



universidad  
de León



# Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y Aeroespacial

## GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL

Trabajo de Fin de Grado

IMPRESIÓN 4D DE MATERIALES INTELIGENTES  
APLICADO AL SECTOR AEROESPACIAL

4D PRINTING OF SMART MATERIALS APPLIED TO THE  
AEROSPACE INDUSTRY

Autor: Juan José Sánchez Llamas  
Tutor: Joaquín Barreiro García

(Julio, 2023)

Página dejada intencionadamente en  
blanco

**UNIVERSIDAD DE LEÓN**  
**Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y**  
**Aeroespacial**

**GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL**  
**Trabajo de Fin de Grado**

**ALUMNO:** Juan José Sánchez Llamas

**TUTOR:** Joaquín Barreiro García

**TÍTULO:** Impresión 4D de materiales inteligentes, aplicado al sector aeroespacial

**CONVOCATORIA:** Julio, 2023

**RESUMEN:**

Los materiales inteligentes son aquellos que tienen la capacidad de responder y adaptarse a diferentes estímulos externos. Los principales tipos son: piezoeléctricos, que son capaces de generar una carga eléctrica como respuesta a una tensión o deformarse cuando son sometidos a una corriente; materiales con memoria de forma, que pueden recuperar su forma original cuando reciben un estímulo; magnetorreológicos, que pueden variar sus propiedades físicas (viscosidad, rigidez) en respuesta a un campo magnético externo; cromóactivos, que pueden cambiar de color en función de diversos estímulos (temperatura, luz...) y fotoactivos, que pueden emitir luz cuando incide sobre ellos radiación electromagnética.

Además de estos, existen otros tipos de materiales inteligentes como los piroeléctricos, que generan una carga eléctrica frente a cambios de temperatura; los ferroeléctricos, que tienen la capacidad de modificar y retener una carga eléctrica frente a un estímulo eléctrico y los electrorreológicos, similares a los magnetorreológicos, pero en presencia de un campo eléctrico.

Existen otro tipo de materiales, los metamateriales, que también se pueden considerar inteligentes ya que tienen propiedades electromagnéticas excepcionales que no se encuentran en materiales convencionales. Estos poseen la capacidad de desviar la luz alrededor de ellos y manipular las ondas electromagnéticas.

Los materiales inteligentes, mediante la impresión 4D, permiten la creación de objetos con la capacidad de cambiar su forma o función como respuesta a determinados estímulos. Esto es posible gracias a la fabricación aditiva y la implementación de estos materiales en el proceso.

Los materiales inteligentes tienen numerosas aplicaciones en diversos sectores como la medicina, la electrónica, la robótica o la industria automovilística. En el presente trabajo, se atenderá sobre todo a las aplicaciones en el sector aeroespacial, donde estos materiales ofrecen ventajas significativas como la mejora de la eficiencia energética y la reducción del peso. Además, se han realizado y se están llevando a cabo varios proyectos aeroespaciales que exploran el uso de materiales inteligentes, con el fin de lograr que la aviación sea más eficiente y segura.

**PALABRAS CLAVE:** material inteligente, responder, adaptarse, estímulos, metamateriales, impresión 4D, aplicaciones.

**Firma del alumno:**

**VºBº Tutor/es:**

Página dejada intencionadamente en  
blanco

**UNIVERSIDAD DE LEÓN**  
**Escuela de Ingenierías Industrial, Informática y**  
**Aeroespacial**

**GRADO EN INGENIERÍA AEROESPACIAL**  
**Trabajo de Fin de Grado**

**STUDENT:** Juan José Sánchez Llamas

**TUTOR:** Joaquín Barreiro García

**TITLE:** 4D printing of smart materials applied to the aerospace industry

**CONVOCATORIA:** July, 2023

**ABSTRACT:**

Smart materials are those that have the ability to respond and adapt to different external stimulus. The main types are: piezoelectric, which are able to generate an electric charge in response to a voltage or deform when subjected to a current; shape memory materials, which can recover their original shape when they receive a stimulus; magnetorheological, which can vary their physical properties (viscosity, rigidity) in response to an external magnetic field; chromo-active, which can change color depending on various stimulus (temperature, light...) and photoactive, which can emit light when electromagnetic radiation strikes them.

In addition to these, there are other types of smart materials, such as pyroelectrics, which generate an electric charge in response to changes in temperature; ferroelectrics, which have the ability to modify and retain an electrical charge in response to an electrical stimulus and electrorheologicals, similar to magnetorheologicals, but in the presence of an electric field.

There is another type of materials, metamaterials, which can also be considered intelligent because they have exceptional electromagnetic properties not found in conventional materials. They possess the ability to deflect light around them and manipulate electromagnetic waves.

Smart materials, through 4D printing, allow the creation of objects with the ability to change their shape or function in response to certain stimulus. This is possible thanks to additive manufacturing and the implementation of these materials in the process.

Smart materials have numerous applications in various sectors such as medicine, electronics, robotics or the automotive industry. In the present work, the main focus will be on applications in the aerospace sector, where these materials offer significant advantages such as improved energy efficiency and weight reduction. In addition, several aerospace projects have been and are being carried out that explore the use of smart materials in order to make aviation more efficient and safer.

**KEY WORDS:** smart material, respond, adapt, stimulus, metamaterials, 4D printing, applications.

**Firma del alumno:**

**VºBº Tutor/es:**

Página dejada intencionadamente en  
blanco

# Índice de contenido

0. Introducción .....	22
1. Materiales piezoeléctricos .....	27
1.1. Efecto piezoeléctrico.....	28
1.2. Tipos de materiales piezoeléctricos.....	29
1.2.1. Cristales piezoeléctricos .....	29
1.2.2. Cerámicas piezoeléctricas .....	31
1.2.3. Polímeros piezoeléctricos .....	32
1.3. Aplicaciones de materiales piezoeléctricos .....	34
1.3.1. Sensores .....	34
1.3.2. Actuadores .....	35
1.3.3. Transductores.....	35
1.3.4 Acelerómetros.....	36
1.3.5 Generadores.....	37
2. Materiales con memoria de forma .....	39
2.1 Aleaciones con memoria de forma .....	39
2.1.1 Efecto de memoria de forma en aleaciones .....	40
2.1.2 Efecto de superelasticidad en aleaciones .....	42
2.1.3 Tipos de aleaciones con memoria de forma .....	43
2.1.4 Aplicaciones de las aleaciones con memoria de forma .....	44
2.2 Polímeros con memoria de forma .....	46
2.2.1 Efecto de memoria de forma en polímeros .....	46
2.2.2 Tipos de polímeros con memoria de forma .....	47

2.2.3 Aplicaciones de los polímeros con memoria de forma.....	48
3. Materiales magnetorreológicos .....	51
3.1 Fluidos magnetorreológicos .....	52
3.2 Elastómeros magnetorreológicos .....	54
4. Materiales cromóactivos.....	57
4.1 Materiales termocrómicos.....	57
4.2 Materiales fotocromáticos.....	60
4.3 Materiales electrocromáticos .....	62
5. Materiales fotoactivos .....	65
5.1 Materiales electroluminiscentes .....	65
5.2 Materiales fluorescentes .....	67
5.3 Materiales fosforescentes .....	69
6. Otros materiales inteligentes.....	73
6.1 Materiales piroeléctricos .....	73
6.2 Materiales ferroeléctricos.....	74
6.3 Materiales electrorreológicos.....	75
7. Metamateriales .....	77
7.1 Definición y características .....	77
7.1 Aplicaciones de los metamateriales .....	80
8. Impresión 4D .....	83
8.1 Principios básicos de la impresión 4D.....	84
8.1.1 Proceso de fabricación aditiva .....	84
8.1.2 Material utilizado .....	84
8.1.3 Estímulo y activación de materiales.....	85
8.1.4 Programación y transformación de formas .....	85

8.1.5 Transformación controlada a lo largo del tiempo .....	85
8.2 Técnicas de impresión 4D .....	85
8.2.1 Extrusión de material .....	86
8.2.2 Fotopolimerización en tanque o cuba .....	88
8.2.3 Fusión de lecho de polvo.....	89
8.2.4 Inyección de material .....	91
8.2.5 Inyección de aglutinante .....	93
8.2.6 Deposición directa de energía.....	95
8.2.7 Laminación de hojas.....	97
8.3 Técnicas de impresión 4D más utilizadas actualmente .....	98
8.3.1 Modelado por deposición fundida.....	99
8.3.2 Escritura directa de tinta.....	100
8.3.3 Estereolitografía .....	101
8.3.4 Procesamiento digital de luz .....	101
8.3.5 Rapid Liquid Printing .....	102
8.3.6 Sinterización selectiva por láser.....	103
8.3.7 Polyjet.....	104
8.4 Ejemplos de la impresión 4D .....	105
8.4.1 Stent médico impreso en 4D: .....	105
8.4.2 Implantes impresos en 4D.....	106
8.4.3 Arquitecturas/piezas que cambian de forma .....	107
8.4.4 Textiles impresos en 4D: .....	108
8.4.5 Robot impreso en 4D que analiza la calidad del aire y el suelo.....	109
8.4.6 Robot gusano impreso en 4D que se desplaza .....	110
8.4.7 Estructura impresa en 4D con sensores de humedad: .....	110

8.4.8 Robot impreso en 4D con actuadores piezoeléctricos: .....	111
9. Aplicaciones de los materiales inteligentes en el sector aeroespacial .....	113
9.1 Tela espacial inteligente .....	113
9.2 Alas cambiantes .....	114
9.3 Ruedas superelásticas.....	115
9.4 Velas solares autodesplegables .....	116
9.5 Hormigón inteligente .....	117
9.6 Posibles aplicaciones futuras .....	118
10. Proyectos relacionados con materiales inteligentes en el sector aeroespacial ....	121
10.1 Proyecto ARTIMA.....	121
10.2 Proyecto SARISTU .....	122
10.3 Proyecto PEASSS .....	122
10.4 Proyecto SMS.....	123
10.5 Proyecto MASTRO.....	123
10.6 Proyecto SMARTFAN.....	124
10.7 Proyecto INCOMESS.....	124
10.8 Proyecto DOMMINIO .....	125
10.9 Proyecto INFINITE .....	125
11. Conclusiones.....	127
12. Bibliografía.....	133

# Índice de figuras

<b>Figura 1.1</b> Representación del efecto piezoeléctrico en policristalinos. (Fuente: [14]) .....	29
<b>Figura 1.2</b> Imagen de un cristal de cuarzo. (Fuente: [16] .....	31
<b>Figura 1.3</b> Imagen de discos de cerámica PZT. (Fuente: [21]) .....	32
<b>Figura 1.4</b> Imagen de polímeros de PVDF. (Fuente: [25]) .....	33
<b>Figura 1.5</b> Imagen de un sensor piezoeléctrico. (Fuente: [31]) .....	34
<b>Figura 1.6</b> Imagen de un actuador piezoeléctrico. (Fuente: [32]) .....	35
<b>Figura 1.7</b> Imagen de un transductor piezoeléctrico ultrasónico. (Fuente: [33]) .....	36
<b>Figura 1.8</b> Imagen de un acelerómetro piezoeléctrico. (Fuente: [34]) .....	37
<b>Figura 1.9</b> Imagen de un generador piezoeléctrico. (Fuente: [35]) .....	37
<b>Figura 2.1</b> Curva de histéresis de la aleación SMA en la transformación. (Fuente: [42]) ....	40
<b>Figura 2.2</b> Explicación del efecto de memoria de forma. (Fuente: [42]) .....	41
<b>Figura 2.3</b> Gráfica del fenómeno de superelasticidad. (Fuente: [42]) .....	42
<b>Figura 2.4</b> Imagen de una aleación de Nitinol. (Fuente: [38]) .....	45
<b>Figura 2.5</b> Diagrama del efecto de memoria en un polímero. (Fuente: [47]) .....	47
<b>Figura 2.6</b> Imagen de polímero autorreparable. (Fuente: [51]) .....	49
<b>Figura 3.1</b> Esquema del funcionamiento del efecto magnetorreológico. (Fuente: [56]) ....	51
<b>Figura 3.2</b> Efecto magnetorreológico en un fluido MR. (Fuente: [57]) .....	53
<b>Figura 3.3</b> Prototipo fabricado de aislante de vibraciones basado en elastómeros MR. (Fuente: [62]) .....	56
<b>Figura 4.1</b> Aplicación de materiales termocrómicos en tazas. (Fuente: [76]) .....	60
<b>Figura 4.2</b> Aplicación de materiales fotocromicos en gafas deportivas. (Fuente: [84]) .....	62

<b>Figura 4.3</b> Aplicación de material electrocrómico en ventanas inteligentes. (Fuente: [89]) .....	63
<b>Figura 5.1</b> Estructura general de un material electroluminiscente. (Fuente: [93]) .....	66
<b>Figura 5.2</b> Funcionamiento del fenómeno electroluminiscente. (Fuente: [90]) .....	66
<b>Figura 5.3</b> Diagrama de Jablonski que ilustra las etapas y procesos en la creación de un estado de singlete excitado mediante absorción óptica y posterior emisión de fluorescencia. (Fuente: [99]) .....	68
<b>Figura 5.4</b> Representación esquemática del fenómeno de fosforescencia. (Fuente: [109]) .....	70
<b>Figura 5.5</b> Obra de arte a base de materiales fosforescentes. (Fuente: [114]) .....	71
<b>Figura 7.1</b> A la izquierda, agua con índice de refracción positiva; a la derecha, agua con índice de refracción negativa. (Fuente: [140]) .....	79
<b>Figura 7.2</b> Prenda fabricada con Metaflex. (Fuente: [145]) .....	81
<b>Figura 7.3</b> Capacidad de volver completamente invisible una caza de combate, como sugiere la imagen, utilizando tecnología de metamateriales. (Fuente: [141]) .....	82
<b>Figura 8.1</b> Cuarta dimensión en la impresión. (Fuente: [146]) .....	83
<b>Figura 8.2</b> Método de extrusión de material. (Fuente: [152]) .....	86
<b>Figura 8.3</b> Diagrama esquemático de la extrusión de material. (Fuente: [153]) .....	87
<b>Figura 8.4</b> Método de fotopolimerización en tanque o cuba. (Fuente: [152]) .....	88
<b>Figura 8.5</b> Diagrama esquemático de la fotopolimerización en tanque. (Fuente: [153]) ....	88
<b>Figura 8.6</b> Método de fusión de lecho de polvo. (Fuente: [152]) .....	89
<b>Figura 8.7</b> Diagrama esquemático de la fusión de lecho de polvo. (Fuente: [153]) .....	90
<b>Figura 8.8</b> Método de inyección de material. (Fuente: [152]) .....	91
<b>Figura 8.9</b> Diagrama esquemático de la inyección de material. (Fuente: [153]) .....	92
<b>Figura 8.10</b> Método de proyección de aglutinante. (Fuente: [152]) .....	93
<b>Figura 8.11</b> Diagrama esquemático de la inyección de aglutinante. (Fuente: [153]) .....	93

<b>Figura 8.12</b> Método de deposición directa de energía. (Fuente: [152]) .....	95
<b>Figura 8.13</b> Diagrama esquemático de la deposición directa de energía. (Fuente: [153]) .....	95
<b>Figura 8.14</b> Método de laminación de hojas. (Fuente: [152]) .....	97
<b>Figura 8.15</b> Diagrama esquemático de la laminación de hojas. (Fuente: [153]) .....	97
<b>Figura 8.16</b> Representación del proceso de modelado por deposición fundida (FDM). (Fuente: [173]) .....	99
<b>Figura 8.17</b> Representación de una impresora basada en la escritura directa de tinta (DIW). (Fuente: [174]) .....	100
<b>Figura 8.18</b> Representación del proceso de estereolitografía (SLA). (Fuente: [177]) .....	101
<b>Figura 8.19</b> Representación del proceso de procesamiento digital de luz (DLP). (Fuente: [180]) .....	102
<b>Figura 8.20</b> Representación del proceso de Rapid Liquid Printing (RLP). (Fuente: [185]) .....	102
<b>Figura 8.21</b> Representación del proceso de sinterización selectiva por láser (SLS). (Fuente: [189]) .....	104
<b>Figura 8.22</b> Representación del proceso PolyJet. (Fuente: [194]) .....	105
<b>Figura 8.23</b> Imagen del stent biomédico impreso en 4D. (Fuente: [195]) .....	106
<b>Figura 8.24</b> Imagen de una férula impresa en 4D. (Fuente: [199]) .....	107
<b>Figura 8.25</b> Representación de un corazón impreso en 4D. (Fuente: [203]) .....	107
<b>Figura 8.26</b> Representación de una estructura de hidrogel impresa en 4D. (Fuente: [206]) .....	108
<b>Figura 8.27</b> Representación de una madera programable impresa en 4D. (Fuente: [208]) .....	108
<b>Figura 8.28</b> Representación de un textil impreso en 4D. (Fuente: [210]) .....	109
<b>Figura 8.29</b> Fotografía del robot I-Seed. (Fuente: [211]) .....	109
<b>Figura 8.30</b> Imagen del robot “gusano” impreso en 4D. (Fuente: [212]) .....	110

