



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

**MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

**ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL POTENCIAL DE LA I3D EN  
LOS PARADIGMAS DEFINIDOS EN INDUSTRIA 4.0 Y SU  
RELACIÓN CON LA PROPUESTA INDUSTRIA 5.0  
(SOSTENIBILIDAD, PERSONAS Y RESILIENCIA)**

Autor: Joaquín Bustamante Vela  
Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid  
Julio de 2024

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
“ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL POTENCIAL DE LA I3D EN LOS  
PARADIGMAS DEFINIDOS EN INDUSTRIA 4.0 Y SU RELACIÓN CON LA  
PROPUESTA INDUSTRIA 5.0 (SOSTENIBILIDAD, PERSONAS Y RESILIENCIA)”  
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el  
curso académico 2023-2024 es de mi autoría, original e inédito y  
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro,  
ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada  
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Joaquín Bustamante Vela

Fecha: 10/07/2024

Autorizada la entrega del proyecto  
EL DIRECTOR DEL PROYECTO



do.: Mariano Jiménez Calzado

Fecha: 10/07/2024



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER  
ANÁLISIS DEL IMPACTO DEL POTENCIAL DE LA  
I3D EN LOS PARADIGMAS DEFINIDOS EN  
INDUSTRIA 4.0 Y SU RELACIÓN CON LA  
PROPUESTA INDUSTRIA 5.0 (SOSTENIBILIDAD,  
PERSONAS Y RESILIENCIA)

Autor: Joaquín Bustamante Vela  
Director: Mariano Jiménez Calzado

Madrid  
Julio de 2024

## RESUMEN

La presente memoria corresponde al estudio del posible impacto de la Fabricación Aditiva- Impresión 3D en los paradigmas de la Industria 4.0 y la relación de esta tecnología con la propuesta de la Comisión Europea sobre la Industria 5.0, que tiene un foco en la sostenibilidad, personas y la resiliencia.

Partiendo de la evolución de la industria, se recorre la situación actual de la Industria 4.0 y sus paradigmas, con un especial hincapié en la Fabricación Aditiva. Se discuten las diferentes tecnologías que la componen y los materiales utilizados.

El estudio del impacto en la Industria 4.0 comienza desde un marco nacional, con el análisis de este paradigma de la Fabricación Aditiva frente al resto de tecnologías habilitadoras de la digitalización industrial y su relación frente a los elementos que conducen a la adopción de estas tecnologías habilitadoras. Debido al impacto que tienen a nivel nacional, se continúa con un análisis con la ayuda de documentos y estudios de la situación de este paradigma desde un marco europeo y global.

Para examinar la posible relación de la Fabricación Aditiva con la propuesta Industria 5.0 se relacionan las características propias del paradigma frente a los conceptos de sostenibilidad, personas y resiliencia. Posteriormente, se relaciona con casos prácticos de los distintos sectores de aplicación, la alineación de la tecnología con estos conceptos.

**Palabras clave:** Fabricación aditiva, Industria 4.0, Industria 5.0, Sostenibilidad, Personas, Resiliencia, Impresión 3D.



# ÍNDICE

<b>1. INTRODUCCIÓN</b>	<b>11</b>
<b>1.1. Introducción</b>	<b>11</b>
<b>1.2. Antecedentes</b>	<b>11</b>
<b>2. ESTADO DEL ARTE</b>	<b>13</b>
<b>2.1 Industria 4.0</b>	<b>13</b>
2.1.1 Evolución de la industria	13
2.1.2 Industria 4.0	15
2.1.3 Tecnologías clave en la Industria 4.0	16
2.1.3.1 Internet de las cosas (IoT)	18
2.1.3.2 Inteligencia Artificial (IA) & Machine Learning (ML)	21
2.1.3.3 Realidad extendida (AR & VR)	24
2.1.3.4. Digital Twin	26
2.1.3.5. Fabricación aditiva	26
2.1.3.6. Big Data y Analytics	30
2.1.3.7. Robótica	33
2.1.3.8. Cobots	34
2.1.3.9. RPA & HyperAutomation	34
2.1.3.10. Control Tower	35
2.1.3.11. Ciberseguridad	35
2.1.3.12. Blockchain	36
2.1.3.13. Servicios en Cloud	36
<b>2.2 Industria 5.0</b>	<b>37</b>
<b>2.3 Fabricación Aditiva</b>	<b>38</b>
2.3.1. Técnicas	39
2.3.1.1. Extrusión de material	39
2.3.1.2. Estereolitografía	40
2.3.1.3. Fusión por lecho de polvo	41
2.3.1.4. Inyección de Material (Material Jetting)	42
2.3.1.5. Inyección de Aglutinante (Binder Jetting)	42
2.3.1.6. Deposición de Energía Dirigida (Directed Energy Deposition)	43
2.3.1.7. Laminación de hojas (Sheet Lamination)	43
2.3.2. Materiales	44
2.3.2.1. Metales	45
2.3.2.2. Polímeros	45
2.3.2.3. Cerámica	46
2.3.2.4. Materiales compuestos	46
<b>3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS</b>	<b>48</b>
<b>3.1 Motivación</b>	<b>48</b>
<b>3.2. Objetivos del proyecto</b>	<b>49</b>

<b>4. ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE</b>	<b>50</b>
4.1. Objetivo 8 - Trabajo decente y crecimiento económico:	50
4.2. Objetivo 9 - Industria, innovación e infraestructura:	50
4.3. Objetivo 12 - Producción y consumo responsables:	50
<b>5. METODOLOGÍA</b>	<b>51</b>
5.1. Metodología de trabajo	51
<b>6. DESARROLLO Y RESULTADOS</b>	<b>52</b>
6.1. Situación actual	52
6.1.1. Industria 4.0	52
6.1.2. Fabricación aditiva	65
6.1.3. El papel del comercio electrónico y el uso de la web	80
6.2. Evolución	83
6.2.1. Análisis según Gartner	83
6.2.2. Análisis de futuras tendencias	87
6.3. Impacto	90
6.4. Industria 5.0	94
6.4.1. Alineación FA con el enfoque de la Industria 5.0	94
6.4.2. Análisis por sectores	100
6.4.3. Materiales	109
6.4.3.4. Uso de residuos industriales	109
6.4.3.5. Uso de materiales sostenibles y reciclados	111
<b>7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>113</b>
7.1. Conclusiones	113
7.2. Trabajos futuros	114
<b>8. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>115</b>

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Evolución de la Industria	13
Ilustración 2. Capas de la arquitectura de IoT	20
Ilustración 3. Clasificación de la realidad mixta según Milgram y Kishino	26
Ilustración 4. Archivo CAD exportado a archivos STL con alta y baja resolución	27
Ilustración 5. Clasificación procesos de fabricación aditiva	28
Ilustración 6. Representación del proceso de FDM adaptado [23]	29
Ilustración 7. Uves del Big Data	31

Ilustración 8. Visión NTT Data de la Industria Digital 4.0[6].....	53
Ilustración 9. Tecnologías más presentes en las empresas [6].....	54
Ilustración 10. Planteamiento de inversión en tecnología por parte de las empresas [6]	55
Ilustración 11.¿Cómo gestionan actualmente las empresas todos los procesos relacionados con la producción [6].....	56
Ilustración 12. ¿Las compañías prevén invertir en mejoras en sus procesos productivos?[6].....	57
Ilustración 13. ¿En qué puntos plantean las mayores oportunidades de ahorro de costes? [6].....	58
Ilustración 14. ¿Cuál es el grado de conocimiento y capacidades digitales dentro de las compañías?[6].....	59
Ilustración 15.¿Están identificadas las competencias digitales de cada empleado? [6] ..	60
Ilustración 16.¿Cuáles son las competencias que las compañías consideran indispensables de cara al futuro de la industria 4.0? [6] ..	61
Ilustración 17. Principales coyunturas con las que se han encontrado las compañías[6]	62
Ilustración 18. ¿Cuál se considera como la mayor barrera para la adopción digital en las compañías?[6].....	63
Ilustración 19. ¿Cuáles son las barreras principales en la transformación digital? [6]....	64
Ilustración 20. Tendencia en FA; Mercado Interior [51].....	67
Ilustración 21. Inversiones en FA [51] .....	67
Ilustración 22. Indicación de tendencia del mercado interior; piezas producidas. [51] ..	68
Ilustración 23. Tendencia del material de la FA. Composites[51] .....	69
Ilustración 24. Tendencia del material de la FA. Metales[51] .....	69
Ilustración 25. Tendencia del material de la FA. Plásticos[51].....	70
Ilustración 26. Tendencia del material de la FA. Cerámicos [51] .....	70
Ilustración 27. Tendencia de sector aeroespacial [51] .....	71
Ilustración 28. Índice de confianza de FA[51] .....	71
Ilustración 29. Factores clave para elegir la impresión 3D [53] .....	72
Ilustración 30. Cantidad de piezas impresas en 3D.[52] .....	73
Ilustración 31. Volúmenes de producción de piezas impresas en 3D en 2023.[52] .....	74
Ilustración 32. Tamaño de las tandas de producción de impresión 3D [53].....	75
Ilustración 33. ¿Le ha ayudado la impresión 3D a ahorrar costes sustanciales en su proceso de fabricación? [52] .....	76
Ilustración 34. Las industrias que más están usando cada tecnología de impresión 3D [52] .....	77
Ilustración 35. Aplicaciones de la impresión 3D.[52] .....	77
Ilustración 36. Aplicaciones de la impresión 3D [53] .....	78
Ilustración 37. Desglose de las tendencias de impresión 3D por regiones [52] .....	79
Ilustración 38. Comparación de las cadenas de suministro tradicionales y de CM [55] ..	81
Ilustración 39. Evolución de las plataformas industriales en la nube [56] .....	82

Ilustración 40. Hyper Cycle para Tecnologías Emergentes [58] .....	85
Ilustración 41. Curva Gartner Fabricación Aditiva 2019 [59].....	86
Ilustración 42. Crecimiento en el mercado de la impresión 3D y predicciones[52] .....	87
Ilustración 43. ¿En qué sectores ve más posibilidades de que la impresión 3D tenga un impacto significativo? [52] .....	88
Ilustración 44. El futuro de la impresión 3D [52].....	89
Ilustración 45. ¿Qué impacto tendrá la IA en la industria de la impresión 3D? [52] .....	90
Ilustración 46. Imagen de la web de Xometry [ <a href="https://xometry.eu/es/">https://xometry.eu/es/</a> ] .....	94
Ilustración 47. Prótesis de pie por 3D Natives .....	97
Ilustración 48. Diseño de mascarilla por Cooper3D .....	99
Ilustración 49. Grippers biónicos impresos en 3D por BMW. ....	101
Ilustración 50. Modelo 3D diseñado por un ingeniero de Leitat [68] .....	104
Ilustración 51. Impresión 3D con hormigón [69] .....	106
Ilustración 52. Filtro para la purificación de agua por Ogilvy .....	107
Ilustración 53. Zapatillas impresas en 3D aprovechando residuos marinos por 3D Natives[73] .....	108
Ilustración 54. Proceso de la 3DCP[65] .....	109
Ilustración 55. Variación del límite elástico del cemento geopolímero de control (F100) y del cemento con residuos (F90G10) con el tiempo [65], [74] .....	111
Ilustración 56. Filamento y pieza impresa con PLA Mejillón. Fuente: Francofil .....	112

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Esquema de los materiales utilizados en los diversos métodos obtenido del MIT .....	45
Tabla 2. Aspectos básicos en una empresa industrial. Elaboración propia .....	91
Tabla 3. Comparación entre producción en masa y FA-I3D [61] .....	92
Tabla 4. Relación de la FA-I3D con conceptos relevantes en la Industria 5.0. Elaboración propia .....	95
Tabla 5. Aplicaciones del sector, elaboración propia. Imágenes por 3DNatives y 3DPrinting.com.....	100
Tabla 6. Aplicaciones del sector, elaboración propia. Imágenes por 3DNatives .....	103
Tabla 7. Aplicaciones del sector, elaboración propia. Imágenes por 3DNatives .....	105



# 1. INTRODUCCIÓN

## 1.1.Introducción

La Comisión Europea ha establecido un cambio de enfoque en el modelo de producción, dando prioridad a la sostenibilidad, las personas y la resiliencia, ya que el desarrollo industrial estaba basado en la innovación tecnológica y competitividad. Este cambio, que se encuentra dentro de la propuesta de Industria 5.0, busca no solo mejorar la competitividad de las empresas, sino también garantizar la resiliencia y la adaptabilidad frente a los desafíos emergentes, al tiempo que promueve una mayor integración entre humanos y tecnología.

El siguiente Trabajo de Fin de Máster (TFM) se enfoca en el impacto de una tecnología habilitadora específica, la Fabricación Aditiva-Impresión 3D (FA-I3D), en el nuevo modelo de producción propuesto por la Comisión Europea en este contexto. La FA-I3D, como parte integral de la Industria 4.0, representa una revolución en los procesos de fabricación, ofreciendo ventajas significativas en términos de flexibilidad, personalización y eficiencia.

El desarrollo de un modelo industrial más justo y sostenible requiere la integración de la fabricación aditiva con los principios de sostenibilidad, personas y resiliencia propuestos por la Industria 5.0. La FA-I3D no solo ayuda a la optimizar los recursos y reducir los desechos en los procesos de producción, sino que también fomenta que los trabajadores participen activamente en la toma de decisiones y trabajen juntos con otros actores en el ecosistema industrial.

## 1.2.Antecedentes

La evolución industrial ha pasado por varias fases, cada una marcada por innovaciones tecnológicas y cambios en los modelos de producción. La Industria 1.0 se inició con la mecanización y la introducción de máquinas de vapor a finales del siglo XVIII. Posteriormente, la Industria 2.0 estuvo marcada por la electrificación y la producción en masa a principios del siglo XX. La Industria 3.0, a partir de los años 70, se caracterizó por la automatización y la incorporación de tecnología de la información. Finalmente, a principios del siglo XXI, surgió la Industria 4.0, centrada en la digitalización, la conectividad y el uso de tecnologías avanzadas como el Internet de las Cosas (IoT), el big data y la inteligencia artificial (IA).

En este contexto, la Industria 5.0 emerge como una evolución de la Industria 4.0,

enfocándose en una mayor integración entre humanos y máquinas. A diferencia de sus predecesoras, la Industria 5.0 no solo busca la eficiencia y la productividad, sino también la sostenibilidad, la resiliencia y el bienestar de las personas. La sostenibilidad promueve prácticas industriales que minimizan el impacto ambiental, optimizan el uso de recursos y fomentan la economía circular. La resiliencia se centra en la capacidad de las industrias para adaptarse y recuperarse de crisis y cambios, garantizando la continuidad operativa. Además, el enfoque en las personas busca una colaboración más estrecha entre humanos y tecnologías avanzadas, mejorando la calidad de vida laboral y permitiendo una mayor personalización y participación en el proceso productivo.

La Fabricación Aditiva, comúnmente conocida como impresión 3D, es una tecnología que crea objetos tridimensionales a partir de modelos digitales añadiendo material capa por capa. Las ventajas clave de la FA incluyen la flexibilidad, permitiendo la producción de diseños complejos y personalizados sin necesidad de herramientas específicas; la eficiencia, reduciendo los tiempos de producción y los costos asociados al prototipado y la fabricación en series cortas; y la sostenibilidad, minimizando los residuos de material y permitiendo el uso de materiales reciclados.

En el contexto de la Industria 4.0, la FA se ha convertido en una tecnología habilitadora crucial. Integra perfectamente con otros sistemas avanzados como el IoT y la IA, facilitando la creación de fábricas inteligentes donde los procesos están conectados entre sí y optimizados en tiempo real.

La Industria 5.0 lleva la aplicación de la FA un paso más allá, promoviendo su uso no solo para la eficiencia y personalización, sino también para cumplir con los principios de sostenibilidad, resiliencia y bienestar humano. La optimización de recursos es un aspecto clave, ya que la FA permite una fabricación más precisa y eficiente, reduciendo el desperdicio y aprovechando materiales reciclables. Los sistemas basados en FA pueden ser más fácilmente ajustados y operados, permitiendo a los trabajadores involucrarse en el diseño y la toma de decisiones, mejorando su satisfacción y productividad. Además, la FA ofrece una capacidad única para adaptarse rápidamente a los cambios en la demanda y en las cadenas de suministro, facilitando una producción ágil y flexible.

## 2. ESTADO DEL ARTE

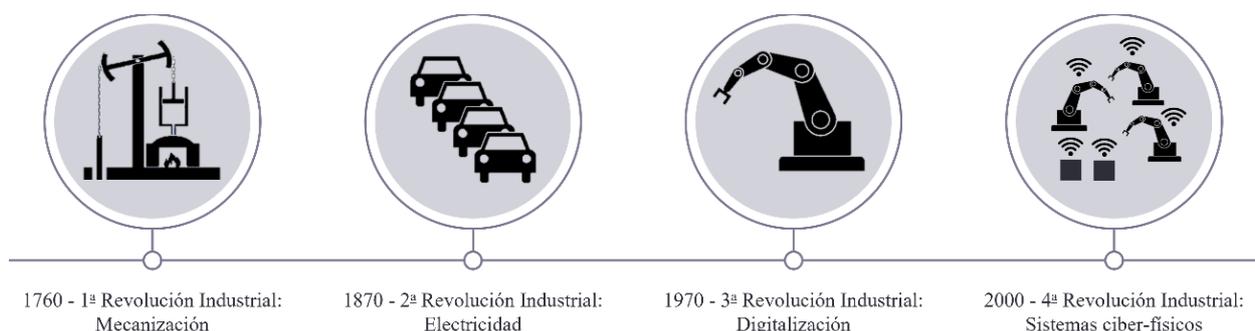
En este apartado se hará una revisión de la evolución de la industria a lo largo de la historia y la tecnología disruptiva de impresión 3D junto a su vinculación con la Industria 4.0.

### 2.1 Industria 4.0

#### 2.1.1 Evolución de la industria

Para una mejor comprensión de la Industria 4.0 se debe analizar la industria en sí misma. La industria es la rama de la economía encargada de la producción y fabricación de bienes materiales y servicios mediante la transformación de materias primas en productos finales. En un principio, el sistema productivo era un proceso artesanal costoso en términos de tiempo y recursos económicos. Sin embargo, la producción actual se caracteriza por bienes altamente mecanizados y automatizados.

El mundo se ha enfrentado al reto de producir más bienes en menor tiempo para satisfacer la creciente demanda. Por ello, fue muy importante la introducción de la industrialización, basada en la búsqueda de una economía impulsada por la producción en masa de bienes manufacturados mediante el uso de maquinaria y tecnología. Estas fases de desarrollo de la industria se conocen como revoluciones industriales. Han producido cambios significativos y han redefinido la forma en que se fabrican los bienes teniendo un impacto duradero en la sociedad y la economía. A continuación, la ilustración 1 muestra la evolución de la industria destacando el periodo y los desencadenantes del cambio:



*Ilustración 1. Evolución de la Industria*

La digitalización ha generado una variedad de aplicaciones para la Cuarta Revolución Industrial, que incluyen la automatización de procesos de manufactura y la simplificación de las tareas diarias en el hogar. De ahí surge el término Industria 4.0.[1]

La introducción de la industrialización marcó el comienzo de la Primera Revolución Industrial, también llamada Industria 1.0, que tuvo lugar en Gran Bretaña en el siglo XVIII. Este período se caracterizó por una serie de cambios significativos en la forma en que se producía y se organizaba la producción. La mecanización de los procesos, el uso de maquinaria y energía a vapor permitieron aumentar la fabricación de bienes. Estos avances condujeron a la creación de fábricas y a la adopción del sistema industrial.

La implementación del sistema industrial consistió en la división del trabajo y la especialización de los trabajadores en tareas específicas introduciendo así la producción en masa. Además, la invención de la máquina de vapor fue un acontecimiento fundamental que permitió la mecanización de la producción y el uso de energía en la industria. Asimismo, la máquina de vapor permitió la construcción de barcos más grandes y rápidos, impulsando el crecimiento del comercio marítimo y la expansión del Imperio Británico. Con la ayuda del crecimiento demográfico, las transformaciones agrarias y la situación política estable en el país, la sociedad tuvo los recursos suficientes para evolucionar en este sector. La burguesía, enriquecida gracias a su superioridad naval y el comercio colonial, desempeñó un papel crucial en el impulso de la industrialización.

La expansión del comercio internacional y la colonización de nuevas tierras proporcionaron nuevas oportunidades de negocio a finales del siglo XIX. Fue en este contexto que comenzó la Segunda Revolución Industrial como una evolución de la Industria 1.0, que trajo consigo importantes avances tecnológicos y transformaciones en la fabricación industrial.

Uno de los hechos más significativos fue la creación de la electricidad, el acero y el petróleo que permitieron un aumento sin precedentes en la fabricación industrial. Se implementó un nuevo sistema de producción conocido como producción en serie o producción en cadena, que involucraba el uso de la cadena de montaje y la división racional del trabajo con el fin de incrementar la eficiencia y productividad en las fábricas. Este método de fabricación permitió la producción masiva de productos estandarizados, lo que resultó en una reducción de costes y una mejora en la producción. También se produjo un importante avance en la tecnología del transporte, con la invención del motor de combustión interna, que impulsó la creación de automóviles, camiones y aviones.

La Tercera Revolución Industrial, también conocida como la Revolución Digital o la Revolución de la Información, se produjo a partir de la segunda mitad del siglo XX con la adopción de la electrónica y la digitalización en los procesos industriales. Esta revolución marcó un cambio radical en la forma en que se producía, se gestionaba y se distribuía la información y los bienes.

Uno de los aspectos clave de la Tercera Revolución Industrial fue la adopción generalizada de tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC). La digitalización de los procesos industriales permitió la transformación de la información analógica en formato digital, lo que facilitó su almacenamiento, procesamiento y transmisión de manera más eficiente. Los sistemas de gestión de datos, los sistemas de control industrial y la interconexión de dispositivos fueron algunos de los avances tecnológicos que impulsaron esta transformación.

La introducción de la electrónica en los procesos industriales fue otro componente esencial de esta revolución. La automatización de tareas a través de sistemas electrónicos y el reemplazo de la mano de obra humana en ciertas actividades mejoraron la eficiencia y la precisión de la producción. La implementación de controladores electrónicos, robots industriales y sistemas de control automatizados permitió una mayor velocidad de producción, una reducción de errores y una optimización de los recursos utilizados.

Además, la Tercera Revolución Industrial se caracterizó por la integración de los sistemas de producción. La interconexión y la comunicación entre diferentes etapas y departamentos de una cadena productiva permitieron una gestión más coordinada y un flujo de información más fluido. Los avances en las tecnologías de redes y comunicaciones facilitaron la integración de maquinaria, dispositivos y sistemas en un entorno digitalizado, lo que permitió la supervisión, el control y la toma de decisiones en tiempo real.

Esta revolución tuvo un impacto significativo en diversos sectores económicos. Por ejemplo, en la industria manufacturera, la digitalización y la automatización permitieron la producción de bienes personalizados en masa, conocida como fabricación aditiva o impresión 3D. En el ámbito de los servicios, la adopción de tecnologías digitales impulsó la creación de nuevas plataformas de comercio electrónico, servicios en la nube y soluciones digitales para la gestión empresarial.

En las tres primeras revoluciones industriales, el ser humano ha sido testigo y creador de tecnologías mecánicas, eléctricas y de la información, cuyo objetivo era mejorar la productividad de los procesos industriales. Ahora nos encontramos en la Cuarta Revolución Industrial o "Industria 4.0", liderada por la tecnología de objetos inteligentes para integrar el mundo real con la era de la información con vistas al futuro desarrollo industrial. [2].

### 2.1.2 Industria 4.0

La Industria 4.0 es un término relativamente nuevo nacido en Alemania. Este ha sido desde un principio un país líder y muy competitivo en la industria de fabricación. Con la crisis europea, plantearon una estrategia como parte de una iniciativa del gobierno para mantener su competitividad a nivel global y para ello el ministro federal de educación e investigación alemán eligió el término Industria 4.0 y publicó el artículo "Industria 4.0: La proyección del futuro para la producción, automatización y empleo" publicado en 2011 para impulsar la transformación digital. La idea detrás de la Industria 4.0 era aprovechar las tecnologías emergentes, como el Internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial, el análisis de datos y la computación en la nube, para impulsar la digitalización de los procesos industriales y lograr una mayor eficiencia y competitividad.

En 2013 este término se popularizó aún más cuando fue presentado en la Feria Industrial de Hannover y se convirtió en la estrategia nacional alemana. [2]. Alemania recomendó su implementación lo que captó la atención de gobiernos, grandes multinacionales y empresarios de todo el mundo que reconocieron su potencial transformador en la producción industrial. Desde entonces, este término es parte de nuestra sociedad.

La Industria 4.0 como ya hemos introducido anteriormente se refiere a una nueva fase de la revolución industrial que se caracteriza por la integración de tecnologías digitales avanzadas en los procesos de producción y fabricación. El uso de nuevas tecnologías permite la interconexión y comunicación de máquinas, sistemas y personas en la cadena de valor lo que facilita la automatización, el análisis de datos en tiempo real y la toma de decisiones más informadas.

La Industria 4.0 también implica la adopción de sistemas ciber físicos, donde la digitalización y la física se combinan para crear entornos de producción más flexibles y eficientes. Los sistemas ciber físicos permiten la comunicación y cooperación entre los elementos físicos (máquinas, robots, productos) y los componentes digitales (software, algoritmos, análisis de datos) para optimizar la producción y permitir la personalización masiva de productos.

Además de mejorar la eficiencia y la productividad, tiene como objetivo mejorar la experiencia del cliente y fomentar la innovación. La capacidad de producir productos altamente personalizados y adaptados a las necesidades individuales de los clientes es una de las ventajas clave de la Industria 4.0.

### 2.1.3 Tecnologías clave en la Industria 4.0

La Industria 4.0 se basa en el internet de las cosas (IoT), la impresión 3D, el big data y la analítica, la inteligencia artificial y otras tecnologías. Estas tecnologías han generado

cambios significativos no solo en la industria manufacturera sino también en el comportamiento del consumidor [3]. Y al mismo tiempo, fomentan la creación de capacidades que permiten a las empresas adaptarse a los cambios del mercado. Principales tecnologías presentes en la industria 4.0:

1. Internet de las cosas (IoT): Permite la conexión de dispositivos físicos a través de internet, lo que facilita la recopilación y el intercambio de datos en tiempo real. El IoT tiene que ver con situaciones en las que la conectividad de la red se extiende a objetos, sensores y artículos de uso diario que normalmente no se consideran desde un punto de vista computacional. Existe una interacción entre el mundo físico con los sistemas informáticos, lo que permite que estos dispositivos generen, intercambien y consuman datos con una mínima intervención humana [4].
2. Big Data y Analytics: La capacidad de recopilar, almacenar y analizar una gran cantidad de datos de varias fuentes para obtener información valiosa que pueda ser utilizada para la toma de decisiones.
3. Inteligencia Artificial (IA) y Machine Learning (ML): Las tecnologías de IA y ML permiten a las máquinas y sistemas aprender de los datos, reconocer patrones y tomar decisiones autónomas. Se utilizan para el análisis predictivo, la optimización de procesos y la automatización de diversas tareas.
4. FA-I3D: Las tecnologías de fabricación aditiva, como la impresión 3D, permiten crear piezas y componentes complejos capa a capa directamente a partir de diseños digitales. Este enfoque ofrece una mayor flexibilidad de diseño, menos residuos y una creación de prototipos más rápida.
5. Robótica y automatización: Estas tecnologías implican el uso de robots y sistemas automatizados para realizar tareas tradicionalmente llevadas a cabo por humanos. Mejoran la eficiencia, la productividad y la seguridad en la fabricación y otras industrias.
6. Realidad extendida: Estas tecnologías superponen información digital al mundo físico o crean entornos virtuales inmersivos, respectivamente. Se utilizan para el mantenimiento, la visualización de diseños y la colaboración remota en la industria.
7. Servicios en Cloud: Estos proporcionan acceso bajo demanda a recursos informáticos, como almacenamiento, capacidad de procesamiento y aplicaciones de software, a través de Internet. Permite soluciones escalables y rentables de almacenamiento de datos, procesamiento y despliegue de software.

Aunque como se comenta en [5] las implicaciones futuras de la industria pasan por el perfil de los trabajadores ya que la presencia global de Internet y el acceso inmediato a la información transformarán este concepto tal y como lo conocemos. Basándose en un uso inteligente de Internet, pasarán a ser profesionales capaces de hallar rápidamente soluciones a problemas complejos. Por ello, se considera fundamental trabajar en la dirección de hacer una interacción hombre-máquina en la que se presenten los datos de un modo integrado e intuitivo.

Las tecnologías mencionadas anteriormente están transformando la forma en que se concibe y se lleva a cabo la producción, y tienen el potencial de impulsar la eficiencia, la flexibilidad y la personalización en el sector industrial. A continuación, examinaremos en profundidad las tecnologías (paradigmas) habilitadoras de la Digitalización Industrial [6]:

#### 2.1.3.1 Internet de las cosas (IoT)

"Una red abierta y completa de objetos inteligentes que tienen la capacidad de autoorganizarse, compartir información, datos y recursos, reaccionando y actuando ante situaciones y cambios del entorno" es lo que se conoce como Internet de las cosas [7]. En otras palabras, Internet de las cosas se conoce como la interconexión de objetos cotidianos a través de Internet, lo que les permite recopilar y compartir datos de manera independiente sin la intervención humana directa.

Esto indica que los objetos están equipados con sensores y dispositivos conectados que les permiten comunicarse entre sí y con sistemas informáticos. Esto implica un cambio significativo en la comunicación entre humanos y dispositivos, o H2H (humano a humano) o H2D (humano a dispositivo). Este cambio de paradigma abre la posibilidad de generar grandes oportunidades y un gran potencial para el desarrollo y expansión de la tecnología.

Abarcan una amplia gama de aplicaciones, desde el seguimiento de la producción en una fábrica hasta la monitorización de la salud y el hogar. Las aplicaciones móviles y otros sistemas informáticos pueden monitorear y controlar objetos conectados, lo que permite la automatización y optimización de procesos.

Aunque el término no se utilizaba en ese momento, la primera aplicación conocida de Internet de las cosas se remonta a la década de 1980. Un grupo de programadores de la Universidad Carnegie Mellon en Pittsburgh creó una máquina de Coca-Cola en 1982 que podía verificar la disponibilidad de bebidas en la máquina en tiempo real y reportar su estado mediante sensores, microcontroladores, una interfaz de usuario e Internet.

El objetivo de este proyecto era informar a los estudiantes de la universidad sobre la existencia de estas bebidas en la máquina antes acercarse a ella. Se considera una de las primeras aplicaciones prácticas de IoT porque combinaba sensores, redes y computación para brindar información sobre un objeto físico en tiempo real. Aunque fue una solución básica en comparación con las tecnologías actuales de Internet de las cosas (IoT), estableció las bases para el desarrollo posterior de aplicaciones más avanzadas en este campo.

Sin embargo, un británico ,pionero en tecnología, llamado Kevin Ashton, director ejecutivo de Auto-ID Labs en el MIT, introdujo el término en 1999, describiéndolo como "objetos conectados identificables unívocamente con tecnología de identificación por radiofrecuencia "[8]. Esta idea ha ganado popularidad y han surgido numerosas formas de referirse a ella. Algunos de estos son la Web de las cosas, los dispositivos conectados, la Internet de las cosas o los sistemas ciber físicos. Esto se refiere a sistemas integrados que incorporan componentes digitales y físicos.

Es esencial cumplir con unos requisitos y establecer una arquitectura clara para garantizar un funcionamiento óptimo de IoT, lo que facilitará la interconexión de los dispositivos y permitirá una integración fluida entre el mundo físico y el virtual. “Al diseñar la arquitectura de IoT, se deben tener en cuenta la escalabilidad, la extensibilidad y la interoperabilidad entre dispositivos heterogéneos y sus modelos”. [8]

A continuación, se van a detallar los principales enfoques para diseñar sistemas en el IoT:

- Arquitectura de extremo a extremo:

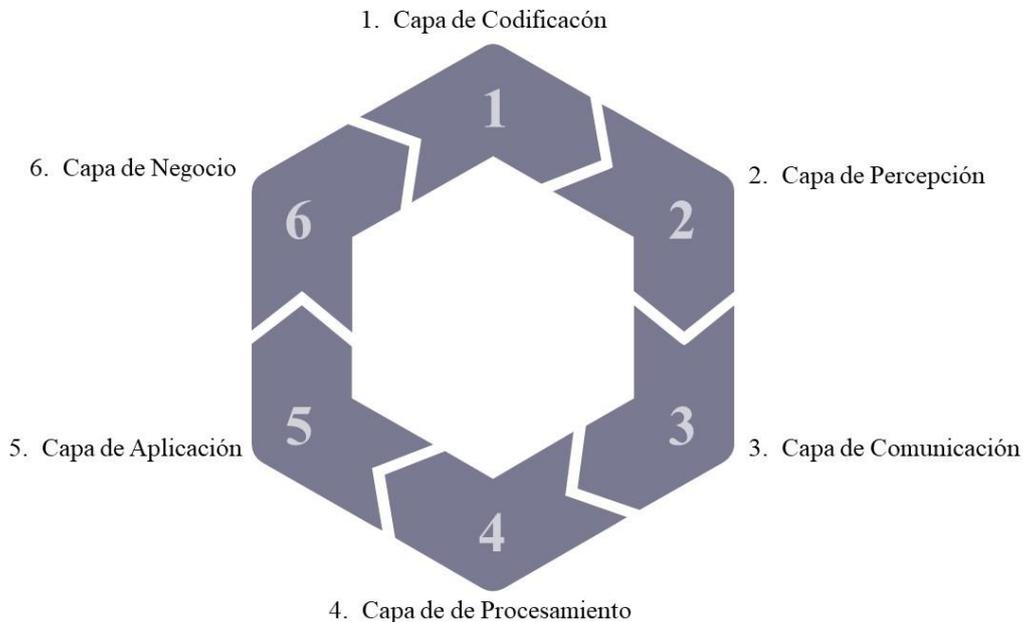
Esta arquitectura se basa en una conexión directa entre una plataforma en la nube y los dispositivos de IoT. Los dispositivos de Internet de las cosas (IoT) envían los datos a través de una red de comunicación a la nube, donde se procesan, almacenan y toman decisiones.

Al conectar directamente los dispositivos de IoT a la nube, se simplifica la infraestructura necesaria para el procesamiento y almacenamiento de datos. Esto puede conducir a una implementación más rápida y económica. Además, como los dispositivos de IoT pueden enviar datos a la nube de manera eficiente y la plataforma en la nube puede manejar grandes cantidades de datos de varios dispositivos, permite una alta escalabilidad.

Aunque esta arquitectura es sencilla y escalable, puede presentar problemas con la latencia y el ancho de banda en aplicaciones de tiempo real o con grandes cantidades de datos.

- Arquitectura de capas:

Este tipo de arquitectura divide el sistema de IoT en diferentes capas funcionales, cada una con su propio propósito. En el artículo [9] se establecen seis capas para clasificar la infraestructura de desarrollo de IoT. Esto permite una modularidad y escalabilidad adecuadas. Las capas, esquematizadas en la ilustración 4, se desarrollarán a continuación:



*Ilustración 2. Capas de la arquitectura de IoT*

1. Capa de codificación: Esta capa es la base del IoT al otorgar identificación a los objetos de interés. Cada objeto tiene un identificador digital único que le permite diferenciarse y es fácil de rastrear en el ámbito digital. Se han establecido varios estándares normalizados para facilitar la identificación de productos.
2. Capa de Percepción: Esta capa recopila datos del entorno físico utilizando variables como temperatura, presión y movimiento. Luego, se convierten en datos digitales para su posterior procesamiento. Los sensores y otros dispositivos conectados realizan esta tarea. El sistema de identificación por radiofrecuencia (RFID) es uno de ellos, que permite la identificación y seguimiento de objetos con etiquetas electrónicas que transmiten ondas de radio que contienen información única.
3. Capa de Comunicación: Los datos adquiridos en la capa de percepción se envían al sistema de procesamiento. Esta conexión entre capas se produce a través de protocolos de comunicación como son Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee, 5G, Near Field Communication (NFC), etc.
4. Capa de Procesamiento: Los datos recopilados por los sensores y otros

dispositivos se procesan y analizan en esta capa. Se utilizan algoritmos avanzados, aprendizaje automático, computación en la nube e inteligencia artificial.

5. Capa de Aplicación: Los resultados del análisis de datos se utilizan para crear productos y servicios específicos para cada tipo de industria. Las aplicaciones de monitorización, control remoto, optimización de procesos y análisis predictivo son algunos ejemplos de esto.
6. Capa de Negocio: En esta capa se concentran todos los aspectos comerciales y estratégicos del IoT necesarios para una implementación efectiva. Esta capa crea modelos de negocio que aprovechan las oportunidades de IoT, administran los servicios que se ofrecen y se integran con los sistemas existentes de la empresa. La generación de ingresos, la gestión de la cadena de suministro y la toma de decisiones basada en datos son algunos de los temas que se abordan.

