498.
 - Ladenburg, J., Hevia-Koch, P., Petrović, S., & Knapp, L., The offshore-onshore conundrum: Preferences for wind energy considering spatial data in Denmark, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 121, 2020.
 - Lahrou, Y., & Brissaud, D., A Technical Assessment of Product/Component Remanufacturability for Additive Remanufacturing, *Procedia CIRP*, 69, 2018, 142–147.
 - Lamichhane, T., Sethuraman, L., Dalagan, A., Wang, H., Keller, J., & Paranthaman, M., Additive manufacturing of soft magnets for electrical machines—a review, *Materials Today Physics*, 15, 2020.
 - Lehmann, M., Karimpour, F., Goudey, C. A., Jacobson, P. T., & Alam, M. R., Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 74, 2017, 1300–1313.
 - Li, L., Post, B., Kunc, V., Elliott, A. M., & Paranthaman, M. P., Additive manufacturing of near-net-shape bonded magnets: Prospects and challenges, *Scripta Materialia*, 135, 2017, 100–104.
 - Li, X. Y., Ge, J. P., Chen, W. Q., & Wang, P., Scenarios of rare earth elements demand driven by automotive electrification in China: 2018–2030, *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 2019, 322–331.
 - Li, Y., Huang, X., Tee, K. F., Li, Q., & Wu, X. P., Comparative study of onshore and offshore wind characteristics and wind energy potentials: A case study for southeast coastal region of China, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 39, 2020.
 - Lian, Q., Sui, W., Wu, X., Yang, F., & Yang, S., Additive manufacturing of ZrO₂ ceramic dental bridges by stereolithography, *Rapid Prototyping Journal*, 24(1), 2018, 114–119.
 - Majeed, A., Ahmed, A., Salam, A., & Sheikh, M. Z., Surface quality improvement by parameters analysis, optimization and heat treatment of AlSi10Mg parts

- manufactured by SLM additive manufacturing, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 2(4), 2019, 288–295.
- Malviya, A., Patil, R., & Shrivastav, A., Scope of Additive Manufacturing in Wind Energy Systems, *SSRN Electronic Journal*, 2021.
 - Mann, M., Palmer, S., Lee, D., Kurup, P., Remo, T., Jenne, D. S., Richardson, B. S., Love, L. J., & Post, B. K., *The Current State of Additive Manufacturing in Wind Energy Systems*, 2017.
 - Matizamhuka, W., *The Impact of Magnetic Materials in Renewable Energy-Related Technologies in the 21st Century Industrial Revolution: The Case of South Africa*. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 1–9.
 - Matsumoto, M., Yang, S., Martinsen, K., & Kainuma, Y., Trends and research challenges in remanufacturing, *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 2016, 129–142.
 - Mohammadi, M., & Asgari, H., Achieving low surface roughness AlSi10Mg_200C parts using direct metal laser sintering. *Additive Manufacturing*, 20, 2018, 23–32.
 - Möllerström, E., Gipe, P., Beurskens, J., & Ottermo, F., A historical review of vertical axis wind turbines rated 100 kW and above, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 105, 2019, 1–13.
 - Moon, H., Boyina, K., Miljkovic, N., & King, W. P., Heat Transfer Enhancement of Single-Phase Internal Flows using Shape Optimization and Additively Manufactured Flow Structures, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 177, 2021.
 - Mourtzis, D., Simulation in the design and operation of manufacturing systems: state of the art and new trends, *International Journal of Production Research*, 58(7), 2019, 1927–1949.
 - Nafis, B. M., Whitt, R., Iradukunda, A. C., & Huitink, D., Additive Manufacturing for Enhancing Thermal Dissipation in Heat Sink Implementation: A Review, *Heat Transfer Engineering*, 42(12), 2020, 967–984.
 - Naidu, V., Shelare, S.D., Awatade, S.M., V. A. M. N. E. A., A Review on Design of Components of 4 Stroke Engine Using Hybrid Metal Matrix, *International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development*, 10(3), 2020, 8853–8862.
 - Nath, S. D., & Nilufar, S., An Overview of Additive Manufacturing of Polymers and Associated Composites, *Polymers*, 12(11), 2020, 2719.
 - Öberg, C., Shams, T., & Asnafi, N., Additive Manufacturing and Business Models: Current Knowledge and Missing Perspectives, *Technology Innovation Management Review*, 8(6), 2018, 15–33.
 - Ohiomah, I., & Sukdeo, N., Challenges of the South African economy to transition to a circular economy: a case of remanufacturing, *Journal of Remanufacturing*, 2022.
 - Okabe, T.H., Takeda, O., Fukuda, K., Umetsu, Y., Direct extraction and recovery of neodymium metal from magnet scrap, *Mater. Trans.* 44, 2003, 798–801.
 - Okuda, M., Gómez, C., Métodos en investigación cualitativa: triangulación, *revista Colombiana de Psiquiatría*, 34, 2005.
 - O’Leary, D. E., Gartner’s hype cycle and information system research issues, *International Journal of Accounting Information Systems*, 9(4), 2008, 240–252.