<b>Figura 8.31</b> Funcionamiento estructuras higromorfos impresos en 4D. (Fuente: [214]) ...	111
<b>Figura 8.32</b> Representación del tamaño de los “micro-cerdas-robots” impresos en 4D. (Fuente: [215]) .....	111
<b>Figura 9.1</b> Fotografía de la tela espacial inteligente impresa en 4D. (Fuente: [220]) .....	114
<b>Figura 9.2</b> Actuador de aleación con memoria de forma en la extensión del ala morphing. (Fuente: [222]) .....	115
<b>Figura 9.3</b> Representación del neumático superelástico. (Fuente: [224]) .....	116
<b>Figura 9.4</b> Secuencia de la configuración de plegado de una vela solar autodesplegable. (Fuente: [225]) .....	117
<b>Figura 9.5</b> Representación del hormigón inteligente. (Fuente: [227]) .....	118

Página dejada intencionadamente en  
blanco

# Índice de cuadros y tablas

**Tabla 2.1** Composición química y propiedades de algunas aleaciones SMA.  
(Fuente: [39]) ..... 43

**Tabla 4.1** Tipos de materiales cromoactivos y sus estímulos. (Fuente: [68]) ..... 57

Página dejada intencionadamente en  
blanco

# Glosario de siglas, símbolos, abreviaturas, acrónimos y términos

<b>SM:</b>	Smart Material (Material Inteligente)
<b>PE:</b>	Piezoeléctrico
<b>SMM:</b>	Shape Memory Material (Material con Memoria de Forma)
<b>MR:</b>	Magnetorreológico
<b>CA:</b>	Cromoactivo
<b>FA:</b>	Fotoactivo
<b>PyE:</b>	Piroeléctrico
<b>FeE:</b>	Ferroeléctrico
<b>ER:</b>	Electrorreológico
<b>MM:</b>	Metamaterial
<b>PZT:</b>	abreviatura de "Lead Zirconate Titanate" (Titanato de circonato de plomo)
<b>PLT:</b>	abreviatura de "Lead-lanthanum titanate" (Titanato de plomo-lantano)
<b>BT:</b>	abreviatura de "Barium titanate" (Titanato de bario)
<b>BST:</b>	abreviatura de "Barium strontium titanate" (Titanato de bario estroncio)
<b>MEMS:</b>	MicroElectroMechanical Systems (Sistemas MicroElectroMecánicos)
<b>PVDF:</b>	abreviatura de "Polyvinylidene fluoride" (Fluoruro de polivinilideno)
<b>T<sub>g</sub>:</b>	Temperatura de transición vítrea
<b>LCP:</b>	Liquid Crystal Polymer (Polímero Líquido de Cristal)
<b>SMA:</b>	Shape Memory Alloy (Aleación con Memoria de Forma)
<b>M<sub>s</sub>:</b>	Temperatura de comienzo de transformación martensítica
<b>M<sub>f</sub>:</b>	Temperatura de final de la transformación martensítica
<b>A<sub>s</sub>:</b>	Temperatura de comienzo de la transformación austenítica
<b>A<sub>f</sub>:</b>	Temperatura de final de la transformación austenítica
<b>SIM:</b>	Martensita inducida por tensión
<b>M<sub>d</sub>:</b>	Temperatura máxima de formación de martensita inducida por tensión
<b>SMP:</b>	Shape Memory Polimer (Polímero con Memoria de Forma)

<b>UHMWPE:</b>	Ultra High Molecular Weight Polyethylene (Polietileno de Ultra Alta Densidad)
<b>TPE:</b>	Thermoplastic polyester (Poliéster termoplástico)
<b>PP:</b>	<b><i>Polypropylene (Polipropileno)</i></b>
<b>SMASH:</b>	Shape Memory Polymer Assisted Self Healing (Auto Reparación Asistida por Memoria de Forma).
<b><math>T_{trans}</math>:</b>	Temperatura de transición
<b><math>T_m</math>:</b>	Temperatura de cristalización
<b><math>R_f</math>:</b>	Relación de fijeza
<b><math>R_r</math>:</b>	Relación de recuperación
<b>MRF:</b>	Magnetorheological Fluids (Fluidos Magnetorreológicos)
<b>MRE:</b>	Magnetorheological Elastomers (Elastómeros Magnetorreológicos)
<b>UV:</b>	Ultravioleta
<b>LCD:</b>	Liquid Cristal Display (Pantalla de Cristal Líquido)
<b><math>S_1'</math>:</b>	Estado de singlete excitado
<b><math>S_1</math>:</b>	Estado de singlete relajado
<b><math>S_0</math>:</b>	Estado basal
<b>FRET:</b>	Fluorescence Resonance Energy Transfer (Transferencia de Energía por Resonancia de Fluorescencia)
<b>SMILES:</b>	Simplified Molecular Input Line Entry Specification (Especificación de Introducción Lineal Molecular Simplificada)
<b><math>T_c</math>:</b>	Temperatura de Curie
<b>FeRAM:</b>	Ferroelectric Random Access Memory (Memoria de Acceso Aleatorio Ferroeléctrica)
<b><math>n</math>:</b>	Índice de refracción
<b><math>\epsilon</math>:</b>	Permitividad eléctrica
<b><math>\mu</math>:</b>	Permeabilidad magnética
<b>AM:</b>	Additive Manufacturing (Fabricación aditiva)
<b>MIT:</b>	Massachusetts Institute of Technology (Instituto Tecnológico de Massachusetts)
<b>CAD:</b>	Computer - Aided Design (Diseño asistido por Ordenador)
<b>ISO:</b>	International Organization for Standardization (Organización Internacional de Normalización)

<b>FDM:</b>	Fused Deposition Modeling (Modelado por Deposición Fundida)
<b>DIW:</b>	Direct Ink Writing (Escritura Directa con Tinta)
<b>SLA:</b>	Stereolithography (Estereolitografía)
<b>DLP:</b>	Digital Light Processing (Procesamiento Digital de la Luz)
<b>SLS:</b>	Selective Laser Sintering (Sinterizado Selectivo Láser)
<b>LPBF:</b>	Laser Powder Bed Fusion (Fusión de lecho de polvo por láser)
<b>EBM:</b>	Electron Beam Melting (Fusión por haz de electrones)
<b>M-Jet:</b>	Material Jetting (Inyección de material)
<b>NPJ:</b>	NanoParticle Jetting (Inyección de nanopartículas)
<b>MJF:</b>	Multi Jet Fusion
<b>WAAM:</b>	Wire Arc Additive Manufacturing (Fabricación Aditiva por Arco de Alambre)
<b>LOM:</b>	Laminated Object Manufacturing (Fabricación de Objetos Laminados)
<b>UC:</b>	Ultrasonic Consolidation (Consolidación Ultrasónica)
<b>RLP:</b>	Rapid Liquid Printing (Impresión Rápida de Líquido)
<b>IIT:</b>	Istituto Italiano di Tecnologia (Istituto Italiano de Tecnología)
<b>ECE:</b>	School of Electrical and Computer Engineering (Escuela de Ingeniería Eléctrica e Informática)
<b>JPL:</b>	Jet Propulsion Laboratory (Laboratorio de Propulsión Chorro)
<b>IMFT:</b>	Institut de Mecanique des Fluides de Toulouse (Instituto de Mecánica de Fluidos de Toulouse)
<b>MET:</b>	Modularized Equipment Transporter (Transportador Modular de Equipos)
<b>LRV:</b>	Lunar Roving Vehicle (Vehículo Lunar Itinerante)
<b>CORDIS:</b>	COmmunity Research and Development Information Service (Servicio de Información para la Comunidad de Investigación y Desarrollo)
<b>ARTIMA:</b>	Aircraft Reliability Through Intelligent Materials Application (Fiabilidad de las Aeronaves Mediante la Aplicación de Materiales Inteligentes)
<b>Morphing:</b>	que cambia de forma, pero después recupera su forma original
<b>SARISTU:</b>	SmARt Intelligent aircraft STRuctUres (Estructuras Inteligentes para Aeronaves)
<b>PEASS:</b>	PiezoElectric Assisted Smart Satellite Structure (Estructura de Satélite Inteligente con Asistencia Piezoeléctrica)
<b>MASTRO:</b>	Intelligent bulk MAterials for Smart TRanspOrt industries (Materiales Inteligentes al por mayor para la Industria del Transporte Inteligente)
<b>Smartfan:</b>	Fan Inteligente

- CF:** Carbon Fiber (Fibra de Carbono)
- CNT:** Carbon NanoTubes (Nanotubos de Carbono)
- CNF:** Carbon Nanofibers (Nanofibras de Carbono)
- InComEss:** INnovative polymer-based COMposite systems for high-efficient Energy Scavenging and Storage (Innovadores Sistemas Compuestos a base de Polímeros para la Captación y el Almacenamiento de Energía de alta eficiencia)
- EHS:** Energy Harvesting Systems (Sistemas de Recolección de Energía)
- DOMMINIO:** Digital method for imprOved Manufacturing of next-generation MultifuNctIOnal airframe parts (Método Digital para la Fabricación Impresa de piezas de fuselaje Multifuncionales de última generación)
- ATL:** Automated Tape Laying (Tecnología de Laminado Automatizado)
- FFF:** Fusion Filament Fabrication (Fabricación por Filamento Fundido)
- Wearable:** que es ponible o se puede vestir

Página dejada intencionadamente en  
blanco

# 0. Introducción

El conocimiento de los materiales ha sido un aspecto clave en la historia y el dominio de las civilizaciones. Los materiales son tan importantes en la vida humana que incluso los historiadores dividen los primeros períodos de la historia humana según los materiales que se utilizaban: Edad de Piedra, Edad de Bronce, Edad de Hierro... Los avances en el bienestar humano están estrechamente ligados a la creación de nuevos materiales, ya que no solo apoyan el bienestar actual, sino que permiten avances futuros. Uno de los nuevos materiales que se ha desarrollado continuamente desde el siglo pasado son los materiales inteligentes. [1],[2],[3],[4]

Los materiales inteligentes, también conocidos como materiales activos o materiales multifuncionales, son una clase de materiales avanzados que tienen la capacidad de cambiar sus propiedades físicas y químicas en respuesta a estímulos específicos del entorno como cambios de temperatura, variaciones de presión, de humedad, de pH, corrientes eléctricas o campos magnéticos. Se caracterizan por su capacidad de respuesta y adaptación frente a estos estímulos, la cual les permite alterar su forma, tamaño, color, conductividad eléctrica y otras propiedades de forma controlada.

Una de las características fascinantes de los materiales inteligentes es su capacidad para ser programados durante el proceso de fabricación, lo que se conoce como impresión 4D. Este innovador enfoque abre un mundo de posibilidades en términos de personalización y adaptabilidad de los materiales. Esto significa que los materiales pueden adaptarse o transformarse como respuesta a unos estímulos específicos, lo cual nos permite explorar y explotar todo el potencial de los materiales inteligentes. [5],[6],

Estos materiales se encuentran en constante desarrollo y se utilizan en una amplia gama de industrias y aplicaciones. Su versatilidad y funcionalidades específicas los convierten en componentes clave para el desarrollo de nuevas tecnologías. Desde la medicina hasta la electrónica y la ingeniería, los materiales inteligentes ofrecen soluciones innovadoras para mejorar la eficiencia, la seguridad y la comodidad en diversos entornos. Los sectores más beneficiados actualmente con el uso de los materiales inteligentes son los siguientes:

- Ingeniería aeroespacial
- Medicina y biotecnología
- Industria textil
- Industria automovilística
- Electrónica sensible
- Energías renovables

Los materiales inteligentes pueden responder a una gran variedad de estímulos. En función del tipo de estímulo estos pueden presentar diferentes propiedades. Se pueden clasificar los distintos tipos de materiales inteligentes en los siguientes: [7],[8],[9],[10]

**- Materiales piezoeléctricos:**

Son aquellos materiales que generan una carga eléctrica cuando son sometidos a fuerzas mecánicas (como la presión o vibraciones), o que se deforman cuando son sometidos a corrientes eléctricas, es decir, transforman la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa.

**- Materiales con memoria de forma:**

Son aquellos materiales que tienen la capacidad de recuperar su forma original, o parte de ella, después de ser sometidos a un estímulo.

**- Materiales magnetorreológicos:**

Son aquellos materiales capaces de alterar sus propiedades reológicas, como la viscosidad o la rigidez, cuando son expuestos a campos magnéticos externos.

**- Materiales cromoactivos:**

Son aquellos materiales que poseen la capacidad de cambiar su color en respuesta a determinados estímulos externos, tales como cambios de temperatura o exposición a ciertos compuestos químicos.

**- Materiales fotoactivos:**

Son aquellos materiales que tienen la capacidad de alterar sus propiedades físicas o químicas cuando son sometidos a radiación electromagnética, especialmente a la luz.

Los tipos de materiales inteligentes citados son los comúnmente denominados “principales tipos de materiales inteligentes”. No obstante, existen otros tipos de materiales inteligentes que también desempeñan un papel importante en diversas aplicaciones. En este grupo podemos citar los siguientes:

**- Materiales piroeléctricos:**

Son aquellos materiales que exhiben la capacidad de generar una diferencia de potencial cuando son sometidos a cambios de temperatura.

**- Materiales ferroeléctricos:**

Son aquellos materiales que presentan una polarización eléctrica reversible frente al estímulo de un campo eléctrico externo.

**- Materiales electrorreológicos:**

Son aquellos materiales que pueden cambiar sus propiedades reológicas cuando son expuestos a campos eléctricos externos.

Además de los materiales inteligentes anteriormente mencionados, existe una gama de materiales conocida como “metamateriales”. No obstante, existe cierta controversia en cuanto a si estos metamateriales se pueden considerar inteligentes o no. Varias páginas web y algunos artículos científicos los incluyen en esta clasificación ya que poseen propiedades insólitas y una increíble capacidad para manipular la luz, el sonido y las ondas electromagnéticas. Sin embargo, otras fuentes se limitan a tratarlos como otro tipo de materiales, con la simple propiedad de que tienen características electromagnéticas especiales. Aunque la discusión sobre si los materiales son considerados o no inteligentes aún continúa, es imposible negar que estos materiales presentan características y capacidades que van más allá de los límites de los materiales convencionales. Por lo tanto, en el presente estudio serán tratados como materiales inteligentes debido a que generan una respuesta frente a un estímulo, las ondas electromagnéticas.

A continuación, se realizará un análisis de todo lo presentado previamente, en el cual se explicarán los tipos de materiales inteligentes, el proceso de impresión 4D y las aplicaciones de los materiales inteligentes en el sector aeroespacial, así como en el resto de los sectores.

Página dejada intencionadamente en  
blanco

# 1. Materiales piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos son un tipo de materiales inteligentes que tienen la capacidad de generar una carga eléctrica en respuesta a un esfuerzo mecánico aplicado o, por el contrario, cambiar de forma cuando son sometidos a un estímulo eléctrico. Esto quiere decir que son capaces de transformar la energía mecánica en eléctrica y viceversa.

Los primeros materiales piezoeléctricos fueron descubiertos por los hermanos Jacques y Pierre Curie en el año 1880. Se trató de una investigación mediante mediciones de cargas superficiales en determinados cristales, como el cuarzo, la turmalina, el topacio y la sal de Rochelle. De los cristales estudiados se concluyó que los que mostraban mayor efecto piezoeléctrico eran el cuarzo y la sal de Rochelle. Sin embargo, solo lograron demostrar el efecto piezoeléctrico directo (energía mecánica en energía eléctrica). [11],[12]

Fue al año siguiente, en 1881, cuando se dedujo matemáticamente que el efecto piezoeléctrico era reversible. Esto ocurrió gracias a Gabriel Lippmann, un físico luxemburgués que demostró el efecto piezoeléctrico inverso (energía eléctrica en energía mecánica). Este estudio permitió a los hermanos Curie investigar el efecto inverso y proporcionar pruebas cuantitativas sobre el mismo.

A medida que avanzaba el siglo XX, se produjeron numerosos avances en la investigación de estos materiales; sin embargo, no fue hasta la Primera Guerra Mundial cuando se utilizaron por primera vez en la creación de un detector ultrasónico submarino. Este dispositivo estaba fabricado con cristales de cuarzo pegados entre dos placas de acero.

Posteriormente, los materiales piezoeléctricos comenzaron a usarse con más frecuencia en otras aplicaciones, como es el caso de las cerámicas piezoeléctricas, que se empleaban para diseñar cartuchos de fonógrafos. Durante la Segunda Guerra Mundial, varias potencias mundiales (Estados Unidos, la URSS y Japón) llevaron a cabo investigaciones independientes que contribuyeron al avance de los materiales piezoeléctricos. Con ello, se logró una mayor comprensión entre la estructura cristalina y las propiedades piezoeléctricas, permitiendo manipular estos materiales para diversas aplicaciones. [13]

Ejemplos de estas nuevas aplicaciones durante la guerra fueron los micrófonos supersensibles, potentes dispositivos de sonar, sonoboyas y sistemas de encendido para igniciones monocilíndricas. Gracias a estos desarrollos, se produjo un cambio significativo en el enfoque de la tecnología piezoeléctrica, comenzándose a usar para aplicaciones específicas en lugar de solo estudiarla.