#### 2.1.3.2 Inteligencia Artificial (IA) & Machine Learning (ML)

Según la Comisión Europea “la inteligencia artificial (IA) hace referencia a los sistemas que muestran un comportamiento inteligente mediante el análisis de su entorno y la adopción de medidas, con cierto grado de autonomía, para lograr objetivos específicos”[10].

Los sistemas basados en IA pueden funcionar como software independiente o en entornos virtuales como asistentes de voz, software de análisis de imágenes, motores de búsqueda y sistemas de reconocimiento de voz y facial. Además, pueden incorporarse a dispositivos de hardware como aplicaciones de IoT, vehículos autónomos, drones y robots sofisticados.

En otras palabras, la inteligencia artificial es una rama de la informática que se enfoca en crear sistemas y programas capaces de realizar tareas que normalmente requieren la inteligencia humana. Estos sistemas aprenden, razonan y toman decisiones sin intervención humana constante.

En 1956, John McCarthy, un pionero en el desarrollo de la inteligencia artificial, inventó este término. En la conferencia de Darmouth de este año, un grupo de diez investigadores se reunió con el siguiente propósito: “Se intentará descubrir cómo hacer que las máquinas utilicen el lenguaje, formen abstracciones y conceptos, resuelvan tipos de problemas que ahora están reservados a los humanos y se mejoren a sí mismos”[11]. Se considera el

punto de partida de la investigación de la IA. McCarthy la definió como “la ciencia y la ingeniería de la fabricación de máquinas inteligentes, especialmente programas informáticos inteligentes. Está relacionada con la tarea similar de usar computadoras para entender la inteligencia humana, pero la IA no tiene que limitarse a métodos que son biológicamente observables”[12].

Sin embargo, este concepto ya había sido desarrollado en el pasado. En 1950, Alan Turing, reconocido como uno de los padres de la ciencia computacional, propuso con su artículo [13] un método para evaluar la capacidad de una máquina para mostrar un comportamiento inteligente, el Test de Turing. El objetivo del test era determinar si una máquina puede mostrar un nivel de inteligencia que sea indistinguible del de un ser humano al responder una serie de preguntas. Sin embargo, ha sido objeto de debate a lo largo de los años porque algunos argumentan que no es una medida adecuada de la inteligencia verdadera y que simplemente evalúa la capacidad de imitar las respuestas humanas en lugar de comprender o pensar como lo haría un ser humano.

Posteriormente, Stuart J. Russell y Peter Norvig publicaron “Artificial Intelligence: A Modern Approach”[11], y se convirtió en uno de los libros de referencia más destacados en el campo de la IA. En él exploran y analizan los cuatro enfoques fundamentales de la IA, que se distinguen de los sistemas informáticos convencionales por su capacidad para racionalizar y pensar en lugar de simplemente actuar de manera automatizada[14]:

- Sistemas que piensan como humanos: Se refiere a la capacidad de los sistemas de inteligencia artificial para imitar el razonamiento, el aprendizaje, la resolución de problemas y la toma de decisiones de los humanos. Estos sistemas tienen como objetivo replicar la mente humana y sus procesos cognitivos.
- Sistemas que piensan racionalmente: Este se enfoca en el razonamiento lógico y la racionalidad en la toma de decisiones. Los principios y reglas formales sirven como base para estos sistemas para llegar a conclusiones lógicas y tomar decisiones fundamentadas. Los sistemas expertos son un ejemplo de este tipo. La idea principal detrás de ellos es utilizar el conocimiento y la experiencia de expertos humanos en un área específica para resolver problemas y tomar decisiones de manera similar a como lo haría un experto.
- Sistemas que actúan como humanos: Se trata de que los sistemas de IA tengan la capacidad de interactuar, comunicarse y comportarse socialmente de manera similar a los seres humanos. Estos sistemas tienen como objetivo replicar los

aspectos externos y perceptibles del comportamiento humano. El examen de Turing es un buen ejemplo de este enfoque porque se centra en la capacidad de imitar las características humanas y actuar lo más parecido a ellas.

- Sistemas que actúan racionalmente: Este enfoque se basa en la idea de que los sistemas de IA tomen acciones que sean lógicas y razonables y que maximicen el logro de objetivos. La racionalidad se define como la consecución de objetivos y metas, no necesariamente imitando el comportamiento humano. Los asistentes virtuales como Siri o Alexa, que pueden brindar información y realizar llamadas, son un ejemplo de esta IA.

En la actualidad, la inteligencia artificial ha experimentado un cambio significativo y se ha convertido en un campo de estudio y aplicación ampliamente reconocido. La IA ha cambiado muchos campos, como la salud, el comercio, la automoción y la atención al cliente, junto con los avances en el aprendizaje automático, el procesamiento del lenguaje natural y otros campos relacionados.

“Los sistemas inteligentes que ofrecen capacidades de IA a menudo se basan en machine learning”[15]. El machine learning, también conocido como aprendizaje automático, es un enfoque de la IA que se centra en la creación de modelos y algoritmos capaces de aprender y mejorar automáticamente a partir de datos sin necesidad de ser programadas explícitamente para realizar tareas específicas. El machine learning permite que las máquinas analicen y reconozcan patrones en los datos, utilizando esta información para tomar decisiones o realizar predicciones[16], en lugar de seguir instrucciones precisas.

Esta técnica se basa en la idea de "entrenamiento" de un modelo utilizando conjuntos de datos de entrenamiento, donde se le dan a la máquina ejemplos etiquetados o datos históricos para que pueda aprender y generar un modelo predictivo. El rendimiento del modelo mejora a medida que se expone a más datos y se ajusta a los patrones. Además, puede generalizar para hacer predicciones o tomar decisiones con datos no vistos previamente.

Existen tres tipos de machine learning que se utilizan dependiendo de la tarea requerida y los datos disponibles:

El aprendizaje supervisado proporciona al algoritmo un conjunto de datos etiquetados, lo que significa que los datos tienen un resultado conocido. Estos ejemplos etiquetados enseñan al algoritmo cómo predecir o clasificar nuevos datos. Podemos distinguir dos tipos de problemas de aprendizaje supervisado: problemas de regresión, que predicen un valor numérico, y problemas de clasificación, que clasifican valores cualitativos de

manera categorizada.

En el aprendizaje no supervisado, el algoritmo no recibe etiquetas o respuestas conocidas. Por el contrario, el algoritmo debe encontrar patrones o estructuras ocultas en los datos. Se utiliza para tareas como la agrupación de datos.

Por último, el aprendizaje por refuerzo utiliza un sistema de recompensa y castigo. En lugar de recibir valores de entrada y salida, el algoritmo recibe una descripción del problema, posibles acciones, objetivos y restricciones. Debe aprender a través de la interacción con su entorno y recibe recompensas o castigos según las acciones que realiza. El objetivo es maximizar la recompensa a lo largo del tiempo, lo que requiere tomar decisiones y aprender de las consecuencias.

### 2.1.3.3 Realidad extendida (AR & VR)

La realidad extendida es un concepto amplio que abarca todas las tecnologías relacionadas con la inmersión y combinación entre el mundo real y el virtual.

#### - Realidad virtual

La realidad virtual (RV) es una tecnología inmersiva que permite a los usuarios entrar en entornos virtuales tridimensionales y sentirse presentes en esos mundos digitales. Los usuarios pueden explorar e interactuar con este entorno simulado como si estuvieran físicamente presentes en él utilizando dispositivos como gafas de RV y mandos de movimiento. Para brindar una experiencia completa, un sistema de realidad virtual debe tener tres características fundamentales: una respuesta inmediata a las acciones del usuario, gráficos en tres dimensiones en tiempo real y una sensación de inmersión total en el entorno virtual.

La inmersión y la interactividad son los pilares de la RV, que incluyen el enfoque en la información que se quiere tratar, el bloqueo de distracciones y la capacidad de colaborar con el mundo virtual [17]. La RV se remonta a la década de 1960. Los primeros investigadores comenzaron a experimentar con la creación de entornos virtuales inmersivos en este momento. En la década de 1980, Jaron Lanier, el fundador de VPL research, inventó el término RV. Lanier creó sistemas y dispositivos pioneros en el campo de la RV y utilizó el término para describir la experiencia de inmersión en entornos virtuales generados por ordenador.

- Realidad aumentada

Otra tecnología relacionada que ha ganado popularidad en los últimos años es la realidad aumentada (RA). La RA superpone información digital en el mundo físico, mientras que la RV crea un entorno completamente virtual. Al agregar capas de información digital, tiene como objetivo mejorar la realidad existente. Para lograr esto, la RA utiliza tecnologías como cámaras, sensores y dispositivos móviles para capturar imágenes del entorno y agregar gráficos o información adicional en tiempo real. Es importante tener en cuenta que esta no se limita a aspectos visuales; "la RA puede aplicarse potencialmente a todos los sentidos, aumentando también el olfato, el tacto y el oído"[18].

La historia de esta tecnología se remonta a 1955, cuando el cineasta Morton Heilig creó Sensorama, un prototipo que buscaba cubrir todos los sentidos. Era capaz de reproducir películas en 3D, transmitir olores y producir vibraciones. Aunque no se puede considerar el primer sistema de RA porque no proporcionaba una experiencia interactiva ni la capacidad de superponer elementos virtuales al entorno real, sentó las bases para el desarrollo posterior de tecnologías más avanzadas.

- Realidad mixta

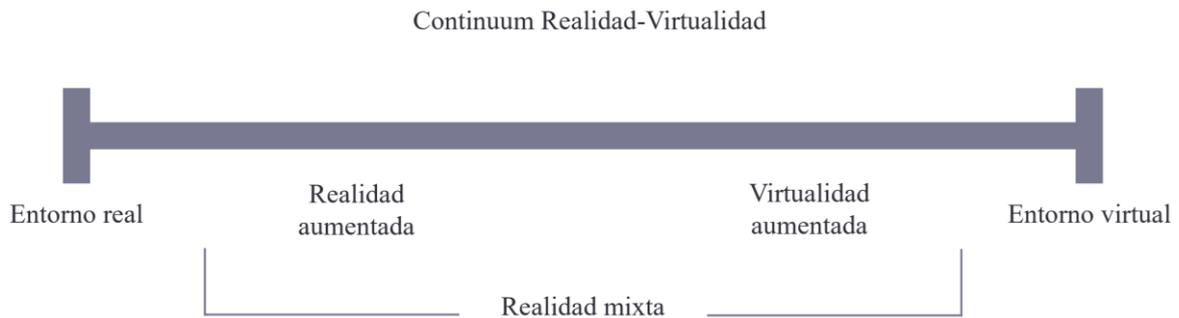
La realidad mixta (RM) es una combinación de la RV y la RA, que permite interactuar con objetos virtuales en el entorno físico de manera más inmersiva y realista. A diferencia de la RV, que crea un entorno completamente virtual, y la RA, que superpone elementos virtuales al entorno real, la RM integra elementos virtuales y físicos de manera más coherente.

En 1994, Paul Milgram y Fumio Kishino publicaron un artículo titulado "Una taxonomía de las pantallas visuales de realidad mixta", donde proponen una clasificación de los diferentes tipos de RM. "Milgram y Kishino definieron el Continuum Realidad-Virtualidad como un continuo que abarca entre el entorno real y el entorno virtual, que comprende RA y la virtualidad aumentada (VA) en el medio, donde la RA está más cerca del mundo real y la VA está más cerca de un entorno virtual puro."[18]

La VA es una forma avanzada de realidad aumentada en la que los objetos y componentes virtuales interactúan de manera más realista y coherente con el entorno físico. Para integrar los elementos virtuales en el mundo real de manera más precisa y convincente, la VA utiliza tecnologías como la detección y reconocimiento de objetos, el seguimiento

de posición y movimiento y la simulación de física. Al combinar elementos virtuales con el entorno físico de manera más fluida y realista, la VA suele crear una experiencia más inmersiva y creíble.

La clasificación realizada en la ilustración 7 muestra que hay una variedad de experiencias y tecnologías inmersivas disponibles, y no solo se limita a una distinción binaria entre lo "real" y lo "virtual".



*Ilustración 3. Clasificación de la realidad mixta según Milgram y Kishino*

#### 2.1.3.4. Digital Twin

El gemelo digital más conocido como "digital twin" es una aplicación innovadora de la realidad extendida. Es una representación virtual y completa de un sistema u objeto físico que puede incluir tanto sus características como su geometría y comportamiento. El gemelo digital permite la creación de réplicas virtuales precisas de objetos y sistemas del mundo real mediante el uso de tecnologías de simulación y modelado.

El gemelo digital simula, analiza y optimiza sistemas y objetos digitales, es decir, no se limita a la visualización y la interacción con el entorno virtual. Proporciona una plataforma para realizar pruebas y experimentos virtuales, lo que puede acelerar el proceso de diseño, identificar problemas o mejoras potenciales y optimizar el rendimiento antes de implementarlos en el mundo real.

#### 2.1.3.5. Fabricación aditiva

La fabricación aditiva es una tecnología disruptiva que ha cambiado el proceso de fabricación de muchos productos. La incorporación gradual de material hasta completar la pieza objetivo es la diferencia entre la fabricación tradicional. Esta adición de material

se lleva a cabo mediante la unión de capas adicionales a una capa de material existente [19].

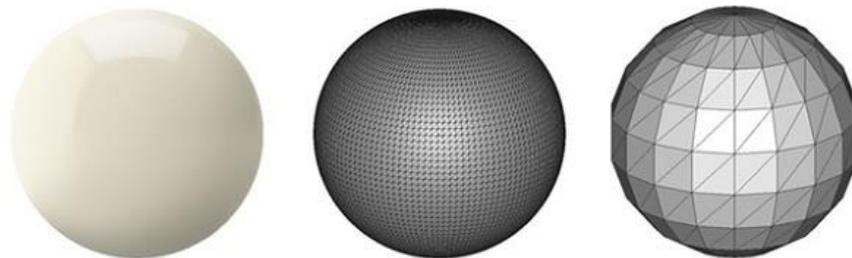
Se define como un proceso de fabricación que “consiste, básicamente, en manipular material a escala micrométrica y depositarlo de forma muy precisa para construir un sólido”. Las principales características que diferencian a este proceso de fabricación de los convencionales son la capacidad de reproducción de geometría complejas, la reducción de residuos y la facilidad para la personalización del producto [20].

Las principales características que diferencian a este proceso de fabricación de los convencionales son la capacidad de reproducción de geometría complejas, la reducción de residuos y la facilidad para la personalización del producto.

La complejidad geométrica de los productos ya sean espesores variables, formas irregulares y vaciado interior, no suponen un reto para este método. Por el contrario, puede suponer una facilidad en la deposición al disponer de huecos y por ello reducir el tiempo y coste de fabricación.

La personalización es otro factor de gran relevancia. El coste es independiente de la semejanza de los productos por lo que es igual si se producen un número de piezas iguales o distintas, permitiendo la personalización en masa.

En este proceso de fabricación se diseña un objeto tridimensional mediante el software “Computer-aided design” (CAD). Más tarde, este archivo se convierte en un archivo STL (“Standard Tessellation Language”) para permitir su “impresión”. “El proceso de creación de archivos STL convierte principalmente la geometría continua del archivo CAD en una cabecera, pequeños triángulos o una lista de coordenadas (x, y, z) y el vector normal a los triángulos”[21]. Para una mejor comprensión se adjunta la siguiente ilustración.



*Ilustración 4. Archivo CAD exportado a archivos STL con alta y baja resolución*

La primera técnica de creación capa por capa fue el prototipado rápido en la década de 1980. Permite la creación de prototipos y modelos, surgió para ayudar a los ingenieros a hacer realidad sus ideas. En un principio, se creó para realizar pruebas de productos, pero hoy en día se producen muchos artículos finales de esta manera.

Otras tecnologías, como la "fabricación asistida por ordenador" (CAM) y el "control numérico por ordenador" (CNC), permitieron la fabricación rápida junto con el uso de CAD. Utilizan comandos numéricos programados para crear instrucciones de fabricación y control automatizado de máquinas herramienta. La impresión de objetos tridimensionales fue posible gracias a la combinación de estas tres tecnologías [22].

Existen muchos métodos de fabricación aditiva. Esto se pueden clasificar en función del material base utilizado si es líquido, sólido o en polvo. Entre todos los métodos que existen, esquematizados en la ilustración posterior, destacaremos para la base líquida: la deposición de material fundido (FDM) y la estereolitografía (SLA), para la base en polvo: la sinterización selectiva por láser (SLS) y la impresión 3D (3DP) y para la base sólida: la fabricación de objetos laminados (LOM). Cada uno de estos métodos utiliza diferentes tecnologías y materiales, lo que permite la fabricación de una amplia variedad de objetos, desde prototipos y piezas personalizadas hasta herramientas y componentes complejos.

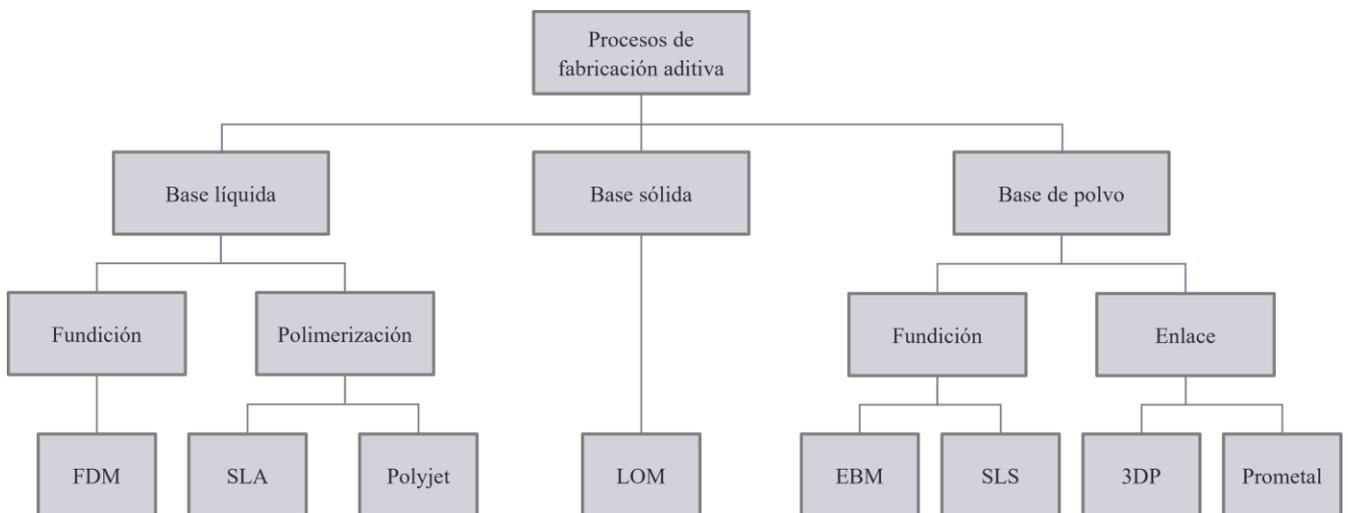


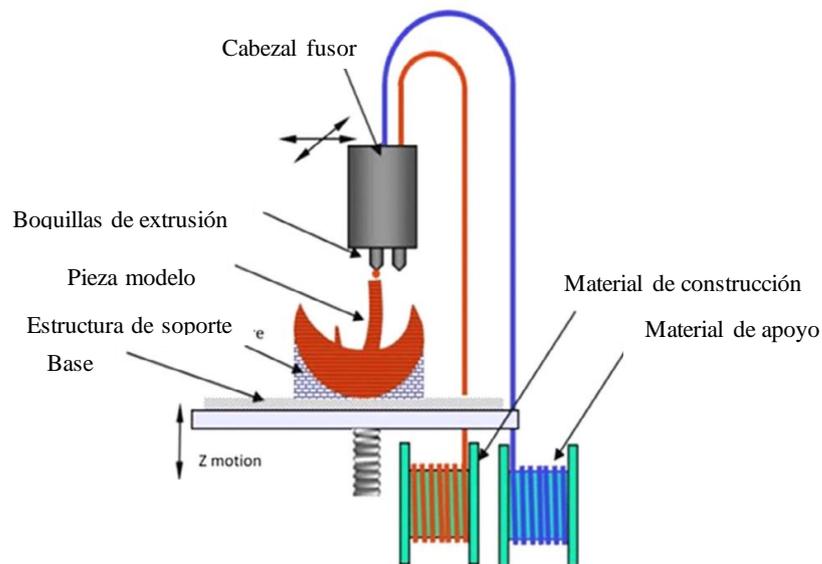
Ilustración 5. Clasificación procesos de fabricación aditiva

El primer proceso de prototipado rápido fue la estereolitografía (SLA). Por esta razón, estos dos términos se consideraban sinónimos, pero ahora hay otros procesos de fabricación como FDM y LOM, que se refieren al prototipado rápido.

La fotopolimerización, que es el endurecimiento de un polímero líquido o resina a través de un láser ultravioleta, es la base de la SLA. Este proceso requiere una estructura que

alberga la resina, una plataforma donde se ancla la pieza capa a capa y un émbolo que permite que la base se mueva. Cada vez que el rayo láser actúa en la resina, se forma una capa y una plataforma baja hasta que se produce el producto final.

El modelado por deposición fundida (FDM) es un método en el que un material termoplástico en forma de filamento fino se alimenta a través de una boquilla caliente. El filamento se funde en el cabezal de fusor y se coloca capa por capa sobre una plataforma de construcción, donde se solidifica rápidamente para formar el objeto deseado. Es muy popular porque es fácil de usar y accesible. Como en todos estos procesos, el diseño se realiza utilizando CAD y se establecen parámetros de impresión como la temperatura de fusión, la velocidad de deposición y la altura de capa.



*Ilustración 6. Representación del proceso de FDM adaptado [23]*

También hay que tener en cuenta la fabricación de objetos laminados (LOM) es un proceso en el que se utiliza material en forma laminar y cada capa se corta en la forma deseada con un láser, generalmente de dióxido de carbono. Para adherir las capas, se aplica adhesivo en polvo o líquido sobre la capa anterior junto con calor y presión.

La fabricación aditiva ofrece un gran abanico de ventajas para la industria, pero aún enfrenta limitaciones que impiden su adopción generalizada. Algunas limitaciones específicas incluyen la disponibilidad y el coste de los materiales, que son inferiores y más altos respectivamente en comparación con los métodos tradicionales de fabricación. Por otro lado, es importante observar la velocidad de fabricación por su relación con el acabado superficial ya que aumentar la velocidad puede afectar la calidad del acabado.

La calidad del producto y la repetitividad del proceso también pueden ser problemáticas, ya que algunos métodos no garantizan la precisión dimensional o la estabilidad de las propiedades físicas de las piezas.

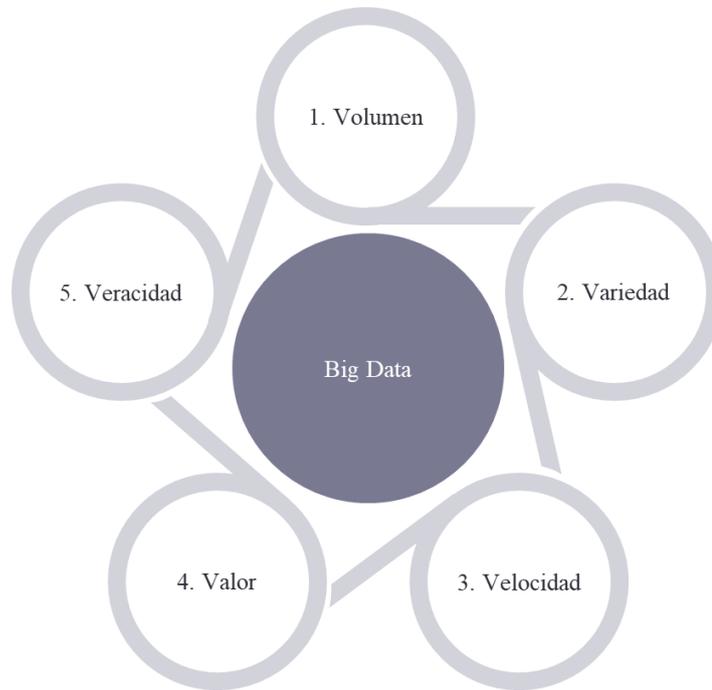
A pesar de estas limitaciones, investigadores y empresas en todo el mundo están abordando estos desafíos a través de la investigación, el desarrollo tecnológico y la innovación, con el objetivo de superar las barreras y aprovechar todo el potencial de la tecnología de fabricación aditiva. Se ha conseguido el desarrollo de materiales avanzados, mejoras en la velocidad y productividad, precisión y calidad de las piezas, innovación en el diseño y la impresión de materiales múltiples [24].

#### 2.1.3.6. Big Data y Analytics

En la actualidad, existen grandes cantidades de datos que se acumulan con el tiempo son difíciles de analizar y manejar utilizando herramientas de gestión de bases de datos comunes [25]. Estos datos se conocen como Big Data.

El aumento exponencial de los datos ha sido impulsado por el creciente volumen y detalle de la información captada por las empresas, el auge de la multimedia, las redes sociales y el Internet de las cosas [26]. Los datos pueden contener patrones, tendencias y correlaciones que son difíciles de descubrir con métodos de análisis convencionales. Las organizaciones pueden aprovechar estas grandes cantidades de datos para obtener información útil, tomar decisiones inteligentes y descubrir oportunidades u obstáculos que antes no eran evidentes.

La siguiente ilustración muestra la naturaleza del Big Data con cinco características principales. Se denomina "5 Vs" cada una de ellas representa un aspecto crucial al trabajar con grandes cantidades de datos.



*Ilustración 7. Uves del Big Data*

1. **Volumen:** El término "Big Data" se caracteriza por cantidades significativas de datos, como ya se ha mencionado anteriormente. La gestión de grandes cantidades de datos es un desafío tanto técnico como analítico. La confiabilidad de los resultados de los estudios aumenta con la cantidad de datos.
2. **Variedad:** El Big Data puede incluir datos estructurados, datos no estructurados y datos semiestructurados. Los datos estructurados son datos organizados en un formato predeterminado y coherente que se encuentra en tablas con filas y columnas. Las bases de datos relacionales facilitan el almacenamiento y el procesamiento de estos datos.

Aunque los datos semiestructurados no cumplen con el formato rígido de los datos estructurados, aún tienen algún nivel de organización o etiquetado que los permite interpretarse como archivos JSON (JavaScript Object Notation) o XML (eXtensible Markup Language). Finalmente, los datos no estructurados carecen de un formato u organización predeterminado, como texto, imágenes o videos. Estos datos no tienen una estructura definida y son difíciles de analizar y procesar

mediante métodos tradicionales. La tarea consiste en administrar y analizar estos diversos tipos de datos.

3. **Velocidad:** El Big Data requiere sistemas y procesos rápidos para capturar y analizar datos en tiempo real o cerca de tiempo real.
4. **Valor:** Como se ha comentado, el objetivo del análisis de Big Data es aprovechar el potencial de extraer valor y conocimiento significativo de los datos. Esto implica utilizar los datos para tomar decisiones informadas, descubrir patrones y tendencias, y obtener conocimientos valiosos que mejoren la eficiencia y la toma de decisiones en diversos ámbitos.
5. **Veracidad:** Para garantizar que los datos sean precisos, se requiere un proceso de limpieza y validación.

Se utilizan varias estrategias en el campo del Big Data para maximizar el potencial de los grandes volúmenes de datos. El procesamiento distribuido, el análisis de datos en tiempo real, el aprendizaje automático, la minería de datos y la visualización de datos son solo algunos de los muchos campos que comprenden estas técnicas.

En el procesamiento de datos a gran escala, el procesamiento distribuido es una técnica importante. Permite dividir la carga de trabajo entre varios nodos de procesamiento, lo que acelera el procesamiento y permite el manejo eficiente de volúmenes masivos de datos. Esto se logra utilizando tecnologías como el Procesamiento Paralelo Masivo (MPP) y frameworks como MapReduce.

Una técnica crucial para el análisis de Big Data es el aprendizaje automático. Se trata de modelos y algoritmos que, como ya hemos explicado anteriormente, permiten a las máquinas aprender de los datos y hacer predicciones o tomar decisiones basándose en patrones y tendencias identificados en los datos. La clasificación, la regresión, los árboles de decisión y las redes neuronales son algunas de las técnicas de aprendizaje automático más comunes.

La minería de datos es un método para encontrar patrones, relaciones y conocimientos ocultos en una colección de datos. Se utilizan algoritmos y técnicas de exploración de datos para obtener datos relevantes y valiosos. La detección de anomalías, la segmentación de grupos de datos, la asociación de elementos y otras técnicas pueden ser parte de esto.

Además, la visualización de datos es esencial para comprender y comunicar los resultados del análisis de Big Data. Los patrones, las tendencias y los hallazgos extraídos de los datos se pueden representar de manera clara y concisa a través de gráficos, tablas y visualizaciones interactivas.

#### 2.1.3.7. Robótica

La robótica es una tecnología que juega un papel crucial en la Industria 4.0. Se refiere al “diseño, construcción, programación y operación de robots y sistemas autónomos que pueden realizar tareas de forma automática o semiautomática, interactuando con su entorno y utilizando sensores, actuadores y sistemas de control” [27] llevando a cabo diversas actividades.

Como se define en el libro Introducción a la robótica [28], un robot es un sistema complejo compuesto por componentes mecánicos, electrónicos y computacionales, que tiene la capacidad de interactuar con su entorno y realizar tareas programadas o de forma autónoma. La robótica abarca una variedad de campos, incluida la cinemática y dinámica de los robots, la planificación de movimientos, la percepción sensorial, el control y el uso de la inteligencia artificial en sistemas robóticos. Los robots van desde manipuladores industriales con brazos articulados hasta robots móviles con ruedas o patas.

La robótica se basa en la comunicación y colaboración entre robots y humanos, así como entre robots y otros sistemas de producción. Los robots pueden comunicarse a través de redes de comunicación y compartir datos con sensores, máquinas y sistemas de control en tiempo real. Esto permite una mayor coordinación y sincronización en el proceso de producción, lo que aumenta la eficiencia y la flexibilidad en la fabricación.

La forma en que los robots interactúan con su entorno y toman decisiones ha cambiado gracias a la IA. Los robots pueden percibir su entorno, aprender de la experiencia y adaptarse a las situaciones cambiantes utilizando algoritmos y técnicas sofisticadas. Los robots pueden usar el machine learning para aprender de los datos y mejorar su desempeño con el tiempo. Otra área importante de investigación en robótica es la visión por ordenador. Permite a los robots procesar la información visual de su entorno, lo que les permite reconocer objetos, seguir rutas y tomar decisiones basándose en la información visual capturada. El campo de la navegación autónoma es crucial para permitir que los robots se muevan de manera autónoma en entornos complejos. Esto

implica la creación de algoritmos de mapeo, localización y planificación de rutas para que los robots se muevan de forma segura y eficiente.

#### 2.1.3.8. Cobots

Los robots colaborativos, también conocidos como cobots, están diseñados para trabajar de forma segura y eficiente junto a los seres humanos, compartiendo el mismo espacio de trabajo. A diferencia de los robots industriales tradicionales, que suelen estar confinados en jaulas de seguridad para evitar accidentes, los cobots son más flexibles y pueden colaborar directamente con los humanos en tareas como ensamblaje, manipulación de objetos, empaquetado, entre otras. Estos robots están equipados con sensores avanzados y sistemas de detección de colisiones para garantizar la seguridad durante la interacción con las personas.

#### 2.1.3.9. RPA & HyperAutomation

La RPA (Automatización Robotizada de Procesos) y la hiper automatización son dos grandes avances en la forma en que las empresas pueden automatizar procesos y aumentar la eficiencia operativa. La entrada de datos, el procesamiento de transacciones y la gestión de respuestas a correos electrónicos son ejemplos de tareas repetitivas y de gran volumen que normalmente requerían intervención humana. El término RPA se refiere al uso de software para automatizar estas tareas. Estos robots de software, también conocidos como "bots", tienen la capacidad de interactuar con sistemas y aplicaciones de la misma manera que lo haría un usuario humano, pero con mayor rapidez, precisión y sin fatiga.

En el concepto de hiper automatización se combina la RPA con otras tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial (IA) o el machine learning (ML). Tiene como objetivo no solo automatizar tareas, sino también brindar herramientas que puedan ayudar a tomar decisiones complejas y mejorar los procesos a través de una mayor comprensión y análisis de los datos disponibles. Por ejemplo, mientras que la automatización robotizada de procesos (RPA) puede automatizar el ingreso de datos de un formulario a un sistema, la hiper automatización también puede analizar las tendencias de esos datos para proporcionar conocimientos y sugerir estrategias para la empresa.

Las empresas pueden obtener muchos beneficios de la implementación de estas tecnologías. El beneficio más notable es una mayor eficiencia operativa pero no la única. También ayuda a reducir errores y costes, ya que deja a los empleados libres para realizar tareas que necesitan mayor creatividad.

Los desafíos que presentan estas tecnologías son:

- La gestión del cambio dentro de la organización. Puede existir una resistencia al cambio debido a una posible pérdida de empleo o la no capacitación del personal.
- Es posible que sea necesario formar al personal e incluso derivarlos a nuevas tareas si lo que estaban acostumbrados a realizar se puede automatizar.
- Es necesario establecer normativas para que haya una buena interacción hombre-máquina.
- Se necesita proteger los datos de los sistemas ya que es posible que manejen información confidencial.

#### 2.1.3.10. Control Tower

El término Control Tower (Torre de control) se refiere a una solución tecnológica sofisticada que permite la visibilidad y el control de múltiples componentes y procedimientos de la cadena de suministro desde un solo lugar. Funciona como un centro de mando donde las organizaciones pueden ver todas las actividades logísticas, desde la producción hasta la entrega final al cliente, en tiempo real. Datos como los inventarios, los envíos, los pedidos y otros factores que afectan a la eficiencia de la cadena de suministro.

Este sistema hace uso de otras tecnologías como big data, inteligencia artificial (IA) y machine learning (ML) para recoger y procesar grandes cantidades de datos de diversas fuentes. Esto permite a las empresas anticipar problemas, gestionar riesgos y tomar decisiones de forma más rápida al integrar y analizar estos datos. Por ejemplo, puede identificar automáticamente cuellos de botella en la cadena de suministro, prever retrasos en las entregas y sugerir rutas o soluciones alternativas para evitar interrupciones.

La implementación de esta tecnología permite una gestión integral de la cadena de suministro para ayudar a tomar decisiones y optimizar los recursos disponibles en la empresa, para responder ante cualquier imprevisto. También existen riesgos asociados a la integración de los sistemas, ya que hay distintos elementos que entran en juego y es necesario que sean compatibles y capaces de realizar las tareas específicas que requiere cada empresa. En esta integración también juega un papel importante el personal, que debe estar cualificado para manejar estos sistemas.

#### 2.1.3.11. Ciberseguridad

En entornos industriales, la ciberseguridad es esencial para proteger sistemas, redes, programas, dispositivos y datos de ataques, daños y acceso no autorizado. El mantenimiento de la integridad y disponibilidad de los sistemas de fabricación y control

es crucial para la operación segura y continua de las plantas de producción.

En la gestión de acceso se está adoptando cada vez más la autenticación multi factor y la gestión de privilegios, que son esenciales para controlar el acceso a recursos críticos y reducir el riesgo de compromisos internos. Para garantizar la integridad y disponibilidad de los datos sensibles, se requiere el cifrado y estrategias sólidas de respaldo y recuperación.

Todavía es necesaria la educación y los programas de concienciación para formar a los usuarios en este ámbito. Existen normativas y estándares de cara a asegurar que las prácticas de seguridad estén alineadas con las normativas internacionales y contribuyan a una gestión de riesgos efectiva. El uso de herramientas vinculadas a la red ha planteado nuevos desafíos para cualquier empresa moderna que no sólo se plantea a nivel técnico sino que debe ser también una prioridad estratégica.

#### 2.1.3.12. Blockchain

En el libro [29], el blockchain es descrito como un protocolo fiable que transforma el sistema económico y el orden de los asuntos humanos hacia algo mejor. Se define como un libro contable digital distribuido que registra transacciones en bloques de datos. Cada bloque está encriptado y enlazado al anterior, formando una cadena inmutable que no puede ser alterada sin cambiar todos los bloques y sin el consenso de la red.

Las aplicaciones que tiene esta tecnología son debidas a la seguridad que aporta. Un ejemplo es su uso en transacciones financieras, esta aplicación es muy conocida a través de criptomonedas como Bitcoin. Aunque no es su único uso, se puede usar para minimizar el fraude electoral, ya que puede ofrecer un sistema de votación más seguro y poniendo el foco en una empresa industrial, puede ayudar en la trazabilidad y en la fiabilidad de su cadena de suministro.

También tiene desafíos pendientes, como pueden ser su regulación y la simplificación de su integración con los usuarios.

#### 2.1.3.13. Servicios en Cloud

Los servicios en la nube ofrecen recursos y aplicaciones que están disponibles en línea a través de Internet, lo que elimina la necesidad de infraestructuras físicas que pueden ser costosas. Los servicios en la nube más comunes son Software como Servicio (SaaS), Plataforma como Servicio (PaaS) e Infraestructura como Servicio (IaaS).