- Páez-Pavón, A., Jiménez-Morales, A., Rodríguez-Arbaizar, M., Carreño-Morelli, E., & Torralba, J. M., Sintering optimisation of Fe–Si soft magnetic materials processed by metal injection moulding, *Powder Metallurgy*, 60(2), 2017, 112–119.
- Palle, P.M., King, D., Banhalmi-zakar, Z., & He, Y., Circular economy: A sustainable management strategy for rare earth elements consumption in Australia, *Current Research in Environmental Sustainability*, 4, 2022.
- Patel, P., Defersha, F., & Yang, S., Resilience Analysis of Additive Manufacturing-enabled Supply Chains: An Exploratory Study, *Frontiers in Manufacturing Technology*, 2, 2022.
- Perenich, M., A Brief Overview of Additive Manufacturing Techniques in Wind Energy, 2021.
- Peters, J. L., Remmers, T., Wheeler, A. J., Murphy, J., & Cummins, V., A systematic review and meta-analysis of GIS use to reveal trends in offshore wind energy research and offer insights on best practices, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 128, 2020.
- Price, C., Armstrong, K., Polsky, Y., Wang, A., Nimbalkar, S., Chesser, P., Post, B., & Su, J. C., A techno-economic framework for comparing conventionally and additively manufactured parts for geothermal applications, *Journal of Manufacturing Processes*, 72, 2021, 458–468.
- Popov, V., Koptug, A., Radulov, I., Maccari, F., & Muller, G., Prospects of additive manufacturing of rare-earth and non-rare-earth permanent magnets, *Procedia Manufacturing*, 21, 2018, 100–108.
- Portman, M., Marine Renewable Energy Policy: Some US and International Perspectives Compared, *Oceanography*, 23(2), 2010, 98–105.
- Post, B., Richardson, B., Lloyd, P., Love, L., Nolet, S., & Hannan, J., Additive Manufacturing of Wind Turbine Molds, Oak Ridge National Lab., 2017.
- Post, B., Richardson, B., Lind, B., Love, R., Lloyd, L., Kunc, P., Rhyne, V., Roschli, B.J., Hannan, A., Nolet, J., Veloso, S., Kurup, K., Remo, P., Dale S., Big Area Additive Manufacturing Application in Wind Turbine Molds, United States. 2017.
- Pramod, J. Wind energy engineering, McGraw-Hill Education, New York, 2016.
- Qian, X., Ostwal, M., Asatekin, A., Geise, G. M., Smith, Z. P., Phillip, W. A., Lively, R. P., & McCutcheon, J. R., A critical review and commentary on recent progress of additive manufacturing and its impact on membrane technology, *Journal of Membrane Science*, 645, 2022.
- Chen Q., Juste E., Lasgorceix M., Petit F., Leriche A., Binder jetting process with ceramic powders: Influence of powder properties and printing parameters, *Open Ceramics*, Volume 9, 2022.
- Ramanathan, A. K., Gingerich, M. B., Headings, L. M., & Dapino, M. J., Metal structures embedded with piezoelectric PVDF sensors using ultrasonic additive manufacturing. *Manufacturing Letters*, 31, 2022, 96–100.
- Ramesh, R., Thomas, G., & Ma, B. M., Magnetization reversal in nucleation controlled magnets. II, Effect of grain size and size distribution on intrinsic coercivity of Fe-Nd-B magnets, *Journal of Applied Physics*, 64(11), 1988, 6416–6423.
- Reddy, K. y Dufera, S., additive manufacturing technologies, 2019