### **1.1. EFECTO PIEZOELÉCTRICO**

El efecto piezoeléctrico, también conocido como piezoelectricidad, es un fenómeno que se manifiesta en determinados materiales que consiste en la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica y viceversa. Es por ello por lo que se puede hablar de efecto piezoeléctrico directo (energía mecánica en energía eléctrica) y efecto piezoeléctrico inverso (energía eléctrica en energía mecánica).

Este fenómeno se basa en la estructura interna de ciertos materiales, generalmente cristales, en los que existe un equilibrio de carga con polarización positiva y negativa a lo largo de un eje polar, es decir, los centros de gravedad de los dipolos de las cargas positivas y negativas coinciden. [14]

Sin embargo, cuando este equilibrio es alterado debido a la aplicación de una tensión mecánica externa, la estructura del material se deforma, desalineando los dipolos eléctricos. Debido a ello, se produce una transferencia de energía a través de los portadores de carga eléctrica, provocando la anulación de los polos opuestos y generando una corriente en el material.

Este es el funcionamiento del efecto piezoeléctrico directo. Por el contrario, en el efecto piezoeléctrico inverso, debido a la aplicación de un campo eléctrico externo, se crea un desequilibrio en la estructura interna del material, dando lugar a una tensión mecánica.

Esto sucede porque, en presencia de una corriente eléctrica, los portadores de las cargas se sienten atraídos en direcciones opuestas, provocando que el material se estire o comprima en función de la dirección de la corriente incidente.

El efecto piezoeléctrico no se manifiesta igual en monocristales y en policristales. En los primeros, los ejes polares muestran una dirección unidireccional, mientras que, en los segundos, las diferentes regiones presentan ejes polares distintos. Para producir el fenómeno de la piezoelectricidad en los policristalinos, es necesario aplicarles un campo eléctrico intenso y calentarlos por encima de la temperatura de Curie. Después, tras ser enfriados de manera gradual, los dipolos se mantienen alineados y el material queda polarizado. En caso de superar la temperatura de Curie, el material queda despolarizado.

El resultado de todo esto es conseguir que el material tenga piezoelectricidad, la cual provoca que, cuando se aplica una tensión con la misma polarización que el material, este se comprime y, cuando se aplica una opuesta, este se estira.



**Figura 1.1** Representación del efecto piezoeléctrico en policristalinos. (Fuente: [14])

## 1.2. TIPOS DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

Existen diferentes tipos de materiales que presentan el efecto piezoeléctrico. Los tres principales grupos son los cristales, las cerámicas y los polímeros. A continuación, se procederá a presentar cada uno de estos materiales, señalando sus propiedades y aplicaciones y ejemplos de los mismos:

### 1.2.1. CRISTALES PIEZOELÉCTRICOS

Son aquellos materiales piezoeléctricos que se pueden encontrar en la naturaleza. Aunque en un inicio han sido fundamentales en las aplicaciones piezoeléctricas, actualmente han perdido relevancia práctica en comparación con otros tipos de piezoeléctricos con mejores

propiedades. No obstante, siguen empleándose en algunas aplicaciones determinadas como en medición del tiempo, destacando el reloj de cuarzo, o en filtros de banda muy estrecha, entre otras. [15]

Se pueden distinguir distintos cristales piezoeléctricos. A continuación, se presentan varios ejemplos significativos:

- **Cuarzo:** se trata de uno de los cristales piezoeléctricos más populares que tiene la capacidad de generar una diferencia de potencial cuando es sometido a compresión o tracción. Si se conecta un cable entre los extremos, es posible aprovechar esta carga eléctrica y generar una microcorriente eléctrica. [16]
- **Turmalina:** este material exhibe tanto propiedades piezoeléctricas como piroeléctricas (este fenómeno será explicado en otro apartado del trabajo). Esto quiere decir que es capaz de generar cargas eléctricas en ambos extremos, cuando es sometida a una tensión o a un cambio de temperatura. Gracias a esta característica, permite atraer hacia ella objetos ligeros (de ahí su nombre “turamali” que significa en ceilonés “piedra que atrae las cenizas”). [17]
- **Topacio:** es un mineral que presenta también propiedades piezoeléctricas, es decir, cuando es sometido a un estímulo mecánico, genera una carga eléctrica.
- **Sal de Rochelle:** este cristal tan conocido tiene también propiedades piezoeléctricas notables; sin embargo, no es adecuada para aplicaciones piezoeléctricas debido a su falta de estabilidad tanto física como eléctrica. [18]
- **Sacarosa:** también llamada azúcar común o azúcar de mesa, la sacarosa ( $C_{12}H_{22}O_{11}$ ) es un disacárido compuesto por glucosa y fructosa que puede exhibir el efecto piezoeléctrico.
- **Berlinita:** se trata de un mineral raro de fosfato ( $AlPO_4$ ), con una estructura idéntica a la del cuarzo, que también presenta propiedades piezoeléctricas.

Además de los cristales naturales, también se han creado cristales artificiales que exhiben propiedades piezoeléctricas. Estos han sido desarrollados mediante técnicas de crecimiento cristalino controlado y modificaciones estructurales a nivel atómico. Algunos ejemplos de estos cristales piezoeléctricos artificiales son: [19],[20]

- Ortofosfato de galio ( $\text{GaPO}_4$ )
- Langasita ( $\text{La}_3\text{Ga}_5\text{SiO}_{14}$ )
- Tantalato de litio ( $\text{LiTaO}_3$ )
- Niobato de Litio ( $\text{LiNbO}_3$ )



Figura 1.2 Imagen de un cristal de cuarzo. (Fuente: [16])

### 1.2.2. CERÁMICAS PIEZOELÉCTRICAS

Son un tipo de materiales piezoeléctricos, compuestos por policristales, en los cuales, mediante la mezcla, moldeado y sinterización a alta temperatura de las materias primas adecuadas, se consiguen propiedades piezoeléctricas. En función de la proporción de materiales utilizados en su fabricación se pueden ajustar sus propiedades, lo que les confiere una gran versatilidad y adaptabilidad para diversas aplicaciones.

Entre sus aplicaciones se pueden destacar: equipos médicos de ecografía, equipos de limpieza de ultrasonidos, sensores de vibraciones, acelerómetros y actuadores y motores piezoeléctricos. [21],[22]

Se pueden distinguir distintas cerámicas piezoeléctricas. A continuación, se presentan varios ejemplos significativos:

- **Cerámicas de titanato de plomo-circonato de titanio (PZT):** son las más destacadas debido a su gran variedad de aplicaciones y excelentes propiedades. Estas cerámicas presentan una sensibilidad elevada, es decir, son altamente receptivas a los estímulos que les son aplicados. Además, su temperatura de funcionamiento es

superior en comparación a otras cerámicas piezoeléctricas, lo que le permite un mayor de aplicaciones y una mayor versatilidad en entornos exigentes.

- **Cerámicas de titanato de plomo-lantano (PLT):** estas cerámicas son conocidas por sus excelentes propiedades piezoeléctricas. Sin embargo, como en su fabricación se emplean óxidos de plomo, que son altamente tóxicos y peligrosos, se están empezando a buscar diferentes compuestos piezoeléctricos para su reemplazo.
- **Cerámicas de titanato de bario (BT):** fueron los primeros materiales ferroeléctricos (este fenómeno será explicado en otro apartado del trabajo) y poseen propiedades dieléctricas excepcionales. Gracias a ello, se utilizan en la fabricación de numerosos dispositivos como condensadores cerámicos multicapa. [23]
- **Cerámicas de titanato de bario estroncio (BST):** se distinguen por su capacidad para presentar propiedades ferroeléctricas, que les confieren la posibilidad de mantener una polarización eléctrica en ausencia de un campo eléctrico externo. Además, tienen una constante dieléctrica elevada. [24]



**Figura 1.3** Imagen de discos de cerámica PZT. (Fuente: [21])

### 1.2.3. POLÍMEROS PIEZOELÉCTRICOS

Los materiales piezoeléctricos son compuestos orgánicos que pueden polarizarse al enfriarse en presencia de un campo eléctrico externo. Gracias a sus propiedades, presentan un gran potencial en diversas aplicaciones, aunque actualmente son en cierto modo limitadas porque siguen en una fase relativamente temprana de su desarrollo.

Entre sus aplicaciones se pueden destacar: transductores electroacústicos, en sistemas MEMS para sensores de presión y en sistemas de ultrasonidos mediante imagen.

Se pueden distinguir distintos polímeros piezoeléctricos. A continuación, se presentan varios ejemplos significativos:

- **Fluoruro de polivinilideno (PVDF):** es un polímero con una estructura semicristalina (50% amorfa y 50% cristalina) que tiene la capacidad de desarrollar un momento dipolar neto al someterlo a un campo eléctrico por encima de su temperatura de transición vítrea ( $T_g$ ). Cuando es enfriado y se congela, se logra el efecto piezoeléctrico, confiriéndole la propiedad de generar una carga eléctrica en respuesta a tensiones mecánicas. [25]
- **Polímeros líquidos de cristal (LCP):** son una familia de termoplásticos que poseen importantes propiedades como elevada resistencia al calor, resistencia eléctrica y resistencia química y además son capaces de desarrollar un momento dipolar al aplicar sobre ellos un campo eléctrico por encima de su  $T_g$ . [26],[27]
- **Parileno-C:** es un polímero formado por una película delgada, que tiene propiedades únicas como una excelente resistencia química, actúa como barrera contra la humedad y exhibe propiedades piezoeléctricas, por lo que puede generar una carga eléctrica en respuesta a un estímulo mecánico. [28]



**Figura 1.4** Imagen de polímeros de PVDF. (Fuente: [25])

### 1.3. APLICACIONES DE MATERIALES PIEZOELÉCTRICOS

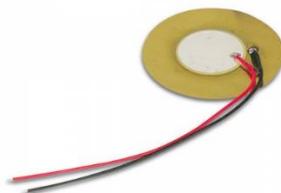
Los materiales piezoeléctricos, gracias a su capacidad de transformar la energía mecánica en eléctrica y viceversa, son muy versátiles y ampliamente utilizados en una gran variedad de aplicaciones. Sus aplicaciones principales se encuentran en sensores, actuadores, transductores, acelerómetros y generadores; aunque también son utilizados en dispositivos como mecheros eléctricos, parrillas de gas, micrófonos... [29],[30]

A continuación, se procederá a explicar brevemente las principales aplicaciones de los materiales piezoeléctricos:

#### 1.3.1. SENSORES

Los sensores piezoeléctricos generan una señal eléctrica como respuesta a un cambio en la tensión aplicada. Transforman los estímulos mecánicos, como aceleraciones o presiones, en señales eléctricas. No obstante, solo generan una señal cuando se experimentan una variación en la tensión aplicada. En ausencia de estas variaciones, el material piezoeléctrico se descarga. Si se aplica un nuevo estímulo mecánico, la carga se restablece, pero, si se mantiene de nuevo constante, vuelve a descargarse el piezoeléctrico.

Los sensores a su vez se pueden clasificar en activos y pasivos dependiendo de la aplicación: los activos miden el tiempo de respuesta o eco de un pulso enviado o el tiempo entre un transmisor y un receptor y, además, los transmisores trabajan en resonancia y los receptores en anti resonancia.; sin embargo, los sensores pasivos, funcionan por debajo de su frecuencia de resonancia y reciben señales en un amplio rango de frecuencias.



**Figura 1.5** Imagen de un sensor piezoeléctrico. (Fuente: [31])

### 1.3.2. ACTUADORES

Los actuadores piezoeléctricos son dispositivos que transforman una señal eléctrica en un desplazamiento físico preciso. Si se bloquea el desplazamiento ante una señal eléctrica incidente, se obtendrá una fuerza de bloqueo que puede ser utilizada en diversas aplicaciones.

Existen un tipo de actuadores, denominado de tipo pila, los cuales ofrecen una resolución extremadamente alta y pueden operar casi sin desgaste ni deterioro. Asimismo, presentan una respuesta rápida, limitada por la capacidad del controlador electrónico, y generan muy poco calor.

Las aplicaciones de los actuadores piezoeléctricos son principalmente en el sector industrial, el aeroespacial y en medicina. Además, también son utilizados en lentes y sistemas de autoenfoco de cámaras y móviles.



**Figura 1.6** Imagen de un actuador piezoeléctrico. (Fuente: [32])

### 1.3.3. TRANSDUCTORES

Los transductores piezoeléctricos son dispositivos electrónicos que tienen la capacidad de transformar la energía eléctrica en otro tipo de energía.

Un ejemplo destacado de transductor piezoeléctrico es el transductor piezoeléctrico ultrasónico, que puede generar ondas sonoras por encima del rango audible para el ser humano. Este es utilizado sobre todo en aplicaciones de limpieza y además ofrecen una

alta eficiencia electroacústica. Los transductores piezoeléctricos también son empleados en otras aplicaciones como en automóviles, industria, hogares, dispositivos electrónicos o guitarras, entre otras.



**Figura 1.7** Imagen de un transductor piezoeléctrico ultrasónico. (Fuente: [33])

### 1.3.4 ACELERÓMETROS

Los acelerómetros piezoeléctricos son sensores utilizados para medir la aceleración de un sistema. Estos se basan en el efecto piezoeléctrico, donde una masa suspendida está restringida por un transductor calibrado para detectar fuerza. Cuando se aplica una aceleración, el transductor mide la fuerza ejercida por la masa.

Algunos acelerómetros piezoeléctricos disponen de circuitos integrados de acondicionamiento de señal, que transforman y acondicionan la señal eléctrica del sensor para ser procesada más fácilmente.

Estos acelerómetros pueden encontrarse en aplicaciones en diversos sectores como la automoción, la seguridad, el control de estabilidad en vehículos, en aviación, en drones o en sensores sísmicos, entre otros.



**Figura 1.8** Imagen de un acelerómetro piezoeléctrico. (Fuente: [34])

### 1.3.5 GENERADORES

Los generadores piezoeléctricos son dispositivos a base de cerámicas piezoeléctricas, que tienen la capacidad de transformar la energía mecánica en energía eléctrica. A diferencia de los sensores, los generadores están diseñados para lograr la máxima eficiencia en la conversión de la energía. Para conseguir esto, es necesario un diseño que considere diversos aspectos como el tipo de material utilizado, la configuración del generador, la tensión aplicada y la impedancia de carga.

Pueden clasificarse en generadores de una sola capa o multicapa; la diferencia principal entre ellos es el voltaje generado. Los generadores multicapa producen un voltaje inferior pero una corriente significativamente mayor que los de una sola capa.



**Figura 1.9** Imagen de un generador piezoeléctrico. (Fuente: [35])

Página dejada intencionadamente en  
blanco

## 2. Materiales con memoria de forma

Los materiales con memoria de forma son un tipo de materiales inteligentes que tienen la capacidad de “recordar” su forma y volver a ella tras haber sido sometidos a una deformación plástica mediante la aplicación sobre ellos de un estímulo externo (cambios de temperatura, de humedad, campos magnéticos...). Además, estos materiales pueden deformarse repetidas veces y volver a su forma original sin deteriorarse indefinidamente.

Principalmente existen dos tipos de materiales con memoria de forma, según la naturaleza del material: las aleaciones, los polímeros. No obstante, también se están investigando cerámicas, composites e hidrogeles que presentan esta propiedad, pero su desarrollo y estudio aún es muy limitado. [36],[37],[38]

A continuación, se procederá a exponer una presentación de los dos tipos principales de materiales con memoria de forma, explicando sus propiedades y aplicaciones, además de diversos ejemplos de cada grupo.

### 2.1 ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

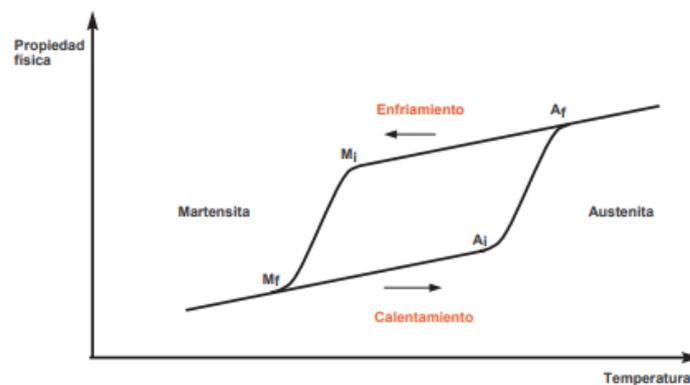
Las aleaciones con memoria de forma son un tipo de materiales SMM que presentan la capacidad de recuperar su forma original al ser calentadas después de una deformación plástica. Se trata de unas aleaciones metálicas que pueden ser deformadas hasta casi un 10%, dentro de un rango de temperaturas, y luego recuperar su forma original al liberar la carga. [39],[40]

Estos fenómenos son conocidos como memoria de forma térmica (también llamado efecto de memoria de forma) y memoria de forma elástica (también llamado superelasticidad). Cada uno de estos efectos presenta potenciales aplicaciones; si se pretende usar para generar fuerza o movimiento, entra en juego el efecto de memoria de forma y, si se pretende almacenar energía, aparece el fenómeno de la superelasticidad. [41],[42]

El efecto de memoria de forma en aleaciones consiste en la capacidad de las aleaciones de recuperar su forma original después de ser deformadas más allá de su límite plástico cuando se les aplica calor. Por otro lado, existe también el efecto de superelasticidad, que consiste en la recuperación de la forma original incluso después de haber experimentado una deformación que ha superado de su límite plástico.