- SaaS: ofrece aplicaciones de software gestionadas por el proveedor, accesibles desde cualquier navegador y bajo un modelo de suscripción. Ejemplos incluyen Google Workspace y Microsoft Office 365, siendo ideales para empresas que buscan reducir costes en software y hardware y mejorar la accesibilidad.
- PaaS: proporciona a los desarrolladores herramientas y un entorno en línea para desarrollar y desplegar aplicaciones sin preocuparse por la infraestructura subyacente. Plataformas como Google App Engine facilitan el desarrollo al reducir costes y permitir la simplificación en la gestión de aplicaciones.
- IaaS: ofrece recursos como servidores y almacenamiento, que las empresas pueden alquilar. Amazon Web Services es un ejemplo, ofrece flexibilidad y control sobre los recursos computacionales con un modelo de pago por uso.

## 2.2 Industria 5.0

La idea de la Industria 5.0 está basada en el apoyo que las industrias pueden brindar para la resolución de problemas tales como la estabilidad social, el cambio climático y la preservación de los recursos. El enfoque de la Industria del Futuro beneficia a la industria, a los trabajadores y a la sociedad.

La propuesta de la Comisión Europea de Industria 5.0 [30] se enfoca en la transformación de la industria europea hacia un enfoque más sostenible, con la mira puesta en el ser humano y la resiliencia. Este concepto complementa y amplía el paradigma de la Industria 4.0, enfocándose no solo en la eficiencia y la productividad a través de la tecnología, sino también en la creación de valor para todos los actores involucrados, incluidos los trabajadores, la sociedad y el medio ambiente.

El enfoque en el ser humano es la esencia de la Industria 5.0. Se espera que la tecnología se adapte a las necesidades de las personas y mejore su bienestar. La industria debe tener en cuenta la salud física y mental de los empleados al proporcionar un entorno de trabajo seguro e inclusivo. Esto implica un cambio significativo en la forma en que las empresas perciben y gestionan su capital humano, poniendo en primer lugar el bienestar y la satisfacción de los empleados. Además de proporcionar soluciones ajustadas a cada individuo.

La sostenibilidad es otro elemento crucial. La industria 5.0 fomenta los procesos circulares que reutilizan, rediseñan y reciclan recursos naturales con el fin de reducir el

impacto ambiental. Fomenta el uso de tecnologías avanzadas como la inteligencia artificial y la fabricación aditiva para optimizar la eficiencia de los recursos y reducir los residuos. Esta transición hacia una economía más circular y sostenible es fundamental para abordar los desafíos ambientales actuales y futuros.

La capacidad de resiliencia también es importante. El objetivo es construir cadenas de valor robustas y adaptables capaces de resistir interrupciones y mantener la continuidad durante situaciones de crisis. Esta capacidad de adaptación es esencial para responder eficazmente a cambios geopolíticos y naturales, como la pandemia COVID-19. La resiliencia industrial garantiza que las empresas puedan mantener operaciones seguras y estables incluso en circunstancias difíciles.

La Industria 5.0 rediseña los roles de los trabajadores en cuanto a beneficios. Los empleados ya no se ven como un gasto, sino como una inversión. Se les da poder y se les reconoce por su contribución al diseño y desarrollo de nuevas tecnologías. Las nuevas tecnologías también pueden automatizar tareas peligrosas, lo que reduce los accidentes y crea un entorno de trabajo más seguro e inclusivo. Además, se promueve el desarrollo continuo de habilidades para que los empleados puedan adaptarse a las nuevas demandas del mercado a través de la capacitación y el reentrenamiento.

Los beneficios para la industria son igualmente significativos. Las empresas que adopten prácticas sostenibles y socialmente responsables serán más atractivas para los nuevos talentos, especialmente entre las generaciones más jóvenes que valoran estas prácticas. La adopción de tecnologías sostenibles aumenta la competitividad y reduce los costes a largo plazo. Las empresas que mejoren su resiliencia tendrán más capacidad para adaptarse a cambios y crisis, lo que garantiza su estabilidad y continuidad operativa. Como resultado, la Industria 5.0 se convierte en un modelo no solo deseable, sino también necesario para el futuro de la industria europea.

### **2.3 Fabricación Aditiva**

Como se mencionó en el capítulo anterior, la fabricación aditiva se define como el proceso mediante el cual se unen materiales para crear objetos basados en modelos tridimensionales (3D), construyéndolos capa por capa, en contraste con los métodos de fabricación sustractiva [31].

Se inició en 1986 con la ayuda de la estereolitografía para crear prototipos rápidos para ayudar a convertir las ideas en modelos físicos. Un año después, 3D Systems lanzó el SLA-1, un sistema de prueba, a la venta [32].

La FA puede crear componentes con geometrías complejas sin usar mezclas especiales como lo hacen las técnicas de fabricación tradicionales. Los procesos de fabricación aditiva son rentables para la fabricación de piezas individuales y lotes pequeños, reducen significativamente los tiempos de producción y permiten la creación de componentes que no serían posibles con los procesos de fabricación sustractiva [33].

En otras palabras, esta tecnología permite una mayor flexibilidad en cuanto a la geometría y la complejidad en el diseño. Cuando la geometría se diseña para la producción en masa y solo se considera el coste de fabricación, a veces no es la mejor opción.

Aunque las técnicas de fabricación aditiva han avanzado significativamente, todavía existen varios desafíos que superar. Estos incluyen una selección limitada de materiales aptos para estos procesos, la precisión reducida de las piezas debido al efecto de "escalonamiento"[34], la inconsistencia y falta de reproducibilidad en la fabricación de componentes, y la carencia de normas establecidas para los procedimientos.

### 2.3.1. Técnicas

La forma en que se crea cada capa y cómo se unen a las capas anteriores distingue las técnicas de fabricación aditiva. Estos elementos describen la precisión, los materiales utilizados, los procedimientos adicionales necesarios, los tiempos y los costes de cada técnica de fabricación aditiva, lo que las hace más o menos adecuadas para la aplicación específica. ASTM International publica estándares relacionados con la fabricación aditiva [35]. Según la norma ISO/ASTM 52910, estas técnicas pueden clasificarse en siete:

#### 2.3.1.1. Extrusión de material

La extrusión de materiales es una técnica innovadora de procesamiento que implica la deposición precisa de filamentos termoplásticos en capas sucesivas siguiendo modelos digitales de las piezas [36]. Fue creada en 1988 por Scott Crump, cofundador de la empresa de impresoras 3D Stratasys, bajo el nombre de modelado por deposición fundida (FDM). Esta técnica se fundamenta en la extrusión mecánica de material termoplástico fundido sobre una superficie [37].

Este proceso utiliza calor para derretir finos filamentos o gránulos termoplásticos, que luego son guiados por un dispositivo robótico controlado por un ordenador para crear un objeto tridimensional. El material sale del extrusor en estado líquido y forma capas delgadas de aproximadamente 0.2 mm de grosor [38]. Se endurece rápidamente cuando

está en estado líquido. Para garantizar una buena adhesión entre las capas, la capa previamente formada debe mantenerse a una temperatura ligeramente inferior al punto de solidificación del material termoplástico.

Tal como explica [39], este método requiere la eliminación de estructuras de soporte a través de procesos de post procesamiento. Los dos tipos de soportes más comunes son la celosía ligera, que se fabrica con el mismo material, pero con una conexión de baja resistencia. En segundo lugar, se utiliza un sistema con dos cabezales: uno para el material de construcción principal y otro para depositar soportes fabricados con materiales solubles en agua, como el alcohol polivinílico (PVA).

Estos materiales se eliminan mediante fusión o disolución durante la fase de post procesamiento. Es importante tener en cuenta que los objetos impresos con FDM a menudo tienen huecos entre las capas de material extruido. Como resultado, las propiedades mecánicas pueden verse afectadas y pueden presentarse efectos de anisotropía.

Como se señala en el artículo de [40], las ventajas de esta tecnología incluyen el coste reducido de máquinas y equipos, la flexibilidad de los materiales, la facilidad de uso, la durabilidad y el coste económico de las materias primas. Sin embargo, los inconvenientes incluyen una superficie impresa muy rugosa, una impresión de baja calidad en comparación con SLA o SLS y piezas fabricadas con menor resistencia mecánica.

#### 2.3.1.2. Estereolitografía

La estereolitografía (SLA) es el término común para la técnica de fotopolimerización en cubeta. Utiliza la fotopolimerización para crear objetos sólidos en 3D a partir de un líquido fotosensible. En este proceso, una capa de este líquido es expuesta a una fuente de luz, lo que lo hace endurecer y se convierte en un sólido reticulado capa tras capa hasta que el objeto completo está completamente formado. Es ampliamente utilizada en la fabricación de prototipos y piezas con acabados superficiales de alta calidad porque es conocida por su alta precisión y capacidad para producir detalles finos [33].

La FA se comenzó en 1986 cuando Charles W. Hull presentó una patente para una tecnología de fotopolimerización llamada SLA. Esta patente marcó el comienzo de la FA con potencial comercial. Una taza para lavar los ojos fue el primer objeto impreso que

utilizó esta tecnología. 3D Systems Corporation ha sido pionera en el desarrollo y avance de la tecnología SLA desde entonces.

Ofrece una variedad de ventajas, que la diferencian de otras tecnologías FA [41]:

- Alta precisión, lo que permite que un láser preciso cree detalles muy finos en el plano XY.
- Rapidez, ya que una sola exposición de imagen puede curar toda una sección transversal del objeto.
- La capacidad de escalar gracias a los dispositivos de estereolitografía de gran área que permiten la fabricación de múltiples componentes en una sola plataforma.
- Acabado suave, lo que produce piezas con un acabado superficial superior en comparación con otras tecnologías de impresión 3D
- El equipo tiene un coste moderado, lo que lo convierte en una opción económica junto con FDM para su uso en el hogar.
- La versatilidad de los materiales permite la creación de objetos 3D funcionales tanto rígidos como flexibles
- Se reduce el desperdicio de materiales porque la resina no tratada puede reutilizarse mientras queda en el tanque.

#### 2.3.1.3.Fusión por lecho de polvo

Las técnicas de fusión por lecho de polvo generalmente utilizan un láser o haz de electrones para derretir un lecho de polvo. Una capa de polvo se extiende mediante un mecanismo de rodadura después de un escaneo [37]. Luego se realiza un escaneo y fusiona la capa recién agregada con la capa anterior. Hasta que la pieza está completamente construida, el proceso continúa iterando. La geometría de la pieza en la posición z y la estrategia de escaneo seleccionada determinan la dirección de escaneo del láser en cada capa.

Incluye una variedad de métodos de fabricación aditiva, como la fusión selectiva por láser (SLM), la sinterización selectiva por láser (SLS) y la fusión por haz de electrones. En SLS, el láser fusiona el material en polvo, mientras que en SLM, el láser derrite completamente el polvo [40]. La SLM es una técnica similar a la SLS, pero en este caso, el láser tiene suficiente potencia para fundir completamente el polvo de construcción en cada capa, logrando una alta densidad en el objeto impreso.

La SLS utiliza un láser para sinterizar segmentos transversales en capas de material en polvo [33]. La energía del láser se dirige a áreas específicas de la capa de polvo, lo que provoca la fusión de las partículas y la formación de una estructura sólida. Hasta que el

objeto 3D está completamente formado, las capas de polvo se distribuyen y fusionan. Las capas superiores se apoyan en el polvo no fundido de la cámara de construcción. Al terminar la impresión, se elimina el polvo excesivo y se crea el objeto sólido deseado.

Este método tiene varias ventajas, como la capacidad de producir piezas complejas con alta precisión y detalles finos, la capacidad de producir piezas con una amplia gama de materiales y propiedades mecánicas mejoradas. Sin embargo, también hay algunas desventajas el tiempo de producción prolongado en comparación con otros métodos, la calidad de la pieza afectada por la calidad del polvo utilizado y la orientación de la pieza durante la producción, y la producción limitada de piezas grandes debido al tamaño de la cámara de producción [42].

#### 2.3.1.4. Inyección de Material (Material Jetting)

Como introduce [43], La tecnología de Inyección de Material (MJ) es un método que emplea la fotopolimerización selectiva de líquidos para fabricar piezas funcionales. La inyección de material es un proceso similar a la inyección de tinta. Este método utiliza la impresión por inyección de tinta bajo demanda para depositar directamente gotas de cera y/o fotopolímero sobre un sustrato. El calentamiento o el fotocurado hace que las gotas inyectadas cambien de fase [37]. Stratasys con su sistema PolyJet y 3D Systems con MultiJet son los principales proveedores de esta tecnología.

#### 2.3.1.5. Inyección de Aglutinante (Binder Jetting)

Esta técnica también conocida como Multijet Binder (MJB), utiliza un polímero líquido seleccionado para depositarse sobre una capa de polvo, lo que permite que la gota de polímero entre en la superficie del polvo, creando una estructura aglomerada de polvo impreso. Posteriormente, se realiza un recubrimiento mediante la dispersión de polvo. Esta técnica es similar a la fusión por lecho de polvo. Durante el post procesamiento, se requiere un proceso de infiltración para fortalecer las piezas impresas, que están hechas de polvo [37].

Z Corporation y ExOne compraron esta tecnología después de que fuera inventada en 1993 en el MIT [44]. Siempre que los materiales en polvo puedan ser esparcidos y humedecidos adecuadamente por el aglutinante inyectado, es aplicable a una amplia gama de materiales en polvo, incluidos metales, polímeros, cerámicas y arena de fundición.

La principal distinción entre la inyección de material y la inyección de aglutinante radica en cómo el material se deposita y solidifica durante el proceso. En el primero, se deposita en estado líquido y luego se solidifica mediante calentamiento o utilizando un aglutinante líquido para unir el polvo en capas, y se requiere una etapa adicional de infiltración para obtener una pieza resistente.

Es importante resaltar que, como expresa en [45], Este proceso funciona con casi cualquier tipo de polvo con altas tasas de producción y utiliza una variedad de tecnologías, incluidas técnicas de impresión, deposición de polvo, métodos de post procesamiento y la interacción dinámica entre el aglutinante y el polvo. Se ha demostrado que puede procesar una amplia gama de materiales, incluidos polímeros, metales y cerámicas. El desarrollo de métodos de impresión y post procesamiento que maximicen el rendimiento de las piezas finales sigue siendo un desafío.

#### 2.3.1.6. Deposición de Energía Dirigida (Directed Energy Deposition)

Esta tecnología de proceso utiliza diferentes fuentes de energía, como el haz de electrones, el láser y el arco de plasma. Durante este proceso, ya sea la plataforma de construcción se mueve mientras la cabeza de deposición permanece quieta, o viceversa [40]. Se introduce directamente polvo o alambre metálico en el punto focal de un haz de energía para crear un charco fundido.

Estos procesos incluyen, esencialmente, máquinas de soldadura tridimensionales. Una técnica llamada Net Shaping Laser Engineered (LENS), desarrollada en 1995 en los Laboratorios Nacionales de Sandia y vendida por Optomec, es uno de ellos. Las piezas fabricadas con LENS pueden contener varias microestructuras con características internas complejas y numerosos materiales graduados [37].

Este proceso crea una parte del objeto fundiendo polvo metálico hacia un área específica. La fusión se produce mediante la utilización de un láser potente, y al enfriarse, el material se solidifica. Todo esto se lleva a cabo en una cámara cerrada llena de gas argón con el fin de controlar el entorno de fabricación [46]. Las ventajas de este método incluyen una alta velocidad de producción, una amplia gama de materiales y la capacidad de reparar componentes desgastados o dañados.

#### 2.3.1.7. Laminación de hojas (Sheet Lamination)

Tal como se expresa en [40], Helist introdujo la técnica de laminación de hojas en 1991. Un ejemplo de esta tecnología de procesamiento es la fabricación de objetos laminados (LOM), que utiliza un láser para cortar secciones cruzadas de hojas de papel de construcción. Cada capa se une a la capa anterior antes de cortar la sección cruzada [33].

Como se comenta en [46], este método combina la construcción de una pieza mediante la adición de capas sobre capas con la eliminación de material innecesario. Los materiales se obtienen en forma de láminas muy delgadas y se unen mediante presión y calor, utilizando un recubrimiento adhesivo térmico.

Proporciona la capacidad de producir piezas de gran tamaño y la versatilidad para utilizar diferentes materiales. Sin embargo, esta técnica puede tener limitaciones en términos de precisión y la complejidad de las formas que se pueden fabricar.

### 2.3.2. Materiales

Para cumplir con los requisitos de FA, se debe seleccionar los materiales adecuados. Estos requisitos incluyen la capacidad de producir la materia prima de una manera que se ajuste al proceso específico, un procesamiento adecuado del material, la posibilidad de un post procesamiento aceptable para mejorar la geometría y las propiedades, y la manifestación de las características de rendimiento necesarias durante su uso. Con el desarrollo de la FA, se han establecido conexiones entre clases particulares de materiales y procesos y aplicaciones específicas. Los metales, los polímeros, las cerámicas y los materiales compuestos son algunos ejemplos.

En la tabla siguiente se resumen los materiales que se pueden usar en cada proceso. En la tabla, los círculos completos indican que las máquinas comerciales disponibles pueden procesar directamente los materiales mencionados. Los círculos vacíos representan combinaciones proceso-material que han sido demostradas en investigación, pero aún no están disponibles comercialmente. Los círculos sombreados en negro representan procesos directos, mientras que los círculos sombreados en azul representan procesos indirectos que requieren pasos adicionales de densificación.

Process	Acronyms	Feedstock	Thermoplastics	Photopolymers	Metals	Ceramics	Composites	Biomaterials	Multimaterial	Other
 Extrusion	FFF, FDM, BMD	Filament, rod, pellets	●	● <sup>1</sup>	●	○	●	●	●	Food, Concrete
 Photopolymerization	SLA, DLP, CLIP	Liquid		●	● <sup>2</sup>	● <sup>3</sup>	●	●		
 Selective Laser Sintering	SLS, HSS, MJF	Powder	●			●	●			
 Selective Laser Melting	SLM, DMLS, EBM	Powder			●					
 Binder Jetting	BJ, 3DP	Powder			●	●		●		Sugar, Sand, Plaster, Pharmaceuticals
 Material Jetting	MJ, Polyjet, Multijet	Liquid	●	●	● <sup>4</sup>	●		●	●	
 Directed Energy Deposition	DED, LENS, EBAM	Wire, powder			●	○			●	
 Sheet Lamination	LOM, UAM	Sheet	● <sup>5</sup>		●	○	● <sup>6</sup>		●	Paper

*Tabla 1. Esquema de los materiales utilizados en los diversos métodos obtenido del MIT*

### 2.3.2.1. Metales

Los metales disponibles en el mercado son limitados, como el titanio, el acero inoxidable y las superaleaciones de níquel. Los dos principales procesos utilizados comercialmente para producir componentes de metal de alta calidad son la fusión por lecho de polvo y la deposición de energía dirigida. Sin embargo, tienen muchos problemas, como su afinidad con los componentes de la atmósfera, lo que puede tener un impacto en la sinterización o la coalescencia del polvo. Además, durante el procesamiento de ciertos metales, se producen óxidos, lo que puede afectar la calidad del producto impreso.

En comparación con los metales ferrosos y otros no ferrosos con diferentes estructuras cristalinas, los metales no ferrosos con estructura cúbica centrada en las caras, como el cobre y el plomo, son más resistentes a defectos. Los defectos también pueden afectar las propiedades mecánicas de los metales, como su resistencia a la fractura y su resistencia a la rigidez. El post procesamiento, como el HIP o el prensado isostático en caliente, puede reducir o eliminar los defectos en los componentes de metal impresos [47].

### 2.3.2.2. Polímeros

Las tres categorías principales de polímeros son: amorfos, semicristalinos y termoestables. El modelo de deposición fundida (FDM) utiliza principalmente polímeros amorfos. Estos polímeros funcionan bien para depositar cordón de plástico durante la impresión porque tienen una amplia gama de temperaturas de reblandecimiento viscoso.

Estos polímeros, incluidos el ácido poliláctico (PLA) y el acrilonitrilo butadieno estireno (ABS), pueden ablandarse a una variedad de temperaturas, incluso la temperatura de glaseado. Durante este proceso, adquieren una alta viscosidad, lo que resulta ideal para la extrusión del material a través de boquillas de diámetro de 0,2 a 0,5 mm [39].

Por otro lado, los polímeros semicristalinos suelen tener un intervalo de ablandamiento mucho más estrecho, lo que hace que su viscosidad cambie significativamente. Aunque este comportamiento es útil en los procesos de sinterización selectiva por láser (SLS) de plásticos, controlar las propiedades de flujo del polímero en el proceso de FDM es más difícil.

Los fotopolímeros se utilizan en la estereolitografía (SLA) y son polímeros termoestables. Estos fotopolímeros están compuestos por monómeros, oligómeros, foto iniciadores y otros aditivos, como colorantes, agentes antiespumantes y antioxidantes. Estos componentes se combinan de manera específica para modificar las propiedades y el comportamiento del material. Los primeros sistemas de SLA usaban mezclas de monómeros de acrilato y foto iniciadores UV, que se solidifican y reaccionan a la luz ultravioleta [48].

#### 2.3.2.3.Cerámica

Como expresa [49], debido a su baja tenacidad y alta temperatura de fusión, las cerámicas son difíciles de trabajar. Sin embargo, aunque siguen existiendo obstáculos para alcanzar una densidad completa, se han logrado avances en el procesamiento directo de alúmina y sus aleaciones mediante métodos como la deposición de energía dirigida y la fusión en lecho de polvo.

Además, en la fabricación aditiva, las cerámicas son los materiales menos tolerantes a los defectos, lo que significa que la presencia de defectos puede afectar significativamente sus propiedades mecánicas [39].

#### 2.3.2.4.Materiales compuestos

La selección y preparación de los materiales de alimentación (ya sea fundido, en forma de filamento, fibroso o particulado), su homogeneidad y las propiedades deseadas son algunos de los factores que afectan la creación de materiales compuestos. La interfaz

adecuada entre la matriz y las fases dispersas o incrustadas es crucial para asegurar una unión adecuada, transferencia de carga y protección contra la corrosión.

### **3. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS**

#### **3.1 Motivación**

La necesidad de comprender y evaluar cómo la FA-I3D puede contribuir al modelo industrial propuesto por la Comisión Europea, en consonancia con los principios fundamentales de la Industria 5.0: sostenibilidad, personas y resiliencia, es lo que motiva este estudio.

La rápida evolución tecnológica ha tenido un impacto significativo en la forma en que se concibe y lleva a cabo la producción industrial. La adopción de tecnologías como FA-I3D ha abierto nuevas perspectivas en términos de diseño, producción y distribución de bienes, lo que permite una mayor personalización, una reducción de costes y tiempos de producción más cortos. Esta transformación ha despertado un gran interés en cuanto a la comprensión acerca de cómo estas tecnologías están modelando el panorama industrial actual y futuro.

Es fundamental comprender cómo la adopción de FA-I3D está afectando la transformación digital de las empresas y la economía en su conjunto en el contexto de nuestro país. Como miembro de la Unión Europea, España se encuentra en un momento crucial para mejorar su competitividad y su capacidad de innovación. Analizar el impacto de FA-I3D en este contexto puede brindar información útil para orientar las políticas y estrategias de desarrollo industrial.

El propósito de este estudio es contribuir a la información sobre la industria y cómo se relaciona con la sostenibilidad, la innovación y la competitividad. Al comprender mejor el impacto de FA-I3D en este contexto, se pueden identificar oportunidades y desafíos importantes para el desarrollo industrial futuro, tanto a nivel nacional como europeo.

### **3.2. Objetivos del proyecto**

El objetivo principal de este estudio es analizar en profundidad cómo la adopción de la FA-I3D dentro del contexto de la Industria 4.0 está impactando la transformación digital. A través de un análisis detallado de diferentes estudios, se busca comprender mejor el alcance y las implicaciones de esta tecnología en la cadena de valor industrial.

Además, se explorará el potencial de la FA-I3D para impulsar la transición hacia la Industria 5.0, un paradigma aún emergente que promueve una mayor integración entre humanos y máquinas, así como una mayor colaboración entre empresas y la comunidad en general.

Este TFM tiene como objetivo aumentar la comprensión del impacto de la tecnología FA-I3D en el panorama industrial y brindar información útil a las empresas, investigadores y responsables de políticas que quieran aprovechar el potencial de la Industria 4.0 para el desarrollo sostenible y la innovación.

## **4. ALINEACIÓN CON LOS OBJETIVOS DE DESARROLLO SOSTENIBLE**

### **4.1. Objetivo 8 - Trabajo decente y crecimiento económico:**

Al analizar el impacto de la FA-I3D como tecnología innovadora, se está ayudando al aumento de la productividad y a la creación de empleos decentes. Además, al examinar cómo esta tecnología puede promover la colaboración entre humanos y máquinas, se están abordando también aspectos de calidad laboral.

### **4.2. Objetivo 9 - Industria, innovación e infraestructura:**

Este trabajo contribuye a mejorar la infraestructura industrial y promover la innovación tecnológica, lo cual es fundamental para el desarrollo sostenible.

### **4.3. Objetivo 12 - Producción y consumo responsables:**

Este trabajo puede contribuir a una producción más eficiente y sostenible al tener el foco en una tecnología disruptiva como la FA-I3D, reduciendo el desperdicio de materiales y energía en los procesos de fabricación. Esto es fundamental para promover el consumo responsable y reducir el impacto ambiental de la producción industrial.

### **4.4. Objetivo 13 - Acción por el clima:**

Al analizar cómo la FA-I3D puede promover la sostenibilidad en la industria, se está contribuyendo indirectamente a mitigar el cambio climático al reducir las emisiones de carbono y el consumo de recursos naturales en los procesos de fabricación.

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1. Metodología de trabajo

Este estudio trata de la búsqueda, síntesis y correlación de artículos y búsqueda de campo de información relevante para el análisis que nos atañe. La metodología del trabajo a desarrollar comenzará con un mapa conceptual donde identificar las variables que intervienen en este estudio. Una vez identificados los parámetros relevantes, se hará uso de los Estudios Smart Industry 4.0 del Observatorio de Industria 4.0 desde el año 2018 a 2023 con la colaboración de NTT DATA para tener una visión de la situación de la transformación digital a nivel nacional como primer marco de referencia.

Para entender en profundidad la situación de una tecnología habilitadora específica como es la Fabricación aditiva – Impresión 3D (FA-I3D) se tienen en cuenta referencias internacionales por su influencia en España.

Más adelante, el Informe Industry 5.0, publicado por la Comisión Europea, sirve para conocer la propuesta de Industria 5.0. Se buscará analizar el papel de la FA-I3D en sus aplicaciones futuras a través de casos de estudio y su relación con los parámetros destacados de esta propuesta como son la sostenibilidad, las personas y la resiliencia.

Además, se hará uso de distintos recursos como artículos, estudios y webs especializadas para completar el estudio.

## **6. DESARROLLO Y RESULTADOS**

### **6.1.Situación actual**

#### 6.1.1. Industria 4.0

Para analizar la situación actual de la Fabricación Aditiva y su comparación a las diferentes tecnologías que componen la Industria 4.0 se parte de un primer de referencia a nivel nacional y para ello se va a hacer uso de los Informes del Observatorio de Industria 4.0 [6]. En estos informes evalúan las diferentes tecnologías que componen la Industria 4.0 con un foco en la cadena de suministro y la fabricación digitales, se tendrán en cuenta diferentes parámetros para conocer la situación actual en términos de adopción. Con esto se busca medir los distintos beneficios tanto cualitativos como cuantitativos que las diferentes tecnologías tienen en las empresas.

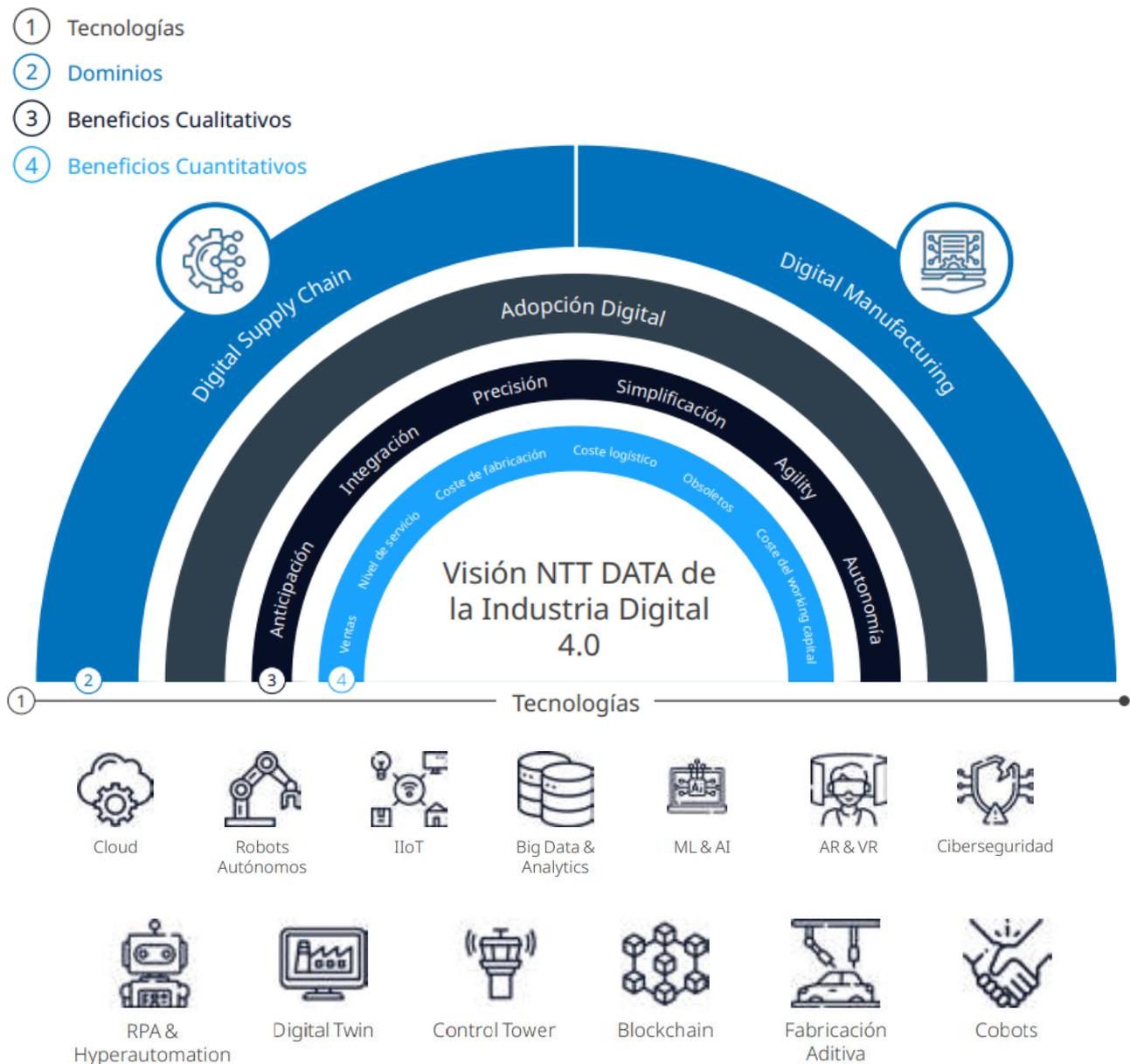


Ilustración 8. Visión NTT Data de la Industria Digital 4.0[6]

Estos informes anuales examinan el grado de digitalización alcanzado en diferentes sectores industriales y proporciona herramientas cruciales para que las empresas evalúen su preparación y capacidad de adopción de tecnologías avanzadas.

El estudio evalúa el grado de madurez y percepción de las tecnologías habilitadoras de la Industria 4.0 dentro de la comunidad empresarial, destacando las aplicaciones prácticas y los casos de uso en diferentes etapas de la cadena de valor industrial. Los resultados revelan un creciente optimismo y preparación por parte de las empresas para la adopción de estas tecnologías, a pesar de las dificultades geopolíticas y económicas actuales.

El estudio subraya la importancia de las personas en el proceso de transformación digital,

destacando la necesidad de flexibilidad, oportunidades de desarrollo y formación continua para superar las barreras culturales y de resistencia al cambio. El objetivo es proporcionar una visión integral que impulse la competitividad y el desarrollo sostenible de la industria.

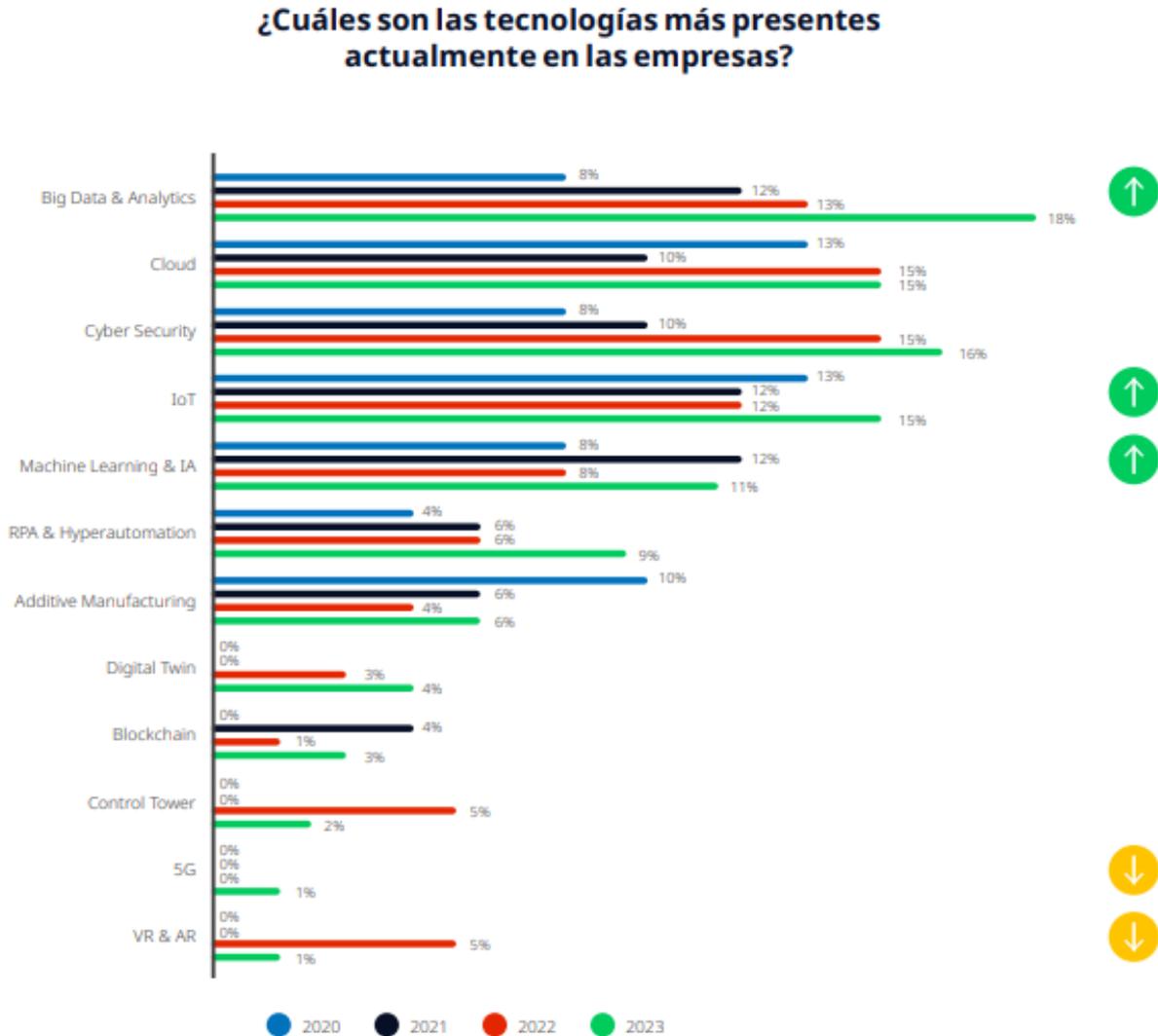


Ilustración 9. Tecnologías más presentes en las empresas [6].

Respecto a cuáles son las tecnologías más presentes en las empresas actualmente, en términos generales, la mayoría de las tecnologías muestran una tendencia de adopción creciente, destacándose particularmente Big Data & Analytics, IoT, y Machine Learning & IA, que han tenido incrementos significativos y sostenidos.

La fabricación aditiva estaba mostrando un decrecimiento hasta 2022 y posteriormente su adopción ha vuelto a niveles de 2021. Comparada con otras tecnologías como Big Data & Analytics y Cyber Security, la fabricación aditiva todavía tiene un camino por recorrer en términos de adopción, aunque su crecimiento hasta la fecha es prometedor. La FA-I3D se encuentra en un punto medio con relación a las diferentes tecnologías que componen

la Industria 4.0.

Tecnologías emergentes como Digital Twin y Blockchain muestran niveles de adopción más bajos. La tecnología 5G, sin embargo, no ha mostrado un patrón de adopción claro en estos años, sugiriendo posibles barreras o retrasos en su implementación.