- Relkar, A. S., & Nandurkar, K., Optimizing & Analysing Overall Equipment Effectiveness (OEE) Through Design of Experiments (DOE), *Procedia Engineering*, 38, 2012, 2973–2980.
- Rothan, H. A., & Byrareddy, S. N., The epidemiology and pathogenesis of coronavirus disease (COVID-19) outbreak, *Journal of Autoimmunity*, 109, 2020.
- Saidur, R., Islam, M., Rahim, N., & Solangi, K., A review on global wind energy policy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(7), 2010, 1744–1762.
- Sainz, J., New Wind Turbine Manufacturing Techniques, *Procedia Engineering*, 132, 2015, 880–886.
- Sainz, J., & Sebastián, M., Methodology for the Maintenance Centered on the Reliability on Facilities of Low Accessibility, *Procedia Engineering*, 63, 2013, 852–860.
- Searle, M., Black, J., Straub, D., Robey, E., Yip, J., Ramesh, S., Roy, A., Sabau, A. S., & Molloy, D., Heat transfer coefficients of additively manufactured tubes with internal pin fins for supercritical carbon dioxide cycle recuperators, *Applied Thermal Engineering*, 181, 2020.
- Seokpum, K., Dreifus, G., Beard, B., Glick, A., Messing, A., Hassen, A. Lindahl, J., Smith, T., Failla, J., Post, B., Bowers, J., Stephenson, K., Love, L., Kunc, V., Graded infill structure of wind turbine blade core accounting for internal stress in big area additive manufacturing, 2018.
- Sharma, V., Sharma, S., & Sharma, G., Recent development in the field of wind turbine, *Materials Today: Proceedings*, 2022.
- Shelare, S. D., Aglawe, K. R., Khope, P. B., Computer aided modeling and finite element analysis of 3-D printed drone, *Materials Today: Proceedings*, 47, 2021, 3375–3379.
- Sher, D. WHAM, there’s a new “largest 3D printer in the world” in town. 3D Printing Media Network - The Pulse of the AM Industry. [Consulta: 5 de mayo de 2022]. Disponible en web: ><https://www.3dprintingmedia.network/wham-theres-a-new-largest-composite-3d-printer-in-the-world-in-town/>>
- Shi, Y. & Herniman, J., The role of expectation in innovation evolution: Exploring hype cycles, *Technovation*, 2022.
- Sheridan, R.S., Sillitoe, R., Zakotnik, M., Harris, I.R., Williams, A.J., Anisotropic powder from sintered NdFeB magnets by the HDDR processing route, *J. Magn. Mater.* 324, 2012, 63–67.
- Soundararajan, B., Sofia, D., Barletta, D., & Poletto, M., Review on modeling techniques for powder bed fusion processes based on physical principles, *Additive Manufacturing*, 47, 2021.
- Sumter, D., de Koning, J., Bakker, C., & Balkenende, R., Key Competencies for Design in a Circular Economy: Exploring Gaps in Design Knowledge and Skills for a Circular Economy, *Sustainability*, 13(2), 2021, 776.
- Svetlizky, D., Das, M., Zheng, B., Vyatskikh, A. L., Bose, S., Bandyopadhyay, A., Schoenung, J. M., Lavernia, E. J., & Eliaz, N., Directed energy deposition (DED) additive manufacturing: Physical characteristics, defects, challenges and applications, *Materials Today*, 49, 2021, 271–295.
- Standard terminology for additive manufacturing – general principles –terminology, in: ISO/ASTM 52900:2015(E), 2015.