Se explicarán a continuación estos dos efectos más detenidamente:

### 2.1.1 EFECTO DE MEMORIA DE FORMA EN ALEACIONES



**Figura 2.1** Curva de histéresis de la aleación SMA en la transformación. (Fuente: [42])

El efecto de memoria de forma en una aleación se da lugar gracias a la aplicación de temperatura sobre la misma. Este cambio de temperatura provoca asimismo una alteración en la estructura internas de la aleación; dicho cambio ocurre debido a una transformación martensítica. [43],[44]

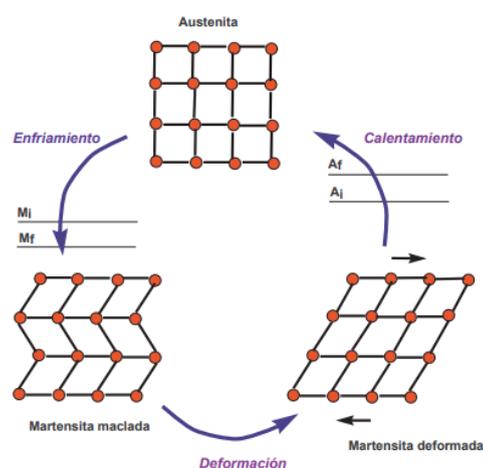
Se considerará que el material, en primera instancia, se encuentra en fase austenítica a una temperatura determinada. Observando la gráfica anterior, se puede ver que al enfriar el material por debajo de la temperatura  $M_s$  (temperatura de comienzo de transformación martensítica), empieza el proceso exotérmico de conversión en martensita hasta que la temperatura haya disminuido por debajo de la temperatura  $M_f$  (temperatura de final de la transformación martensítica), momento en el cual todo el material tiene ya se encuentra en fase martensítica.

Una vez el material se encuentra en su totalidad en fase martensítica, si se le aplica una tensión mecánica, esta fuerza provocará una deformación en el material al alterar la estructura de maclado debido a la influencia de la tensión aplicada. Como resultado, los límites de maclado se verán modificados, generando una respuesta mecánica y estructural en el material martensítico.

Si ahora este material deformado en fase austenítica es calentado por encima de la temperatura  $A_s$  (temperatura de comienzo de la transformación austenítica), comienza el proceso endotérmico de conversión en austenita hasta que la temperatura haya aumentado por encima de la temperatura  $A_f$  (temperatura de final de la transformación austenítica), momento en el cual, el material volvería a la estructura austenítica, recuperando así su forma original antes de la deformación a baja de temperatura.

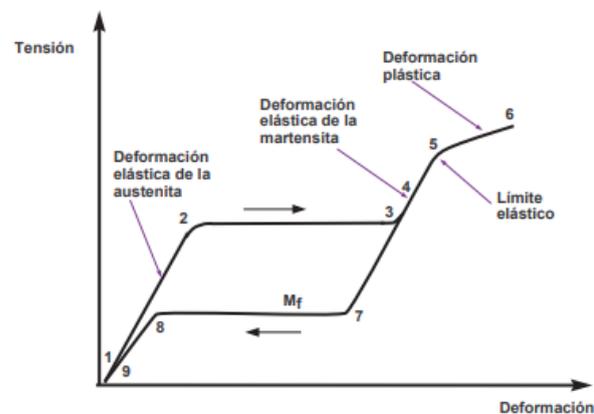
Se puede observar que las temperaturas de comienzo y final de las transformaciones martensítica y austenítica no coinciden. Esto ocurre debido a la movilidad de las interfaces de las diferentes estructuras, lo que se conoce como histéresis de transformación.

Este mecanismo es conocido como memoria de forma simple, ya que solo ocurre una vez. Esto quiere decir que, si el material que ha recuperado su forma tras la deformación plástica vuelve a ser sometido a un nuevo ciclo térmico, no se producirían cambios en su forma. Para que apareciese nuevamente este fenómeno, el material debería ser deformado en frío una vez más.



**Figura 2.2** Explicación del efecto de memoria de forma. (Fuente: [42])

### 2.1.2 EFECTO DE SUPERELASTICIDAD EN ALEACIONES



**Figura 2.3** Gráfica del fenómeno de superelasticidad. (Fuente: [42])

El efecto de superelasticidad en una aleación es una propiedad que se basa en un proceso termoelástico en el cual, al disminuir de manera gradual entre las temperaturas  $M_s$  y  $M_f$ , se produce un crecimiento ligero de las láminas de martensita existentes y la creación de algunas nuevas. Si por el contrario se aumenta la temperatura, estas láminas creadas desaparecen y otras disminuyen en tamaño.

Como se puede ver, en este proceso existe una relación inversamente proporcional entre la temperatura y la tensión, por lo que, si disminuye la temperatura, esto provocará un aumento en la tensión inducida en la martensita, que estabiliza el proceso.

Dado que la martensita es cristalográficamente reversible, este proceso también lo es. El fenómeno de superelasticidad puede ocurrir en ausencia de un estímulo mecánico externo, comenzando a una temperatura  $M_s$  y finalizando en  $M_f$ . Sin embargo, cuando se aplica una tensión externa, la martensita puede empezar a formarse a una temperatura superior a  $M_s$ , pasando a denominarse martensita inducida por tensión (SIM).

Si el material en fase martensítica es sometido a un ensayo de tracción, se puede observar que, a partir de un determinado valor de tensión, el material se estira prácticamente a tensión constante (entre los puntos 2 y 3 de la gráfica) hasta que es declamado. En ese momento, entra en una zona de deformación elástica (entre los puntos 4 y 5) hasta que se alcanza la zona plástica y finalmente se llega al punto de ruptura del material (punto 6).

La fuerza que origina el proceso es mecánica. Por encima de la temperatura  $M_s$ , es necesaria la aplicación de una mayor tensión para inducir la martensita, y este incremento es aproximadamente lineal con el aumento de la temperatura respecto a  $M_s$ . Sin embargo, hay una temperatura, denominada  $M_d$  (temperatura máxima de formación de martensita inducida por tensión), a partir de la cual la tensión requerida es mayor que la necesaria para producir desplazamientos en la estructura interna, impidiendo la formación de martensita. Por lo tanto, se concluye con que la martensita inducida por tensión se genera entre las temperaturas  $M_s$  y  $M_d$ .

### 2.1.3 TIPOS DE ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

Existen numerosas aleaciones con la capacidad de memoria de forma. En la siguiente tabla se muestran algunos ejemplos importantes:

Aleación	Composición	Rango de temperatura (°C)	Histéresis (°C)
Ag-Cd	44/49 at %Cd	de -190 a -50	15
Au-Cd	46,5/50 at % Cd	de 30 a 100	15
Cu-Al-Ni	14/14,5 at %Al; 3/4,5 wt% Ni	de -140 a 100	35
Cu-Sn	15 at % Sn	de -120 a 30	
Cu-Zn	38,5/41,5 wt % Zn	de -180 a -10	10
In-Ti	18/23 at % Ti	de 60 a 100	4
Ni-Al	36/38 at % Ti	de -180 a 100	10
Ni-Ti	49/51 at % Ni	de -50 a 110	30
Fe-Pt	25 at % Pt	-130	4
Mn-Cu	5/35 at % Cu	de -250 q 180	24
Fe-Mn-Si	32 wt%Mn; 6 wt% Si	de -200 a 150	100

**Tabla 2.1** Composición química y propiedades de algunas aleaciones SMA. (Fuente: [39])

Entre los ejemplos de aleaciones con memoria de forma se pueden destacar principalmente tres: las aleaciones de NiTi, conocidas como Nitinol, las aleaciones de NiTi-X (donde X es un elemento ternario) y las aleaciones de Cu-ZnAl. Actualmente, casi todas las aplicaciones nuevas de aleaciones SMA se basan en aleaciones de NiTi, NiTiNb y NiTiCu.

Estas aleaciones son ampliamente utilizadas gracias a su facilidad de fabricación y su capacidad de ajustar sus propiedades según las proporciones de los materiales empleados.

No obstante, existen otras aleaciones SMA que están siendo también investigadas (CuAlNi, FeMnSi, NiAl y NiTiZr), aunque presentan desafíos adicionales debido a su fragilidad o limitación en el rango de temperaturas de transformación. Otras aleaciones que se están estudiando son las basadas en platino, para aplicaciones a altas temperaturas en implantes in vivo. [45]

Como se ha comentado, el Nitinol es una de las aleaciones con memoria de forma más destacadas. Está compuesta por níquel y titanio en proporciones casi iguales y posee excelentes propiedades tanto eléctricas como mecánicas. Además, el Nitinol presenta todas las propiedades típicas en una SMA:

- **Transformación martensítica termoelástica:** puede cambiar de forma de manera reversible mediante la aplicación de calor, experimentando una transformación martensítica que le permite recuperar su forma original.
- **Memoria de forma simple:** tiene la capacidad de "recordar" y regresar a una forma predefinida tras ser deformado, siempre que sea activado mediante un estímulo externo, como el calor generalmente.
- **Memoria de forma doble:** además de una primera forma predefinida, puede tener una segunda forma y cambiar entre ambas con el estímulo adecuado.
- **Superelasticidad:** presenta una sorprendente capacidad de deformación elástica reversible, lo que permite que recupere su forma original incluso después de deformaciones considerables.
- **Pseudoelasticidad:** esta propiedad se refiere a la capacidad para soportar grandes deformaciones sin sufrir daños permanentes, volviendo a su forma original una vez que se elimina la carga aplicada.
- **Capacidad de amortiguamiento:** el Nitinol posee una gran capacidad de absorber y disipar energía.

#### 2.1.4 APLICACIONES DE LAS ALEACIONES CON MEMORIA DE FORMA

Las aleaciones con memoria de forma, como el Nitinol, ofrecen una gran variedad de aplicaciones en diferentes sectores: [46]

En odontología, se utilizan en los alambres para las ortodoncias (brackets), ya que pueden resistir numerosos reajustes sin perder sus propiedades.

En óptica, se ha usado el Nitinol en el desarrollo de marcos de gafas superelásticos, que pueden absorber grandes deformaciones sin romperse.

En medicina, gracias a la biocompatibilidad del Nitinol, este se emplea en la construcción de microbombas, para reemplazar funciones cardíacas y renales, además de en la colocación de stents para desobstruir arterias.

En la industria, se utilizan para la fabricación de uniones de tuberías, en las que la aleación con memoria de forma es utilizada para fijar de manera sólida las tuberías sin requerimiento de soldadura.

En ingeniería civil se investiga su uso como disipadores de energía en marcos de ventanas y en otras instalaciones de construcciones sismo-resistentes, además de la fabricación de barras de aleaciones con memoria de forma para armar vigas de hormigón, logrando una recuperación automática de la forma original si se producen grietas.

Por último, en el ámbito del arte, se plantea la posibilidad de utilizar aleaciones con memoria de forma con el fin de proteger las obras de arte contra vibraciones perjudiciales en los museos.



**Figura 2.4** Imagen de una aleación de Nitinol. (Fuente: [38])

## 2.2 POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA

Los polímeros con memoria de forma son un tipo de materiales SMM que tienen la capacidad de “recordar” y conservar una forma permanente, así como ser manipulados para adoptar una forma temporal que pueda ser fija en condiciones adecuadas. Después, mediante la aplicación de un estímulo (luz, calor, cambios de humedad, de pH...) se desencadena la transformación de la forma temporal de vuelta a la forma previamente memorizada. [47]

Esta propiedad permite a los polímeros con memoria de forma adaptarse y responder a estímulos específicos, lo que los convierte en materiales muy versátiles utilizados en diversas aplicaciones.

Los polímeros SMP ofrecen numerosos beneficios: poseen una elevada deformación elástica (permitiendo deformaciones reversibles mayores del 200%), tienen un coste reducido, una baja densidad y además presentan la posibilidad de biocompatibilidad y biodegradabilidad, lo que les confiere diversas aplicaciones en el sector de la salud.

### 2.2.1 EFECTO DE MEMORIA DE FORMA EN POLÍMEROS

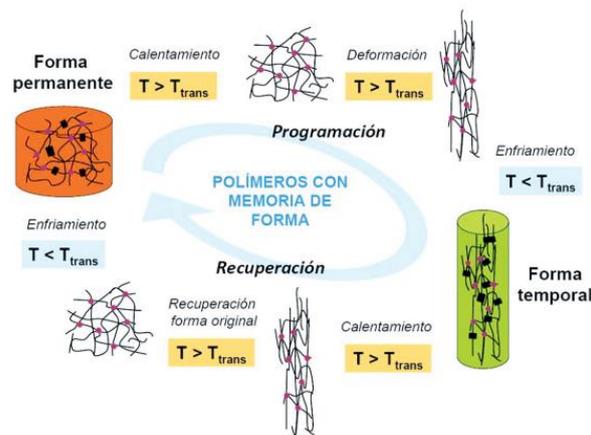
El Efecto de memoria en los polímeros requiere la existencia de una forma permanente y, al menos, una forma temporal reversible. Para lograr este fenómeno, se crean entrelazamientos (físicos o químicos) en el material, de tal manera que fijan la forma permanente y permiten a las cadenas de polímeros poseer cierta elasticidad. [48]

Por otra parte, es necesario tener una transición térmica reversible, como una transición vítrea ( $T_g$ ) o una cristalización ( $T_m$ ), para fijar la forma temporal, de forma que sea capaz de contrarrestar la fuerza elástica que intenta devolver al material a su forma original. Este proceso es conocido como “programación”.

El polímero es calentado por encima de su temperatura de transición ( $T_{trans}$ ), y posteriormente enfriado por debajo de la misma mientras se mantiene la deformación, lo que fija una forma temporal. Durante el proceso, se forman dominios de segmentos de cadena en el estado deformado, actuando como puntos de unión.

Al calentar de nuevo el polímero por encima de la  $T_{trans}$ , esos dominios desaparecen y se induce el efecto de memoria, permitiendo que el polímero recupere su forma original. La estabilidad de las formas se produce a temperaturas inferiores a  $T_{trans}$ , mientras que la recuperación de la forma original es a temperaturas superiores a  $T_{trans}$ .

Para cuantificar este efecto, se utilizan ciclos de memoria de forma y conceptos como la relación de fijeza ( $R_f$ ), que indica el porcentaje de deformación que el polímero es capaz de fijar en la forma temporal, y la relación de recuperación ( $R_r$ ), que caracteriza el porcentaje de recuperación de la forma permanente.



**Figura 2.5** Diagrama del efecto de memoria en un polímero. (Fuente: [47])

### 2.2.2 TIPOS DE POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA

Los polímeros con memoria de forma, al igual que el resto de “plásticos”, se pueden clasificar, según su estructura interna y su comportamiento frente a la temperatura, en tres grupos principales:

- **Polímeros termoplásticos con memoria de forma:** son aquellos que poseen la capacidad de cambiar de estado al ser sometidos a una fuente de calor y luego volver a su forma original al ser expuestos a una fuente de frío o una presión externa; lo que les confiere la posibilidad de ser reciclados y una gran versatilidad. Como ejemplos de estos polímeros se pueden mencionar el polietileno de ultra alta densidad (PEUHD), el poliéster termoplástico (TPE) y el polipropileno (PP). [49]

- **Polímeros termoestables con memoria de forma:** se trata de unos polímeros amorfos que están formados por una red tridimensional de macromoléculas que, a diferencia de los termoplásticos, no pueden ser moldeados repetidamente mediante cambios de temperatura. Mantienen una forma fija incluso después de haber sido deformados, con la capacidad de volver a su forma original de nuevo a través de la reticulación química de las cadenas poliméricas. Como ejemplos de estos polímeros se pueden mencionar la resina epoxi o las poliimidas.
- **Polímeros elastómeros con memoria de forma:** se trata de materiales amorfos, formados por macromoléculas lineales unidas entre sí por algunos puentes entre sus cadenas. Poseen la capacidad de deformarse de manera reversible y volver a su forma original en ausencia de tensiones externas. Como ejemplos de estos polímeros se pueden destacar los elastómeros de poliéter amida.

### 2.2.3 APLICACIONES DE LOS POLÍMEROS CON MEMORIA DE FORMA

Los polímeros con memoria de forma presentan diversas aplicaciones en diferentes campos: [50],[51],[52]

En la industria textil, son utilizados en el diseño de ropa deportiva para permitir impermeabilidad frente a la humedad.

En ingeniería, se emplean como artículos estructurales combinándolos con adhesivos, piezas de aeronáutica, células solares o ensamblajes de piezas de automóviles.

En el sector biomédico, se utilizan en la creación de actuadores, catéteres, productos de ortodoncia y suturas biodegradables, donde ayudan a reducir los riesgos asociados con la cirugía.