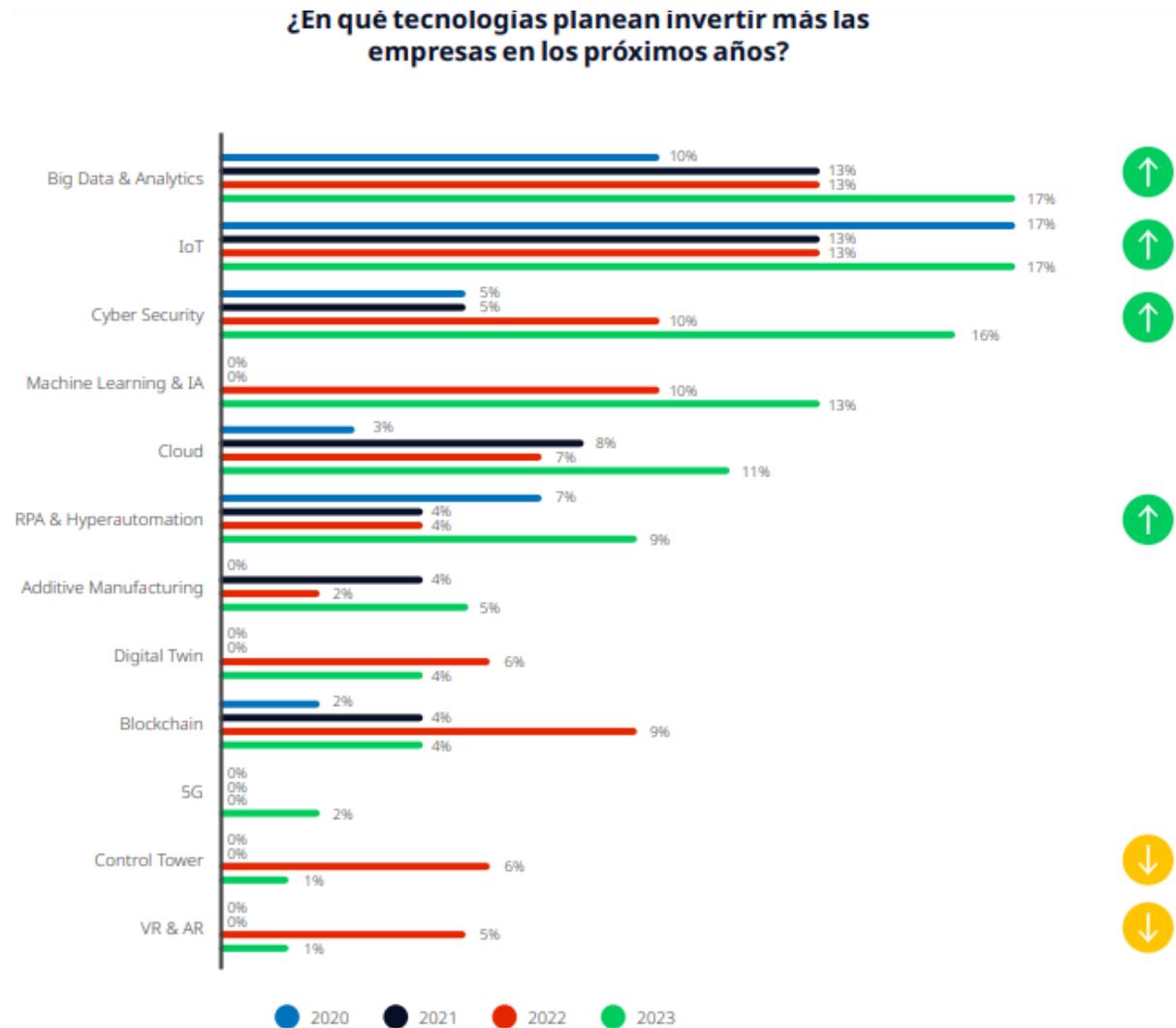


Ilustración 10. Planteamiento de inversión en tecnología por parte de las empresas [6]

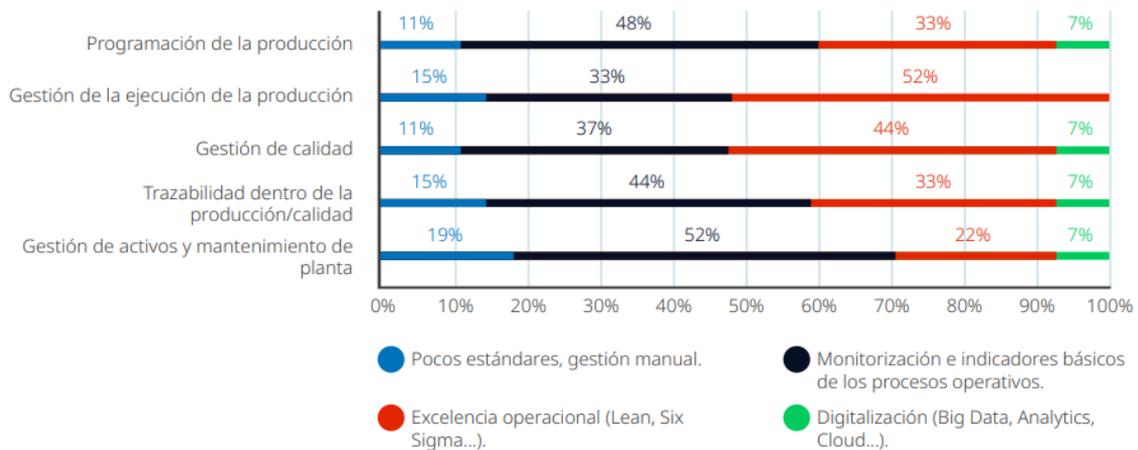
Si se habla de las tecnologías en las que las empresas planean invertir en los próximos años, la mayoría de las tecnologías muestran una tendencia creciente en cuanto a la intención de inversión por parte de las empresas. Las tecnologías de Big Data & Analytics y IoT son las que más destacan, con un incremento significativo de inversión planeada para 2023, alcanzando un 17%. La ciberseguridad también ha visto un aumento considerable, reflejando una creciente preocupación por la protección de datos y la seguridad de los sistemas.

La fabricación aditiva, aunque muestra una tendencia positiva, sigue estando por detrás

en términos de intención de inversión en comparación con tecnologías como Big Data, IoT y Machine Learning & IA. Sin embargo, su crecimiento sugiere un aumento gradual en su adopción e importancia dentro de la estrategia tecnológica de las empresas.

Al igual que anteriormente, tecnologías emergentes como Digital Twin y Blockchain están ganando terreno, aunque todavía representan una menor proporción de la inversión planificada. La tecnología 5G, aunque muestra un crecimiento, sigue siendo una prioridad menor para las empresas en comparación con otras tecnologías.

### ¿Cómo gestionan actualmente las empresas todos los procesos relacionados con la producción?



*Ilustración 11. ¿Cómo gestionan actualmente las empresas todos los procesos relacionados con la producción [6]*

Para analizar la capacidad de adopción se ha cuestionado a las empresas sobre ciertos temas. La gestión de los procesos relacionados con la producción actualmente se revelan tendencias clave en la adopción de metodologías y tecnologías en la gestión de procesos productivos. Predomina el uso de metodologías de excelencia operacional como Lean y Six Sigma, especialmente en la gestión de la ejecución de la producción, donde el 52% de las empresas utilizan estas técnicas. Esto muestra un enfoque fuerte en la optimización continua y la mejora de procesos, esenciales para mantener la competitividad.

Sin embargo, la adopción de tecnologías digitales avanzadas como Big Data, Analytics y Cloud es todavía limitada, con solo un 7% de las empresas aplicándolas en los procesos evaluados. Esta baja adopción indica que muchas empresas están en las etapas iniciales de la transformación digital, enfrentando posiblemente barreras como la falta de infraestructura tecnológica, habilidades digitales insuficientes o la necesidad de

inversiones significativas.

El uso de métodos manuales y con pocos estándares está relativamente bajo, variando entre el 11% y el 19% según el proceso. Esto sugiere una tendencia hacia la estandarización y la adopción de enfoques más estructurados. Un número significativo de empresas utiliza la monitorización e indicadores básicos para gestionar sus procesos operativos, especialmente en la gestión de activos y mantenimiento en planta y la programación de la producción. Este enfoque proporciona datos esenciales para el control de procesos, aunque podría no ser suficiente para alcanzar niveles más avanzados de eficiencia.

La gráfica destaca la prevalencia de la excelencia operacional y la necesidad de aumentar la adopción de tecnologías digitales avanzadas. Las empresas deben acelerar sus esfuerzos de digitalización e invertir en la formación de sus empleados en habilidades digitales. Implementar estrategias efectivas de gestión del cambio y continuar evaluando y mejorando los procesos operativos serán cruciales para mantenerse competitivos.

### ¿Las compañías prevén invertir en mejoras en sus procesos productivos?

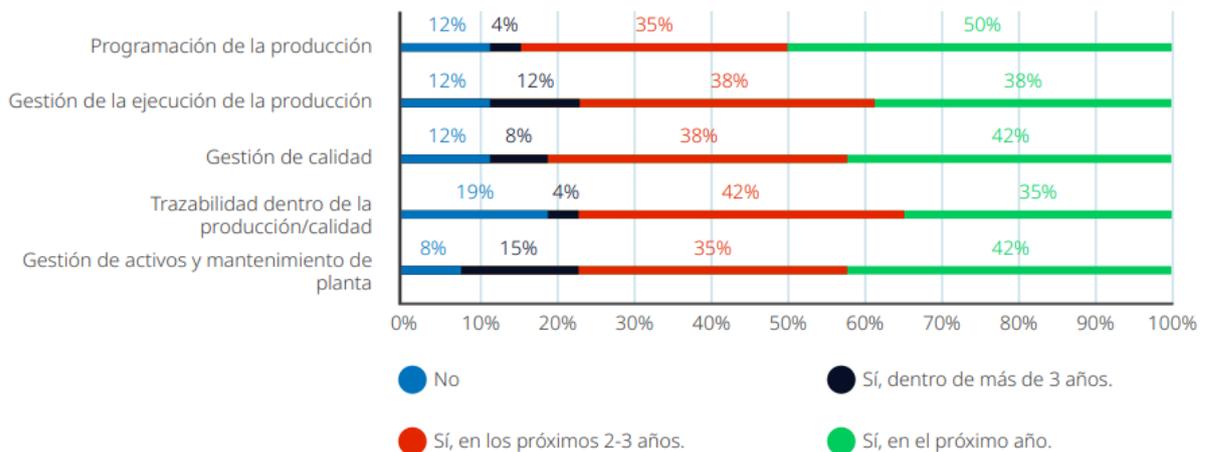


Ilustración 12. ¿Las compañías prevén invertir en mejoras en sus procesos productivos? [6].

En cuanto a las inversiones en mejoras en los procesos productivos de las empresas, destaca una clara prioridad en mejorar la programación de la producción, gestión de calidad y la gestión de activos y mantenimiento de planta en el próximo año, con un 50% y un 42% de las empresas planeando invertir respectivamente. Esto refleja una urgencia en optimizar estos procesos clave para aumentar la eficiencia operativa.

En contraste, las inversiones en la gestión de la ejecución de la producción están previstas de forma conjunta entre el próximo año y los próximos 2-3 años, indicando un enfoque de corto plazo. La trazabilidad dentro de la producción/calidad muestra una tendencia hacia inversiones a medio plazo, con un 42% de las empresas planeando mejoras en los próximos 2-3 años.

Existe un número notable de empresas que no planea invertir en ciertos procesos, lo que podría indicar una falta de percepción del valor o la complejidad percibida de estas inversiones. Para superar esta resistencia, es crucial demostrar el retorno de las inversiones a través de casos exitosos y proyectos piloto que puedan ilustrar los beneficios tangibles de la mejora en estos procesos productivos.

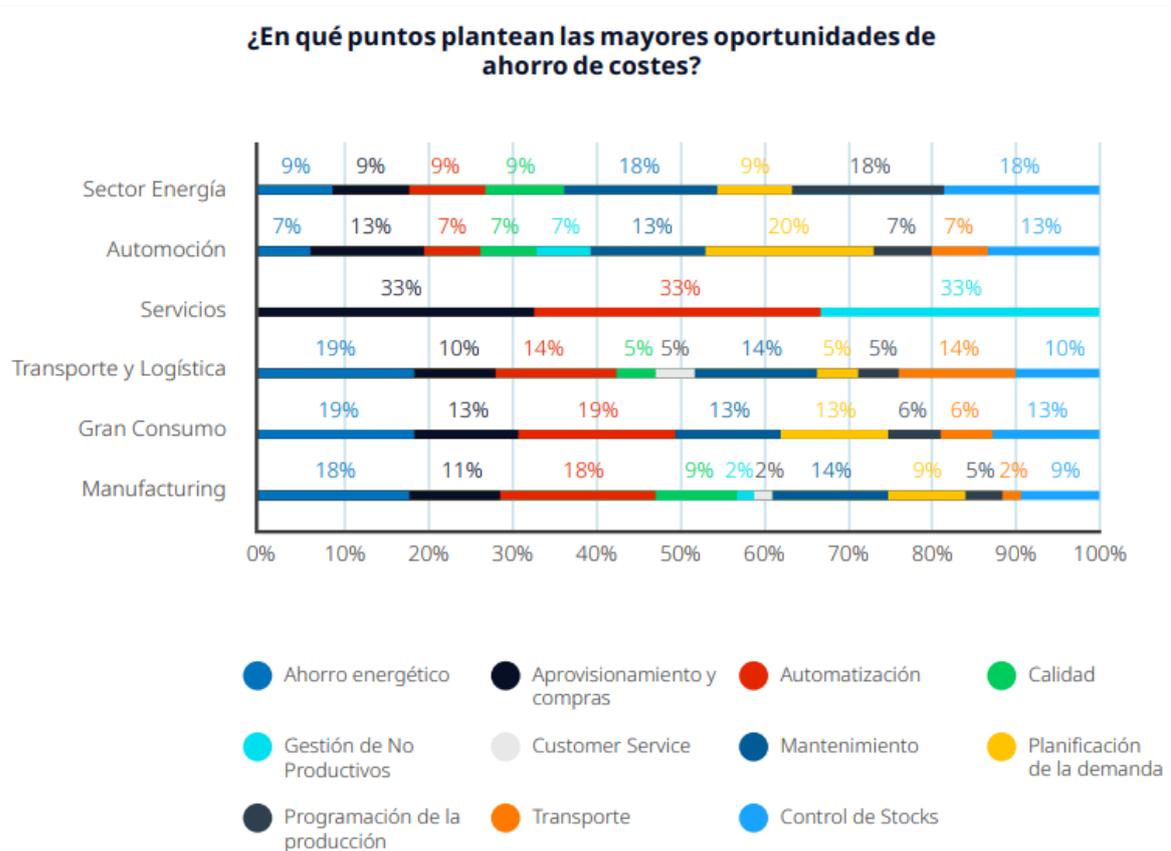


Ilustración 13. ¿En qué puntos plantean las mayores oportunidades de ahorro de costes? [6]

Las empresas de diversos sectores industriales identifican diferentes áreas clave para reducir costes. En el sector Servicios, el ahorro energético, la automatización y el servicio al cliente son las principales áreas de enfoque, con un 33% de las empresas viendo oportunidades en cada una de estas áreas. En el sector de Manufacturing, tanto la automatización como el ahorro energético y el control de stocks son considerados importantes, con un 18% de las empresas enfocándose en cada una de estas áreas.

El sector de Automatización destaca la planificación de la demanda como una oportunidad clave para la reducción de costes, con un 20% de las empresas identificándola como prioritaria. El sector Energía ve oportunidades significativas en la programación de la producción y el control de stocks, con un 18% de las empresas priorizando estas áreas.

La gráfica muestra que las empresas están buscando diversas formas de optimizar sus operaciones y reducir costes, desde la mejora de la eficiencia energética hasta la automatización y la gestión de inventarios. Cada sector tiene sus propias prioridades, pero la tendencia general es hacia la adopción de prácticas que mejoren la eficiencia operativa y reduzcan los costes a largo plazo.

### ¿Cuál es el grado de conocimiento y capacidades digitales dentro de las compañías?

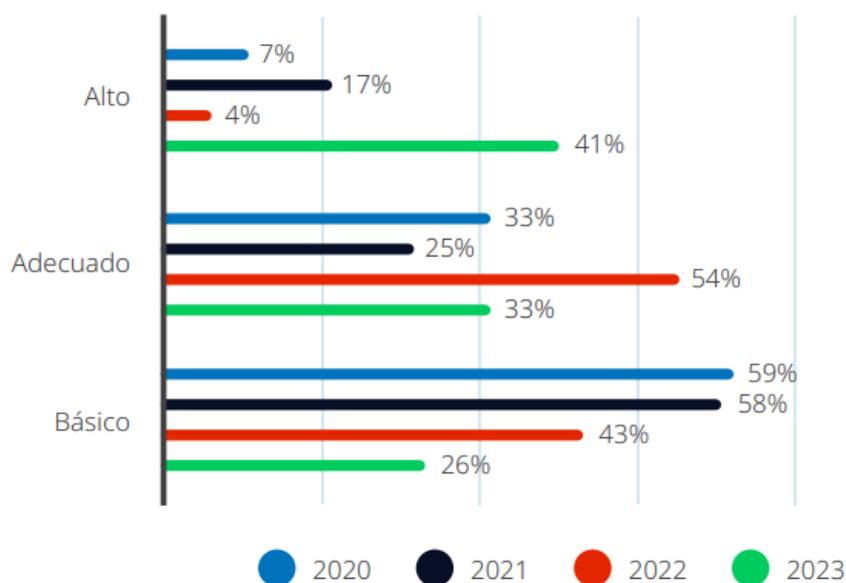


Ilustración 14. ¿Cuál es el grado de conocimiento y capacidades digitales dentro de las compañías? [6]

Ante la pregunta sobre el grado de conocimiento y capacidades digitales dentro de las compañías, hay una clara evolución positiva desde 2020 hasta 2023. En 2020, el 59% de las empresas reportaban un nivel básico de conocimientos digitales, con solo el 7% alcanzando un nivel alto. Sin embargo, para 2023, la proporción de empresas con conocimientos básicos se redujo significativamente al 26%, mientras que las empresas con conocimientos adecuados estuvieron en 33% y aquellas con un alto grado de conocimiento digital alcanzaron el 41%.

Este cambio indica un aumento continuo y significativo en la formación y adopción de habilidades digitales en las empresas. Las iniciativas de transformación digital, incluyendo programas de capacitación y la inversión en nuevas tecnologías, han demostrado ser efectivas, reduciendo la brecha digital y aumentando la competencia y preparación de las empresas para un futuro digitalizado. Este progreso hace que las empresas estén más preparadas ante los desafíos tecnológicos que puedan surgir.

### ¿Están identificadas las competencias digitales de cada empleado?

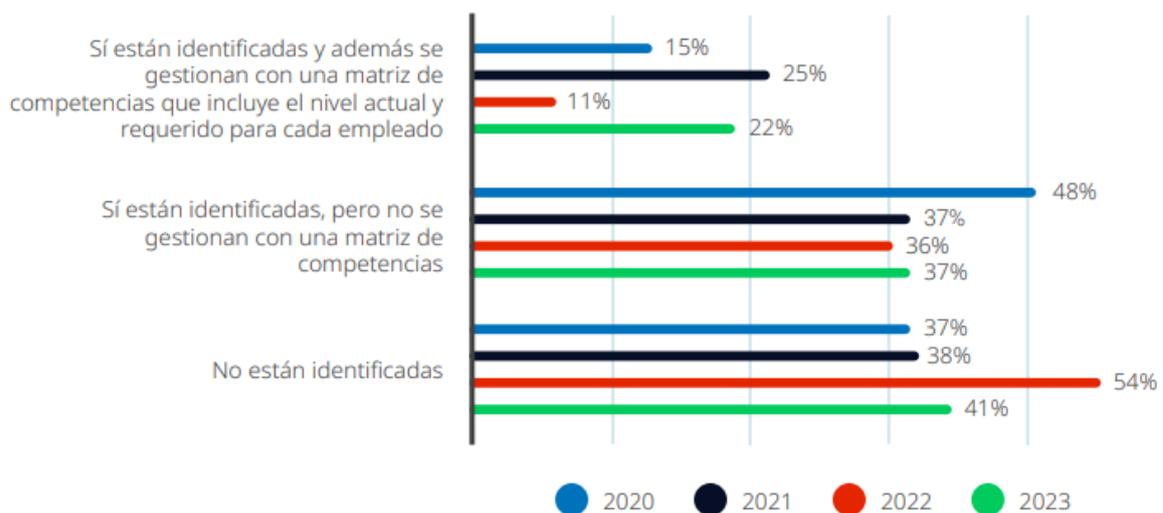


Ilustración 15. ¿Están identificadas las competencias digitales de cada empleado? [6]

Hay un panorama mixto en cuanto a la identificación y gestión de competencias digitales en las empresas entre 2020 y 2023. Mientras que el porcentaje de empresas que utilizan una matriz de competencias para gestionar las habilidades digitales ha aumentado del 15% en 2020 al 22% en 2023, el porcentaje de aquellas que identifican las competencias, pero no las gestionan con una matriz no se ha reducido al mismo nivel y casi que se ha mantenido constante alrededor del 37%. Este hallazgo sugiere que, aunque hay un reconocimiento de la importancia de las competencias digitales, falta la implementación de sistemas estructurados para su gestión.

El porcentaje de empresas que no identifican las competencias digitales ha aumentado ligeramente, pasando del 37% en 2020 al 41% en 2023. Es crucial que más empresas adopten la identificación y gestión estructurada de competencias digitales para estar preparadas para el futuro. Implementar matrices de competencias y programas de

formación continua puede ser un paso importante para cerrar esta brecha y que cada uno de los empleados sean capaces de adaptarse a las nuevas necesidades que requieren sus puestos.

### ¿Cuáles son las competencias que las compañías consideran indispensables de cara al futuro de la industria 4.0?

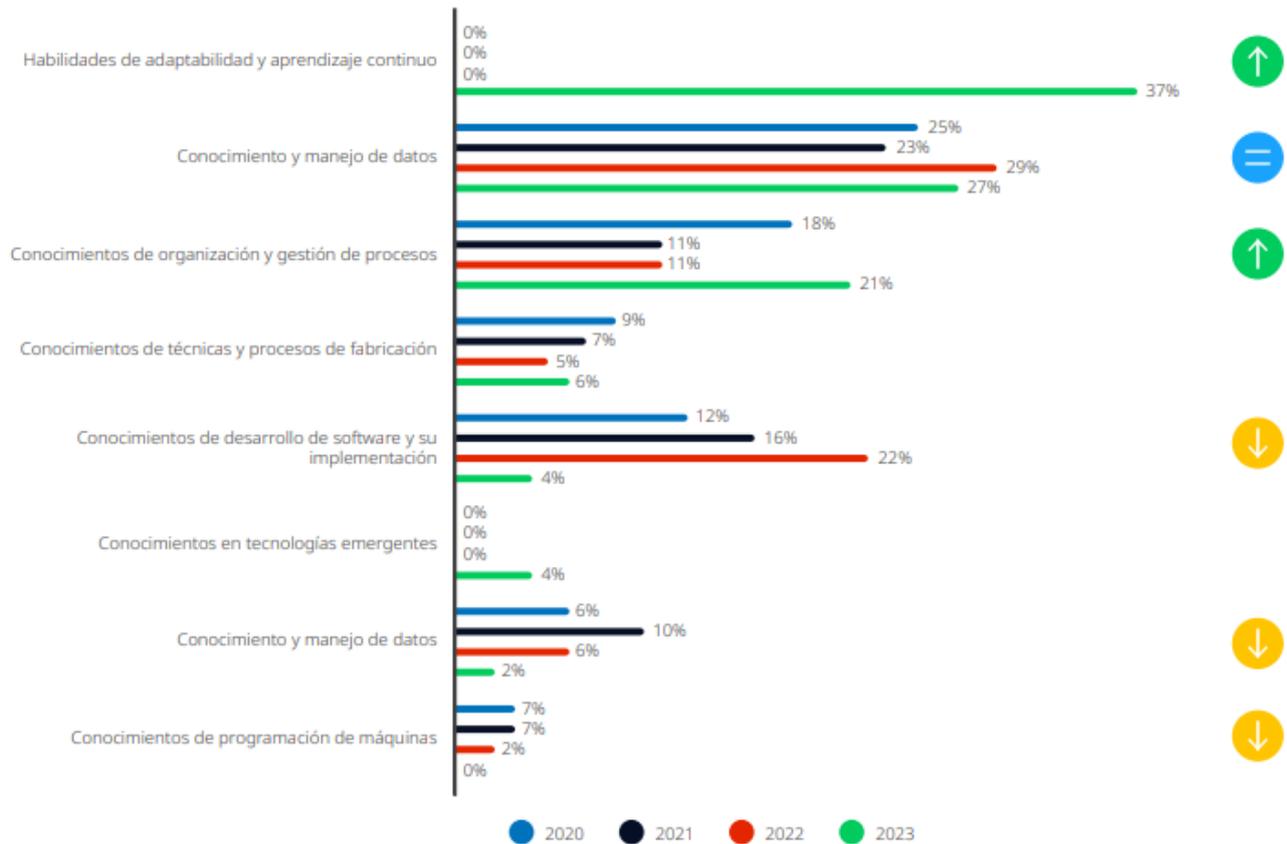


Ilustración 16. ¿Cuáles son las competencias que las compañías consideran indispensables de cara al futuro de la industria 4.0? [6]

A la pregunta sobre las competencias que las empresas consideran fundamentales para el futuro de la Industria 4.0, con las respuestas se muestra que las habilidades de adaptabilidad y aprendizaje continuo han emergido como las más importantes en 2023, con un 37% de las empresas reconociendo su valor. Esto destaca la necesidad de flexibilidad y disposición para aprender en un entorno de rápido cambio tecnológico.

El conocimiento y manejo de datos se ha mantenido siendo importante, disminuyendo ligeramente del 29% en 2022 al 27% en 2023, lo que subraya su papel central en la toma de decisiones dentro de las compañías. Asimismo, los conocimientos de organización y gestión de procesos han aumentado a 21% en 2023, reflejando la creciente importancia

de la eficiencia organizativa.

Por otro lado, los conocimientos de desarrollo de software y su implementación han sufrido una gran caída en importancia, con un 4% en 2023. Además, los conocimientos en tecnologías emergentes y la programación de máquinas son menos priorizadas, con solo un 4% y 0% respectivamente en 2023, lo que sugiere que otras habilidades son vistas como más críticas a corto plazo.

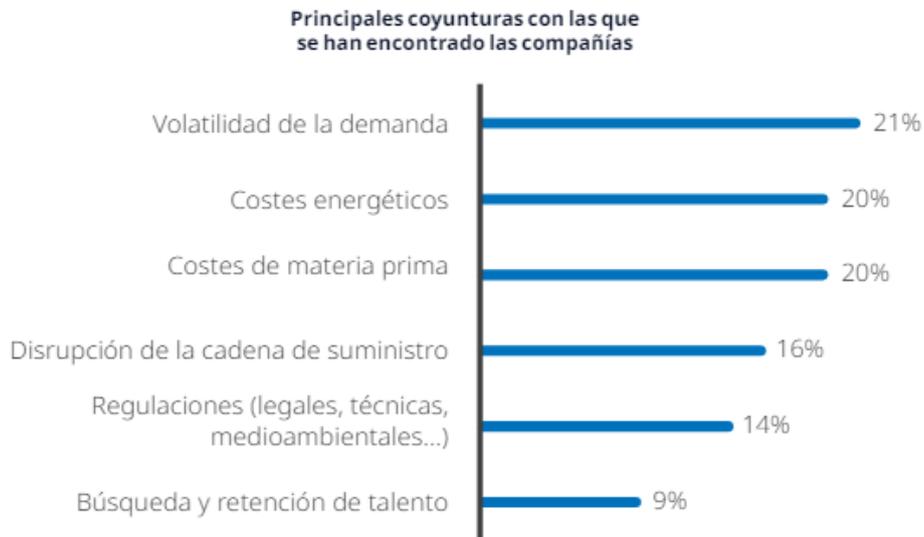


Ilustración 17. Principales coyunturas con las que se han encontrado las compañías[6]

La volatilidad de la demanda es el desafío más significativo, afectando al 21% de las empresas. Esta coyuntura resalta la necesidad de flexibilidad y capacidad de respuesta rápida en las operaciones empresariales para manejar cambios abruptos en la demanda del mercado.

Los costes energéticos y de materia prima, ambos considerados como un problema por el 20% de las empresas, reflejan el impacto considerable que estos gastos tienen en la rentabilidad y competitividad. Las empresas deben buscar estrategias para mitigar estos costes, como la eficiencia energética y la gestión eficaz de la cadena de suministro.

La disrupción de la cadena de suministro, que afecta al 16% de las empresas, subraya la necesidad de construir cadenas de suministro resilientes y diversificadas para evitar interrupciones en la producción. Además, las regulaciones legales, técnicas y medioambientales son un desafío para el 14% de las empresas, indicando la complejidad y los costes asociados con el cumplimiento normativo.

La búsqueda y retención de talento es una coyuntura significativa para el 9% de las

empresas, destacando la importancia de desarrollar estrategias efectivas de recursos humanos para atraer y mantener empleados cualificados en un mercado laboral competitivo. Estos desafíos reflejan las complejidades que enfrentan las empresas en su camino hacia la sostenibilidad y la competitividad.

### ¿Cuál se considera como la mayor barrera para la adopción digital en las compañías?

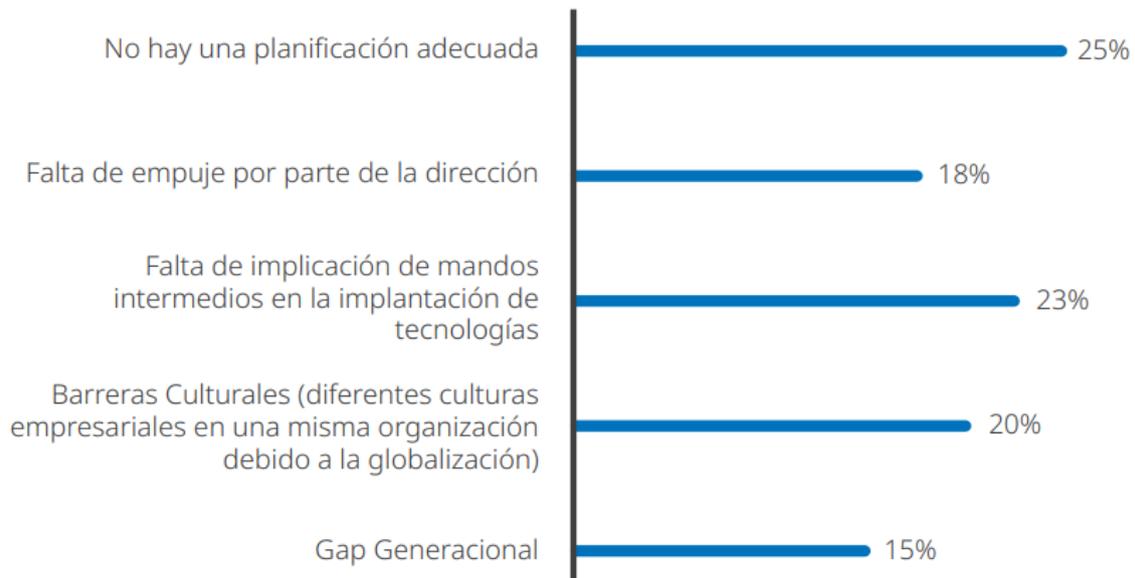


Ilustración 18. ¿Cuál se considera como la mayor barrera para la adopción digital en las compañías? [6]

Respecto a las barreras en la adopción digital en las empresas, se destaca como la mayor barrera la falta de una planificación adecuada, con un 25% de las empresas indicando que no tienen una estrategia clara para la adopción digital. Esto destaca la importancia de desarrollar planes estratégicos bien definidos para asegurar una transición exitosa hacia la digitalización.

Otra barrera significativa es la falta de empuje por parte de la dirección, con el 18% de las empresas. Sin un liderazgo comprometido y activo, los esfuerzos de digitalización pueden perder impulso y prioridad. De manera similar, la falta de implicación de los mandos intermedios en la implementación de tecnologías, señalada por el 23% de las empresas, destaca la necesidad de involucrar a todos los niveles de la organización en el proceso de digitalización.

Las barreras culturales, identificadas por el 20% de las empresas, representan un desafío en organizaciones globales, donde diferentes culturas empresariales pueden dificultar la alineación de los equipos y la colaboración. Por último, el gap generacional, mencionado por el 15% de las empresas, indica que las diferencias en competencias y actitudes hacia

la tecnología entre generaciones pueden crear fricciones en la adopción de nuevas herramientas digitales.

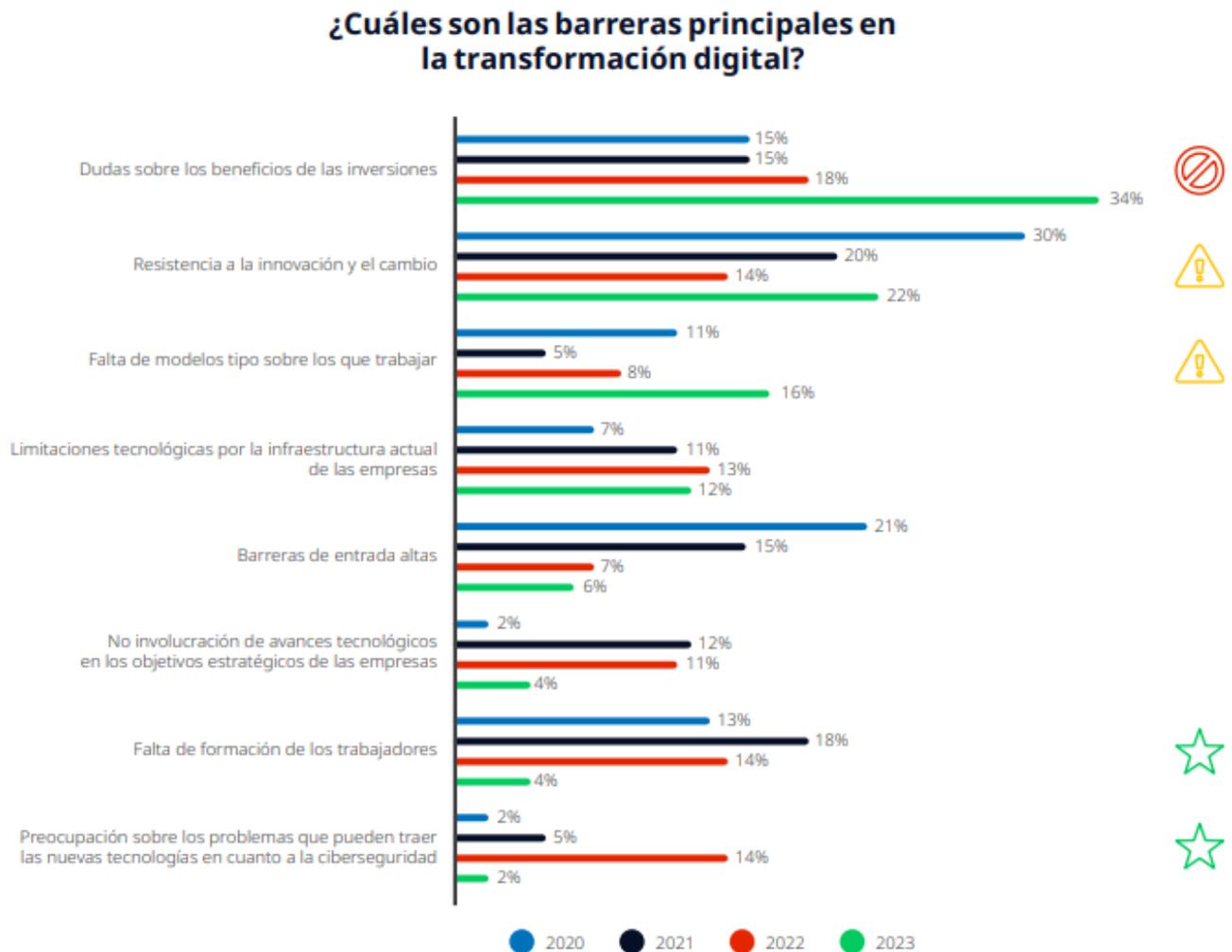


Ilustración 19. ¿Cuáles son las barreras principales en la transformación digital? [6]

Las dudas sobre los beneficios de las inversiones son la mayor barrera en 2023, con un 34% de las empresas señalándolo como un obstáculo significativo. Este incremento sugiere una necesidad urgente de demostrar el retorno de inversión y los beneficios tangibles de la transformación digital para asegurar el compromiso empresarial. Esto puede enlazarse con lo visto en la gráfica anterior respecto a la falta de empuje de la dirección, si por parte de la dirección no está claro que la inversión vaya a ser rentable, es lógico que no impulsen la transformación.

La resistencia a la innovación y el cambio, que aumentó del 14% en 2022 al 22% en 2023, sigue siendo una barrera constante, destacando la importancia de gestionar el cambio cultural en las organizaciones. Además, la falta de modelos tipo sobre los que trabajar, doblándose del 8% en 2022 a 16% en 2023, indica que las empresas necesitan más

ejemplos y marcos prácticos con los que guiarse.