- Stavropoulos, P., Foteinopoulos, P., Papacharalampopoulos, A., & Bikas, H., Addressing the challenges for the industrial application of additive manufacturing: Towards a hybrid solution, *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, 1(3), 2018, 157–168.
- Stavropoulos, P., Spetsieris, A., & Papacharalampopoulos, A., A Circular Economy based Decision Support System for the Assembly/Disassembly of Multi-Material Components, *Procedia CIRP*, 85, 2019, 49–54.
- Tam, E., Soulliere, K., & Sawyer-Beaulieu, S., Managing complex products to support the circular economy. *Resources, Conservation and Recycling*, 145, 2019, 124–125.
- The renewable energy law of People’s Republic of China. Standing Committee of the National People’s Congress. [Consulta: 27 de mayo de 2022]. Disponible en web: <http://www.gov.cn/flfg/2009-12/26/content_1497462.htm>
- Thompson, A. Surface texture measurement of metal additively manufactured parts by X-ray computed tomography, 2019.
- Tethys | Environmental Effects of Wind and Marine Renewable Energy. O’Hagan AM. [Consulta: 27 de mayo de 2022]. Disponible en web: <<https://tethys.pnnl.gov/>>
- Tiismus, H., Kallaste, A., Belahcen, A., Vaimann, T., Rassõlkin, A., & Lukichev, D., Hysteresis Measurements and Numerical Losses Segregation of Additively Manufactured Silicon Steel for 3D Printing Electrical Machines, *Applied Sciences*, 10(18), 2020, 6515.
- Tiismus, H., Kallaste, A., Vaimann, T., & Rassõlkin, A., State of the art of additively manufactured electromagnetic materials for topology optimized electrical machines, *Additive Manufacturing*, 55, 2022.
- Tiwari, R., Andhare, R. S., Shoostari, A., & Ohadi, M., Development of an additive manufacturing-enabled compact manifold microchannel heat exchanger, *Applied Thermal Engineering*, 147, 2019, 781–788.
- Trollman, H., Colwill, J., & Brejnholt, A., Ecologically Embedded Design in Manufacturing: Legitimation within Circular Economy, *Sustainability*, 12(10), 2020.
- Tyagi, S., Yadav, A., & Deshmukh, S., Review on mechanical characterization of 3D printed parts created using material jetting process, *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- UNE - Busca tu norma. *UNE*. [Consulta: 5 de junio de 2022]. Disponible en web: <[https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/?k=\(i:25030\)](https://www.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/?k=(i:25030))>
- Unger, S., Beyer, M., Gruber, S., Willner, R., & Hampel, U., Experimental study on the air-side thermal-flow performance of additively manufactured heat exchangers with novel fin designs, *International Journal of Thermal Sciences*, 146, 2019.
- V., C. Gartner Hype Cycle 2019: 3D Printing Predictions. 3Dnatives. [Consulta: 21 de abril de 2022]. Disponible en web: <<https://www.3dnatives.com/en/gartner-hype-cycle-3dprintingpredictions-150120194/#!>>
- Wakiru, J., Pintelon, L., Muchiri, P., & Chemweno, P., Maintenance Optimization: Application of Remanufacturing and Repair Strategies, *Procedia CIRP*, 69, 2018, 899–904.
- Walton, A., Yi, H., Rowson, N.A., Speight, J.D., Mann, V.S.J., Sheridan, R.S., Bradshaw, A., Harris, I.R., Williams, A.J., The use of hydrogen to separate and recycle