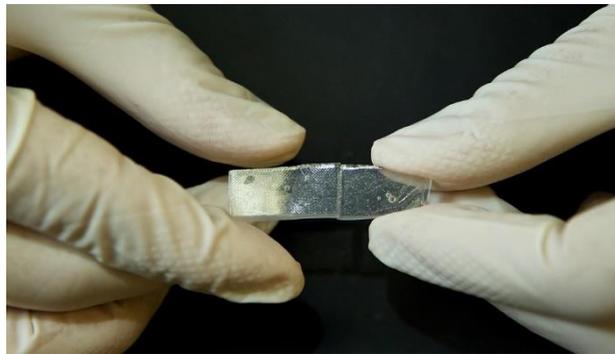
Además, son utilizados en la fabricación de juguetes, sensores, empaquetamientos, tuberías, ruedas... así como en aplicaciones espaciales.

Una de las aplicaciones potenciales de los polímeros con memoria de forma, gracias a su capacidad para reparar daños o grietas de forma automática, es la fabricación de un material autorreparable. Este polímero está compuesto por microcápsulas que contienen

un material “curativo” y tiene la propiedad de que, cuando recibe daño, las cápsulas se rompen liberando ese material curativo y, mediante una reacción de polimerización, se repara el daño ocasionado.

Otro enfoque que se ha dado es utilizar las propiedades del propio polímero. Para ello, se ha experimentado con enlaces iónicos o de puentes de hidrógeno, los cuales se debilitan cuando son sometidos a un estímulo externo, permitiendo la formación de nuevos enlaces y cerrando el daño.

Los polímeros con memoria de forma se utilizan para favorecer la autorreparación, en lo que se denomina auto reparación asistida por memoria de forma (SMASH). La combinación de estas propiedades permite que las partes separadas debido a la grieta vuelvan a unirse. Los SMASH son materiales prometedores y presentan diversas aplicaciones, como revestimientos protectores contra la corrosión y la reparación de materiales en diversos sectores industriales.



**Figura 2.6** Imagen de polímero autorreparable. (Fuente: [51])

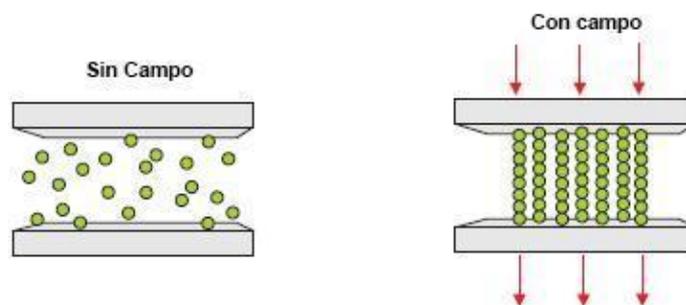
Página dejada intencionadamente en  
blanco

### 3. Materiales magnetorreológicos

Los materiales magnetorreológicos son un tipo de materiales inteligentes que tienen la capacidad de modificar sus propiedades reológicas, de forma rápida y reversible, en respuesta a la aplicación de un campo magnético externo. Se trata de materiales compuestos por partículas micrométricas (entre 3 y 5 micras) magnetizables que se encuentran suspendidas en un líquido portador no magnético, como aceite o queroseno, o en un sólido portador de matriz no magnética, como polímeros elastómeros. [53],[54]

Los materiales magnetorreológicos presentan lo que se conoce como efecto magnetorreológico, el cual se refiere a su capacidad de cambiar sus propiedades físicas en presencia de un campo magnético externo. En ausencia de un campo de magnético externo, las partículas están dispersas en el medio portador, lo que confiere al material la capacidad de fluir y deformarse. Sin embargo, cuando se aplica un campo magnético, se produce una polarización inducida de las partículas suspendidas, provocando que se estas se reorienten y alineen formando estructuras similares a cadenas. Al modificar la estructura interna del material se genera un aumento en la viscosidad y rigidez del material, lo que dificulta su capacidad de deformación y de fluidez.

Las propiedades físicas (reológicas) de los materiales magnetorreológicos pueden controlarse y ajustarse mediante la variación de la intensidad del campo magnético aplicado. Gracias a ello, se puede conseguir un control preciso sobre sus propiedades y su respuesta mecánica en tiempo real.



**Figura 3.1** Esquema del funcionamiento del efecto magnetorreológico. (Fuente: [56])

Principalmente existen dos tipos de materiales magnetorreológicos: los fluidos magnetorreológicos y los elastómeros magnetorreológicos. [55],[56]

Las diferencias fundamentales entre ambos son su composición y el efecto que tiene el fenómeno magnetorreológico en ellos: los fluidos están formados por un líquido que contiene partículas magnéticas en suspensión, las cuales, en presencia de un campo magnético externo, provocan cambios en propiedades reológicas como la viscosidad y la rigidez. Los elastómeros son materiales compuestos que combinan una matriz de polímero elastómero (como el caucho) con partículas magnéticas y aditivos. El efecto que se produce en ellos cuando se les aplica un campo magnético es un cambio en su rigidez y en sus propiedades mecánicas, como la elasticidad y la deformación. [57]

A continuación, se procederá a explicar más detalladamente los fluidos y elastómeros magnetorreológicos y sus aplicaciones.

### **3.1 FLUIDOS MAGNETORREOLÓGICOS**

Los fluidos magnetorreológicos fueron los primeros materiales en ser desarrollados dentro de la categoría de materiales sensibles a campos magnéticos. [58]

Estos fluidos están compuestos por partículas magnéticas suspendidas en un líquido no magnético, como aceite o queroseno, que presentan un comportamiento especial como respuesta a la aplicación de un campo magnético externo. Tienen la capacidad de reorganizarse provocando un cambio casi instantáneo (de 1 a 10 milisegundos) de un estado líquido a uno semisólido.

En ausencia de un campo magnético, el fluido magnetorreológico se comporta como un líquido newtoniano, es decir, que su viscosidad se mantiene constante. Sin embargo, cuando se aplica un campo magnético, esto provoca que las partículas de su estructura interna se alineen en la dirección de las líneas del campo, creando una estructura en forma de cadena. Debido a estos, se produce un aumento en la viscosidad y rigidez del fluido y el paso a un estado semisólido. La intensidad del campo magnético aplicado será la que determine el grado de orden de las partículas.



**Figura 3.2** Efecto magnetorreológico en un fluido MR. (Fuente: [57])

Los fluidos magnetorreológicos presentan dos ventajas significativas: proporcionan una respuesta rápida y reversible ante un campo magnético y permiten el control y ajuste de sus propiedades físicas. [59]

No obstante, también presentan algunos inconvenientes: puede aparecer una sedimentación de las partículas, ya que las partículas y el fluido portador pueden tener diferentes densidades. Esto afecta a la larga en su estabilidad, por lo que se han propuesto métodos para resolver este problema.

- La primera solución incluye la reducción del tamaño de las partículas magnéticas al orden de nanómetros, debido a que muestran una mayor estabilidad debido al movimiento browniano (movimiento aleatorio de partículas) y a la fuerza de Van der Waals (atracciones débiles entre las partículas debidas a fluctuaciones en la distribución de carga eléctrica).
- Otra estrategia consiste en el uso de partículas con estructura de concha central la cual, al modificar su superficie con una capa de polímero, logra disminuir la densidad de las partículas y aumentar su repulsión eléctrica, mejorando la estabilidad y redispersibilidad del fluido.
- Una última solución es la adición de partículas ferromagnéticas nanométricas en el fluido magnetorreológico. Con ello se consigue proporcionar estabilidad adicional, además de mejorar su rendimiento y minimizar la sedimentación de las partículas.

Gracias a la capacidad que tienen los fluidos magnetorreológicos de cambiar su comportamiento de líquido a casi sólido de forma rápida y reversible, estos son muy utilizados en numerosas aplicaciones, aunque principalmente en el diseño de amortiguadores y sistemas de frenado, además de en medicina. [60],[61]

- **Amortiguadores magnetorreológicos:** los fluidos MR son usados en el diseño de amortiguadores porque proporcionan un control ajustable de la viscosidad, y por lo tanto de la amortiguación, permitiendo un mejor control de la estabilidad. Un ejemplo es el sistema de amortiguación de automóviles “MagneRide”, el cual se estimula para adaptarse a las condiciones cambiantes de la carretera.
- **Sistemas de frenado:** se emplean fluidos MR en sistemas de frenado debido a que, al poder ajustar la viscosidad del fluido, se puede conseguir un mayor y más eficiente control del frenado. Destaca la aplicación en frenos de bicicletas estáticas.
- **Medicina:** los fluidos MR se utilizan en prótesis de rodilla como sistemas de control para ajustar la resistencia y amortiguación, con el fin de mejorar la funcionalidad y comodidad de la prótesis y conseguir una adaptación más precisa a las necesidades del paciente.

### 3.2 ELASTÓMEROS MAGNETORREOLÓGICOS

Los elastómeros magnetorreológicos son materiales que combinan una matriz de polímero elastómero (generalmente un compuesto de caucho) con partículas magnéticas y aditivos. Estos materiales tienen la capacidad de modificar su rigidez y propiedades mecánicas como respuesta a la aplicación de un campo magnético. Una de las propiedades más afectadas es el módulo elástico del elastómero. [62]

En ausencia de un campo magnético, los elastómeros magnetorreológicos se comportan como cualquier otro polímero elastómero, con sus típicas características en elasticidad y deformación. Sin embargo, cuando se aplica un campo magnético, las partículas magnéticas se alinean, provocando un cambio en la rigidez y la respuesta mecánica del material. Debido a esto, es posible controlar y ajustar las propiedades elásticas del

elastómero a través de la variación de la intensidad del campo magnético aplicado. Cuando el campo es retirado, los elastómeros recuperan su estado original.

Observando el efecto magnetorreológico en los elastómeros, se puede llegar a la conclusión de que estos pueden considerarse un análogo de los fluidos magnetorreológicos. Sin embargo, presentan ciertas diferencias:

- Los elastómeros MR están diseñados para trabajar por debajo del límite elástico del material, a diferencia de los fluidos MR, que pueden operar por encima del mismo. Esto es debido a que en los fluidos la intensidad del campo magnético influye en el límite de fluencia en contraste con los elastómeros, en los que afecta al límite de elasticidad.
- Los fluidos MR se pueden preparar y utilizar sin un procesamiento adicional necesario. Por el contrario, los elastómeros MR requieren a menudo diferentes procesos (mezcla, moldeo y curado) para formar la matriz elastómera con las partículas magnéticas y los aditivos.

En cuanto a las aplicaciones de los elastómeros magnetorreológicos, se puede concluir con que principalmente son utilizados en amortiguadores y aislantes de vibraciones, además de en robótica: [63]

- **Amortiguadores de vibraciones:** los elastómeros MR son usados en amortiguadores con el objetivo de controlar y reducir las vibraciones no deseadas. Gracias a que ofrecen una respuesta rápida y precisa, son perfectos para minimizar las vibraciones de las máquinas y sistemas industriales, mejorando la seguridad, el rendimiento y la durabilidad.
- **Aislantes de vibraciones:** los elastómeros MR también son utilizados como aislantes de vibraciones entre las máquinas industriales y las estructuras. Al permitir aumentar la rigidez, se puede disminuir la transferencia de vibraciones no deseadas, proporcionando un aislamiento efectivo.

- **Robótica:** los elastómeros MR se emplean en la fabricación de sensores (de fuerza y de presión principalmente), actuadores flexibles (para un control preciso y ajustable del movimiento de robots) y sistemas de agarre y manipulación (para controlar los dedos en diferentes formas de agarre).



**Figura 3.3** Prototipo fabricado de aislante de vibraciones basado en elastómeros MR.

(Fuente: [62])

## 4. Materiales cromosactivos

Los materiales cromosactivos son un tipo de materiales inteligentes que tienen la capacidad de responder a un estímulo externo cambiando sus propiedades ópticas, de tal forma que modifican su apariencia de forma significativa, es decir, cambian su color. [64],[65]

Estos materiales poseen propiedades ópticas únicas que les permiten alterar su apariencia de forma reversible. En función del estímulo que causa esta transformación, se pueden clasificar los distintos tipos de materiales cromosactivos que existen. Los más comunes son los termocrómicos, los fotocromos, y los electrocromos, aunque existen muchos otros; sin embargo, estos no se encuentran al mismo nivel de desarrollo que los citados. [66]

A continuación, se muestra una tabla referente a numerosos tipos de materiales cromosactivos existentes y el estímulo al que responden:

TIPO	ESTÍMULO	TIPO	ESTÍMULO
Termocrómico	Temperatura	Magnetocrómico	Campo magnético
Fotocrómico	Luz	Gasocrómico	Gas - redox/oxígeno
Electocrómico	Corriente eléctrica	Catodocrómico	Irradiación de un haz de electrones
Hidrocromico	Agua	Mecanocrómico	Acciones mecánicas
Halocrómico	Cambio de PH	Tribocrómico	Fricción mecánica
Piezocrómico	Presión	Radiocrómico	Radiación ionizada
Ionocrómico	Iones	Biocrómico	Interconexión con ser biológico
Solvatocrómico	Solventes	Cronocrómico	Paso del tiempo

**Tabla 4.1** Tipos de materiales cromosactivos y sus estímulos. (Fuente: [68])

En los siguientes apartados serán desarrollados los principales tipos de materiales cromosactivos, además de sus aplicaciones actuales:

### 4.1 MATERIALES TERMOCRÓMICOS

Los materiales termocrómicos son aquellos que poseen la capacidad de cambiar de color de manera reversible debido a un cambio en la temperatura. Estos materiales, normalmente de naturaleza semiconductor, cambian de aspecto en función de una

temperatura, denominada temperatura de transición. Permiten elegir el color y rango de temperaturas, lo que da lugar a un amplio abanico de aplicaciones y diseños. [67]

Cuando un material termocrómico se encuentra a una temperatura inferior a la de transición, este se muestra con un color determinado. Sin embargo, cuando se supera ese punto de transición, el material comienza a experimentar una decoloración que se mantendrá hasta que la temperatura baje y sea de nuevo inferior que la de transición, lo que quiere decir que es un proceso reversible.

Este comportamiento tiene notables implicaciones en términos de absorción solar. En condiciones de frío, el material presenta una alta capacidad de absorción de radiación solar, lo que genera un aumento de la temperatura superficial. Por otro lado, en condiciones cálidas, el material muestra una gran capacidad de reflexión de la radiación solar, evitando con ello un aumento de la temperatura superficial. [69]

Los materiales termocrómicos se pueden clasificar en función del proceso que sufren para cambiar de color, distinguiendo los siguientes:

- **Basados en la reflexión de luz:** cambian de color debido a la modificación de su estructura interna o de su superficie en respuesta a un cambio de la temperatura. Estos cambios afectan en la forma en que la luz se refleja en el material, lo que da lugar a un cambio de color.
- **Basados en la absorción de luz:** como respuesta a un cambio de la temperatura, se provoca una alteración en la absorción de la luz. Los enlaces químicos de la estructura interna del material se modifican a medida que varía la temperatura, resultando en un cambio de color del material.
- **Basados en la dispersión de luz:** cambian de color debido a variaciones en la forma en que dispersan la luz en respuesta a un cambio de temperatura. Su estructura interna es alterada con la temperatura, repercutiendo en la forma en que se propagan las ondas de luz, y con ello, el color percibido.

En función de las propiedades y aplicaciones de los materiales termocrómicos, estos se pueden clasificar en diferentes tipos:

- **Pigmentos termocrómicos:** son polvos finos, formados por componentes químicos sensibles a la temperatura, que cambian de color a medida que aumenta la temperatura. Se pueden mezclar con pinturas, tintas o polímeros para obtener recubrimientos. Empiezan con un intenso color, que poco a poco va desapareciendo cuando son calentados. En el momento que se enfrían, recuperan su color original. [70]
- **Cristales líquidos termocrómicos:** son compuestos orgánicos que presentan cambios de color como respuesta a la variación de la temperatura. Algunos cristales son capaces de mostrar diferentes colores a distintas temperaturas. Se utilizan a menudo en dispositivos como termómetros o indicadores de propano en los tanques. Una de las aplicaciones populares de estos materiales son los anillos de estado de ánimo. [74]
- **Tintas termocrómicas:** son compuestos, formados también por pigmentos termocrómicos, con la capacidad de cambiar de color en función de la temperatura. Son muy utilizadas en impresión, ya que permiten crear diseños e imágenes que varían su color al aplicarles calor. Un ejemplo especial de este grupo los tintes Leuco, que solo pueden variar su apariencia entre dos formas químicas, una de las cuales es incolora.
- **Pinturas termocrómicas:** son pinturas, compuestas por pigmentos termocrómicos, que permiten cambiar el color de la superficie del material que recubren al variar la temperatura. Se usan con bastante frecuencia en aplicaciones artísticas (como tazas de café o juguetes) además de en señalización vial. [71]
- **Láminas termocrómicas:** son películas delgadas, formadas por materiales termocrómicos, que pueden cambiar de color cuando son expuestas al calor. Son utilizadas en etiquetas de seguridad y también como aprendizaje y entretenimiento para niños, ya que les permite mejorar su estimulación sensorial, además de su creatividad y expresión artística. [72]
- **Polímeros termocrómicos:** son plásticos, que contienen aditivos termocrómicos en su composición, que son capaces de cambiar de color al calentarse, y luego volver a su color original al enfriarse. Estos polímeros son ampliamente

utilizados en juguetes, revestimientos y elementos de diseño. Otra aplicación se encuentra en el uso de polímeros termocrómicos para la protección solar adaptativa de edificios.