Las limitaciones tecnológicas debido a la infraestructura actual también son una barrera significativa, con un 12% en 2023, manteniéndose prácticamente constante a lo largo de los años. Asimismo, las barreras de entrada altas, descendiendo al 6% en 2023, reflejan la evolución de las empresas en su proceso de embarcarse en la transformación digital.

La falta de integración de los avances tecnológicos en la estrategia empresarial y la falta de formación de los trabajadores, ambos con un descenso a 4% en 2023, señalan el foco que han puesto las empresas en la necesidad de una mayor alineación entre tecnología y objetivos de negocio, así como programas de capacitación continuos para desarrollar competencias digitales. Por último, las preocupaciones sobre ciberseguridad, descendiendo ampliamente del 14% en 2022 al 2% en 2023, señalan el aumento de enfoques robustos para manejar los riesgos asociados con las nuevas tecnologías.

De todo ello se señala que, aunque la FA-I3D muestra un crecimiento prometedor, aún está por detrás en adopción e inversión en comparación con Big Data, IoT y ciberseguridad. En cuanto a la inversión, las empresas priorizan otras tecnologías más maduras, aunque la fabricación aditiva está ganando terreno gradualmente. Sigue habiendo desafíos pendientes como la gestión de procesos productivos, en la que hay una adopción limitada de tecnologías digitales avanzadas, esto implica que muchas empresas están en las primeras etapas de la transformación digital y necesitan mejorar su infraestructura tecnológica y habilidades digitales. Se destaca también la importancia de la formación continua y el desarrollo de capacidades digitales para conseguir una adopción efectiva de la FA. Resulta importante enfrentar desafíos como la volatilidad de la demanda y los costes energéticos para poder aprovechar plenamente las ventajas de la FA.

#### 6.1.2. Fabricación aditiva

Poniendo un mayor foco en la situación actual de la Fabricación aditiva- Impresión 3D como tal, se ha hecho uso de diferentes informes y artículos que dan una visión ampliada de diferentes aspectos relevantes para entender cómo la evolución de la tecnología ha influido en su adopción teniendo en cuenta tanto el ámbito nacional como el internacional debido a la influencia que tiene este último en las tendencias a nivel nacional.

Es importante conocer la influencia de la FA-I3D en la cadena de suministro. Los principales insumos para la producción mediante impresión 3D son los materiales y los datos de diseño contenidos en archivos CAD [50]. Esta tecnología, que permite integrar múltiples componentes en un solo producto, elimina la necesidad de suministros

adicionales para cada componente. En comparación con los métodos de producción tradicionales, la FA-I3D provoca dos cambios importantes respecto a la relación con proveedores. Reduce la dependencia de proveedores de componentes y aumenta la dependencia de proveedores de materiales sostenibles y de sistemas informáticos. Los proveedores de las máquinas de impresión suelen suministrar también los materiales, debido a la inmadurez de la tecnología y las estrategias de los proveedores.

La fabricación aditiva requiere menores cantidades de materias primas que los métodos convencionales, lo que reduce el desperdicio y fomenta la sostenibilidad. En la industria de la construcción, por ejemplo, se puede ahorrar hasta un 60% de concreto imprimiendo estructuras huecas [50]. Sin embargo, todavía hay una limitada cantidad de proveedores de materiales ecológicos, la poca variedad (que se espera que aumente) y los altos costes son desafíos que actualmente tienen los fabricantes que buscan fuentes sostenibles alternativas. Esto la vulnerabilidad de la cadena de suministro debido a los cambios en la disponibilidad de materiales. La capacidad de producción tiene una alta dependencia de la habilidad de los proveedores para la entrega de los materiales sostenibles acordados, en cantidad, precio y tiempo de entrega programado. Esta tecnología permite también a las empresas subcontratar de forma completa el diseño y la fabricación de productos a proveedores de estos servicios que priorizan la sostenibilidad. Esta forma de actuar permite que las empresas disfruten de los beneficios de la FA-I3D mientras reducen los riesgos como los gastos de formación del personal.

Entre septiembre y noviembre de 2023, la European Association of Manufacturing Technologies, (Cecimo) organizó la séptima ronda de su Encuesta Europea de Fabricación Aditiva, cuyo objetivo es evaluar las tendencias clave del mercado en el sector de la FA-I3D en el ámbito europeo. Como se detalla en el informe [51], la tendencia de crecimiento de los pedidos no es demasiado optimista, aunque se espera un mayor crecimiento en el mercado nacional. Por otro lado, se espera que las empresas de FA-I3D que ofrecen soluciones relacionadas con el uso de materiales compuestos y plásticos como materiales experimenten el mayor crecimiento de pedidos en los próximos seis meses, especialmente del sector aeroespacial.

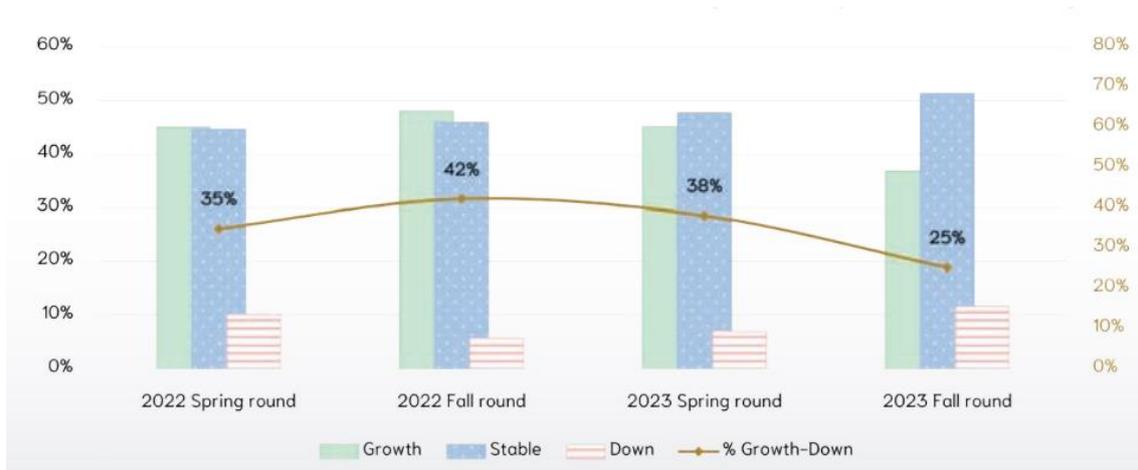


Ilustración 20. Tendencia en FA; Mercado Interior [51]

Los resultados de FA-I3D sobre las tendencias del mercado interno en el sector europeo muestran una perspectiva estable pero un poco más lenta para el crecimiento del mercado interno en comparación con el período de la encuesta anterior. Como se muestra en el gráfico anterior, las expectativas de crecimiento han disminuido significativamente del 45% al 37%, mientras que la proporción de encuestados que anticipan una evolución negativa ha aumentado del 7% en la encuesta de primavera al 12% en esta última. Aunque las expectativas empresariales han disminuido un poco, se prevé que el sector europeo del FA continúe expandiéndose de manera moderada en su mercado nacional durante los próximos seis meses, lo que indica un crecimiento de la demanda algo estable.

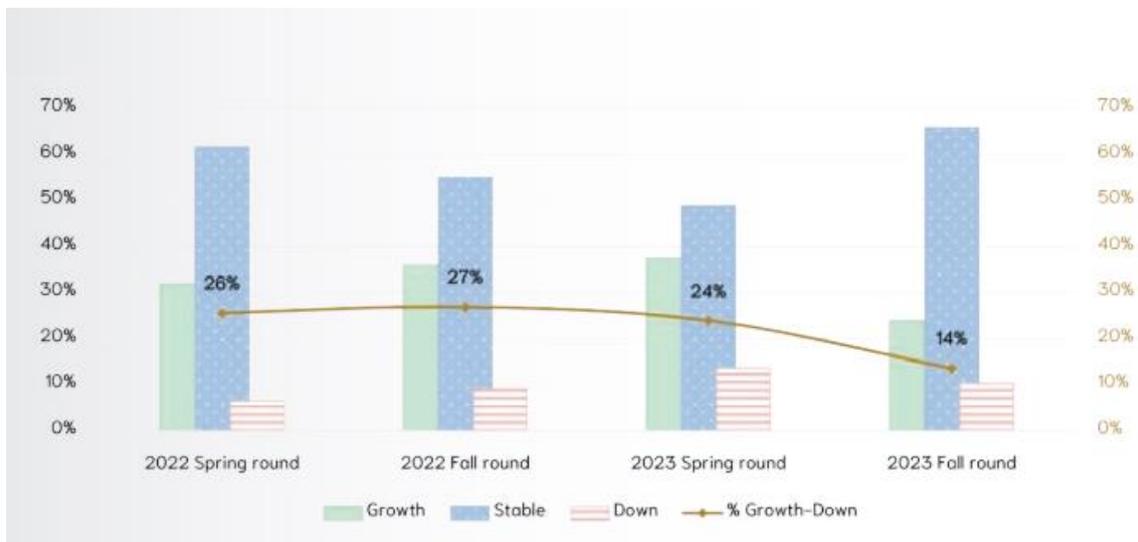


Ilustración 21. Inversiones en FA [51]

El balance de nuevas inversiones en el sector FA ha disminuido significativamente de un 24% en la ronda anterior a un 14% en esta ronda, en línea con las expectativas moderadas para los mercados nacionales e internacionales. La cantidad de encuestados que esperaban

un aumento en las inversiones ha disminuido del 37% al 24%, mientras que la cantidad de encuestados que esperaban una disminución también ha bajado del 14% al 10%. Y el 66% de los encuestados esperan que la inversión permanezca estable. Esto destaca que aproximadamente dos tercios de los encuestados anticipan que los niveles de inversión permanecerán idénticos a los de los seis meses anteriores.

La tendencia observada en el ámbito europeo no difiere mucho de la española. Mientras que en Europa hay un descenso, la estabilidad en términos de inversión destaca frente a variaciones al alza y a la baja. Siendo también predominante los encuestados que confían en un aumento de las inversiones. Esto concuerda con lo visto anteriormente en el ámbito español, donde había un ligero aumento en inversiones.



Ilustración 22. Indicación de tendencia del mercado interior; piezas producidas. [51]

El análisis de los indicadores de tendencia en el mercado doméstico europeo muestra un balance positivo, aunque existe un descenso en las expectativas de crecimiento. Esta tendencia coincide con una desaceleración económica en Europa, por lo que no es sorprendente. A pesar de que ha aumentado el porcentaje de encuestados que esperan un crecimiento en la categoría de productos y piezas fabricadas de FA, también ha aumentado el porcentaje que espera un descenso, del 2% al 11% desde la primavera de 2023. El equilibrio resultante es estable pero ligeramente inferior, con un 39%.

Los nuevos materiales, como los plásticos y los materiales compuestos, también son un tema importante. La reducción de la huella de carbono y el reciclaje de materiales son fundamentales para las estrategias de producción sostenibles. La FA permite el uso de materiales avanzados que pueden mejorar la durabilidad y el rendimiento de los productos

mientras se reduce el desperdicio, lo que es un gran beneficio para una economía circular.

### Composites.

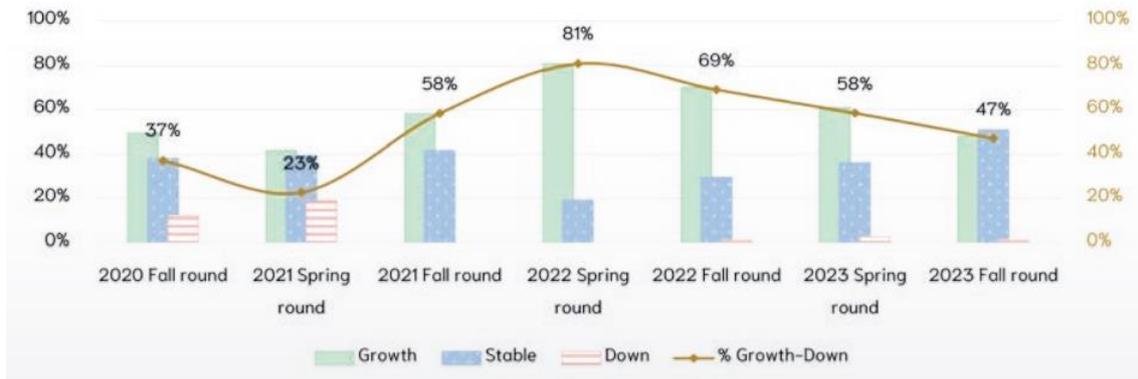


Ilustración 23. Tendencia del material de la FA. Composites[51]

Estos resultados revelan que, aunque los pedidos se están estabilizando, los compuestos se proyectan como el material más demandado en el periodo posterior a la encuesta. Si bien las expectativas de crecimiento son ligeramente menores que en la encuesta de primavera, es positivo que las expectativas negativas se mantengan bajas como en las encuestas anteriores.

### Metales.

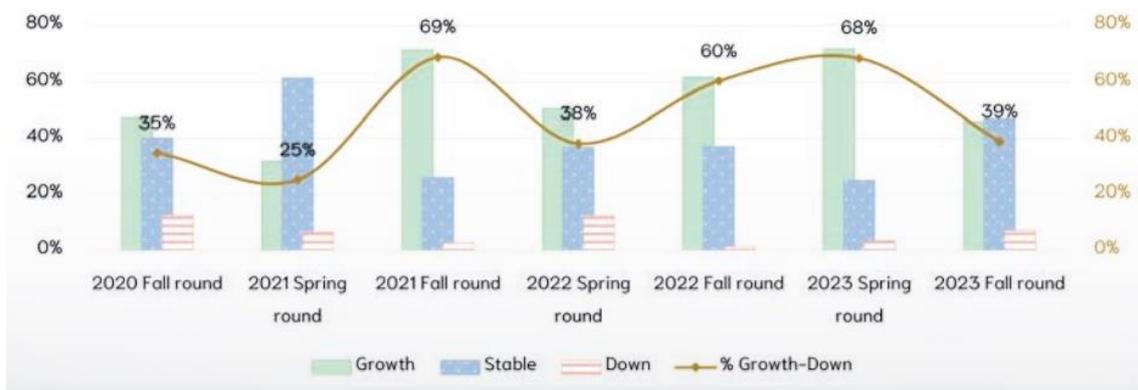


Ilustración 24. Tendencia del material de la FA. Metales[51]

Los metales han observado un cambio significativo. Antes se esperaba que los metales tuvieran el crecimiento más sólido, pero ahora las expectativas se han reducido. Han aumentado los encuestados que vaticinan una disminución en los nuevos pedidos subiendo del 3% al 7% y los que apostaban por un crecimiento han caído del 72% al 46%. Esto no evita que los metales sigan siendo uno de los tres materiales con mayor

crecimiento previsto.

### Plásticos.

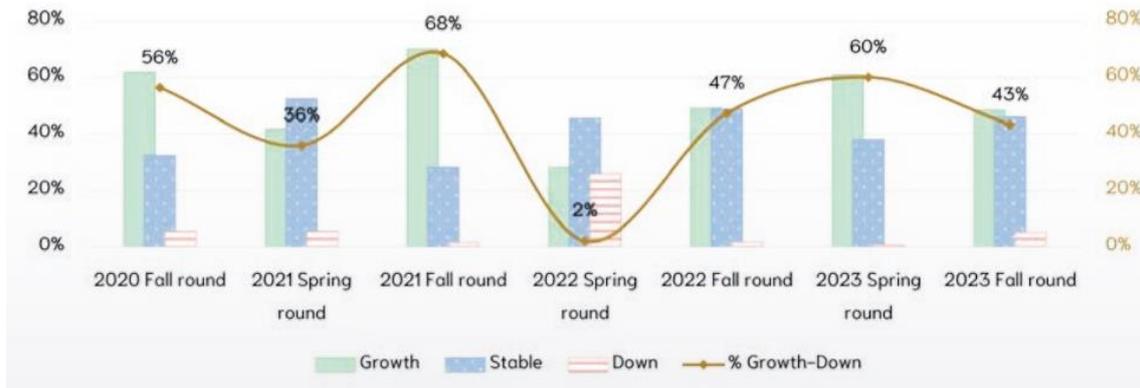


Ilustración 25. Tendencia del material de la FA. Plásticos[51]

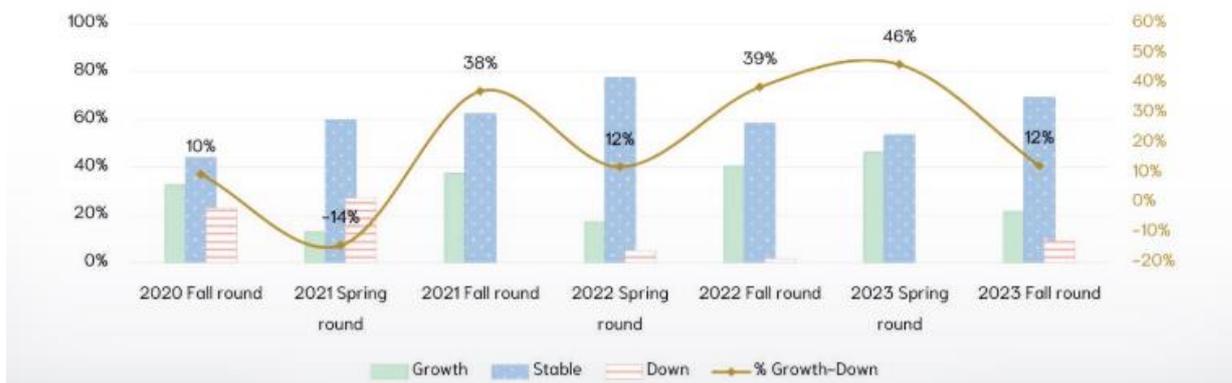


Ilustración 26. Tendencia del material de la FA. Cerámicos [51]

Los plásticos siguen en segundo lugar en cuanto a expectativas de nuevos pedidos, aunque hay un aumento en la proporción de encuestados que esperan pedidos más estables o negativos. En cuanto a los cerámicos, ha disminuido significativamente el porcentaje de encuestados que prevé un aumento en los pedidos, mientras que casi el 10% anticipa una reducción. Este resultado es el más bajo desde la primavera de 2022.

Si comparamos con la encuesta anterior, las expectativas de crecimiento son ligeramente inferiores, pero aún positivas. Las empresas de FA-I3D que se enfocan en materiales compuestos y plásticos pueden esperar el mayor crecimiento en los próximos seis meses. No como para otros materiales, cuyas las expectativas de crecimiento han disminuido significativamente.

### Sector aeroespacial.

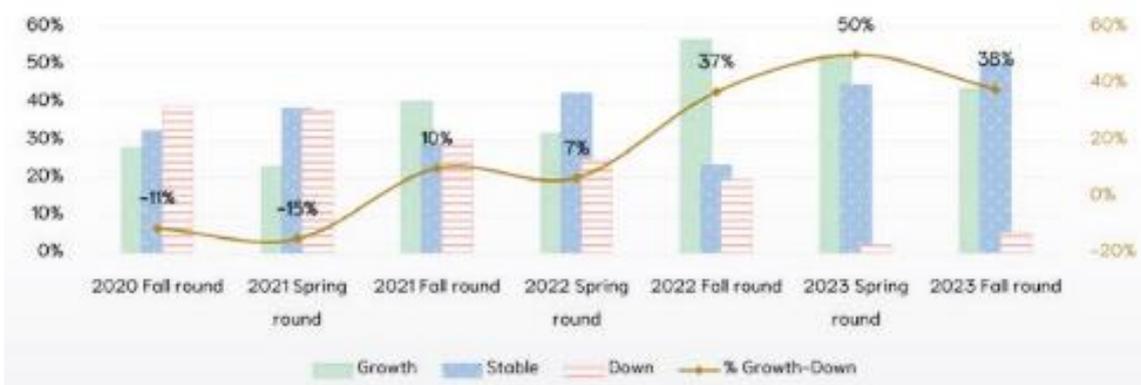


Ilustración 27. Tendencia de sector aeroespacial [51]

Yendo al análisis por sectores, se destaca que sectores como la aeroespacial, defensa, automoción, y médico están liderando la adopción de la FA. Estos sectores son críticos en la debido a su alta demanda de precisión, personalización y mejora continua. La capacidad de la FA para producir componentes ligeros y optimizados es especialmente valiosa en la industria aeroespacial, donde la reducción de peso es crucial. Aunque el porcentaje de encuestados que esperan un crecimiento ha disminuido del 53% al 44%, se espera que el sector aeroespacial mantenga su posición como el sector con mayor crecimiento de nuevos pedidos en los próximos meses.



Ilustración 28. Índice de confianza de FA[51]

Los resultados más recientes de la encuesta indican que el Índice de Confianza FA ha disminuido significativamente hasta los 56,5 puntos, el nivel más bajo desde que se tienen datos. El índice continúa en una zona favorable por encima de 50, es probable que las actuales circunstancias económicas y las posibilidades de financiación menos favorables estén afectando negativamente las inversiones en FA-I3D.

El informe también menciona varios desafíos, como la necesidad de personal cualificado y la integración de la FA en los procesos de producción tradicionales como también se vio en el estudio anterior. Estos desafíos requieren un personal capacitado en tecnologías avanzadas y una infraestructura capaz de soportar la integración de nuevas tecnologías

En el informe 3D Printing Trend Report 2024 de Protolabs [52] se encuentra información muy relevante respecto a cómo está siendo la adopción de la FA-I3D en las empresas desde un punto de vista global. En este informe han recopilado datos sobre las tendencias del mercado de diversas fuentes. Entre ellas, cifras de varias empresas líderes de análisis de mercado que evaluaron el mercado de la impresión 3D en 2023, una encuesta a más de 700 ingenieros, diseñadores, fabricantes y otros líderes de la comunidad mundial de ingeniería. Se va a hacer uso también del informe que lanzaron en 2022 [53] para lograr una visión de las variaciones que se han producido en este tiempo.

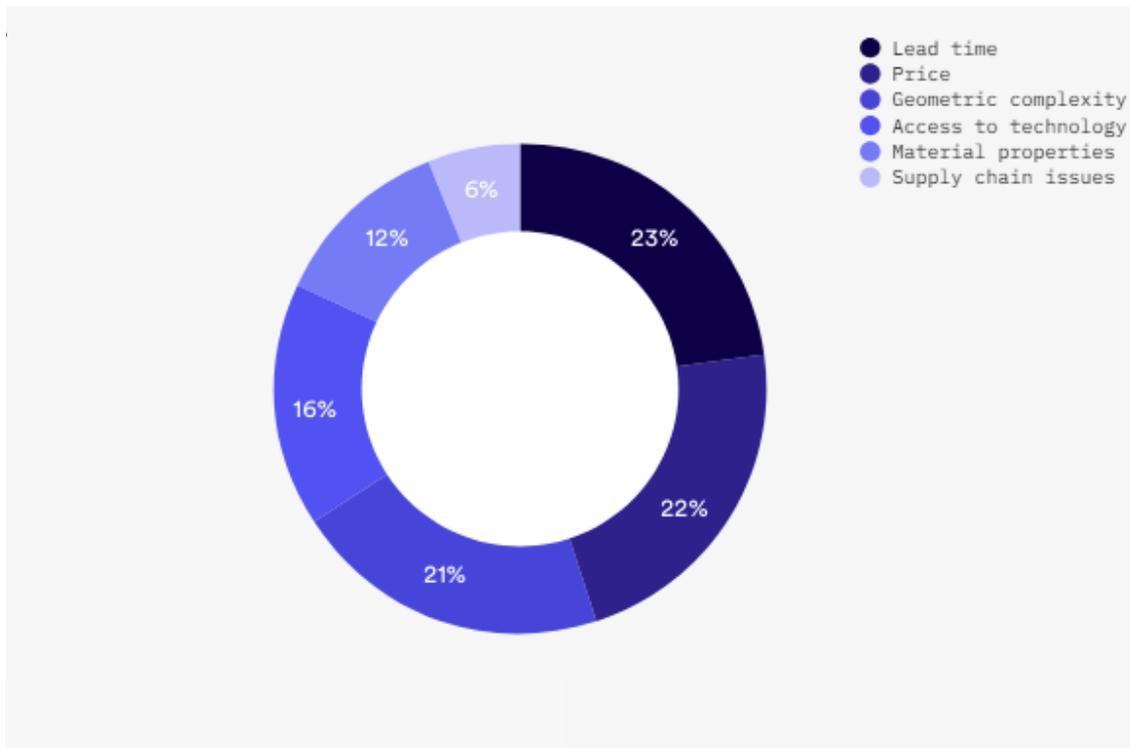
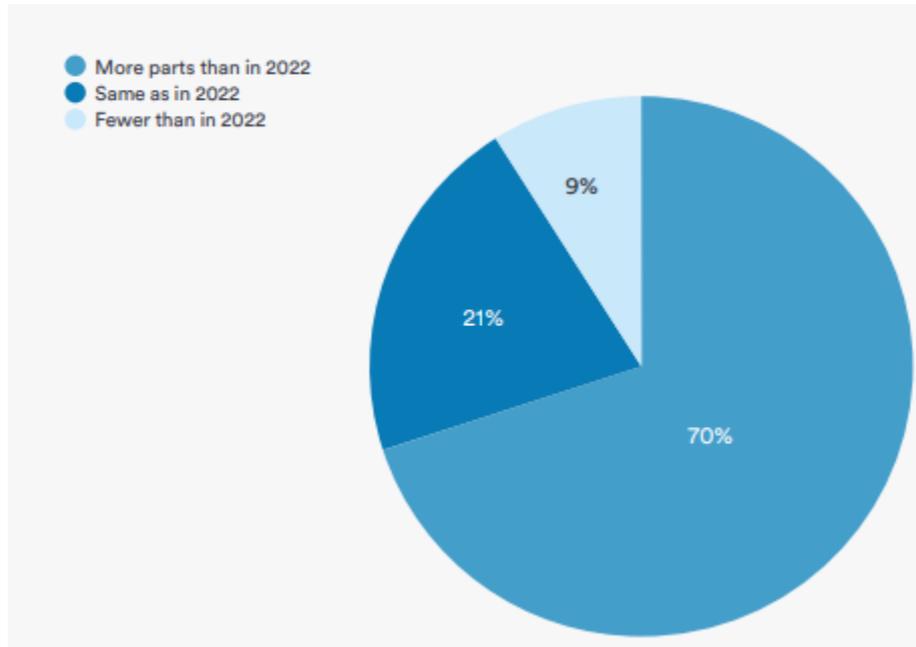


Ilustración 29. Factores clave para elegir la impresión 3D [53]

Es importante saber cuáles son los motivos que llevan a las empresas a hacer uso de la Impresión 3D. De la gráfica superior se obtiene que los factores más influyentes para son el tiempo de entrega, el precio y la complejidad geométrica, casi igualados en términos de resultados con un 23, 22 y 21 % respectivamente. Estos factores destacan las ventajas clave de la FA-I3D, como la rapidez, la rentabilidad y la capacidad para manejar geometrías complejas. La accesibilidad a la tecnología y las propiedades específicas de los materiales también son importantes, aunque en menor medida, con un 16 y 12 %

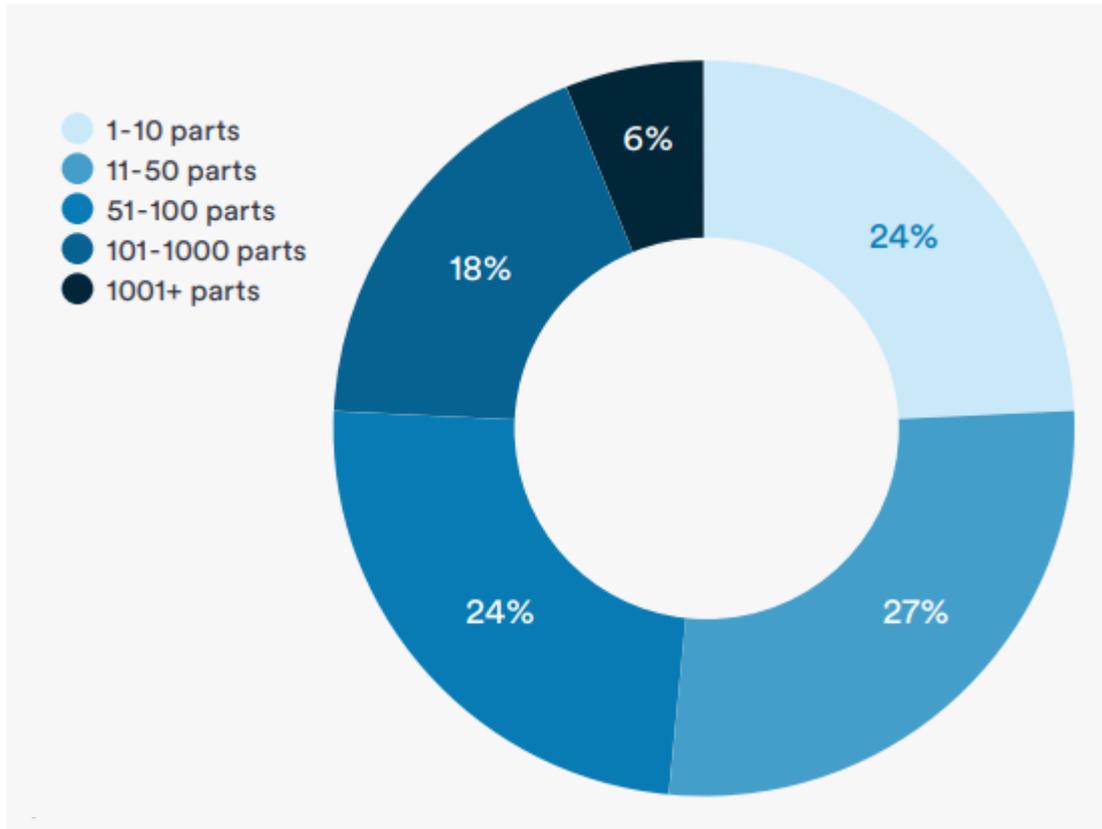
respectivamente. Por último, aunque los problemas en la cadena de suministro son una consideración menor, la impresión 3D sigue ofreciendo beneficios importantes en este aspecto.



*Ilustración 30. Cantidad de piezas impresas en 3D.[52]*

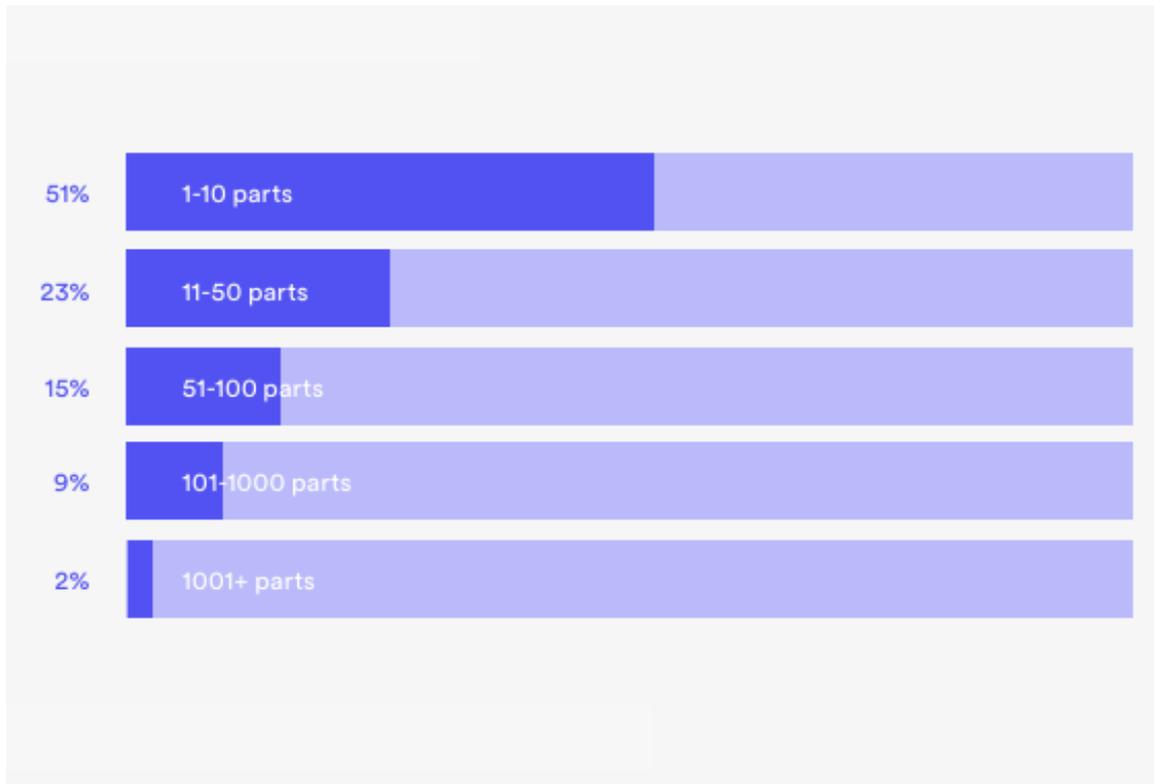
La encuesta sobre si el número de partes impresas en 2024 será superior al de 2022, nos da una visión clara. El 70% de los encuestados afirma que será mayor, frente a un 21% que asume que la cifra será igual y un 9% que considera que será inferior. La respuesta de los encuestados el aumento de partes impresas en este año respecto a hace 2 años es claro y esto demuestra la evolución que la FA-I3D está teniendo en las empresas y también incluso para particulares.

En comparación de las tendencias anteriormente observadas para el ámbito europeo, a nivel global hay una mayor diferencia a nivel positivo en términos de piezas impresas.



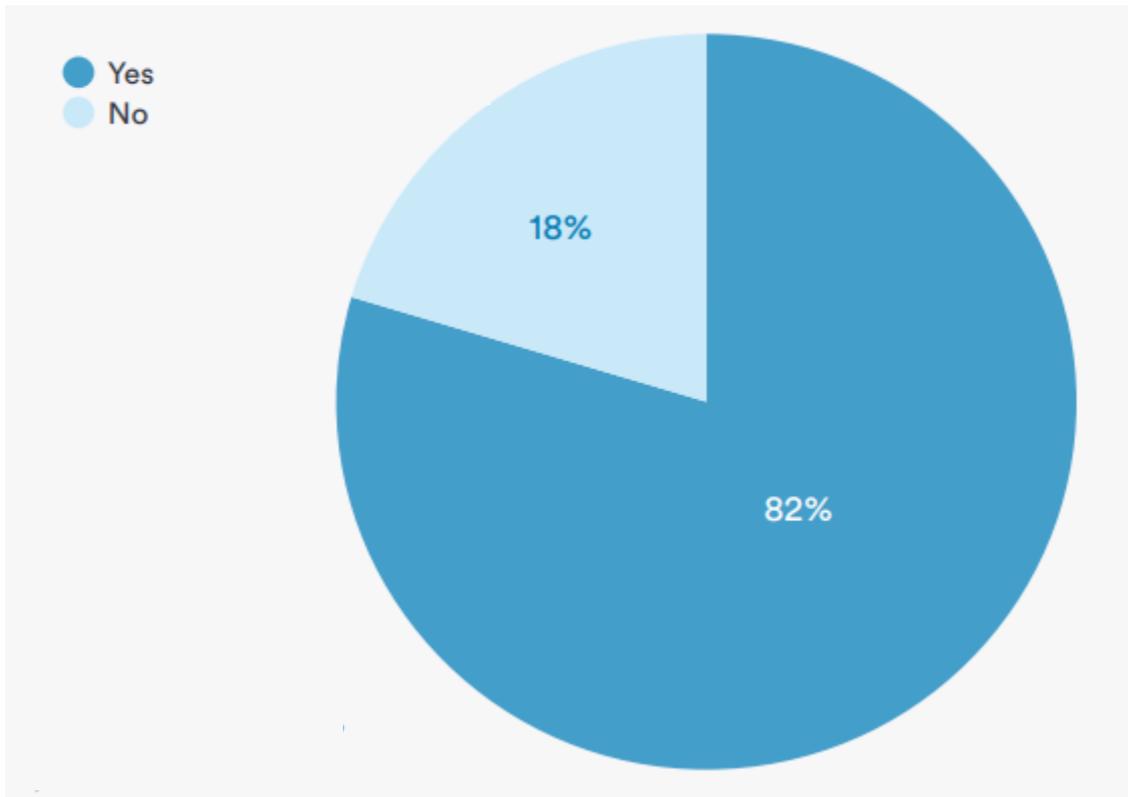
*Ilustración 31. Volúmenes de producción de piezas impresas en 3D en 2023.[52]*

Respecto a los volúmenes de producción, la mayoría están en los segmentos más bajos, entre 1-10 piezas un 24%, entre 11 – 50 piezas un 27% y entre 51 – 100 piezas un 24 %. Esto hace que el 75 % de los volúmenes de producción esté por debajo de las 100 piezas. Esto indica que la FA-I3D se utiliza con mayor frecuencia producciones de bajo volumen. Esto es debido a que no es una tecnología que se use para buscar repetibilidad, sino que tiene un mayor alcance en pequeñas series de productos y en componentes específicos.