- neodymium–iron–boron-type magnets from electronic waste, *J. Cleaner Prod.*, 104, 2015, 236–241.
- Wang, H., Lamichhane, T., & Paranthaman, M., Review of additive manufacturing of permanent magnets for electrical machines: A prospective on wind turbine, *Materials Today Physics*, 24, 2022.
 - Wang, H., Qu, J., Sun, Q., Kang, Z., & Han, X., Thermal characteristic comparison of three-dimensional oscillating heat pipes with/without sintered copper particles inside flat-plate evaporator for concentrating photovoltaic cooling, *Applied Thermal Engineering*, 167, 2020.
 - Wang, N., Zhang, Y., & Li, J., Carbon emission reduction and coordination in a closed-loop supply chain with outsourcing remanufacturing, *Kybernetes*, 2021.
 - Wang, Y., Ahmed, A., Azam, A., Bing, D., Shan, Z., Zhang, Z., Tariq, M. K., Sultana, J., Mushtaq, R. T., Mehboob, A., Xiaohu, C., & Rehman, M., Applications of additive manufacturing (AM) in sustainable energy generation and battle against COVID-19 pandemic: The knowledge evolution of 3D printing, *Journal of Manufacturing Systems*, 60, 2021, 709–733.
 - Weil, K. E., PORTER, Competitive advantage, creating and sustaining superior performance, *Revista de Administração de Empresas*, 25(2), 1985, 82–84.
 - World Energy Trade. LM Wind Power termina la 1ra cuchilla eólica de más de 100 metros Please enable JavaScript to view the comment. [Consulta: 17 de enero de 2022]. Disponible en web: <<https://www.worldenergytrade.com/energias-alternativas/energia-eolica/lm-wind-power-termina-la-1ra-cuchilla-eolica-de-mas-de-100-metros>>
 - Wei, Y., Zou, Q. P., & Lin, X., Evolution of price policy for offshore wind energy in China: Trilemma of capacity, price and subsidy, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 136, 2021.
 - Wu F., El-Refaie A. M., Towards Fully Additively-Manufactured Permanent Magnet Synchronous Machines: Opportunities and Challenges, 2019 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2019, pp. 2225-2232.
 - Yan, Q., Dong, H., Su, J., Han, J., Song, B., Wei, Q., & Shi, Y., A Review of 3D Printing Technology for Medical Applications, *Engineering*, 4(5), 2018, 729–742.
 - Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.-M., Van Gerven, T., Jones, P.T., Binnemans, K., REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: a critical review. *J. Sustain, Metall.* 3, 2017, 122–149.
 - Yu, F., Schweisfurth, T., Industry 4.0 technology implementation in SMEs – A survey in the Danish-German border region, *International Journal of Innovation Studies*, 4(3), 2020, 76–84.
 - Yue, M., Yin, X., Li, X., Li, M., Li, X., Liu, W., Wu, Y., Zhang, D., Chen, J., Yi, X., Zuo, T., Recycling of Nd–Fe–B sintered magnets sludge via the reduction-diffusion route to produce sintered magnets with strong energy density. *ACS Sustain. Chem. Eng.* 6, 2018, 6547–6553.
 - Zakotnik, M., Harris, I.R., Williams, A.J., Possible methods of recycling NdFeB-type sintered magnets using the HD/degassing process. *J. Alloy. Compd.* 450, 2008, 525–531.

- Zakotnik, M., Tudor, C.O., Commercial-scale recycling of NdFeB-type magnets with grain boundary modification yields products with ‘designer properties’ that exceed those of starting materials, *Waste Manage.* 44, 2015, 48–54.
- Zheng, Y., & Ahmad, R., Automated Feature Extraction for Hybrid Additive-Subtractive Remanufacturing, *Procedia CIRP*, 93,2020, 56–61.
- Ziaee, M., & Crane, N. B. Binder Jetting: A Review of Process, Materials, and Methods. *Additive Manufacturing*, 2019.
- Zhang, X., Tiwari, R., Shooshtari, A. H., & Ohadi, M. M., An additively manufactured metallic manifold-microchannel heat exchanger for high temperature applications, *Applied Thermal Engineering*, 143, 2018, 899–908.
- Zhao, C. Y., ChemInform Abstract: Review on Thermal Transport in High Porosity Cellular Metal Foams with Open Cells. *ChemInform*, 44(36), 2013.
- Zhuo, P., Li, S., Ashcroft, I. A., & Jones, A. I., Material extrusion additive manufacturing of continuous fibre reinforced polymer matrix composites: A review and outlook, *Composites Part B: Engineering*, 224, 2021.
- Zhang, F., Zhu, L., Li, Z., Wang, S., Shi, J., Tang, W., Li, N., & Yang, J., The recent development of vat photopolymerization: A review, *Additive Manufacturing*, 48, 2021.