En cuanto a las aplicaciones de los materiales termocrómicos, se pueden citar las siguientes: en el sector de la salud, son utilizados en etiquetas de control de temperaturas y en cadenas de frío; en la industria textil se emplean para el diseño de ropa (camisetas y sudaderas principalmente) que cambian de color gracias al uso de tintas termocrómicas; en estética, se utilizan para crear pintauñas termocrómicas; en el sector del hogar son empleados en el diseño de sartenes, tazas y otros envases. Por último, en arquitectura, han sido usados en revestimientos termocrómicos, que tienen el objetivo de mejorar la eficiencia energética de los edificios. [73],[75],[76],[77]



**Figura 4.1** Aplicación de materiales termocrómicos en tazas. (Fuente: [76])

## 4.2 MATERIALES FOTOCRÓMICOS

Los materiales fotocromáticos son aquellos que tienen la capacidad de cambiar su color de forma reversible cuando son expuestos a radiación electromagnética, como luz visible o radiación ultravioleta (UV). El nivel de transformación que sufren depende de la intensidad de luz incidente; es por ello por lo que no se pueden ver en la oscuridad. Si la luz incide sobre estos materiales, cambian de transparentes a coloridos; en el momento que la luz deja de incidir en ellos, revierten a transparentes. [78]

Estos materiales están formados por moléculas que son capaces de cambiar su estructura química, y por tanto su color, cuando son expuestos a la radiación electromagnética

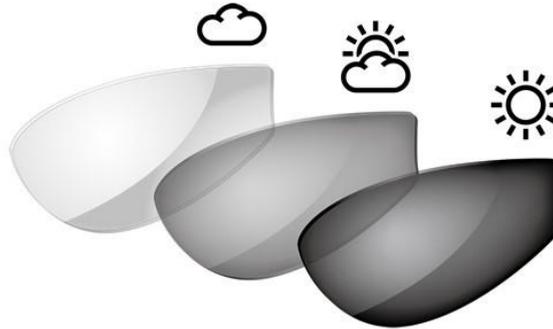
adecuada. Cuando incide la luz sobre ellos se provoca una excitación de los electrones en su estructura molecular, lo que da lugar a cambios en los enlaces químicos y una reorganización de sus moléculas. Debido a esto se produce una alteración en las propiedades ópticas del material, es decir, un cambio de color. Una vez la radiación es apartada del material, este vuelve a su estado original de manera gradual.

El fotocromismo es un fenómeno que puede aparecer por diferentes mecanismos. Se pueden distinguir tres tipos de mecanismos: [79],[80]

- **Fotocromismo basado en la isomería cis-trans de dobles enlaces:** este caso implica la presencia de compuestos con enlaces dobles en su estructura molecular. Estos compuestos pueden adoptar dos configuraciones: cis (con los grupos en el mismo lado) y trans (con los grupos en lados opuestos). Cuando son expuestos a la luz, los enlaces pueden cambiar de una configuración a otra, provocando un cambio en el color del material. [81]
- **Fotocromismo basado en reacciones de cicloadición:** este caso implica la presencia de compuestos que pueden experimentar una reacción química de cicloadición cuando son expuestos a la luz. La radiación produce la formación de nuevos enlaces químicos dentro del compuesto, lo que da lugar a una alteración de su estructura molecular y de las propiedades ópticas del material, es decir, de su color. [82]
- **Fotocromismo basado en reacciones electrocíclicas:** este caso implica la presencia de compuestos que pueden experimentar reacciones electrocíclicas, que son variaciones en su estructura molecular cuando son expuestos a la luz. Esta radiación lumínica provoca que los electrones se redistribuyan dentro del material, lo que produce cambios en las propiedades ópticas y el color del material. [83]

Los materiales fotocromáticos son ampliamente utilizados en numerosas aplicaciones. Entre estas se pueden destacar las siguientes: se han empleado en la química supramolecular, en el diseño de interruptores moleculares capaces de controlar las reversibilidades de las reacciones moleculares; se usan en la fabricación de lentes fotocromáticas para gafas de sol,

aunque presentan la limitación de que son inestables en periodos largos de exposición a la luz solar; en la industria electrónica son utilizados para almacenamiento de datos, con investigaciones de discos duros con capacidad de varios terabytes; y también son usados en la industria de los juguetes o la cosmética, con investigaciones sobre los colores en compuestos como pigmentos. [84]



**Figura 4.2** Aplicación de materiales fotocromáticos en gafas deportivas. (Fuente: [84])

### 4.3 MATERIALES ELECTROCRÓMICOS

Los materiales electrocrómicos son aquellos que poseen la capacidad de cambiar su color en respuesta de manera reversible a un cambio en su estado de oxidación por la aplicación de una diferencia de potencial externa. Esta corriente eléctrica induce en ellos una reacción redox (reducción-oxidación) que modifican las longitudes de onda en las que el material puede interactuar con la luz, dando como resultado un cambio de color en el material, volviéndose menos transmisor. [85],[86]

Existen diferentes tipos de materiales electrocrómicos, tanto inorgánicos como orgánicos. En el caso de materiales inorgánicos, destacan los óxidos de metales de transición y los complejos inorgánicos ya que presentan propiedades electrocrómicas muy interesantes. Por otro lado, dentro de materiales orgánicos, se pueden resaltar los polímeros conductores, cuyas propiedades electrocrómicas han logrado que sean utilizados en numerosas aplicaciones. [87]

Los materiales electrocrómicos son utilizados en diversas aplicaciones: en automoción se emplean en la fabricación de espejos retrovisores antideslumbrantes, que ajustan la cantidad de luz que reflejan para no cegar al conductor; en ingeniería civil se utilizan en el diseño de unas “ventanas inteligentes” que pueden cambiar su transparencia. Esto ofrece una mayor privacidad, control de la luz y confort visual. Además, estas ventanas pueden servir como pantallas para visualizar información. Por último, los materiales electrocrómicos también son empleados en dispositivos como filtros de cámaras fotográficas y de vídeo, pantallas de grandes dimensiones o gafas de sol. [88],[89]



**Figura 4.3** Aplicación de material electrocrómico en ventanas inteligentes. (Fuente: [89])

Página dejada intencionadamente en  
blanco

## 5. Materiales fotoactivos

Los materiales fotoactivos son un tipo de materiales inteligentes que tienen la capacidad de interactuar con la luz en respuesta a su presencia. Debido a las increíbles propiedades lumínicas que poseen, al poder absorber, emitir o generar cambios cuando incide sobre ellos una corriente electromagnética, los materiales fotoactivos son muy utilizados en numerosas aplicaciones.

Estos materiales pueden clasificarse principalmente en tres grupos: electroluminiscentes, fluorescentes y fosforescentes. A continuación, se procederá a explicar cada uno de estos.

### 5.1 MATERIALES ELECTROLUMINISCENTES

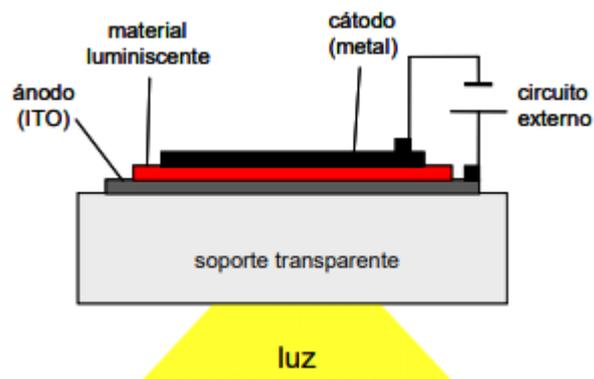
Los materiales electroluminiscentes son aquellos que tienen la capacidad de emitir luz cuando son estimulados por una corriente eléctrica o a un campo eléctrico lo suficientemente fuerte. Se trata de materiales semiconductores que están compuestos fundamentalmente por una determinada cantidad de fósforos y fluorocarbonos y son capaces de transformar la energía eléctrica en luz.

La electroluminiscencia es un fenómeno que se basa a grandes rasgos en la excitación de electrones dentro del material y su posterior liberación de energía en forma de fotones de luz. Generalmente, los materiales electroluminiscentes están formados por dos electrodos (un ánodo y un cátodo) y una película de material electroluminiscente situada entre ambos electrodos. El soporte en el que van montados los electrodos y la película electroluminiscente es transparente para permitir la salida de la luz. [90],[91],[92]

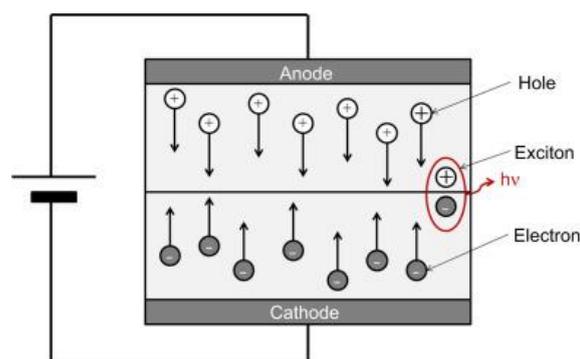
En el momento en que el material es estimulado por una corriente eléctrica, el cátodo inyecta electrones a la película, al mismo tiempo que el ánodo extrae electrones de niveles de energía inferiores, creando "huecos". Cuando un electrón y un hueco se encuentran, se recombinan dando lugar a un excitón, el cual al desactivarse (descender de nivel energético) libera energía en forma de un fotón, provocando con ello que el material emita una luz. [93],[94]

Esta luz emitida suele ser monocromática. En función de la energía que posee el fotón y del material utilizado, esta luz podrá emitir en diferentes colores.

A diferencia de otros fenómenos luminosos como la incandescencia (emisión de luz debida a la temperatura), la mecanoluminiscencia (emisión de luz debida a una acción mecánica), la quimioluminiscencia (emisión de luz debida a una reacción química) o la sonoluminiscencia (emisión de luz debida al sonido), en los cuales la conversión de la luz se genera calor como subproducto, la electroluminiscencia destaca por transformar directamente la energía eléctrica en luz sin producir calor.



**Figura 5.1** Estructura general de un material electroluminiscente. (Fuente: [93])



**Figura 5.2** Funcionamiento del fenómeno electroluminiscente. (Fuente: [90])

Los materiales electroluminiscentes presentan una serie de ventajas: no requieren un consumo elevado de corriente eléctrica, pueden emitir luz de manera omnidireccional, tienen una vida útil muy larga (de hasta cincuenta mil horas), funcionan en un amplio rango

de temperaturas (desde  $-60^{\circ}\text{C}$  hasta  $90^{\circ}\text{C}$ ), pueden usarse en exteriores y además se regulan a sí mismos, por lo que no es necesario un sistema de control sobre ellos.

Por otro lado, como desventajas de estos materiales se pueden mencionar los siguientes: requieren un alto voltaje para funcionar (desde 60 V hasta 600 V), la cantidad de luz emitida es limitada, no presentan una gran gama de colores de luz y además poseen una eficiencia reducida (desde 2 a 6 lúmenes por vatio).

En cuanto a las aplicaciones de los materiales electroluminiscentes se puede afirmar que estos son muy utilizados gracias a sus propiedades ópticas. Además, gracias a que pueden adquirir cualquier forma (cables, tiras o incluso formas casi en 2D), se van incorporando en nuevos sectores, como en joyería, juguetes o accesorios de moda. [95],[96],[97]

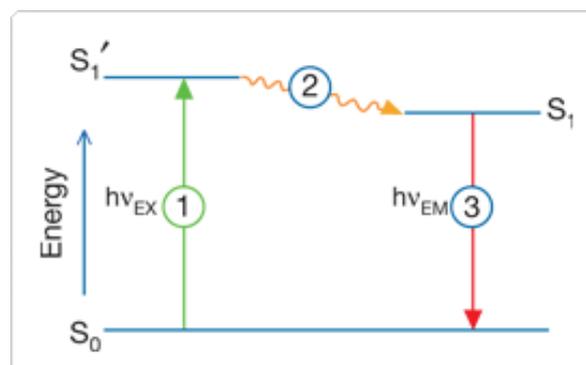
En la industria automovilística se usan principalmente en los cuadros de mandos de los automóviles, ya que ofrecen una iluminación uniforme y de alta visibilidad, incluso en condiciones de poca luz. En la industria de la iluminación se emplean para crear pantallas de cristal líquido (LCD), que posibilitan una mejora en la visibilidad y contraste de la imagen. Asimismo, ofrecen una iluminación eficiente y de alta calidad que permite ajustarse en términos de brillo y color, logrando así una amplia variedad de opciones de personalización de las pantallas LCD. Además, ya que los materiales electroluminiscentes son finos y flexibles, son ideales para su integración en pantallas LCD de dispositivos pequeños y portátiles, como teléfonos móviles, tablets y ordenadores. Por último, los materiales electroluminiscentes también son muy usados en señalización y cartelería, tomando parte en la composición de letreros y señales luminosas.

## 5.2 MATERIALES FLUORESCENTES

Los materiales fluorescentes son aquellos que poseen la capacidad de absorber la energía de la luz exterior y después emitirla en forma de luz visible. Se trata de materiales semiconductores, tanto artificiales como naturales, que presentan una propiedad denominada fluorescencia, que les permite absorber energía lumínica externa y reemitirla en forma de luz visible de mayor longitud de onda, generando un brillo característico en la oscuridad. [98],[99]

La fluorescencia es un fenómeno óptico que tiene lugar en un tipo de moléculas determinadas, llamadas fluoróforos, las cuales suelen hidrocarburos poliaromáticos o compuestos heterocíclicos. Este proceso consta de tres etapas: [100],[101]

- **Etapa 1 – Excitación:** en la primera fase el fluoróforo absorbe un fotón de la fuente lumínica externa, creando con ello un estado de singlete excitado ( $S_1'$ ).
- **Etapa 2 - Tiempo de vida del estado excitado:** durante un tiempo limitado (generalmente de 1 a 10 nanosegundos), el fluoróforo se mantiene excitado, experimentando alteraciones en su estructura interna. En ese momento, parte de la energía del estado excitado se disipa, generando un estado de singlete relajado ( $S_1$ ) que emite fluorescencia. Sin embargo, no todas las moléculas excitadas regresan al estado basal ( $S_0$ ) mediante fluorescencia, ya que pueden ocurrir otros procesos como enfriamiento por colisión, transferencia de energía por resonancia de fluorescencia (FRET) o cruce entre sistemas.
- **Etapa 3 - Emisión de fluorescencia:** en la tercera fase se emite un fotón que devuelve el fluoróforo a su estado basal. Este fotón emitido es de una mayor longitud de onda que la del fotón excitado, es decir, menos energético, debido a la disipación de energía durante la segunda etapa. Esta diferencia de energía o longitud de onda, denominada como desplazamiento de Stokes, es de gran importancia en las técnicas de fluorescencia, ya que permite detectar los fotones de emisión separados de los fotones de excitación.



**Figura 5.3** Diagrama de Jablonski que ilustra las etapas y procesos en la creación de un estado de singlete excitado mediante absorción óptica y posterior emisión de fluorescencia. (Fuente: [99])

La fluorescencia es un proceso cíclico en el que, a menos que el fluoróforo sea destruido de manera irreversible (lo que se conoce como fotoblanqueo), puede volver a ser excitado y detectado sucesivamente. Este fenómeno posibilita que un solo fluoróforo genere multitud de fotones detectables, lo cual es crucial para la alta sensibilidad de las técnicas de detección por fluorescencia. [102],[103]

Los materiales fluorescentes se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones: en la industria de la iluminación, están presentes en las lámparas fluorescentes de casas y oficinas; en la industria química son empleados en numerosas técnicas de detección en los laboratorios; otra aplicación se encuentra en la detección de billetes falsos, ya que los verdaderos están impresos con tintas fluorescentes. Además, debido a que ofrecen una gran gama de colores y pueden ser diseñados para emitir luz en diferentes longitudes de onda, son muy utilizados en la fabricación de pinturas y tintes fluorescentes, e incluso en señales de tráfico y de seguridad. [104],[105]

Por último, se han de destacar dos materiales, uno llamado “SMILES”, que se trata del material fluorescente más brillante que existe, y otro que son los “fosfoles”, descubiertos este año, que son compuestos a base de fósforo con unas propiedades ópticas increíbles.