*Ilustración 32. Tamaño de las tandas de producción de impresión 3D [53]*

Si tenemos en cuenta la encuesta realizada en el informe de 2022, podemos observar cómo la tendencia es que los volúmenes de producción están aumentando, el segmento de más de 100 piezas ha pasado del 11 al 24% y el segmento del volumen de 1 – 10 piezas se ha reducido del 51% al 24%, esto es un buen modo de medir la evolución de la tecnología y cómo cada vez es capaz de ser usada para diferentes propósitos.



*Ilustración 33. ¿Le ha ayudado la impresión 3D a ahorrar costes sustanciales en su proceso de fabricación? [52]*

Como hemos visto anteriormente, uno de los factores que causan la elección de la FA-I3D en las empresas es el precio. En la pregunta sobre si la FA-I3D ha ayudado a una reducción substancial de costes, los encuestados nos muestran una tendencia clara y es que sí, con un 82%, efectivamente la impresión 3D ayuda al ahorro de costes. La adición progresiva de material ayuda a reducir el desperdicio de material, el cual tiene un coste significativo para las empresas.

Otro dato importante que podemos obtener del informe de Protolabs [52] es la importancia que tienen las diferentes tecnologías englobadas en el término impresión 3D, estas pueden diferir en la selección de materiales, el acabado superficial, la durabilidad y la velocidad y el coste de fabricación. La respuesta de los encuestados, con un 59% que usa con mayor frecuencia FDM, un 20% que usa SLA, un 11% que usa SLS y un 7% que usa más MJF, nos sugiere de la importancia del FDM que como vemos, permite a las empresas implementarlo en un mayor número de procesos gracias a las ventajas mencionadas previamente, como son: el coste reducido de máquinas, la flexibilidad de los materiales, la facilidad de uso, la durabilidad y el coste económico de las materias primas

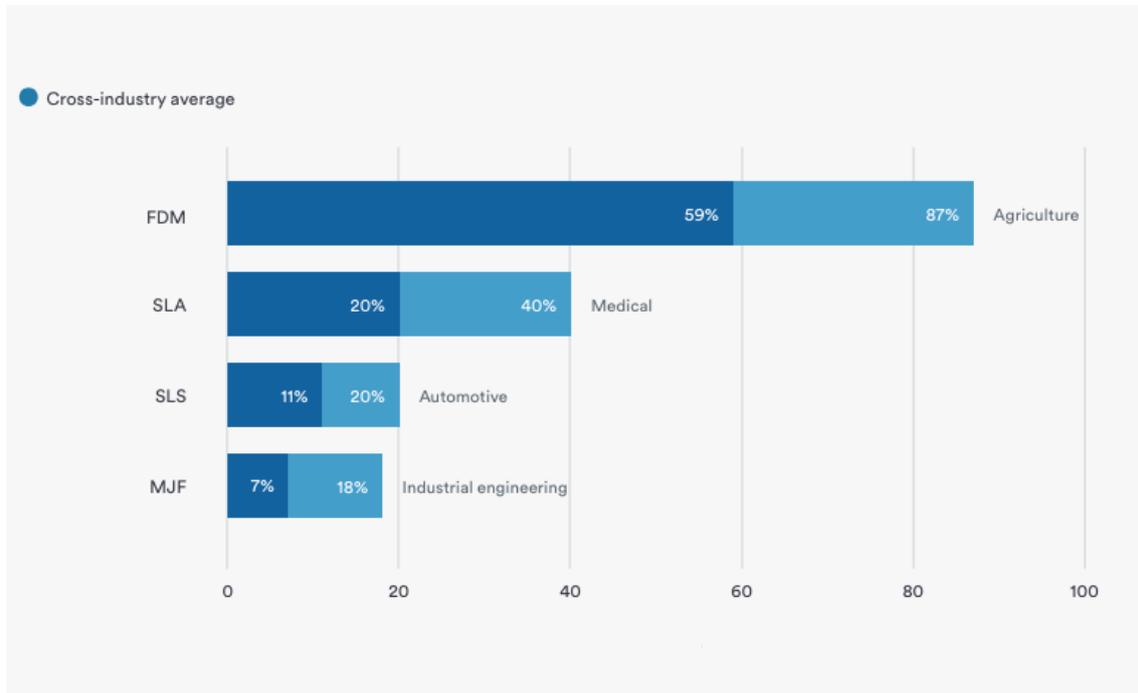


Ilustración 34. Las industrias que más están usando cada tecnología de impresión 3D [52]

Si se cruzan las técnicas comunes de FA-I3D con las diferentes industrias en las que se usan podemos ver que la FDM es muy usada en Agricultura, con un 87%. La técnica SLA tiene su uso más destacado en la industria médica, que puede tener amplias aplicaciones para ayudar a enfermos. La técnica SLS es más usada en el sector Automotriz, donde un 20% de las aplicaciones de la FA-I3D la usan. Por último, la MFJ tiene su uso más destacado en la Ingeniería industrial.

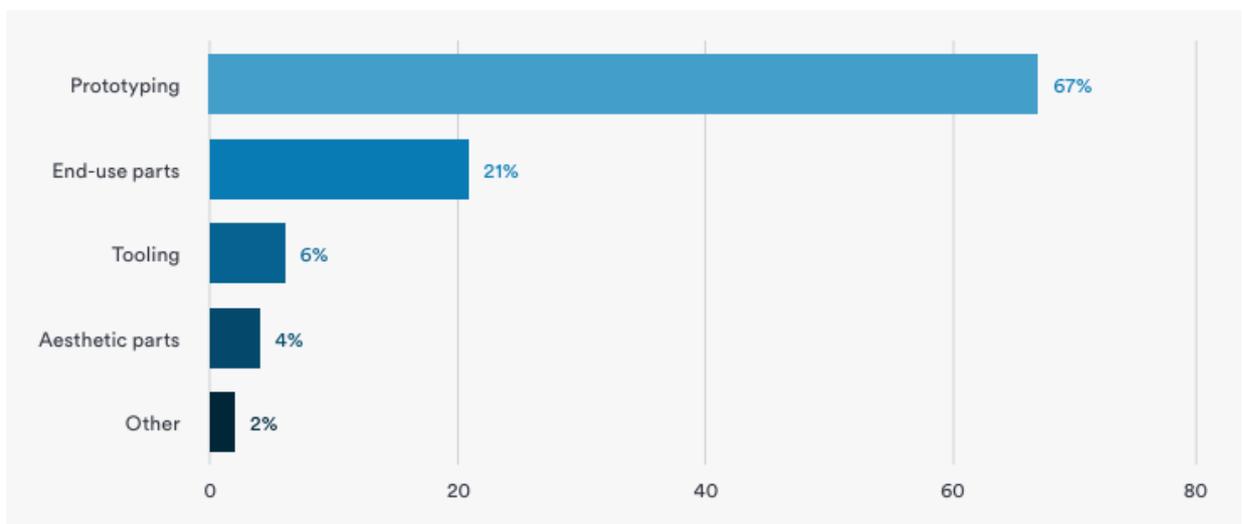


Ilustración 35. Aplicaciones de la impresión 3D.[52]

Las aplicaciones que puede tener la FA-I3D son variadas. Según los encuestados el mayor uso que tiene la Impresión 3D es en el prototipado, con un 67%, seguido de End-use parts

con un 21%. La gráfica muestra claramente el predominio que tiene el prototipado frente al resto de aplicaciones que se le puede dar a esta tecnología. El uso de la impresión 3D para generar modelos de prueba ayuda a las empresas a disminuir los riesgos y a mejorar sus diseños.

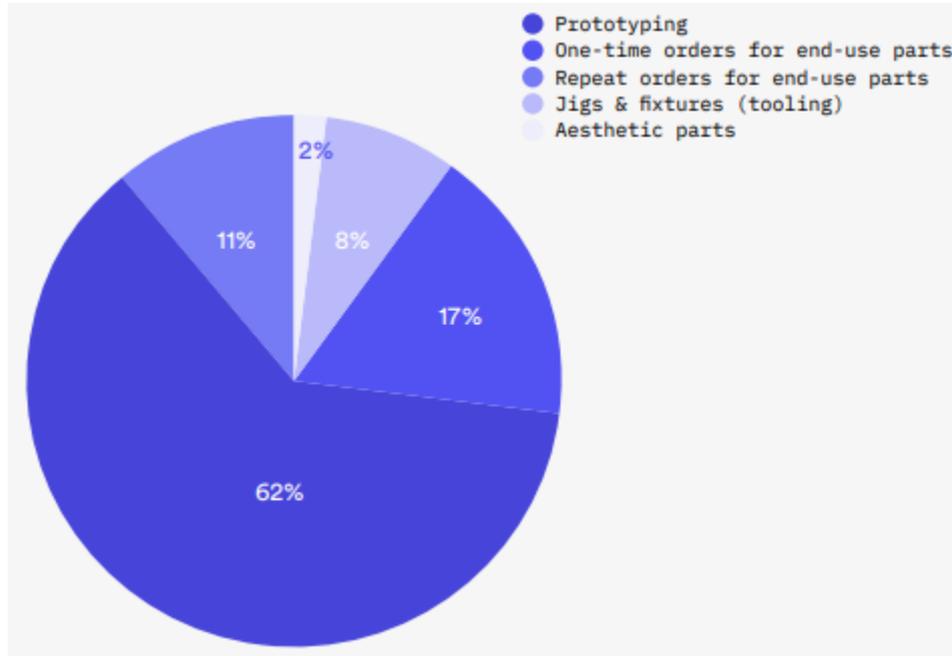


Ilustración 36. Aplicaciones de la impresión 3D [53]

Comparando los resultados anteriores con los obtenidos en 2022, vemos como el prototipado ha aumentado su presencia, del 62 al 67%, la fabricación de piezas de End-use desciende del 28% al 21%, al igual que el Tooling, que pasa del 8 al 6%. Aun así, se observan tendencias similares, donde el prototipado es la aplicación con más éxito con una amplia diferencia.

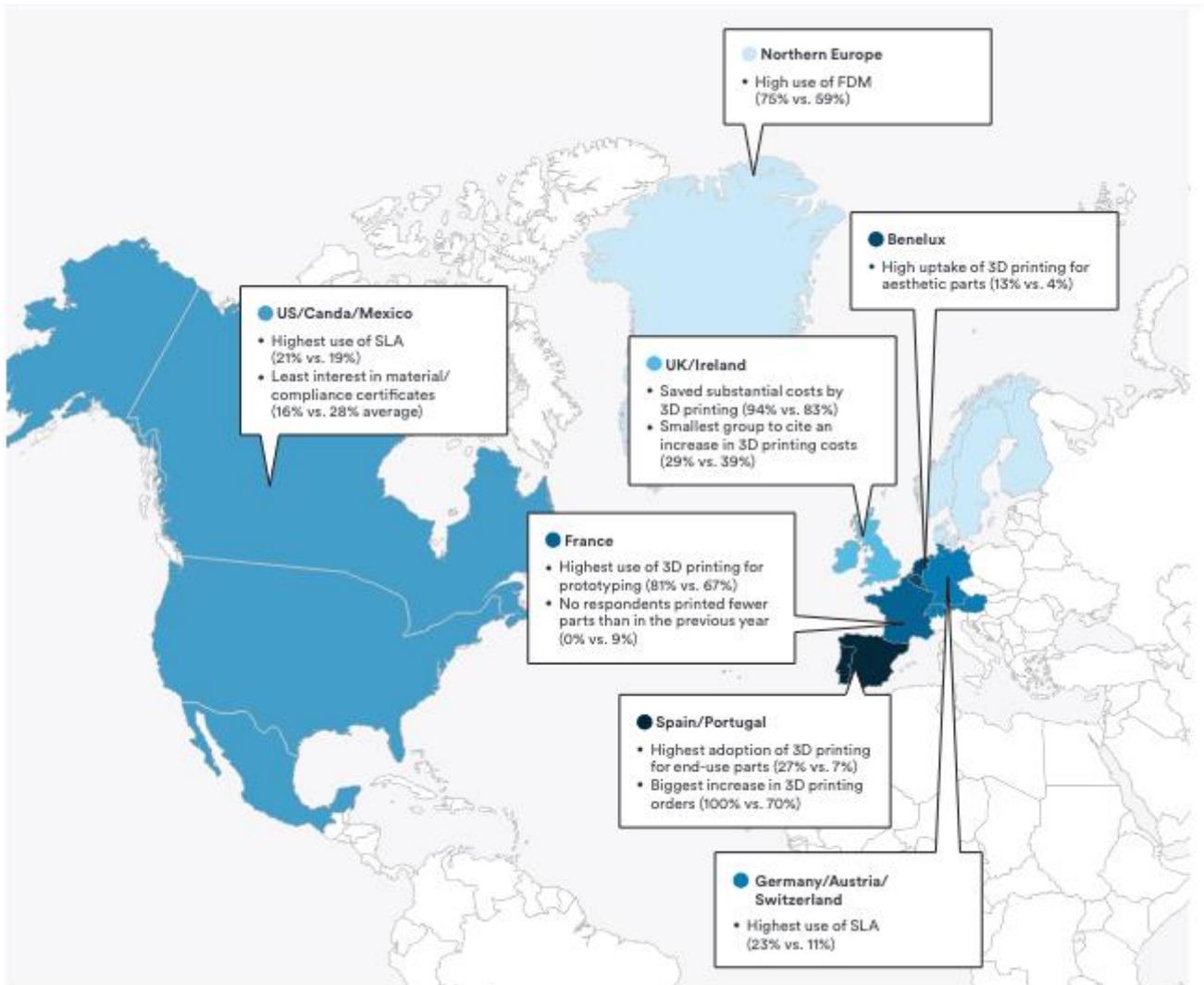


Ilustración 37. Desglose de las tendencias de impresión 3D por regiones [52]

Poniendo la vista en las diferentes tendencias que está teniendo la FA-I3D en todo el mundo, observamos comportamientos muy distintos, entre los cuáles hay que destacar:

- Los porcentajes de encuestados que afirman que su tecnología más utilizada es la MJF son especialmente elevados en España/Portugal donde alcanza el 27% y Reino Unido/Irlanda,18%, mientras que la media mundial es del 7%.
- En BeNeLux, la impresión 3D tiene un igual uso para piezas de End-use como para el prototipado con un 40% cada uno. Esto difiere mucho de la media mundial, que es del 67% de uso para prototipado y del 21% para piezas de End-use.
- En BeNeLux también hay un alto porcentaje de encuestados que utilizan la FA-I3D principalmente para piezas estéticas 13%, lo que supone triplicar la media

mundial que sólo es del 4%.

- En España y Portugal, el 100% de los encuestados afirmaron imprimir más en 2023 que en 2022, frente a la media mundial que es del 70%.

### 6.1.3. El papel del comercio electrónico y el uso de la web

Para tener contexto de la situación actual de la FA-I3D son relevantes otros campos como el acceso a esta tecnología. El artículo [54] proporciona una perspectiva integral sobre el uso de canales de e-commerce en la FA-I3D. Este artículo destaca cómo la utilización de tecnologías de comunicación electrónica y el e-commerce en FA-I3D puede afectar las estructuras de la cadena de suministro, la eficiencia operativa y los costes.

La investigación muestra que, aunque la integración de canales electrónicos en FA-I3D se ha promocionado como un medio para incrementar la eficiencia y reducir costes, la realidad es más compleja. Se sugiere que las empresas deben evaluar cuidadosamente sus estrategias de canal y no asumir que la adopción de tecnologías digitales llevará automáticamente a mejoras operativas.

Es necesario un enfoque estratégico en la implementación de la tecnología. Para los proveedores de FA-I3D, elegir el canal adecuado puede ser crítico. El marco conceptual desarrollado en el estudio, que incluye modelos como la fabricación colaborativa, la fabricación localizada y la fabricación por usuarios, ofrece una guía para entender cómo diferentes configuraciones de canales pueden influir en la cadena de suministro y en la eficiencia general del proceso de fabricación. Este aspecto es fundamental para la industria, donde la flexibilidad y la capacidad de personalización son clave para mantener la competitividad.

También es importante considerar no solo las implementaciones técnicas sino también las implicaciones prácticas y estratégicas de estas tecnologías. En el contexto de estudio, esto implica que las empresas deben integrar de manera inteligente las tecnologías de FA-I3D con otros sistemas digitales, como el Internet de las Cosas, la inteligencia artificial y el análisis de datos, para maximizar los beneficios. La capacidad de transferir archivos de diseño de manera electrónica y la colaboración a través de plataformas digitales son ejemplos claros de cómo la FA-I3D puede transformar los modelos de negocio y las operaciones.

Esta capacidad de transferir archivos de manera electrónica se relaciona con lo que se comenta en [55], con el concepto de Cloud Manufacturing (CM), que se basa en la digitalización y la integración de tecnologías avanzadas. La fabricación aditiva, siendo

una de estas tecnologías avanzadas, se beneficia significativamente de este modelo. La capacidad de CM para conectar recursos de fabricación distribuidos y virtualizados a través de la nube permite que las impresoras 3D y otros equipos de fabricación aditiva se integren fácilmente en redes de producción flexibles. Esto no solo mejora la eficiencia y reduce los costes, sino que también facilita la personalización del producto.

Cloud Manufacturing requerirá la interacción entre tres grupos: los consumidores, los proveedores de aplicaciones y los proveedores de recursos físicos. Las necesidades de los usuarios se ajustarán a las capacidades de los proveedores de recursos a través de la capa de aplicación. Las soluciones serán específicas para cada cliente o tarea, ya que la capa de aplicación basada en la nube puede utilizarse para generar numerosas opciones para los usuarios en función de sus preferencias.

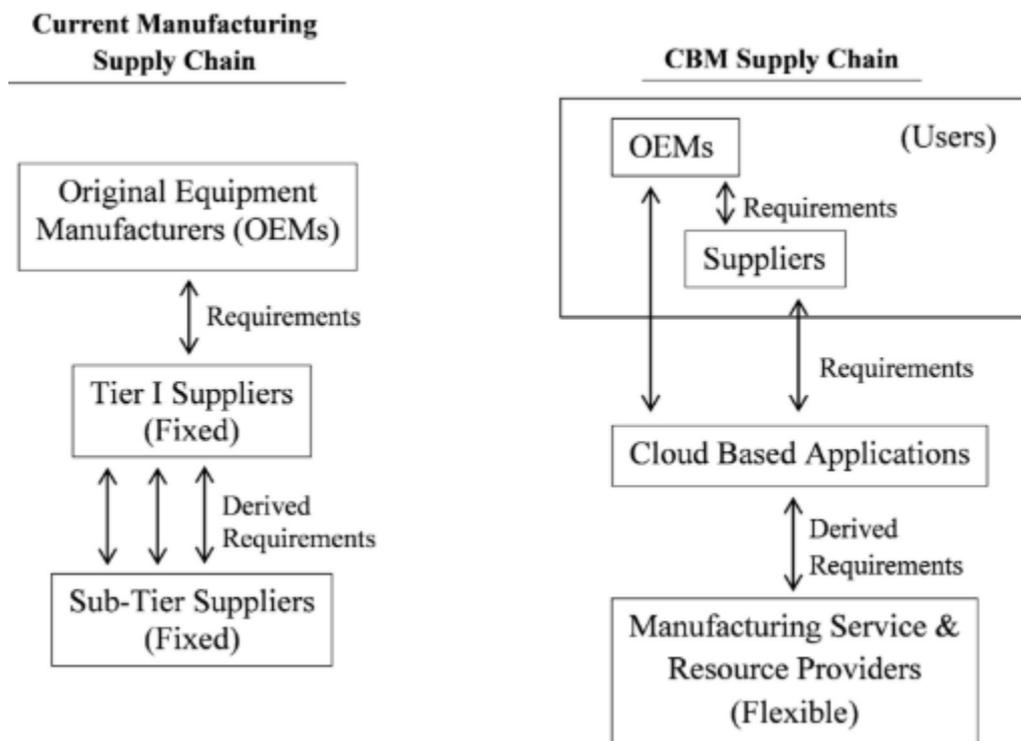


Ilustración 38. Comparación de las cadenas de suministro tradicionales y de CM [55]

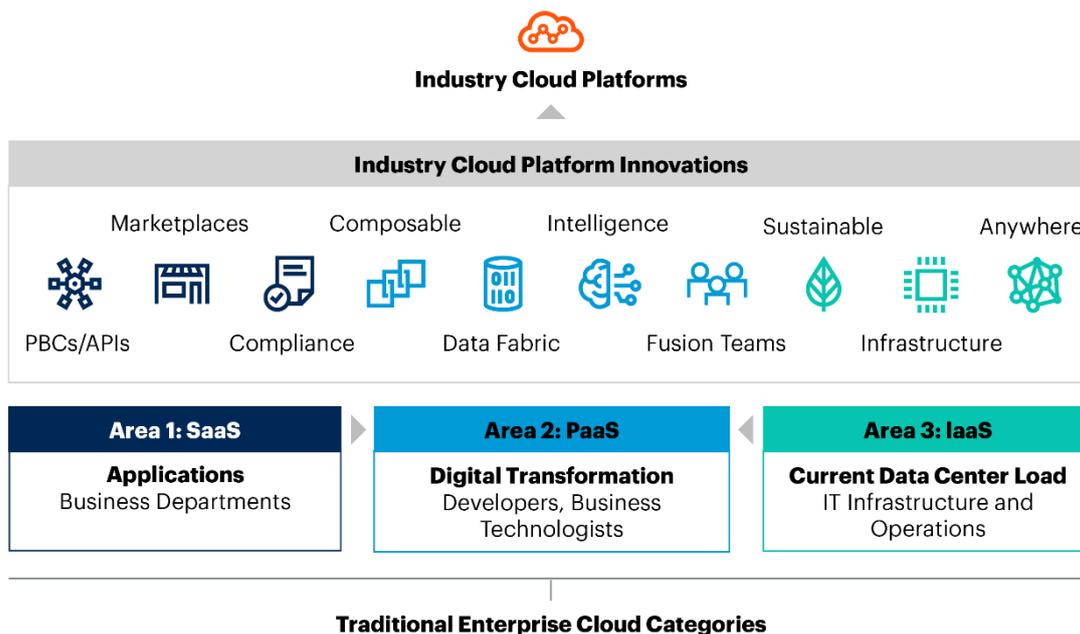
Resulta importante el aprovechamiento de la automatización y los sistemas de control industrial para coordinar y optimizar los procesos de fabricación. En la situación actual, la fabricación aditiva ha avanzado considerablemente en términos de velocidad y precisión. Sin embargo, la integración completa de la FA en las cadenas de suministro globales y su optimización sigue siendo un desafío. Aquí es donde el modelo de CM puede aportar un valor significativo. Al proporcionar un marco para la automatización de la colaboración entre múltiples fábricas y equipos de FA, CM puede ayudar a superar las limitaciones actuales de la fabricación aditiva, permitiendo una producción más ágil y

adaptable.

Este concepto de CM puede transformar los modelos de negocio tradicionales mediante la introducción de un enfoque de "carga compartida, beneficio compartido". La fabricación aditiva, con su capacidad para producir piezas complejas y personalizadas bajo demanda, se alinea perfectamente con esta filosofía. En un entorno de CM, las capacidades de fabricación aditiva pueden ser compartidas y optimizadas entre múltiples actores, reduciendo el tiempo de inactividad y mejorando la utilización de recursos. Este enfoque colaborativo puede hacer a modelos de negocio más sostenibles.

Para maximizar los beneficios, es crucial contar con un sistema que pueda gestionar eficientemente la distribución y el uso de los recursos. Es clave para ello la flexibilidad y la agilidad. Al permitir una rápida reconfiguración y reasignación de recursos, CM puede potenciar la capacidad de respuesta de la fabricación aditiva a las cambiantes demandas del mercado, mejorando así la competitividad y la innovación.

### Industry Cloud Platform Evolution



Source: Gartner  
772891\_C

**Gartner.**

*Ilustración 39. Evolución de las plataformas industriales en la nube [56]*

En [56] se destaca que las plataformas industriales en la nube crean valor para las empresas al incorporar servicios en la nube que tradicionalmente se adquieren por separado. En la ilustración superior podemos observar como las plataformas industriales en la nube convierten una plataforma en la nube en una plataforma empresarial y amplían

una herramienta de innovación tecnológica para que sirva también como herramienta de innovación empresarial.

Lo comentado anteriormente respecto a sistemas de control industrial para coordinar y optimizar los procesos de fabricación tiene que ver con lo que se discute en [57], donde se destaca la evolución hacia la digitalización y la red en la industria. En el contexto que tratamos, esto se traduce en la implementación de sistemas basados en la web para la FA-I3D, permitiendo una integración más fluida y eficiente de los procesos de producción. Estos sistemas aprovechan la conectividad para permitir la colaboración remota y el control en tiempo real, parámetros fundamentales hoy en día. La FA-I3D, al ser un proceso altamente automatizable, se beneficia enormemente de las capacidades de planificación y programación descritas en el informe. Se busca maximizar la eficiencia operativa mediante la automatización avanzada y la optimización de recursos.

Resulta vital el uso de tecnologías como los servicios web, para mejorar la operación combinada de los sistemas. Esto es clave para la integración de diversas tecnologías y sistemas de producción. La fabricación aditiva, al utilizar estas tecnologías, puede mejorar la colaboración y la integración con otros procesos de fabricación digital, facilitando un flujo de trabajo más cohesivo y eficiente.

Una de las características destacadas es la capacidad de control y monitorización en remoto de las máquinas de fabricación aditiva. Esto no solo mejora la accesibilidad y el uso compartido de recursos, sino que refuerza la flexibilidad y la capacidad de respuesta en la producción.

La seguridad y la gestión de datos son cruciales debido al aumento de la digitalización. La gestión de la seguridad en los sistemas basados en la web es vital para proteger la propiedad intelectual y garantizar la integridad de los procesos de FA-I3D. La implementación de medidas de seguridad robustas es esencial para la adopción en la fabricación aditiva, asegurando que los datos y los sistemas estén protegidos contra amenazas cibernéticas.

## **6.2. Evolución**

### **6.2.1. Análisis según Gartner**

Para tener conocimiento de cómo ha evolucionado la FA-I3D en los últimos años se va a hacer uso de un gran indicador, que es la Curva de Gartner. La Curva de Gartner es una gráfica desarrollada por la empresa Gartner. Esta curva se utiliza para representar la

madurez, adopción y aplicación de tecnologías específicas a lo largo del tiempo. Su objetivo principal es ayudar a las empresas y organizaciones a entender cómo evolucionan las expectativas y la realidad de las tecnologías emergentes, permitiéndoles tomar decisiones informadas sobre su adopción y utilización.

La curva se divide en cinco fases distintas. La primera fase, llamada **fase de entusiasmo**, es cuando una nueva tecnología emerge y comienza a generar interés y expectativas, aunque en esta etapa hay poca evidencia tangible de que realmente funcione. Luego, la tecnología avanza hacia la **fase de punto máximo**, donde la publicidad temprana produce una serie de historias de éxito, a menudo acompañadas de una cantidad igualmente elevada de fracasos, lo que genera una alta atención de los medios y expectativas exageradas.

A medida que la realidad de la tecnología no cumple con las expectativas infladas, se entra en la fase conocida como la **fase de desilusión**. En esta etapa, la tecnología pierde atractivo y la atención disminuye, llevando a algunos productores a abandonar sus proyectos. Sin embargo, las tecnologías que sobreviven a esta fase comienzan a mejorar y a mostrar aplicaciones prácticas, entrando en la **fase de nuevo crecimiento**, donde se entienden mejor sus beneficios y empiezan a emerger aplicaciones más concretas.

Por último, la tecnología alcanza la **fase de productividad o Plateau**, donde se estabiliza y empieza a ser ampliamente aceptada y utilizada. En esta fase, los beneficios de la tecnología se vuelven evidentes y su adopción se generaliza en el mercado.

Para cada tecnología, también se hace una estimación del tiempo que tardarán en llegar al Plateau, si será en menos de 2 años, entre 2 y 5 años, entre 5 y 10 años o si se quedará obsoleto antes de alcanzar el Plateau.

Hype Cycle for Emerging Technologies, 2022

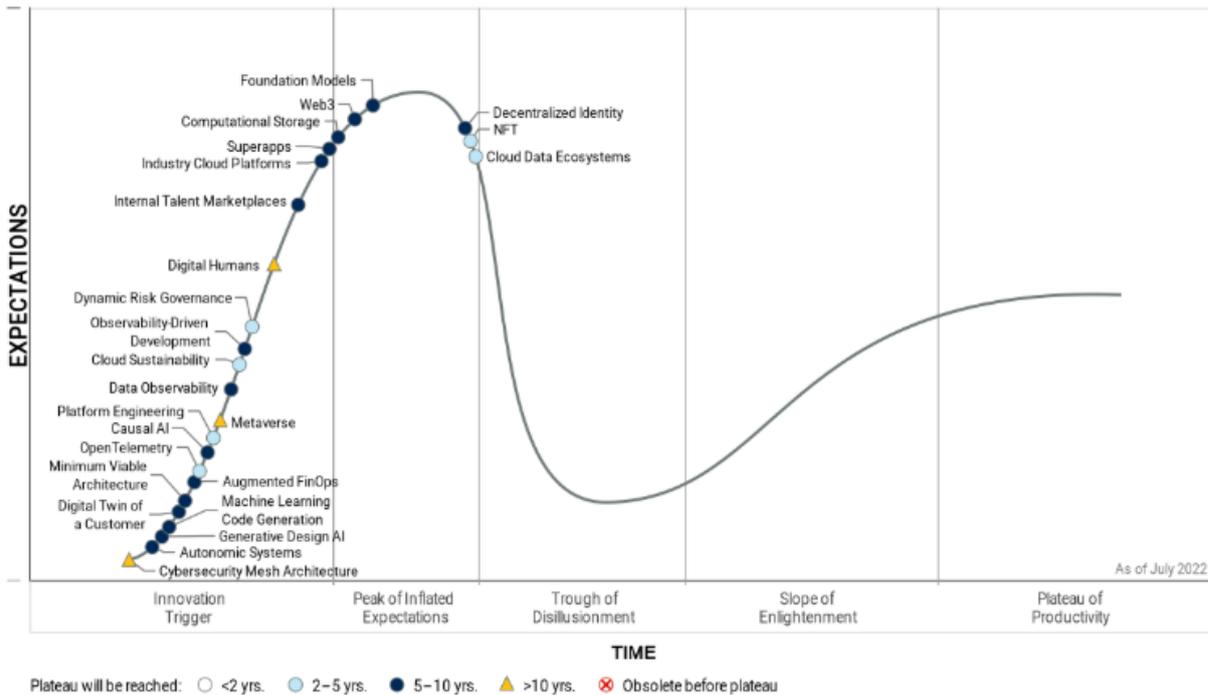


Ilustración 40. Hyper Cycle para Tecnologías Emergentes [58]

En la Ilustración superior podemos observar el “Hyper Cycle” de Gartner para tecnologías emergentes en el año 2022, en el cual hay que destacar los Ecosistemas de Datos en la nube, con relación a lo mencionado en apartados anteriores, puede ser una figura clave en el acceso de los usuarios a la tecnología. Estos ecosistemas se encuentran hacia la fase de desilusión, pero se espera que alcancen la fase de productividad en un periodo de los próximos 2 a 5 años. Esta tecnología proporciona información y conocimientos que optimizan y aceleran la entrega de productos, servicios y soluciones y aumentan la sostenibilidad de las operaciones empresariales.

Como podemos observar muchas tecnologías de IA, realidad extendida se encuentran en este gráfico. Entre ellas están el gemelo digital, generación de código, el metaverso... La mayoría de ellas se encuentran en la fase de lanzamiento lo que significa que aún tienen que superar diversos desafíos y alcanzar su potencial completo. El futuro éxito o desilusión dependerá de cómo evolucionen y se desarrollen estas tecnologías en los próximos años.

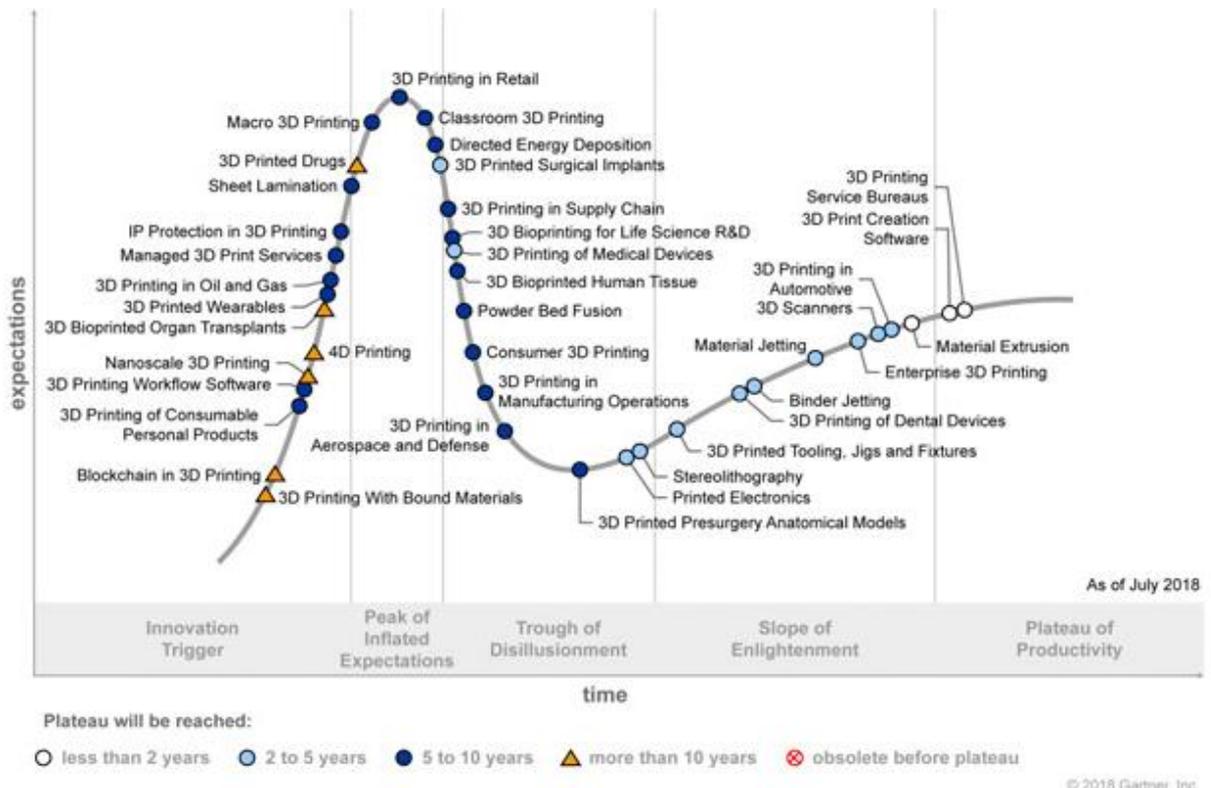


Ilustración 41. Curva Gartner Fabricación Aditiva 2019 [59]

Analizando en profundidad la tecnología que atañe a este proyecto, la FA-I3D, se tiene en cuenta la curva Gartner sobre las expectativas de la Impresión 3D, que fue publicada en el año 2019.

La impresión 4D llegaba al mercado y alcanzaría su pico en un plazo de 10 años. Se puede ver situada en la fase de entusiasmo debido a las capacidades dinámicas de los materiales, y en pleno proceso de investigación y desarrollo. Actualmente está siendo investigada y desarrollada por universidades y algunas empresas como Airbus, Autodesk, HP y Stratasys. Aunque la impresión 4D debía superar obstáculos informáticos, científicos y de ingeniería. El informe predice que en 2023 la I4D estaría generando la llegada de venture capital por valor de 300 millones de € [60].

Durante el desarrollo de la investigación se ha destacado el papel de la fabricación aditiva en sus aplicaciones médicas. Según la predicción de Gartner, en el año 2023 ya deberían existir un 25% de los dispositivos médicos en los mercados desarrollados que hagan uso de la impresión 3D. Esta predicción se refiere al cambio hacia el uso de la impresión 3D para la planificación previa a la cirugía y en la realización de reemplazos articulares, implantes quirúrgicos y prótesis. Por otro lado, para el año pasado 2023, hay una predicción de que la impresión 3D con biosintéticos y células vivas estaría impulsando un mercado multimillonario de prótesis y sustitución de órganos.

El informe indicaba que ya en el año 2020, los metales y las aleaciones impresas en 3D serían un componente esencial de las cadenas de suministro de piezas de recambio en los mercados comercial, militar e incluso de consumo.

### 6.2.2. Análisis de futuras tendencias

En los informes de Protolabs mencionados anteriormente también se hace hincapié en futuras tendencias que pueden darse en el contexto de la FA-I3D desde un ámbito global, estos datos son realmente valiosos para dar una idea de hacia dónde se mueve el sector.