CURRÍCULUM VITAE DEL AUTOR

EXPERIENCIA PROFESIONAL

- 2019 - Actual **OFSC Product Owner para Siemens Gamesa**
 Alten Group
 Proyectos Planning and Dispatching
- Business Intelligence: Definición de procesos, KPIs gestión y desarrollo
 - Implantación y formación en las distintas zonas (actualmente EMEA)
- 2017- 2019 **Consultor y líder de Proyecto. Programa Graduate: Liderazgo, Talento Técnico**
 Prosegur Alarmas
 Business Intelligence: análisis de los principales KPIs de los departamentos de callcenter (cold calling, retención, emisión, recepción), comercial y servicio técnico. Modelos predictivos.
 Fidelización: segmentación de clientes, campañas de cross selling y mejora del NPS en los distintos puntos de control de la compañía.
 Productividad: evaluación de procesos para mejorar la eficiencia y la calidad de los mismos: visitas concertadas, rutas de mantenimiento, retención comercial, proceso administrativo, proceso de recobro.
 Implantación de proyectos de mejora y de herramientas de monitorización y gestión.
- 2015 **Ingeniero de materiales (Prácticas)**
 FIDAMC.
 Diseño y análisis de vida de piezas estructurales de fibra de carbono.
 Ensayos en laboratorio y taller.
- 2011 **Delineante (Prácticas)**
 URBAQ ARQUITECTOS, S.L
 Dibujo, diseño y elaboración de proyectos de arquitectura, urbanismo e ingeniería.
 Mediciones y estudio en campo.

EDUCACIÓN Y FORMACIÓN

- 2019 –Actual **Máster en Ingeniería Avanzada de Fabricación**
 UNED (Madrid), España.
 Tecnologías, procesos, simulación y control de nuevos sistemas de fabricación y procesado.
- 2011 - 2017 **Grado en Ingeniería de la Energía** EFQ 6
 Universidad Rey Juan Carlos (Madrid), España.
 Ingeniería de Procesos, Ingenierías Eléctrica y Química, Gestión de Proyectos, Transmisión de Calor. Energías Convencionales, Nuclear y Renovables.
- 2011 - 2017 **Grado en Ingeniería de Materiales** EFQ 6
 Universidad Rey Juan Carlos (Madrid), España.
 Estructura de la Materia, Diseño y cálculo de tensiones. Elasticidad y Resistencia de Materiales, Estudio detallado de los subtipos de Materiales; Materiales Compuestos, Polímeros, Materiales Cerámicos, Metálicos...
- 2009 - 2011 **Ciclo superior de desarrollo de proyectos urbanísticos y operaciones topográficas**
 Centro Integrado de Formación Profesional de León.
 Áreas: Arquitectura, Urbanismo y Obra Civil.
- 2008 - 2009 **Programa intercambio**
 Jefferson Davis High School. (Alabama), EE.UU.

COMPETENCIAS
PERSONALES

Lengua materna

Español

Otros idiomas

	COMPRENSIÓN		CONVERSACIÓN		EXPRESIÓN ESCRITA
	Comprensión auditiva	Comprensión de lectura	Interacción oral	Expresión oral	
Inglés	C1	C1	C1	C1	C1
Francés	A1	A1	A1	A1	A1

Nivel: A1/A2: usuario básico - B1/B2: usuario independiente - C1/C2: usuario competente
Marco común Europeo de referencia para las lenguas

PUBLICACIONES

Espada, J. J., Villalobos, H., & Rodríguez, R., Environmental assessment of different technologies for bioethanol production from *Cynara cardunculus*: A Life Cycle Assessment study. *Biomass and Bioenergy*, 144, 105910, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2020.105910>