### **5.3 MATERIALES FOSFORESCENTES**

Los materiales fosforescentes son aquellos que presentan la capacidad de absorber y almacenar energía lumínica de una fuente externa y después emitirla en forma de luz visible de forma prolongada cuando la fuente ha sido eliminada. Se trata de materiales semiconductores que pueden experimentar el fenómeno de fluorescencia, pero, a diferencia de en los materiales fluorescentes, en estos existe un retraso temporal entre la absorción y la emisión de los fotones de luz. [106],[107]

Esto provoca que los materiales fosforescentes continúen emitiendo luz después de que la fuente incidente sea desconectada, ya que la energía absorbida es liberada de una forma lenta y continuada. Esta emisión de luz puede tener una duración de varios minutos u horas, e incluso días. [108]

Como ya se ha mencionado, el proceso de emisión de luz es muy parecido al de los fluorescentes; sin embargo, existen una diferencia importante. En la fosforescencia cuando un fluoróforo es excitado, sus moléculas adquieren el mismo spin que las del nivel energético inferior. Debido a esto no genera un estado de singlete, sino que da lugar a un estado de triplete. Como consecuencia, se produce un retraso en el regreso de las moléculas excitadas a su estado basal, lo que posibilita al fluoróforo seguir emitiendo fotones aun cuando la fuente de luz incidente esté apagada. [109],[110],[111]

Esta diferencia en la velocidad de emisión de luz es la razón por la cual la fluorescencia es instantánea, mientras que la fosforescencia es un proceso más prolongado.



**Figura 5.4** Representación esquemática del fenómeno de fosforescencia. (Fuente: [109])

Gracias a sus propiedades ópticas, los materiales inteligentes son muy utilizados en una gran variedad de aplicaciones. Se ha de destacar la willemita (de color verdoso), que es uno de los materiales fosforescente más usados. En la industria electrónica, se emplean en la creación de pantallas, como las de los móviles o las televisiones, y de relojes, que permiten leer la hora en la oscuridad. En referencia a la seguridad vial son utilizados para fabricar de señales de tráfico y captáforos reflectantes, además de en el diseño de chalecos reflectantes. Otro uso reciente es en la fabricación del denominado cemento fosforescente, que ayudará en condiciones de baja visibilidad. [112],[113],[114]

Además de su utilidad práctica, los materiales fosforescentes, debido a su capacidad para producir diferentes colores y efectos luminosos únicos, están empezando a ser usados en obras de arte, a modo de pinturas o cerámicas fosforescentes.



**Figura 5.5** Obra de arte a base de materiales fosforescentes. (Fuente: [114])

Página dejada intencionadamente en  
blanco

## 6. Otros materiales inteligentes

Además de los materiales inteligentes previamente explicados, existen otros que, aunque no son tan utilizados o no tienen tantas aplicaciones, también se consideran como otros tipos de materiales inteligentes ya que poseen una capacidad de respuesta frente a determinados estímulos específicos.

En esta categoría se procederá a explicar de forma breve tres de estos otros tipos de materiales inteligentes, aunque probablemente aún haya más tipos que los citados:

### 6.1 MATERIALES PIROELÉCTRICOS

Los materiales piroeléctricos son aquellos que tienen la capacidad de generar una carga eléctrica cuando son sometidos a cambios de temperatura, es decir, cuando se calientan o se enfrían. Aunque se ha logrado diseñar materiales piroeléctricos artificiales, es en determinados cristales donde se produce más este efecto. Es importante destacar que todos los piroeléctricos son también piezoeléctricos, por lo que pueden generar una diferencia de potencial ante el estímulo de una fuerza mecánica; sin embargo, no todos los piezoeléctricos presentan propiedades piroeléctricas. [115],[116]

Los piroeléctricos poseen esta cualidad gracias a su estructura interna cristalina única. Estos cristales están polarizados eléctricamente y, cuando se les somete a variaciones de temperatura, los átomos de su estructura cristalina modifican ligeramente su posición, resultando en un cambio de la polarización del material. Dicho cambio de polarización es que genera un voltaje a través del cristal. [117]

Si la nueva temperatura se mantiene constante, entonces la tensión piroeléctrica desaparece de manera gradual a causa de la corriente de fuga, debida al movimiento de electrones a través del cristal, de iones a través del aire o corriente que es filtrada por un voltímetro conectado a través del cristal.

Como ejemplos de piroeléctricos se pueden señalar la turmalina, que fue el primer material en el que se registró el efecto piroeléctrico, el nitruro de galio (GaN), el nitrato de cesio ( $\text{CsNO}_3$ ), el tantalato de litio ( $\text{LiTaO}_3$ ), así como fluoruros de polivinilo y derivados de la fenilpiridina y ftalocianina de cobalto. [118]

Debido a las propiedades de los materiales piroeléctricos, estos son ampliamente utilizados para diversas aplicaciones como sensores infrarrojos, que detectan los cambios en la radiación térmica y los convierten en señales eléctricas; generadores de energía térmica, ya que pueden generar un voltaje al ser expuestos a fuentes de calor, como el calor residual de los procesos industriales; en incluso en fusión nuclear (denominada fusión piroeléctrica) mediante la creación de campos eléctricos para dirigir los iones de deuterio. [119],[120]

## 6.2 MATERIALES FERROELÉCTRICOS

Los materiales ferroeléctricos son aquellos que presentan una polarización dieléctrica espontánea reversible cuando no están en presencia de un campo eléctrico. Esto quiere decir que tienen la capacidad de modificar y retener una carga eléctrica frente a un estímulo eléctrico. A pesar de que se han creado materiales ferroeléctricos artificiales, es en determinados cristales donde más ocurre este efecto. Todos los materiales ferroeléctricos son también piezoeléctricos, pero dicha propiedad no es aplicable en el sentido opuesto. Además, todos los ferroeléctricos son asimismo piroeléctricos; por lo que se observa que estos tres efectos están muy relacionados entre sí. [121],[122],[123]

Al aplicar un estímulo eléctrico sobre estos materiales, aparece el efecto ferroeléctrico, que les permite la retención de la polarización inducida por el estímulo eléctrico. Esta propiedad desaparece al superar una determinada temperatura, denominada temperatura de transición o de Curie ( $T_c$ ). En ese momento, el cristal pasa de ferroeléctrico a paraeléctrico.

Como ejemplos de ferroeléctricos se pueden citar la sal de Rochelle ( $\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ ), que fue el primer material en el que se analizaron propiedades ferroeléctricas, el titanato de bario ( $\text{BaTiO}_3$ ), el titanato de plomo ( $\text{PbTiO}_3$ ), el niobato de litio ( $\text{LiNbO}_3$ ), además del titanato de circonato de plomo (PZT). [124]

Los materiales ferroeléctricos son utilizados en numerosas aplicaciones: se usan en la fabricación de capacitores y condensadores cerámicos, debido a su gran capacidad para almacenar electricidad de manera reversible. Son también empleados en el desarrollo de dispositivos de memoria no volátil, como la memoria de acceso aleatorio ferroeléctrica (FeRAM), y también en el diseño y la construcción de dispositivos electroacústicos, sensores y actuadores. [125],[126],[127]

### **6.3 MATERIALES ELECTORREOLÓGICOS**

Los materiales electrorreológicos son aquellos que tienen la capacidad de cambiar sus propiedades reológicas en respuesta a la actuación de un campo eléctrico. Esto quiere decir que, cuando son sometidos a un campo eléctrico, son capaces de experimentar una variación en su viscosidad o rigidez, pudiendo cambiar rápidamente de un estado líquido o blando a uno sólido o rígido de forma reversible. [128],[129],[130]

Se trata de fluidos que contienen suspensiones de partículas finas orgánicas (como almidón o celulosa) o inorgánicas (como cerámica o vidrio). En ausencia de un campo eléctrico, las partículas están dispersas en el líquido; sin embargo, al ser sometido el fluido a una corriente eléctrica, las partículas se alinean en la dirección del campo, formando una estructura rígida tridimensional, y resultando en un cambio instantáneo de estado. Al eliminar la corriente, las partículas regresan a su estado original, disminuyendo su viscosidad.[131]

Los fluidos electrorreológicos son utilizados en varias aplicaciones significativas dentro la industria automovilística, sirviendo en la fabricación de válvulas hidráulicas de acción rápida y embragues. Además, son usados en frenos (frenos ER) y amortiguadores, ya que permiten ajustar y controlar la rigidez. Otras aplicaciones de estos materiales se encuentran en la industria de la electrónica sensible, donde son incorporados en elementos como controladores hápticos y pantallas táctiles, así como en pantallas y teclados enrollables, que se pueden plegar en el momento que no se usen. [132],[133],[134]

Página dejada intencionadamente en  
blanco

## 7. Metamateriales

Junto a los materiales inteligentes anteriormente mencionados, existe una variedad de materiales conocida como “metamateriales”. Al igual que en la introducción del presente trabajo, se abre aquí de nuevo el debate sobre el hecho de considerar inteligentes o no los metamateriales. Hoy en día sigue existiendo esta controversia y las diferentes fuentes de información hasta el momento no han conseguido “ponerse de acuerdo”.

Numerosas páginas web y artículos científicos los incluyen en esta clasificación ya que poseen propiedades insólitas y una increíble capacidad para manipular la luz, el sonido y las ondas electromagnéticas. Sin embargo, otras fuentes se limitan a tratarlos como otro tipo de materiales, con la simple peculiaridad de que tienen características electromagnéticas especiales. [135],[136]

Lo que es innegable es que estos materiales presentan características y capacidades que van más allá de los límites de los materiales convencionales. Por lo tanto, en el presente estudio serán tratados como materiales inteligentes debido a que generan una respuesta frente a un estímulo, las ondas electromagnéticas. [137]

### 7.1 DEFINICIÓN Y CARACTERÍSTICAS

En los últimos años, los metamateriales han surgido como un área de investigación prometedora e intrigante, con el potencial de revolucionar nuestra interacción con la luz y el sonido. Estos materiales artificiales son diseñados cuidadosamente con el objetivo de exhibir propiedades electromagnéticas y acústicas extraordinarias que desafían las limitaciones de los materiales convencionales. Gracias a la exploración de su estructura interna, los científicos pueden lograr un control y manipulación en la propagación de la luz y el sonido sin precedentes. [138]

Según el Instituto Europeo Virtual para Materiales Electromagnéticos Artificiales y Metamateriales son “una disposición artificial de elementos estructurales, diseñada para conseguir propiedades electromagnéticas ventajosas e inusuales”. Comúnmente se pueden definir también como un conjunto de materiales inteligentes artificiales que presentan características electromagnéticas especiales, distintas de las de los componentes naturales que los conforman. Estas propiedades aparecen como resultado de la geometría y organización de la estructura final, además de las interacciones entre los elementos constituyentes.

Los metamateriales presentan una extraordinaria capacidad para curvar las ondas electromagnéticas, es decir, son capaces de desviar la trayectoria de la luz u otras ondas electromagnéticas de forma controlada. [139]

A diferencia de los materiales propios de la naturaleza, que tienen un índice de refracción positivo (medida de cuánto se desvían las ondas electromagnéticas al pasar de un medio a otro), los metamateriales muestran un índice de refracción ( $n$ ) negativo, lo que quiere decir, que las ondas incidentes se desvían hacia el lado opuesto de la perpendicular a la superficie normal que separa los medios, es decir, en la dirección opuesta a la Ley de Snell. Por esta razón, los metamateriales también son denominados materiales “zurdos”.

Las propiedades electromagnéticas de los materiales en la naturaleza dependen principalmente de dos parámetros, la permitividad eléctrica ( $\epsilon$ ) y la permeabilidad magnética ( $\mu$ ), las cuales permiten caracterizar el comportamiento de un material ante una onda electromagnética. Cuando un material presenta simultáneamente ambas negativas, su índice de refracción también será negativo.

En teoría, no existe un límite para el rango de valores que estos dos parámetros pueden tomar. Es por ello por lo que sería posible diseñar y construir materiales con características de respuesta electromagnética específicas no encontradas en la naturaleza, que es lo que se pretende con los metamateriales.

La capacidad de un metamaterial para comportarse como un material homogéneo (que exhibe propiedades electromagnéticas uniformes y predecibles, a pesar de su estructura interna compleja y heterogénea) con un índice de refracción negativo está determinada por la relación entre la dimensión máxima de sus componentes y la longitud de onda de la luz incidente. En el caso de que la dimensión máxima sea menor que la longitud de onda, el metamaterial presentará un comportamiento diferente al de los materiales convencionales. Sin embargo, en el caso de que la dimensión máxima sea igual o mayor que la longitud de onda, el metamaterial se comportará como un “cristal fotónico” con un índice de refracción positivo.



**Figura 7.1** A la izquierda, agua con índice de refracción positiva; a la derecha, agua con índice de refracción negativa. (Fuente: [140])

A continuación, se explicarán brevemente ciertas características significativas de los metamateriales: [140],[141]

- Anisotropía: las propiedades físicas de los metamateriales (como la permitividad eléctrica o la permeabilidad magnética) varían en función de la dirección de incidencia de las ondas. Esto conlleva que los metamateriales respondan de distinta manera dependiendo de la orientación de la onda electromagnética o acústica.
- Invisibilidad y camuflaje: los metamateriales pueden ser diseñados para desviar la luz alrededor de un objeto, lo que crea una ilusión de invisibilidad o camuflaje. Esto es posible mediante la precisa manipulación de las propiedades de refracción y absorción del metamaterial. Al conseguir desviar la luz alrededor de

un objeto, el metamaterial puede hacer que parezca que el objeto no está presente, o que el objeto se confunda con su entorno, exhibiendo un efecto de camuflaje.

- Superlentes: los metamateriales pueden actuar como superlentes debido a que tienen la capacidad de poder enfocar la luz por debajo del límite de difracción. En el campo de la óptica tradicional, existe una restricción fundamental conocida como el límite de difracción de Rayleigh, que limita la resolución de los objetos. Sin embargo, los superlentes basados en metamateriales pueden superar esta limitación y lograr una mayor resolución. Esto se logra mediante el control preciso de cómo se propagan las ondas electromagnéticas a través del metamaterial.
- Control acústico: los metamateriales poseen una gran capacidad para controlar el sonido gracias a la configuración de sus estructuras. Cuando son colocados estratégicamente entre una fuente de ruido y un receptor, estos pueden amplificar o incluso suprimir selectivamente las ondas ultrasónicas. Esta propiedad se consigue debido a la complejidad de las estructuras internas de los metamateriales.

## **7.1 APLICACIONES DE LOS METAMATERIALES**

Actualmente, los metamateriales representan un área que sigue en pleno desarrollo, y que se encuentra en sus primeras etapas de investigación. Sin embargo, ya existen determinadas aplicaciones de estos. [142],[143]

En la industria textil, se ha hecho uso de metamateriales para el diseño de prendas de ropa transparentes. Es el caso de "Metaflex", una prenda fabricada con un material que, al recibir la luz, tiene la capacidad de hacerla fluir alrededor en lugar de reflejarla, lo cual permite detectar lo que se encuentre bajo la prenda y lo hace invisible para el ojo humano.



**Figura 7.2** Prenda fabricada con Metaflex. (Fuente: [145])

Esta aplicación es probablemente la más prometedora si se consigue perfeccionar. La creación de una capa de invisibilidad práctica y efectiva utilizando metamateriales presenta uno de los mayores desafíos actuales de la ciencia. [144],[145]

Por un lado, diseñar metamateriales con las propiedades ópticas precisas para interactuar con la luz en diferentes longitudes de onda, ya es un verdadero reto, pero además construirlos a gran escala supone otra gran dificultad. Asimismo, hay que tener en cuenta las limitaciones físicas y teóricas, como el hecho de que lograr la invisibilidad completa en todas direcciones es prácticamente inviable, al menos con la tecnología actual, debido a las restricciones fundamentales en la física de las ondas electromagnéticas y la luz.

Sin embargo, a pesar de estos desafíos, los metamateriales siguen en constante avance y es posible que, en un futuro bastante lejano, se encuentren soluciones innovadoras y se superen estos obstáculos, dando lugar a lo que sería la creación de una capa de invisibilidad funcional. Sin embargo, actualmente, es imposible predecir cuándo o si se logrará esa meta.

Dicho esto, a pesar de ello, los metamateriales ofrecen una amplia variedad de otras posibles aplicaciones.

En la industria automovilística, podría utilizarse metamateriales con el objetivo de corregir puntos muertos o ciegos en los retrovisores de los automóviles, consiguiendo una mejora en la seguridad vial.

En el ámbito militar, siguiendo con la aplicación de los metamateriales para crear “capas de invisibilidad”, estos materiales podrían emplearse en tareas de vigilancia, defensa y camuflaje.

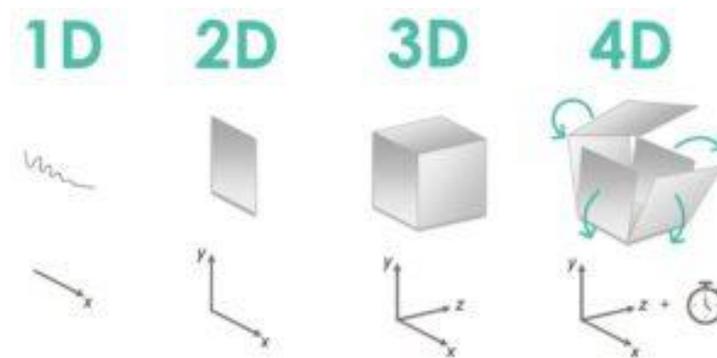


**Figura 7.3** Capacidad de volver completamente invisible una caza de combate, como sugiere la imagen, utilizando tecnología de metamateriales. (Fuente: [141])

Por último, gracias a las propiedades electromagnéticas de los metamateriales, estos podrían usarse para fabricar lentes ópticas y cámaras de alta resolución, antenas de telecomunicaciones más precisas y potentes, además de equipos de diagnóstico médico por imagen de mayor calidad.