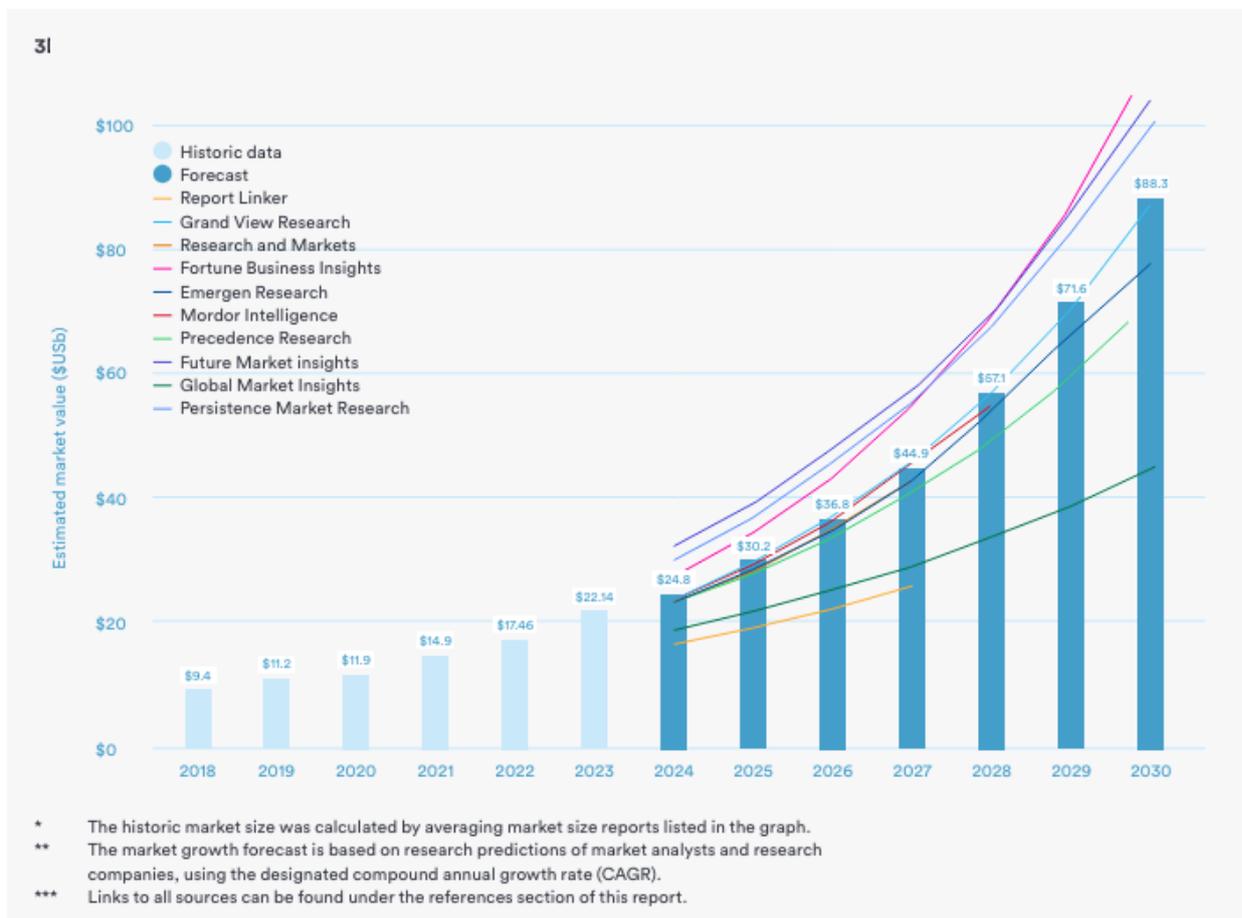
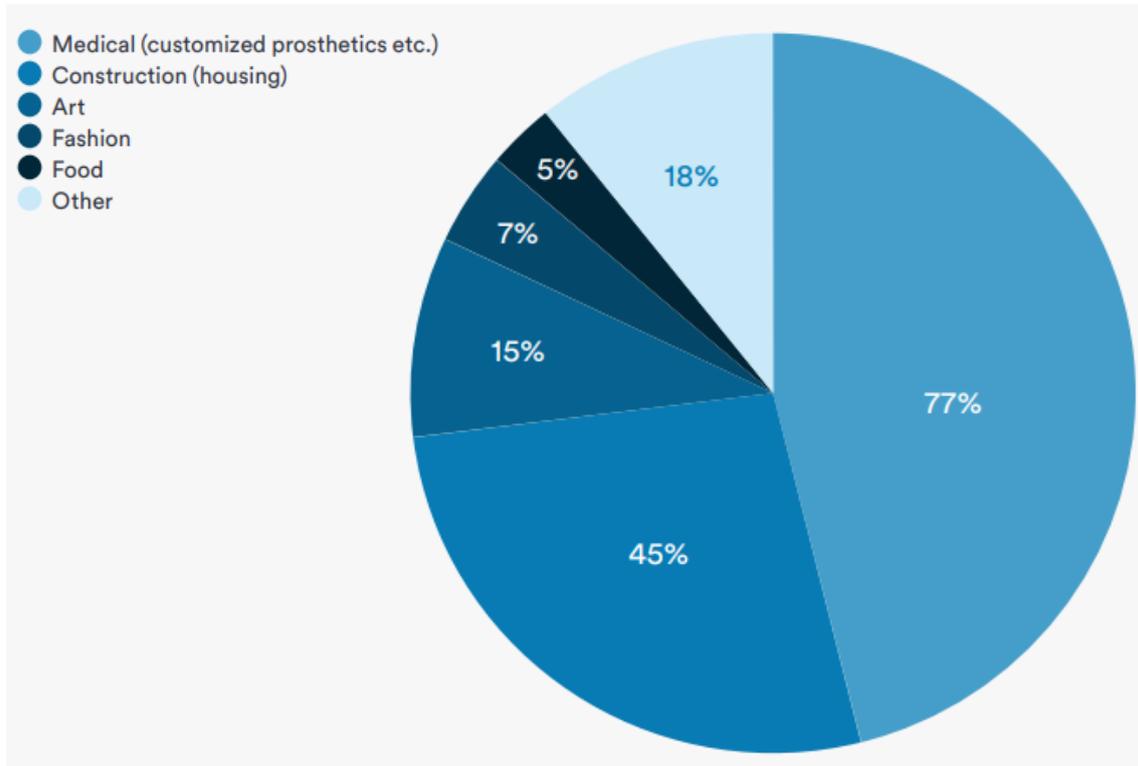


Ilustración 42. Crecimiento en el mercado de la impresión 3D y predicciones[52]

Como podemos observar, en los últimos años el tamaño de mercado de la Impresión 3D no ha parado de crecer y en todas las estimaciones de los distintos informes, todas coinciden en que la tendencia de crecimiento se mantendrá en los próximos años en mayor o menor medida. Las distintas previsiones apuntan a mayor inversión y desarrollo de esta tecnología para las múltiples aplicaciones que tiene.



*Ilustración 43. ¿En qué sectores ve más posibilidades de que la impresión 3D tenga un impacto significativo? [52]*

Para analizar dónde podremos encontrar el desarrollo del sector, el 77% de los encuestados advierte que la industria con mayor potencial es la médica, donde las prótesis personalizadas pueden dar un gran empuje al desarrollo de la tecnología y ayudar así a mejorar la vida de personas con distintas discapacidades. Seguido de la medicina, está la construcción, con un 45% de los encuestados alineándose con ella como la industria con mayor potencial. El uso de la FA-I3D en la construcción a gran escala supondría un hito histórico y reduciría tiempos y mano de obra necesaria para llevar a cabo los proyectos. Otras industrias a destacar son: el arte, la moda y el sector alimentario.

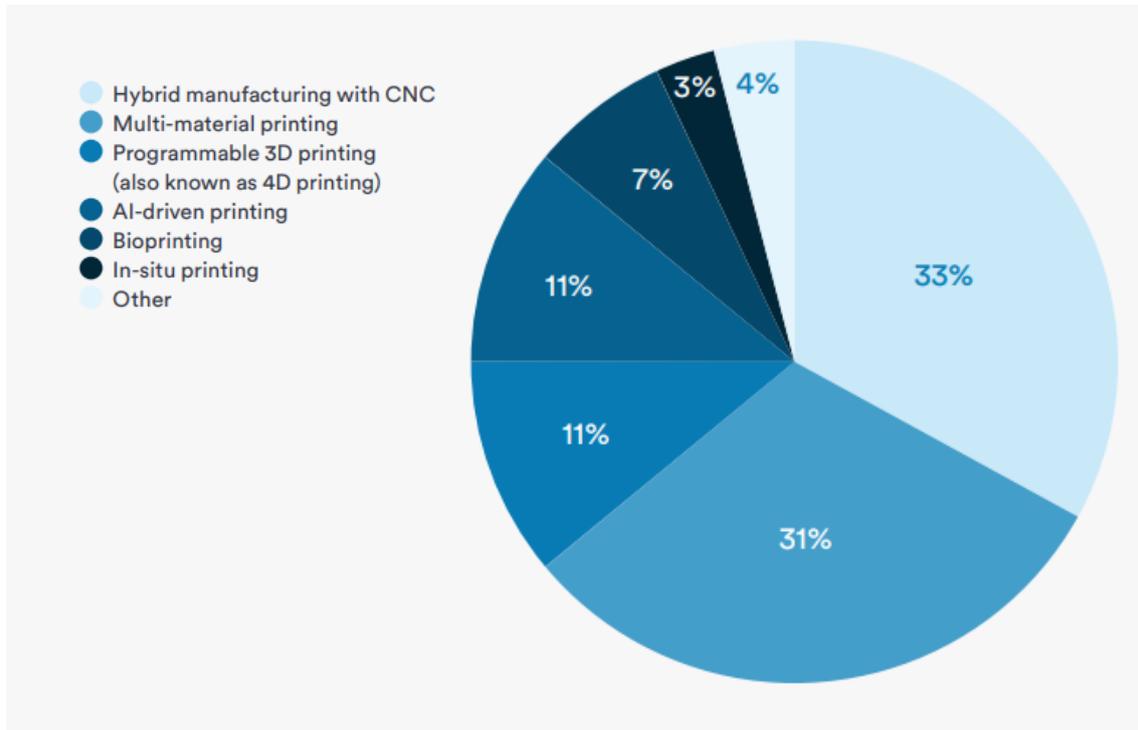
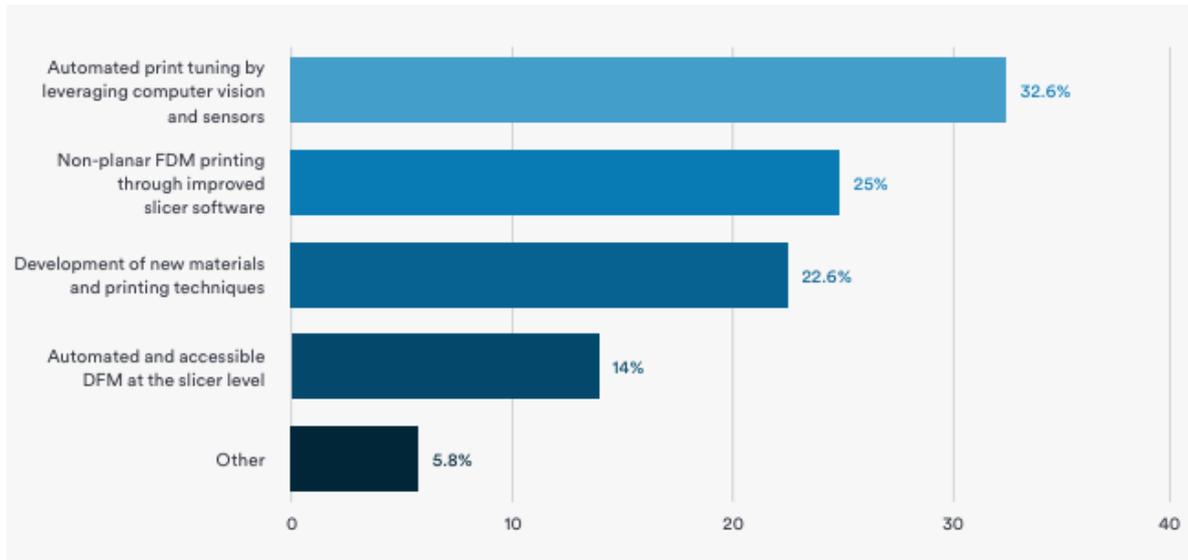


Ilustración 44. El futuro de la impresión 3D [52]

Con relación a tendencias futuras que nos podemos encontrar en la fabricación aditiva, los encuestados han destacado, con un 33% la fabricación híbrida con CNC. Esto combina las ventajas de la fabricación aditiva y el mecanizado CNC. Esto permite producir piezas con mayor precisión, complejidad y eficiencia, aprovechando lo mejor de ambas tecnologías. Con la impresión 3D se reduciría el desperdicio de material y con el mecanizado CNC, se lograría una mayor precisión en los acabados. Hay que destacar también la impresión multi material, con un 31%, que aportaría mucha flexibilidad y haría más sencilla la impresión de elementos más complejos. La impresión 3D programable, conocida como impresión 4D y la impresión dirigida por inteligencia artificial, con un 11%, se postulan como una gran evolución de la FA-I3D que está por llegar, en la que la intervención humana sea mínima.



*Ilustración 45. ¿Qué impacto tendrá la IA en la industria de la impresión 3D? [52]*

La inteligencia artificial está suponiendo una revolución total en muchos procesos en estos últimos años. Poniendo el foco en el impacto que puede tener la inteligencia artificial en la industria de la FA-I3D, los encuestados han destacado el ajuste automatizado de la impresión mediante visión por ordenador y sensores con un 32,6%, impresión FDM no plana mediante software de corte mejorado con un 25%, un 22,6% ha destacado el desarrollo de nuevos materiales y técnicas de impresión. Por último, un 14% de los encuestados se ha decantado por DFM automatizado y accesible a nivel de cortadora.

Estos resultados señalan que principalmente se valora la precisión y optimización en los procesos de impresión mediante la automatización. Existe un interés significativo en la innovación de técnicas y materiales de impresión.

### **6.3. Impacto**

Para medir el impacto que tiene la FA-I3D en la Industria 4.0, se han seleccionado 8 aspectos básicos en una empresa industrial, para analizar el cambio que supone la introducción de la fabricación aditiva:

<b>Relación con clientes</b>	<b>Operaciones</b>	<b>Gestión de costes</b>
<b>Relación con proveedores</b>		<b>Planificación y logística</b>
<b>Calidad</b>	<b>Nuevos productos y servicios</b>	<b>Medios productivos</b>

*Tabla 2. Aspectos básicos en una empresa industrial. Elaboración propia*

De estos 8 campos, la Fabricación aditiva – impresión 3D tiene un impacto directo en varios de ellos.

Las operaciones en una empresa cubren todas las actividades que son necesarias para producir y entregar bienes o servicios. Esto incluye la planificación de la producción, gestión de inventarios y control de calidad para asegurar que los productos cumplan con los estándares establecidos. También comprende la gestión de la cadena de suministro, que implica la compra de materias primas, logística y transporte de materiales y productos.

En el artículo 3-D printing: The new industrial revolution de B. Bearman [61] se comenta que la FA-I3D permite la creación de piezas y productos personalizados con rapidez, reduciendo los tiempos de producción y permitiendo una mayor flexibilidad en las líneas de producción. Para mostrar las diferencias que supone la introducción de esta nueva tecnología en la tabla siguiente se hace una comparación con respecto a la personalización en masa:

Característica	Personalización en masa	FA-I3D
Tecnología de fabricación	Basada en piezas modulares montadas previamente en diferentes combinaciones	Fabricación automatizada basada en software CAD y FA
Requisitos de integración de la cadena de suministro	Necesita de una gestión de la cadena de suministro altamente integrada para garantizar los productos adecuados en el momento oportuno a partir de múltiples suministros	Menor número de requisitos. Utiliza suministros fácilmente disponibles procedentes de múltiples proveedores
Ventajas económicas	En este sentido no se encuentran diferencias. Ambas tienen capacidad para fabricar productos a medida a precios relativamente bajos. Bajo riesgo de inventario. Mejor gestión del capital circulante	
Gama de productos	Ordenadores, relojes, zapatos	Prototipos, maquetas, piezas de recambio, prótesis

*Tabla 3. Comparación entre producción en masa y FA-I3D [61]*

Las impresoras 3D tienen varias ventajas clave en el desarrollo de prototipos y maquetas, como la facilidad para duplicar productos, el bajo coste y las consideraciones de seguridad y privacidad del producto. Por ejemplo, los prototipos y maquetas pueden producirse con el mismo color, textura y acabado que un producto fabricado en serie. Además, debido al bajo coste de modificación de los prototipos, los vendedores pueden probar más fácilmente diferentes versiones del producto basándose en los comentarios de los clientes y del diseño.

Si hablamos de medios productivos nos referimos a los recursos y equipos utilizados en el proceso de producción. La adopción de la fabricación aditiva permite la creación de componentes y productos personalizados con rapidez, eliminando la necesidad de herramientas y moldes específicos. Esto reduce los costes de configuración y permite una mayor flexibilidad en la producción [62] [63].

Como vemos en [63], la FA-I3D no sólo crea oportunidades de innovación y nuevos modelos empresariales, sino que está reconfigurando la distribución de la actividad de fabricación. Desde la Revolución Industrial, la fabricación se ha ido centralizando progresivamente. Sin embargo, la aparición de tecnologías avanzadas de fabricación digital está creando oportunidades para que la fabricación se descentralice.

Una visión del futuro basada en la impresión 3D puede ser aquella en la que: "Las fábricas del futuro serán más variadas, y estarán más distribuidas que las actuales [...] El panorama de la producción incluirá super fábricas intensivas en capital que producirán productos complejos; unidades reconfigurables integradas con los requisitos fluidos de sus socios de la cadena de suministro; y centros de producción locales, móviles y domésticos para algunos productos. Los emplazamientos urbanos se harán comunes a medida que las fábricas reduzcan su impacto medioambiental. La fábrica del futuro puede estar en la cabecera de la cama, en el hogar, en el campo, en la oficina y en el campo de batalla"[64].

Esta tecnología también permite una importante aceleración en el desarrollo de nuevos productos. Ayuda a que las empresas puedan iterar rápidamente en el diseño y probar múltiples versiones en un tiempo mucho más corto que con los métodos tradicionales. Este proceso ágil reduce el ciclo de desarrollo y permite que los nuevos productos lleguen al mercado más rápidamente, aumentando la capacidad de la empresa para responder a las demandas del mercado de manera correcta.

Además, fomenta la innovación en el diseño de productos. La libertad que ofrece esta tecnología permite la creación de productos con geometrías complejas y características innovadoras que no serían posibles con las técnicas de fabricación convencionales. Esta capacidad de explorar nuevas formas y funciones abre un abanico de oportunidades para diseñar productos que se diferencien en el mercado por su novedad y funcionalidad avanzada.

La capacidad de respuesta rápida a la demanda del mercado es fundamental en el entorno empresarial actual. La impresión 3D permite a las empresas adaptarse rápidamente a las tendencias del mercado y a las necesidades cambiantes de los clientes, introduciendo nuevos productos de manera más ágil y efectiva. Esta agilidad no solo mejora la competitividad de la empresa, sino que también aumenta la satisfacción del cliente al proporcionar productos que se ajustan mejor a sus expectativas y necesidades emergentes.

La FA-I3D facilita la expansión de la oferta de servicios de una empresa. Las empresas pueden ofrecer servicios adicionales como personalización y producción bajo demanda, lo que amplía su oferta y hace la diferencia frente a la competencia. Esta capacidad de personalizar productos a gran escala y producir componentes específicos a pedido responde a una creciente demanda por productos únicos y personalizados en el mercado actual.

Para analizar el impacto que tiene en la relación con los proveedores, las plataformas que se han creado alrededor de esta tecnología muestran un ejemplo claro de cómo ha

evolucionado el sector.



Ilustración 46. Imagen de la web de Xometry [<https://xometry.eu/es/>]

Hoy en día, existen webs especializadas que dan una respuesta adecuada a los clientes y simplifican el acceso a la tecnología. En la imagen superior podemos observar la web de Xometry, en la cual los clientes que quiera un servicio de impresión 3D puede subir los archivos a imprimir, elegir materiales y acabados, además, de obtener un presupuesto rápidamente. Todo ello hace que el acceso a la tecnología esté disponible para cualquiera. La sencillez de la propuesta mejora la satisfacción y lealtad del cliente. Para las empresas, la capacidad de producir prototipos de forma rápida permite adaptarse a los clientes ágilmente y ajustar el producto a las preferencias del cliente.

Respecto a los proveedores, la flexibilidad que aporta la FA-I3D reduce la dependencia de las empresas en sus proveedores y simplifica la cadena de suministro. La fabricación aditiva provoca una menor necesidad de piezas estandarizadas, esto también simplifica las negociaciones con proveedores.

## 6.4. Industria 5.0

### 6.4.1. Alineación FA con el enfoque de la Industria 5.0

Como se indicó en el estado del arte, la propuesta de la Comisión Europea de Industria 5.0 se enfoca en la transformación de la industria europea con un especial hincapié en tres conceptos: sostenibilidad, las personas y la resiliencia. Esto nace de la necesidad de surge con la crisis de la pandemia COVID-19 de ser más autónomos.

Dando el salto a la propuesta de Industria 5.0, hay algunos parámetros relativos a la sostenibilidad, personas y resiliencia que pueden ayudar a medir el impacto y el papel que puede jugar la FA-I3D en ella.

Sostenibilidad	Reducción de residuos
	Uso de materiales sostenibles
	Impacto ambiental
Personas	Participación y capacitación
	Diseño centrado en el usuario
Resiliencia	Flexibilidad y adaptabilidad
	Reducción de dependencias externas
	Capacidad de recuperación frente a errores

*Tabla 4. Relación de la FA-I3D con conceptos relevantes en la Industria 5.0. Elaboración propia*

En cuanto a **sostenibilidad**, la FA-I3D ayuda a la optimización de las piezas fabricadas, a usar materiales sostenibles y a tiene un impacto ambiental positivo:

- Reducción de residuos

La relación de la Fabricación aditiva con la reducción de residuos se puede dar de muchas maneras. Primero, con esta tecnología donde los materiales se agregan capa por capa, en lugar de ser eliminados como en la fabricación sustractiva tradicional. La propia definición de esta tecnología va en línea con este apartado.

Otras características propias de la FA-I3D que van en este sentido son, por ejemplo, su flexibilidad provoca la optimización de piezas usando menos material sin comprometer la estructura de la pieza. Esta flexibilidad permite crear piezas de repuesto específicas que pueden ser difíciles de encontrar o que normalmente requerirían la producción de una nueva pieza completa, lo cual puede ayudar a prolongar la vida útil de los productos. También se puede relacionar con la posibilidad de fabricación bajo demanda, ya que esto significa que los usuarios o las empresas pueden imprimir lo estrictamente necesario,

evitando los excesos de inventario. Esta independencia a la hora de producir y la posibilidad de hacerlo en el lugar donde se va a hacer uso de las piezas producidas reducen también las emisiones derivadas del transporte así como el uso de materiales para el embalaje.

- Uso de materiales sostenibles

La FA-I3D facilita el uso de materiales sostenibles como bioplásticos y reciclados. Cada vez está más extendido su uso y esto va totalmente en línea con la propuesta que expone la Comisión Europea. En el documento [65] habla sobre el uso de residuos industriales en la impresión 3D de hormigón sostenible y se examinan diferentes tipos de residuos que han sido utilizados para producir mezclas imprimibles en 3D. Esto se desarrollará en profundidad en apartados posteriores.

- Impacto ambiental

Como se habla en [50], dentro del proceso de la cadena de suministro, FA-I3D juega un papel importante en la mejora de la sostenibilidad. La fabricación aditiva permite tiradas únicas e integrar múltiples componentes en un solo producto, lo que elimina la necesidad de suministros adicionales y reduce la dependencia de proveedores de componentes, lo que hace que el proceso sea más sencillo y respetuoso con el medio ambiente.

Su capacidad para utilizar menores cantidades de materias primas en comparación con los métodos de fabricación tradicionales es una de sus principales ventajas. Esta característica mejora la sostenibilidad y la reducción de desechos al optimizar el uso de materiales y reducir el impacto ambiental de la producción.

La producción localizada con FA-I3D puede reducir significativamente los requisitos de transporte, lo que reduce las emisiones de carbono y reduce las huellas ambientales de las cadenas de suministro convencionales. Este aspecto de la fabricación aditiva ayuda a las empresas a alcanzar sus objetivos de sostenibilidad mientras mantienen una ventaja competitiva en sus industrias.

Poniendo el foco en las **personas**, la FA-I3D permite a las personas participar y ser creadores de sus propios productos. Además, la tecnología permite un alto grado de personalización que puede provocar un diseño centrado en el usuario:

- Participación y capacitación

FA-I3D permite que las personas y las pequeñas empresas diseñen y produzcan sus propios productos. Esto antes resultaba imposible para usuarios individuales. En la

actualidad, las impresoras 3D son relativamente asequibles, pero además, existen plataformas que ofrecen herramientas que permiten a cualquier persona diseñar y crear productos personalizados.

Una aplicación muy útil es la fabricación de repuestos, que permite a las personas y pequeñas empresas tener una independencia total de sus proveedores y agilizar la obtención de las piezas personalizadas. Esto fomenta la formación de las personas en las tecnologías, con la posibilidad que ofrece esta tecnología de iterar de forma relativamente sencilla para alcanzar el diseño final deseado, fomentando así también la creatividad y la innovación de los usuarios.

- Diseño centrado en el usuario

La FA-I3D permite un alto nivel de personalización, esto hace que se puedan adaptar productos a las necesidades específicas del usuario final. Por ejemplo, la organización americana de prótesis e-NABLE utiliza la FA-I3D para crear dispositivos personalizados para amputados, mejorando significativamente la calidad de vida de los usuarios.



*Ilustración 47. Prótesis de pie por 3D Natives*

Con la posibilidad que ofrece la tecnología en cuanto a fabricación de prototipos, permite a los usuarios finales probar los productos en situaciones reales y ajustar lo que sea necesario de forma fácil. Esto favorece a la inclusión de personas con discapacidad como amputaciones.

Si nos centramos en la **resiliencia**, esta tecnología permite a los clientes tener independencia respecto al exterior, tener una alta flexibilidad en los diseños y la facilidad de enmendar errores:

- Flexibilidad y adaptabilidad

La impresión 3D tiene una gran capacidad de adaptación a cambios en la demanda y necesidades del mercado y, además, hacerlo de forma rápida. Un aspecto ya mencionado como la fabricación localizada que permite esta tecnología es otro ejemplo claro de la flexibilidad que aporta a los usuarios a la hora de producir sus propias piezas.

Pero no termina ahí, la FA-I3D permite una libertad de diseño casi ilimitada. Los diseñadores pueden crear estructuras complejas y formas que serían difíciles o imposibles de fabricar con métodos de producción tradicionales. Esto incluye cavidades internas, geometrías de todo tipo y la posibilidad de usar múltiples materiales en una sola impresión, lo que permite explorar nuevas posibilidades en diseño de productos. Además, no requiere de herramientas o moldes específicos, lo que permite a los fabricantes cambiar rápidamente entre diseños sin tener en costes adicionales o tiempo de inactividad.

- Reducción de dependencias externas

Como permite la fabricación en lugares como cases particulares, la FA-I3D minimiza cualquier dependencia de los usuarios relativa a la cadena de suministra. Esto destaca particularmente en situaciones de crisis, donde las interrupciones en la cadena de suministro pueden provocar un desastre. Permite la fabricación de las piezas necesarias cuando y donde se necesiten.

Se reducen también los riesgos asociados al transporte al permitir la fabricación localizada. Fomenta la innovación al permitir el desarrollo de productos sin grandes inversiones, lo que acelera el ciclo de desarrollo de productos y permite a las empresas mantener la propiedad intelectual y el control del proceso de diseño y fabricación.

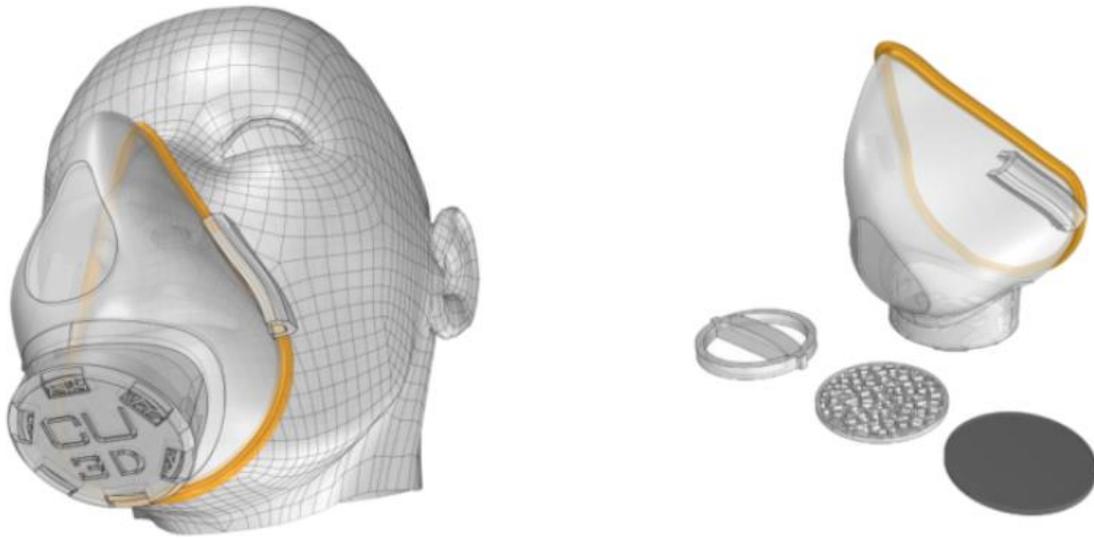
El uso de materiales reciclados para la producción también reduce la dependencia de recursos nuevos y externos, fomentando un ciclo de producción más cerrado y controlado internamente.

- Capacidad de recuperación frente a errores

Esta tecnología facilita la iteración rápida para la corrección de errores en el proceso de diseño y fabricación. Esto permite generar prototipos con los que testar el producto final y es una gran herramienta de mejora en los procesos.

Para todos estos factores, la crisis de la pandemia COVID-19 puede ser el mayor ejemplo de la resiliencia de la FA-I3D. En esos momentos, muchas personas y pequeñas empresas utilizaron impresoras 3D para fabricar equipos de protección personal (EPI), como

mascarillas y respiradores. Esto demuestra a las claras la capacidad de respuesta y adaptación que dota a los clientes la fabricación aditiva.



*Ilustración 48. Diseño de mascarilla por Cooper3D*

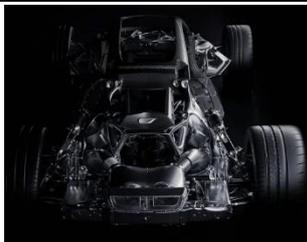
### 6.4.2. Análisis por sectores

La impresión 3D ha generado un impacto significativo en todos sus campos de aplicación. Por ello, se va a hacer uso de casos prácticos reales para dar visibilidad al cambio que genera su implementación y su alineación con la sostenibilidad, personas y resiliencia.

#### a. Automoción

La Fabricación aditiva está transformando el sector de la automoción de diversas maneras, contribuyendo a la producción más eficiente, la personalización y la innovación. Permite a usuarios la fabricación de sus propias piezas de recambio sin depender de terceros, pero además su uso está cada vez más extendido en las grandes empresas que operan en este mercado.

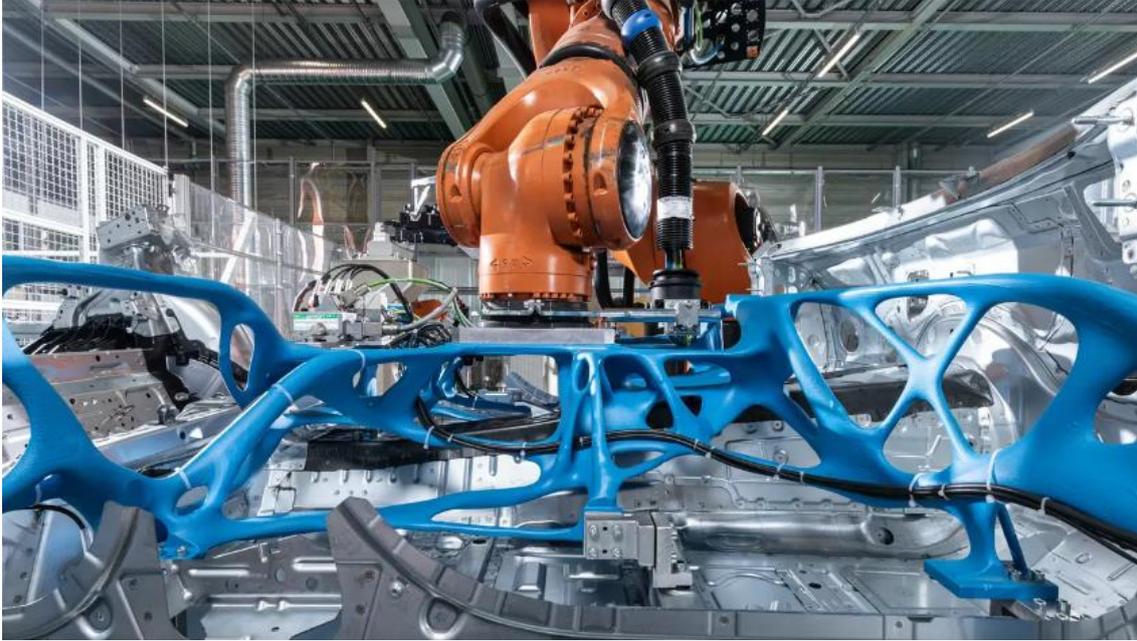
En la siguiente tabla se pueden observar diferentes aplicaciones derivadas de la Fabricación Aditiva en el sector, entre las que se encuentran la impresión de del chasis de un vehículo eléctrico, la optimización topológica realizada por Ferrari en Fórmula 1 para reducir el peso de su monoplaza, la restauración de coches antiguos, la producción de embellecedores para Bentley, la reducción de peso y mejora de rendimiento en los coches de nueva generación de McLaren o la fabricación de robots para optimizar las líneas de producción en BMW.

Automoción			
	Brazo biónico	Automóvil	Restauración
			
	Embellecedores	Fórmula 1	Mejora de rendimiento

*Tabla 5. Aplicaciones del sector, elaboración propia. Imágenes por 3DNatives y 3DPrinting.com*

Hoy en día empresas del sector de la automoción, como BMW hacen uso de la FA-I3D

para optimizar su línea de producción. BMW ha fabricado más de 400,000 componentes usando impresión 3D, lo que demuestra la capacidad de la tecnología para producir piezas rápidamente. En 2023, su campus de fabricación aditiva produjo más de 300,000 piezas [66], evidenciando la eficiencia y rapidez en la producción.



*Ilustración 49. Grippers biónicos impresos en 3D por BMW.*

La fabricación de grippers biónicos (dispositivos usados para la manipulación de objetos) que son 20% más ligeros que las versiones tradicionales permite una optimización significativa de los componentes. La reducción de peso es crucial para mejorar la eficiencia de los robots en la línea de producción, resultando en ciclos de producción más rápidos y menos desgaste. Además, se fabrican en solo 22 horas, lo que muestra una reducción considerable en el tiempo de fabricación. Esta rapidez, junto con la disminución en los costes de mantenimiento debido a componentes más ligeros y duraderos, subraya la eficiencia económica de la impresión 3D. BMW utiliza también materiales reciclados en su proceso, logrando una reducción de más del 60% en las emisiones de CO<sub>2</sub> en comparación con los métodos usados con anterioridad, subrayando el enfoque sostenible de esta tecnología.

La combinación de sinterizado selectivo por láser (SLS) y la impresión a gran escala (LSP) permite a BMW fabricar grippers personalizados y adaptados a necesidades específicas de producción. Esta flexibilidad es clave para responder a demandas variables y mantener la resiliencia en la cadena de producción. También hacen uso de herramientas de software avanzadas como Synera para optimizar el diseño de estructuras biónicas maximiza el potencial de la tecnología, permitiendo a BMW crear componentes más eficientes y livianos.

## b. Aeroespacial

En el sector aeroespacial, el uso de la tecnología de la fabricación aditiva está cada vez más extendido debido a su capacidad de producir piezas personalizadas en pequeñas cantidades, producir piezas con geometrías complejas y la mejora de la autosuficiencia que supone el poder imprimir piezas y herramientas en el espacio de trabajo.

Un caso real es en el Boeing 777X, especialmente en sus motores GE9X, que muestra cómo esta tecnología está revolucionando el sector aeroespacial. Los motores GE9X están hechos de más de 300 piezas impresas en 3D en las instalaciones de General Electric en Ohio e Italia. Estos componentes, que incluyen sensores de temperatura, mezcladores de combustible e intercambiadores de calor, muestran la capacidad de la FA-I3D para crear piezas con geometrías complejas que optimizan el rendimiento del motor. Las aspas del ventilador y la carcasa del avión están hechas de compuestos de fibra de carbono, lo que reduce significativamente su peso y lo convierte en un avión más eficiente en términos de combustible, produciendo un 10% [67] menos de emisiones que sus competidores.

GE y Boeing pueden iterar rápidamente en el diseño y desarrollo de componentes gracias a la fabricación aditiva, lo que acelera el proceso de innovación. Una gran ventaja de la impresión 3D es que reduce el desperdicio de material y contribuye a la sostenibilidad al permitir la producción de piezas personalizadas y optimizadas para las necesidades específicas de rendimiento y diseño. La producción de estos componentes ha mejorado su eficiencia y ha reducido los costes de mantenimiento gracias a la incorporación de tecnologías avanzadas como la fusión láser de lecho de polvo.

## c. Medicina

En el campo de la medicina puede ser uno de los cuáles la FA-I3D tenga mayor potencial. Es capaz de proporcionar soluciones personalizadas y mejorar la eficiencia de los tratamientos. Uno de los usos más destacados es la fabricación de implantes a medida, como prótesis dentales, articulares y cráneo faciales, que se ajustan perfectamente a la anatomía de cada paciente. Esto mejora la compatibilidad y los resultados clínicos. Otra área a destacar es el bioprinting, que utilizando células y biomateriales puede imprimir tejidos y órganos, con el potencial de abordar la escasez de órganos donados. Esto es algo que sigue en desarrollo, pero su implantación a gran escala supondría un cambio radical en este sector.

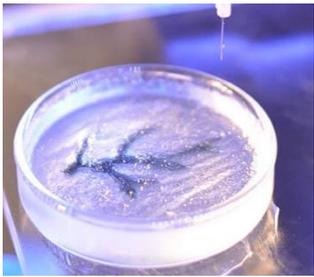
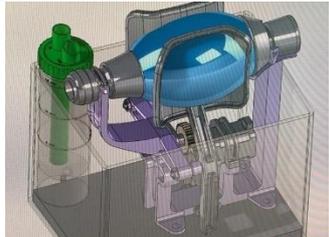
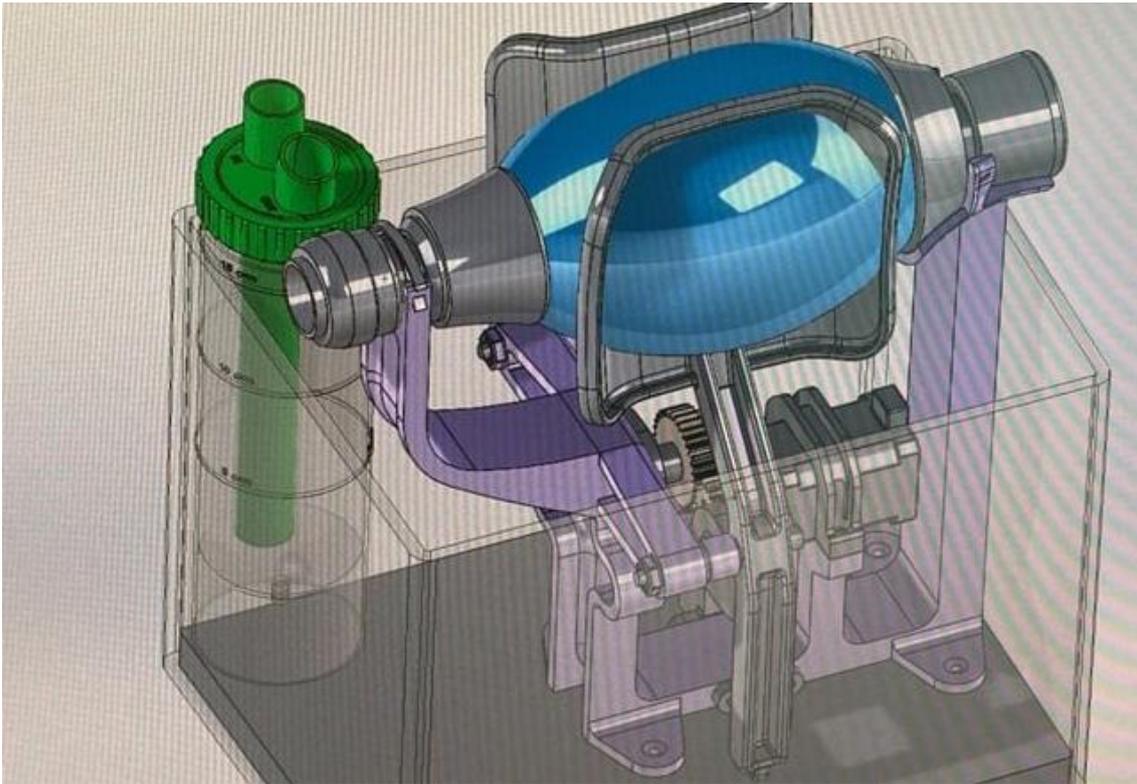
Medicina			
	Bioimpresión	Dental	Biotintas
			
	Estelirizador de aire	Medicina regenerativa	Respirador

Tabla 6. Aplicaciones del sector, elaboración propia. Imágenes por 3DNatives

La impresión de respiradores es un ejemplo real de la aplicación de esta tecnología durante la crisis sanitaria del COVID-19 en España. Un respirador impreso en 3D, diseñado por el centro de tecnología Leitat, llamado Leitat 1 fue desarrollado y aprobado médicamente por un equipo liderado por el Consorci de la Zona Franca, HP, Leitat, SEAT, el Consorci Sanitari de Terrassa y el Hospital Taulí en Sabadell [68]. Este dispositivo fue creado para brindar soporte respiratorio de emergencia a los pacientes en momentos difíciles. La fabricación aditiva facilitó el diseño y la producción de respiradores, lo que es crucial para satisfacer la gran demanda en los hospitales. Navantia y Airbus aumentaron la producción con sus capacidades de impresión 3D, lo que destacó la capacidad de esta tecnología para una respuesta rápida ante emergencias médicas.



*Ilustración 50. Modelo 3D diseñado por un ingeniero de Leitat [68]*

El desarrollo de Leitat 1 destaca la flexibilidad y personalización de la impresión 3D en el campo médico, ya que se puede adaptar fácilmente a las necesidades específicas de diseño y producción de dispositivos médicos críticos. Con la validación médica se garantizó que el respirador cumplía con los estándares regulatorios necesarios y era funcional y seguro. La capacidad de aumentar la producción hasta cientos de unidades diarias demuestra cómo la impresión 3D puede satisfacer demandas urgentes y apoyar la atención médica durante crisis como una pandemia global. Esta capacidad de adaptación y la independencia respecto a terceros como proveedores, es una muestra clara de la resiliencia proporcionada por la FA-I3D.

#### d. Militar

La aplicación que tiene la FA-I3D en el campo militar está relacionada con la fabricación de componentes para vehículos o la posibilidad de adaptar equipos a las necesidades específicas de la misión.

El proyecto Brokkr de la Armada Británica utiliza la fabricación aditiva, particularmente la impresión de metales, para fabricar componentes directamente en el campo de batalla, lo que representa un avance significativo en la logística militar. A través de esta iniciativa, los soldados pueden abordar las necesidades de mantenimiento y reparación de equipos

de manera rápida y eficiente, sin depender de largas cadenas de suministro convencionales. Al optimizar procesos y reducir costos operativos, este proyecto destaca la innovación y la eficiencia en la logística militar.

Este enfoque en la fabricación aditiva de la Armada Británica comenzó con el reconocimiento de su potencial durante despliegues en Sudán del Sur en 2019, demostrando la capacidad de la tecnología para satisfacer necesidades de infraestructura urgentes. Desde entonces, se ha hecho un gran avance en el desarrollo y la adopción de una variedad de tecnologías de impresión 3D, incluida la impresión en frío de metales. Esto no solo permite la creación rápida de prototipos y componentes, sino también la adaptación precisa a las demandas y misiones militares específicas.

e. Construcción

Un gran avance en el sector de la construcción es la posibilidad de fabricar viviendas de forma rápida y económica. Esta tecnología permite utilizar materiales como hormigón y compuestos especiales, esto permite abordar a la vez la accesibilidad a la vivienda y el uso de materiales sostenibles.

En la siguiente tabla se pueden observar aplicaciones derivadas de la tecnología que se estudia, que suponen hitos para el sector, como son la fabricación de un puente en China o la de una vivienda por completo haciendo uso de diferentes materiales.

Arquitectura		
	Puentes	Edificios

*Tabla 7. Aplicaciones del sector, elaboración propia. Imágenes por 3DNatives*

Un caso real ocurrido en el año 2019 es el puente de hormigón impreso en 3D en el distrito de Baoshan, Shanghai, que marca un hito significativo en la construcción moderna al demostrar las capacidades innovadoras de la impresión 3D a gran escala. Con dimensiones de 26.3 metros de longitud y 3.6 metros de ancho [69], este proyecto es uno de los más grandes de su tipo en la industria de la construcción. Diseñado por el profesor Xu Weiguo de la Escuela de Arquitectura de Tsinghua e inspirado en el puente Zhaozhou

de la dinastía Sui, este puente fue construido en un tiempo récord de 450 horas, utilizando dos brazos robóticos y supervisado por 10 trabajadores. Esta rapidez contrasta significativamente con los métodos tradicionales y refleja la eficiencia en comparación con los métodos de construcción convencionales.

La FA-I3D acelera el proceso de construcción y reduce la dependencia de la mano de obra cualificada, un recurso cada vez más difícil de encontrar en China. Para evaluar las propiedades mecánicas de los materiales y monitorizar posibles deformaciones estructurales, el puente lleva incorporados diferentes sensores. Este caso demuestra cómo la impresión 3D reduce el desperdicio y optimiza el uso de materiales, lo que promueve prácticas constructivas más amigables con el medio ambiente.



*Ilustración 51. Impresión 3D con hormigón [69]*

#### f. Electrónica

La FA-I3D tiene también su impacto en la industria electrónica ya que es capaz de proporcionar nuevas formas de diseño, fabricación y personalización de componentes y dispositivos.

Un caso real de este campo es el proyecto de la máquina etiquetadora creada por Fraens [70]. Esta máquina utiliza principalmente piezas plásticas impresas en 3D, aunque algunos elementos como los tornillos, varillas lisas, paneles acrílicos y secciones de

extrusión de aluminio fueron adquiridos externamente, prácticamente todos los componentes funcionales fueron fabricados de forma aditiva.

La flexibilidad y la personalización que ofrece la FA-I3D son esenciales para este proyecto. Fraens evitó los costosos y complejos procesos de fabricación tradicionales al diseñar y fabricar los elementos de manera económica y rápida. Esto no solo redujo los costes de producción, sino que también aceleró el tiempo de desarrollo de la máquina etiquetadora, lo que permite que cada componente funcione mejor. Este proyecto fomenta la innovación y el uso de materiales como el PLA naranja, un bioplástico biodegradable, que se obtiene a partir del almidón extraído del maíz, la remolacha y del trigo [71].

g. Medio ambiente

La FA-I3D también puede tener aplicaciones que ayuden a facilitar el acceso al agua, como los filtros para purificar el agua que se desarrollaron en Colombia para combatir la falta de agua en las zonas desérticas. Estos tapones ecológicos se fabrican con bioplástico derivado de almidón de maíz mediante impresión 3D y no solo reducen la dependencia de plásticos convencionales, sino que también promueven el uso de materiales biodegradables.



*Ilustración 52. Filtro para la purificación de agua por Ogilvy*

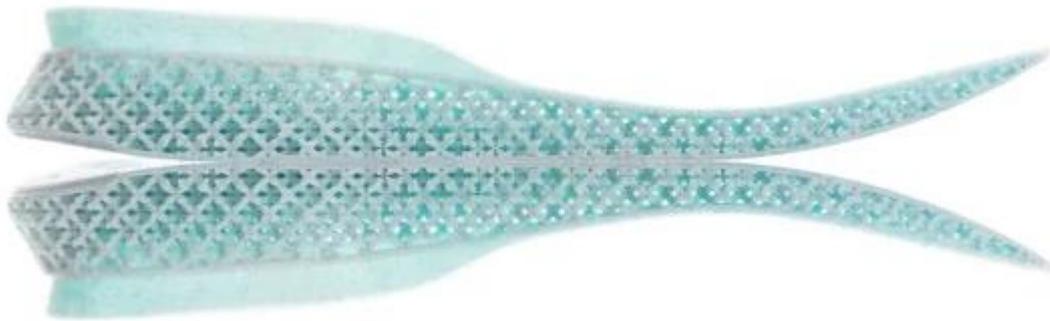
La iniciativa surge de la colaboración entre Ogilvy Colombia, la Fundación Baylor y la

Cruz Roja Colombiana, y demuestra las oportunidades que se generan para mejorar directamente la calidad de vida de las comunidades vulnerables. Estos filtros no sólo purifican agua mediante capas de metales, minerales y sustratos naturales, sino que también son pequeños y portátiles, lo que los hace adecuados para comunidades rurales que puedan ser difíciles de alcanzar. El objetivo es beneficiar a 10,000 personas con 1,000 filtros a lo largo del año [72], poniendo en valor la escalabilidad que tiene la tecnología, además de su efectividad, para resolver desafíos ambientales y sociales.

#### h. Moda

En el mundo de la moda, la fabricación aditiva no sólo tiene aplicaciones a la hora de la producción de joyas y prendas, sino que también da la posibilidad de experimentar con materiales innovadores.

Empresas como Adidas, que ha demostrado liderazgo en sostenibilidad al asociarse con Parley, una organización que aboga por la protección de los océanos mediante la reutilización de plásticos marinos para crear productos nuevos, en este caso, zapatillas impresas en 3D [73].



*Ilustración 53. Zapatillas impresas en 3D aprovechando residuos marinos por 3D Natives[73]*

Este proyecto se enfrenta a un desafío ambiental al hacer uso de desechos plásticos marinos, como redes de pesca abandonadas, transformándolos en materiales de calzado. El uso de la FA-I3D permite a Adidas promover y optimizar el reciclaje de los recursos presentes en el planeta. Con este proyecto, Adidas no solo avanza en términos de innovación tecnológica y sostenibilidad, sino que también posiciona la industria de la moda como un agente de cambio positivo hacia prácticas más responsables y centradas en la conservación del medio ambiente.

i. Arte

En el mundo del arte, ha habido recientemente un caso similar en el que la empresa checa 3DDen ha impreso en 3D una réplica de la Torre Eiffel, utilizando como material principal desechos plásticos reciclados del océano. La estructura, de 14 metros de altura y compuesta por 1,600 piezas impresas en 3D reforzadas con varillas de acero, no solo es un logro técnico sino también un símbolo de innovación en fabricación sostenible.

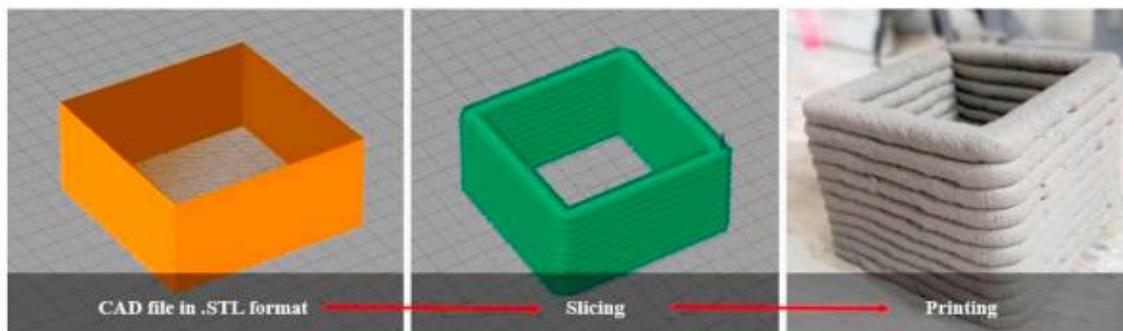
6.4.3. Materiales

6.4.3.4. Uso de residuos industriales

En los casos que se han comentado anteriormente, ha sido posible observar la importancia que juegan los materiales sostenibles en el desarrollo de la fabricación aditiva en los diferentes sectores y muestra a las claras su relación con la propuesta Industria 5.0.

Anteriormente, hemos visto la existencia de materiales usados para la impresión 3D provenientes del reciclaje de residuos marinos y otros fabricados de manera sostenible.

El documento [65] hace una revisión del uso de residuos industriales para la impresión 3D con hormigón sostenible. Con el crecimiento de la población y la demanda de infraestructura, ha aumentado también la generación de residuos industriales y las emisiones de CO<sub>2</sub>. La impresión 3D de hormigón (3DCP) se presenta como una solución innovadora para estos problemas al permitir el uso de desechos industriales en la fabricación de hormigón.



*Ilustración 54. Proceso de la 3DCP[65]*

La impresión 3D de hormigón requiere materiales específicos con propiedades adecuadas para la construcción. Los residuos industriales se utilizan como materiales cementantes suplementarios (SCM) en mezclas imprimibles en 3D, mejorando así las propiedades del hormigón fresco, su resistencia a corto plazo y su durabilidad. Además, el uso de estos residuos reduce la necesidad de vertederos y la contaminación del suelo y agua, y disminuye los costes de construcción al reducir el uso de cemento y otros materiales costosos. En el estudio se demuestra que las mezclas de hormigón imprimible en 3D que

contienen altos volúmenes de residuos industriales mejoran significativamente la sostenibilidad de esta técnica emergente de construcción al hacer posible una economía circular.

Los residuos discutidos en el en el documento son:

- Cenizas volantes (Fly ash - FA): Un subproducto de las plantas de energía a base de carbón, clasificado en categorías como Clase C y Clase F basadas en el contenido de CaO.
- Sílice de humo (Silica fume - SF): Un subproducto del proceso de fundición durante la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio, conocido por su capacidad para mejorar las propiedades tempranas del hormigón.
- Desechos de alto horno y otros desechos: Producidas en la fabricación de hierro y acero, estos desechos, cuando se enfrían repentinamente, forman partículas granuladas que pueden usarse como un material cementicio suplementario.
- Desecho de cobre (Copper slag): Otro subproducto de la industria de fundición y refinación de cobre que se utiliza por sus características de partícula angular.

Del documento se extrae que el uso de residuos como las cenizas volantes puede reducir la contracción por secado del hormigón, reduciendo el riesgo de fisuras. Esto es fundamental para mantener la integridad estructural y visual de los componentes impresos en 3D. El uso de residuos también puede influir en el tiempo de fraguado del hormigón. La sílice de humo, por ejemplo, puede acelerar la hidratación del cemento, lo que aumenta la resistencia inicial. Esto es particularmente útil en la FA-I3D, donde es importante la capacidad de soportar cargas tempranas.

Los materiales como la sílice de humo y los desechos hacen que el hormigón sea más resistente y duradero. Estos materiales funcionan como rellenos microscópicos que mejoran la microestructura del hormigón, lo que mejora sus propiedades mecánicas y su resistencia a condiciones agresivas.

Del estudio [74], en el que estudiaron la evolución del límite elástico de un geopolímero con el tiempo, se encontró que la sustitución del 10% en peso de FA por cierto residuo (F90G10), mejora significativamente el límite elástico durante el período de reposo de 0 a 30 min, lo que se ve reflejado en la siguiente gráfica.

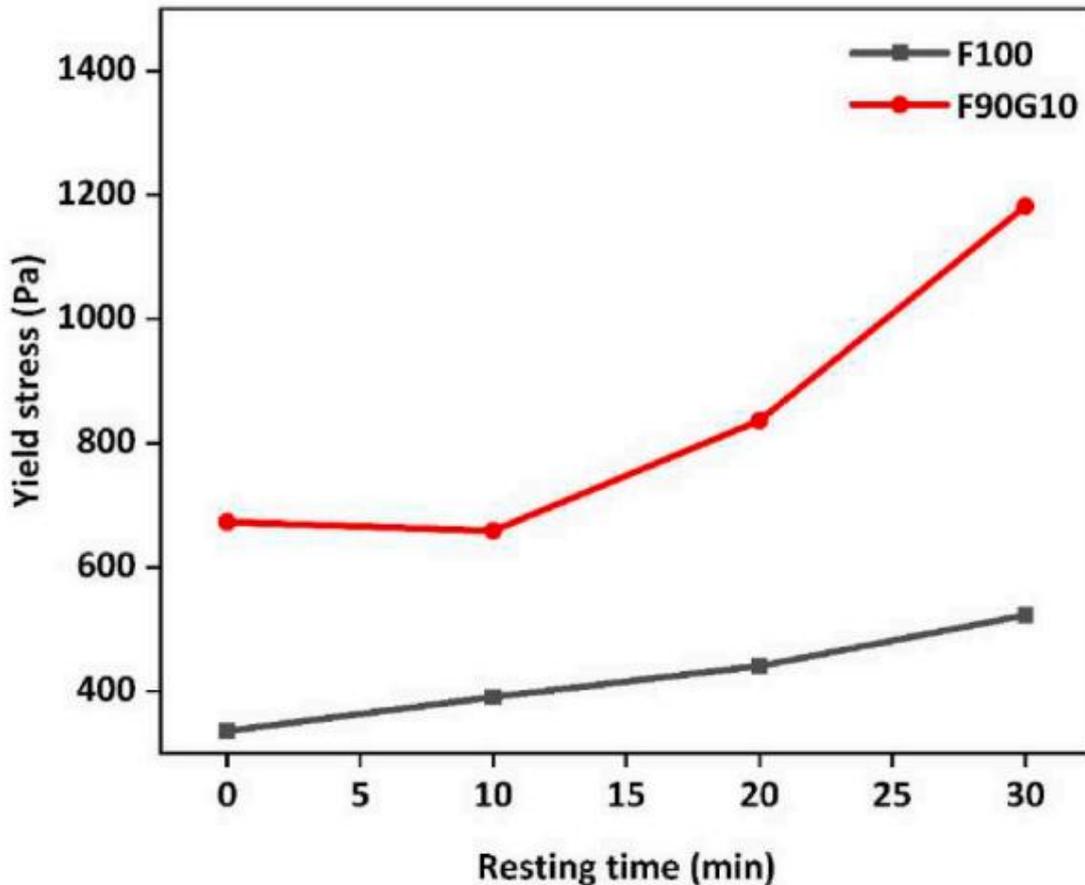


Ilustración 55. Variación del límite elástico del cemento geopolímero de control (F100) y del cemento con residuos (F90G10) con el tiempo [65], [74]

#### 6.4.3.5. Uso de materiales sostenibles y reciclados

Al facilitar el uso de materiales reciclados y biodegradables, la impresión 3D juega un papel importante en la promoción de la sostenibilidad. La FA-I3D ayuda a la economía circular al dar nueva vida a materiales que de otro modo serían desechados. Esto se logra utilizando filamentos hechos de plásticos reciclados, como PET y ABS. Los materiales biodegradables como el ácido poliláctico (PLA), que se produce a partir de recursos renovables como el almidón de maíz, reducen la dependencia de combustibles fósiles y ofrecen una alternativa más respetuosa con el medio ambiente.

Esta tecnología lidera la exploración de compuestos basados en biomateriales como la madera y las algas y fomenta la innovación en el desarrollo de nuevos materiales sostenibles.

La empresa Filament2print, que es una empresa estadounidense dedicada a la fabricación de filamentos para la impresión 3D, ofrece en su web a sus clientes materiales sostenibles muy diversos, en el catálogo también se encuentran filamentos hechos de PET y ABS.

Muchos de los filamentos ofertados tienen una base de PLA, que es muy usado debido a que no desprende gases nocivos y no necesita que el dispositivo de impresión tenga una cama caliente.

A estos filamentos se les considera como ecológicos debido a que a la matriz de PLA se le añade un relleno de fibras naturales. Estas fibras naturales se pueden escoger de una selección muy variada de subproductos derivados de la elaboración de cerveza, café o mejillón. El uso de este tipo de materiales muestra la alineación de la FA-I3D con la sostenibilidad, pata clave en la propuesta I5.0. En la imagen inferior se muestran piezas fabricadas con estos materiales.



*Ilustración 56. Filamento y pieza impresa con PLA Mejillón. Fuente: Francofil*

## 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

### 7.1. Conclusiones

Las conclusiones derivadas del estudio realizado son:

- La visión conjunta de los diferentes ámbitos de estudio, a nivel nacional y global, coinciden en una tendencia ascendente en cuanto al crecimiento de la FA-I3D en términos de producción de piezas e inversión. En el año 2023 tiene un valor de mercado de 22,54 mil millones de dólares, lo que denota la importancia de esta tecnología dentro de los paradigmas de la Industria 4.0.
- Cada región tiene sus particularidades, aun así, el uso más común de la Fabricación aditiva tiene que ver con el prototipado. Esta tecnología permite a los fabricantes iterar en busca de una solución óptima para su producto.
- Teniendo en cuenta 8 áreas clave de una empresa industrial, la FA-I3D tiene un impacto directo en 2 de ellas. Además, a través de las plataformas existentes alrededor de esta tecnología se puede ver reflejada en otras 3 áreas.
- Las plataformas y la transmisión de datos en la nube y su desarrollo resultan clave para la FA-I3D. Suponen un cambio sustancial en la relación que tienen las empresas con sus proveedores y con sus clientes. Facilitan el acceso de los usuarios a la tecnología, simplifican el manejo de archivos y datos y permiten la monitorización del producto final.
- Se ha podido ver que la Impresión 3D se alinea a la perfección con la propuesta Industria 5.0 de la Comisión Europea. La Fabricación Aditiva al ser aditiva, como su propio nombre indica, y no sustractiva reduce el desperdicio de material y con la posibilidad que ofrece en el uso de materiales de origen orgánico y reciclado casa a la perfección con la sostenibilidad buscada en esta propuesta. Teniendo en cuenta los demás conceptos ensalzados en la propuesta, las personas y la resiliencia, se ha podido observar, con sus distintos campos de aplicación, que la FA-I3D permite la personalización del producto y que el diseño se haga en función del cliente final, permite a los usuarios fabricar sus propias piezas sin depender de factores externos y tiene una gran flexibilidad. Esto último se refleja a la perfección en el uso de la tecnología para la fabricación de prototipos, lo que permite a los fabricantes recuperarse frente a posibles errores y les facilita alcanzar el producto deseado a la vez que optimizado.

## 7.2. Trabajos futuros

Durante la realización de este trabajo, han surgido otras vías de estudio para la realización de trabajos futuros:

- Análisis en profundidad del impacto que puede tener la Inteligencia Artificial en el futuro de la Fabricación Aditiva.
- Desarrollo de un modelo de negocio para una empresa industrial que aproveche las capacidades de la FA-I3D, como la producción bajo demanda, la personalización, la reducción de los costes logísticos y la independencia frente a la cadena de suministros y su comparación con los modelos de negocio tradicionales.
- Realizar un estudio detallado acerca del impacto ambiental de los productos fabricados mediante la tecnología descrita y evaluar por completo el ciclo de vida de estos productos.
- Ahondar en el papel que puede tener la Fabricación aditiva en sistemas más grandes de producción. Teniendo en cuenta cómo puede ser su integración con tecnologías de automatización y robótica.
- Traslado de este estudio a otros paradigmas que, en el marco nacional, tienen una mayor presencia a día de hoy, como Big Data & Analytics.

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] M. RODRIGUEZ SALVADOR y J. MANCILLA DE LA CRUZ, «PRESENCIA DE LA INDUSTRIA 4.0 EN LA FABRICACIÓN ADITIVA: ANÁLISIS DE TENDENCIAS TECNOLÓGICAS», *DYNA*, 2018.
- [2] K. Zhou, T. Liu, y L. Zhou, «Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges», 2th International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD), 2015.
- [3] C. B. Ynzunza Cortés, J. M. Izar Landeta, J. Guadalupe Bocarando Chacón, F. Aguilar Pereyra, y M. Larios Osorio, «El Entorno de la Industria 4.0: Implicaciones y Perspectivas Futuras», *Concienc. Tecnológica*, n.º 54, 2017.
- [4] F. Rozo-García, «Revisión de las tecnologías presentes en la industria 4.0», *Revista UIS Ingenierías*, 2020.
- [5] M. Sachon, «Los pilares de la industria 4.0.», *Revista de Antiguos Alumnos del IESE*, vol. 148, 2018.
- [6] NTT DATA, «Smart Industry 4.0. Los retos en el camino hacia la Transformación digital», VI, 2023.
- [7] S. Madakam, R. Ramaswamy, y S. Tripathi, «Internet of Things (IoT): A Literature Review», *Journal of Computer and Communications*, 2015.
- [8] P. Gokhale, O. Bhat, y S. Bhat, «Introduction to IOT.», 2018.
- [9] M. U. Farooq, M. Waseem, S. Mazhar, A. Khairi, y T. Kamal, «A Review on Internet of Things (IoT)», *International Journal of Computer Applications*, 2015.
- [10] Comisión Europea, «Artificial Intelligence for Europe», 2018.
- [11] S. J. Russell y P. Norvig, «Artificial Intelligence: A Modern Approach», 2010.
- [12] J. McCarthy, «What is Artificial Intelligence?», Stanford, 2007.
- [13] A. M. Turing, «Computing Machinery and Intelligence», 1950.
- [14] IBM, «¿Qué es la inteligencia artificial (IA)?»
- [15] C. Janiesch, P. Zschech, y K. Heinrich, «Machine learning and deep learning.», 2021.
- [16] Z. H. Zhou, «Machine Learning.», 2021.
- [17] J. M. Zheng, K. W. Chan, y I. Gibson, «Virtual Reality», 1998.
- [18] J. Carmigniani, B. Furht, M. Anisetti, P. Ceravolo, E. Damiani, y M. Ivkovic, «Augmented reality technologies, systems and applications», 2010.
- [19] M. Jiménez, L. Romero, I. A. Domínguez, M. del M. Espinosa, y M. Domínguez, «Additive Manufacturing Technologies: An Overview about 3D Printing Methods and Future Prospects», 2019.
- [20] M. Zahera, «LA FABRICACIÓN ADITIVA, TECNOLOGÍA AVANZADA PARA EL DISEÑO Y DESARROLLO DE PRODUCTOS». XVI Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, 2012.
- [21] K. Wong y A. Hernández, «Review of Additive Manufacturing». Department of Mechanical and Aerospace Engineering, University of Miami, 2012.
- [22] R. I. Noorani, «Rapid Prototyping: Principles and Applications», 2005.
- [23] V. Harshitha y S. S. Rao, «Design and analysis of ISO standard bolt and nut in FDM 3D printer using», 2019.
- [24] U. M. Dilberoglu, B. Gharehpapagh, U. Yaman, y M. Dolen, «The role of additive manufacturing in the era of Industry 4.0». 2017.
- [25] J. J. Camargo Vega, J. F. Camargo Ortega, y L. Joyanes Aguilar, «Conociendo Big Data», 2014.

- [26] McKinsey, «Big data: The next frontier for innovation, competition, and productivity», 2011.
- [27] B. Siciliano y O. Khatib, «Springer Handbook of Robotics», Springer Science & Business Media, 2016.
- [28] J. J. Craig, «Introduction to Robotics». Pearson Educación, 2006.
- [29] D. Tapscott y A. Tapscott, *La revolución blockchain*. Deusto, 2017.
- [30] Directorate-General for Research and Innovation, European Commission, «Industry 5.0: Towards a sustainable, humancentric and resilient European industry», 2021.
- [31] ASTM, «Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies», 2010.
- [32] T. Wohlers, T. Gornet, N. Mostow, I. Campbell, y O. Diegel, «History of additive manufacturing», 2016.
- [33] C. L. Thomas, T. M. Gaffney, S. Kaza, y C. H. Lee, «Rapid prototyping of large scale aerospace structures», IEEE Aerospace Applications Conference, 1996.
- [34] N. Guo y M. C. Leu, «Additive manufacturing: technology, applications and research needs», Higher Education Press, 2013.
- [35] ISO/ASTM 52910, «Additive Manufacturing - Design, requirements, guidelines and recommendatios». ISO/ASTM International 2018, julio de 2018.
- [36] M. Spoerk, C. Holzer, y J. Gonzalez-Gutierrez, «Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage», Journal of Applied Polymer Science, 2019.
- [37] W. Gao *et al.*, «The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering», Elsevier, 2015.
- [38] F. P. W. Melchels, M. A. N. Domingos, T. J. Klein, J. Malda, P. J. Bartolo, y D. W. Hutmacher, «Additive manufacturing of tissues and organs», Elsevier, 2011.
- [39] D. Bourell *et al.*, «Materials for additive manufacturing», Elsevier, 2017.
- [40] R. Kumar, M. Kumar, y J. S. Chohan, «The role of additive manufacturing for biomedical applications: A critical review», 2021.
- [41] F. Zhang *et al.*, «The recent development of vat photopolymerization: A review», Elsevier, 2021.
- [42] S. Vock, B. Klöden, A. Kirchner, y T. Weißgärber, «Powders for powder bed fusion: a review», Springer, 2019.
- [43] O. Gülcan, K. Günaydın, y A. Tamer, «The State of the Art of Material Jetting—A Critical Review», Polymers, 2021.
- [44] L. C., «Guía completa: Binder Jetting o inyección de aglutinante», *Gartner Research*, junio de 2023.
- [45] M. Ziaee y N. B. Crane, «Binder jetting: A review of process, materials, and methods», Elsevier, 2019.
- [46] K. S. Prakash, T. Nancharaih, y V. V. S. Rao, «Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview», Elsevier, 2017.
- [47] ASTM, «Standard Specification for Additive Manufacturing Titanium-6 Aluminum-4 Vanadium with Powder Bed Fusion», 2014.
- [48] I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker, y M. Khorasani, «Additive Manufacturing Technologies», Springer, 2021.
- [49] J. Deckers, K. Shahzad, J. Vleugels, y J. P. Kruth, «Isostatic pressing assisted indirect selective laser sintering of alumina components Deckers, J.; Shahzad, K.; Vleugels, J.; Kruth, J.P.», 2012.
- [50] P. Chountalas, N. Saltagianni, A. Lagodimos, y D. Georgakellos, «3D Printing Technologies for Enhancing Sustainability in Supply Chains», ene. 2024.

- [51] Interempresas, «Informe del sector de la impresión 3D / fabricación aditiva 2024», Interempresamedia, 2, 2024.
- [52] Protolabs, «3D Printing Trend Report 2024. Market changes and technological shifts in the 3D printing market», Protolabs, may 2024.
- [53] HUBS (A Protolab Company), «3D Printing Trend Report 2022. Market changes and technological shifts in the 3D printing market», feb. 2022.
- [54] D. R. Eyers y A. T. Potter, «E-commerce channels for additive manufacturing: an exploratory study», *J. Manuf. Technol. Manag.*, vol. 26.
- [55] D. Wu, M. J. Greer, D. W. Rosen, y D. Schaefer, «Cloud manufacturing: Strategic vision and state-of-the-art», *J. Manuf. Syst.*, 2012.
- [56] G. Petri, T. Haynes, Y. Natis, y W. Katsurashima, «Top Strategic Technology Trends for 2023: Industry Cloud Platforms», Gartner Research, oct. 2022.
- [57] H. Lan, «Web-based rapid prototyping and manufacturing systems: A review», Elsevier, 2008.
- [58] M. Davis y G. Olliffe, «Hype Cycle for Emerging Technologies, 2022», *Gart. Res.*, jul. 2022.
- [59] B. Boparai y A. Ivar, «Hype Cycle for 3D Printing Technology in Manufacturing», 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.gartner.com/en/documents/4017144>
- [60] C. V., «Gartner Hype Cycle 2019: 3D Printing Predictions», *3D Natives*, enero de 2019.
- [61] B. Bearman, «3-D printing: The new industrial revolution», *Bus. Horiz.*, n.º 55(2), 155-162, 2012.
- [62] I. Gibson, D. W. Rosen, y B. Stucker, «Additive manufacturing technologies», *Springer*, vol. 17, 2015.
- [63] S. Ford y M. Despeisse, «Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges», *J. Clean. Prod.*, n.º 137, 1573-1587, 2016.
- [64] Foresight, U. K., «Future of Manufacturing: a New Era of Opportunity and Challenge for the UK – Summary Report», The Government Office for Science, London, 20, 2013.
- [65] D. Dey, D. Srinivas, B. Panda, P. Suranei, y T. G. Sitharam, «Use of industrial waste materials for 3D printing of sustainable concrete: A review», Elsevier, feb. 2022.
- [66] k-zeitung, «BMW Unveils 3D Printed Bionic Grippers», mayo de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://3dprinting.com/news/bmw-unveils-3d-printed-bionic-grippers/>
- [67] A. M., «El Boeing 777X, con más de 300 piezas impresas en 3D, efectúa su primer vuelo», *3D Natives*, febrero de 2020.
- [68] A. M., «Covid-19: desarrollan en España el primer respirador impreso en 3D para hospitales», marzo de 2020.
- [69] L. C., «China fabrica el puente de hormigón impreso en 3D más largo del mundo», *3D Natives*, enero de 2019. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/puente-de-hormigon-impreso-en-3d-280120192/>
- [70] T. Nardi, «3D PRINTING A BOTTLE LABELING ASSEMBLY LINE», *Hackaday*, junio de 2024.
- [71] Bimek 3D, «Filamento para impresión 3d en PLA Naranja».
- [72] 3Dprinting.com, «3D Printed Filter Caps Offer Clean Water for Colombia's Arid Zones», *3DPrinting.com*, mayo de 2024.
- [73] L. C., «Adidas crea zapatillas impresas en 3D a partir de desechos marinos», *3D*

*Natives*, diciembre de 2015.

- [74] B. Panda, C. Unluer, y M. J. Tan, «Investigation of the rheology and strength of geopolymer mixtures for extrusion-based 3D printing Biranchi Panda a, Cise Unluer b, Ming Jen Tan a», *Cem. Concr. Compos.*, vol. 94, pp. 307-314, nov. 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.10.002>.