## 8. Impresión 4D

La impresión 4D es una tecnología revolucionaria que va más allá de la impresión 3D convencional. A diferencia de la impresión 3D, la cual se enfoca en crear objetos tridimensionales estáticos, la impresión 4D agrega un componente temporal al proceso, lo que permite que los objetos impresos cambien o se adapten con el tiempo. Esta cuarta dimensión eleva el potencial de la fabricación aditiva a un nuevo nivel, abriendo oportunidades emocionantes y novedosas posibilidades para varias industrias. [146]



**Figura 8.1** Cuarta dimensión en la impresión. (Fuente: [146])

La impresión 4D fue conceptualizada y desarrollada por el profesor Skylar Tibbits, fundador del Laboratorio de Autoensamblaje del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT). Tibbits y su equipo de investigación acuñaron el término "impresión 4D" en 2013 y presentaron el concepto por primera vez en una conferencia. Su visión era ir más allá de la fabricación estática para explorar cómo los materiales se transforman y se adaptan a diferentes estímulos. [147],[148]

La impresión 4D se basa en los mismos principios básicos que la impresión 3D, utilizando un proceso aditivo para construir objetos capa por capa con la ayuda de un programa de diseño asistido por ordenador (CAD). La diferencia clave se encuentra en los materiales utilizados y en la forma en que se diseña el objeto impreso. Los materiales utilizados en la impresión 4D son los denominados "materiales inteligentes". Estos materiales, como previamente se han explicado, son capaces de cambiar de forma, estructura o función en

respuesta a determinados estímulos. [149],[150]

La impresión 4D tiene el potencial de revolucionar la industria de la fabricación. Al permitir crear objetos que pueden adaptarse y cambiar con el tiempo, surgen nuevas posibilidades para la fabricación ágil y la personalización masiva. Además, la impresión 4D tiene la capacidad de reducir los desechos y optimizar el uso de materiales, lo que la convierte en una opción de fabricación más sostenible. [151]

## **8.1 PRINCIPIOS BÁSICOS DE LA IMPRESIÓN 4D**

La impresión 4D se basa fundamentalmente en la combinación de la tecnología de impresión 3D tradicional con materiales inteligentes y la capacidad de programar transformaciones a lo largo del tiempo. Se pueden resumir sus principios básicos en los siguientes: proceso de fabricación aditiva, material utilizado, estímulo y activación de materiales, programación y transformación de formas y transformaciones controladas en el tiempo.

### **8.1.1 PROCESO DE FABRICACIÓN ADITIVA**

La impresión 4D se basa en los mismos principios básicos que la impresión 3D tradicional. En la impresión 3D se utilizan técnicas aditivas para crear objetos tridimensionales capa por capa a partir de un modelo digital. Esta tecnología ha revolucionado la fabricación al permitir la creación de geometrías complejas y personalizadas.

### **8.1.2 MATERIAL UTILIZADO**

La impresión 4D da un paso más allá de la impresión 3D tradicional al incorporar materiales inteligentes en el proceso de fabricación. Los materiales inteligentes son fundamentales para permitir la transformación de formas para la impresión 4D.

### **8.1.3 ESTÍMULO Y ACTIVACIÓN DE MATERIALES**

En la impresión 4D, los materiales inteligentes se activan mediante estímulos específicos, lo que permite transformaciones de formas. Los estímulos pueden ser físicos o químicos y pueden incluir cambios de temperatura, humedad, luz, pH, factores eléctricos, magnéticos u otros. La elección del estímulo depende de las propiedades y propiedades del material inteligente utilizado.

### **8.1.4 PROGRAMACIÓN Y TRANSFORMACIÓN DE FORMAS**

Un aspecto único de la impresión 4D es la capacidad de programar materiales inteligentes para responder a estímulos. Esto significa que es posible diseñar objetos que cambien su forma o función con el tiempo de forma controlada y predecible. La programación implica definir la secuencia de estímulos, la intensidad, la duración y las transformaciones requeridas.

### **8.1.5 TRANSFORMACIÓN CONTROLADA A LO LARGO DEL TIEMPO**

La impresión 4D permite que los objetos impresos evolucionen y se transformen después de la fabricación. Pueden cambiar de forma, adaptarse a diferentes condiciones o realizar nuevas funciones cuando se exponen a estímulos específicos. Estas transformaciones pueden ser instantáneas o graduales, según las propiedades del material inteligente y la programación aplicada.

## **8.2 TÉCNICAS DE IMPRESIÓN 4D**

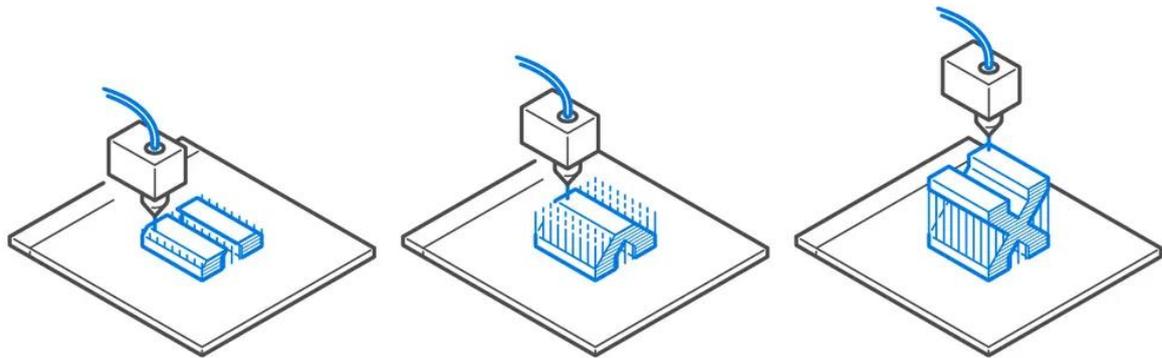
Existen una gran variedad de técnicas mediante las cuales una pieza puede ser procesada, lo que se denomina fabricación aditiva o impresión 3D. En impresión 4D se puede utilizar cualquiera de estos procesos de fabricación aditiva, pero con la particularidad de que el material utilizado es un material inteligente. [152]

De acuerdo con la Norma UNE-EN ISO 17296-2 de 2017 del Comité Técnico ISO/TC 261 *Fabricación aditiva*, de la Organización Internacional de Normalización (ISO), los procesos

desarrollados para la fabricación aditiva se agrupan en siete categorías básicas según las partes fundamentales de funcionamiento de las máquinas. [153]

A continuación, se expondrán las diferentes categorías y, posteriormente, se explicarán más detenidamente los procesos más utilizados actualmente en impresión 4D:

### 8.2.1 EXTRUSIÓN DE MATERIAL

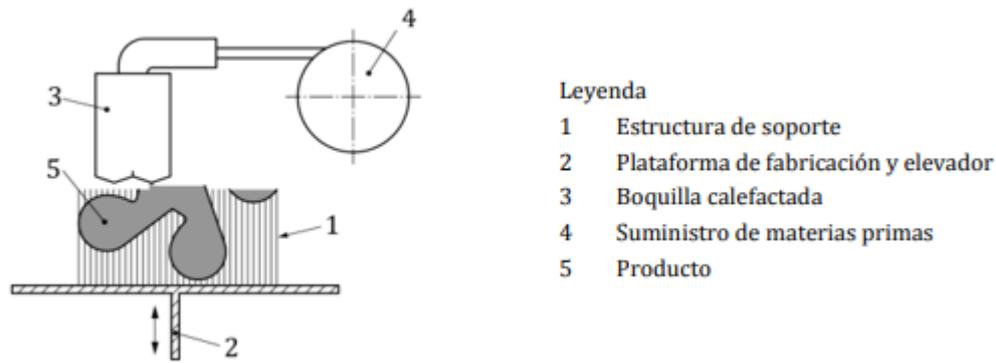


**Figura 8.2** Método de extrusión de material. (Fuente: [152])

*“La extrusión de material es un proceso de fabricación aditiva en el cual el material se dispensa selectivamente a través de una boquilla o un orificio.”*

El material normalmente es un filamento de plástico que es empujado a través de la boquilla que casi lo funde en el proceso. El material posteriormente es depositado en una plataforma de construcción siguiendo un recorrido predeterminado por un software de diseño de la impresión. A continuación, el filamento se enfría y se solidifica creando un objeto sólido.

A continuación, se adjunta una imagen que representa un diagrama esquemático del proceso de extrusión de materia:

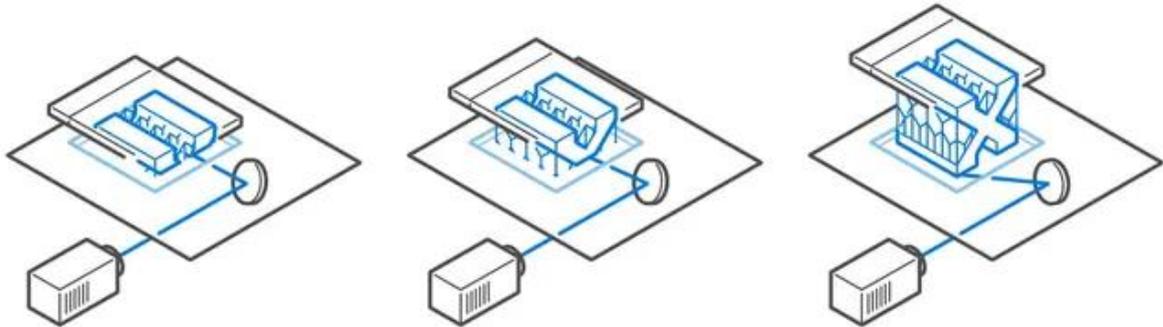


**Figura 8.3** Diagrama esquemático de la extrusión de material. (Fuente: [153])

Por último, se presentan varias características del proceso de extrusión de material:

- **Subtipos de extrusión de material:**
  - Modelado por deposición fundida (FDM).
  - Escritura directa de tinta (DIW).
  - Impresión 3D de construcción.
  - Bioimpresión 3D.
- **Materia prima:** filamento o pasta, generalmente termoplásticos y cerámicas estructurales.
- **Mecanismo de unión:** mediante reacción química o térmica.
- **Fuente de activación:** mediante calor, ultrasonidos o reacción química entre componentes.
- **Procesado secundario:** eliminación de la estructura de soporte.
- **Precisión dimensional:**  $\pm 0.5\%$  (límite inferior  $\pm 0.5$  mm).
- **Aplicaciones generales:** prototipos, carcasas eléctricas, pruebas de forma y ajuste, plantillas y accesorios, patrones de fundición de inversión, casas, etc.
- **Puntos fuertes:** método de impresión 3D de menor costo con una amplia gama de materiales.
- **Puntos débiles:** a menudo propiedades de material más bajas (resistencia, durabilidad, etc.) y generalmente no tan precisas dimensionalmente.

## 8.2.2 FOTOPOLIMERIZACIÓN EN TANQUE O CUBA

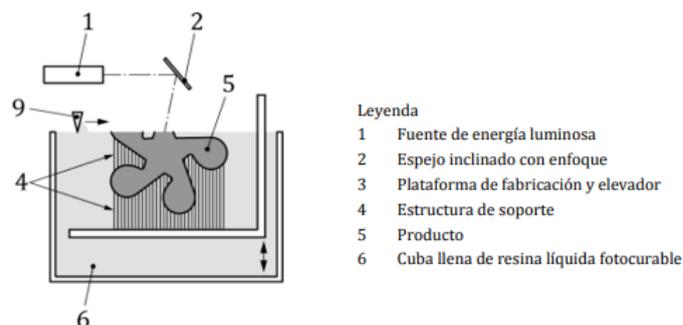


**Figura 8.4** Método de fotopolimerización en tanque o cuba. (Fuente: [152])

*“La fotopolimerización en tanque o cuba es un proceso de fabricación aditiva en el que el fotopolímero líquido se cura selectivamente en una cuba mediante polimerización activada por luz.”*

Una vez el fotopolímero líquido es introducido en una cuba, un haz de luz se orienta con precisión hacia un punto o área específicos del líquido consiguiendo endurecerlo. Esta técnica de impresión se realiza capa por capa hasta que se forma la pieza 3D. Una vez el proceso finaliza, el objeto impreso es limpiado para eliminar los restos de resina líquida y es sometido a un curado posterior (a la luz del Sol o en una cámara de luz ultravioleta) para mejorar sus propiedades mecánicas.

A continuación, se adjunta una imagen que representa un diagrama esquemático del proceso de fotopolimerización en tanque o cuba:

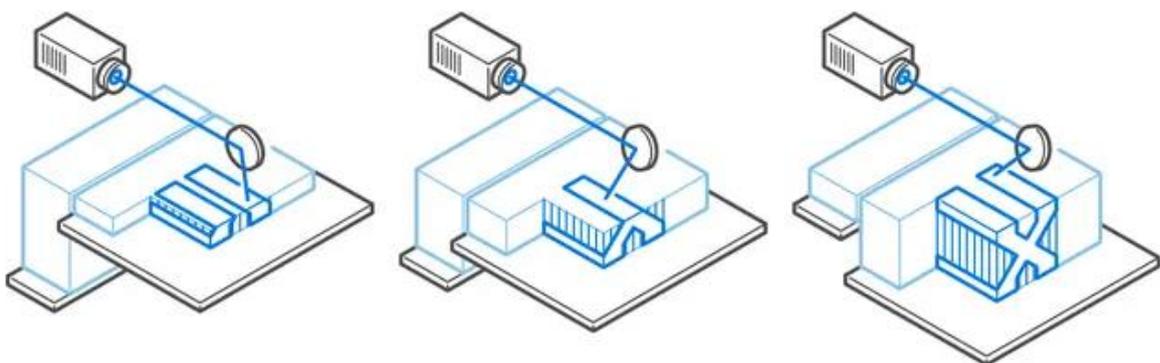


**Figura 8.5** Diagrama esquemático de la fotopolimerización en tanque. (Fuente: [153])

Por último, se presentan varias características del proceso de fotopolimerización en tanque o cuba:

- **Subtipos de fotopolimerización en tanque o cuba:**
  - o Estereolitografía (SLA).
  - o Pantalla de cristal líquido (LCD).
  - o Procesamiento digital de luz (DLP).
- **Materia prima:** líquido o pasta, resina fotorreactiva con o sin relleno.
- **Mecanismo de unión:** mediante reacción química.
- **Fuente de activación:** mediante radiación ultravioleta proveniente de láseres.
- **Procesado secundario:** eliminación del material de soporte, una limpieza y un curado posterior.
- **Precisión dimensional:**  $\pm 0,5\%$  (límite inferior  $\pm 0,15$  mm).
- **Aplicaciones generales:** prototipos de polímeros similares a moldes de inyección y piezas de uso final, fundición de joyas, aplicaciones dentales y productos de consumo.
- **Puntos fuertes:** acabado superficial suave y detalles finos.

### 8.2.3 FUSIÓN DE LECHO DE POLVO

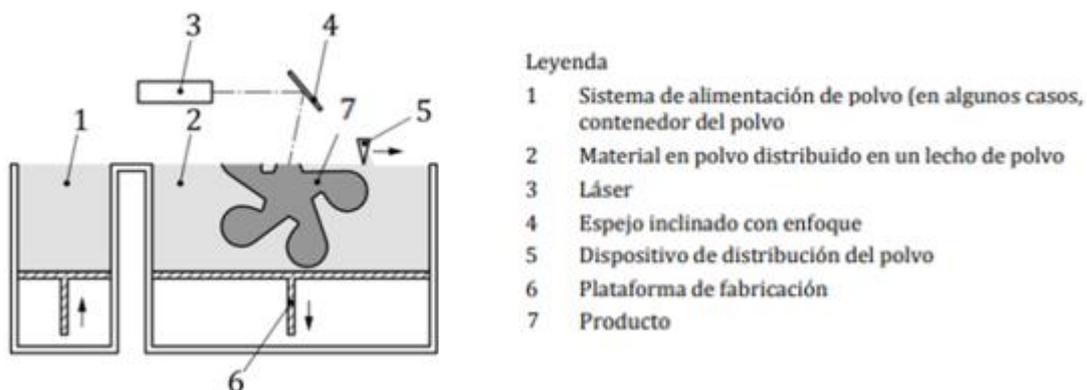


**Figura 8.6** Método de fusión de lecho de polvo. (Fuente: [152])

*“La fusión de lecho de polvo es un proceso de fabricación aditiva en la cual la energía térmica funde selectivamente ciertas zonas de un lecho de polvo.”*

La impresora extiende una capa fina de material en polvo sobre el lecho de impresión, generalmente con un tipo de rodillo, cuchilla o rascador. La energía, comúnmente de un láser, fusiona determinados puntos de la capa de polvo y, posteriormente, se deposita otra capa de polvo, la cual se fusiona con la anterior. Este proceso se repite hasta que la pieza final está impresa. Una vez finalizado, el objeto se apoya y se envuelve en polvo sin fundir.

A continuación, se adjunta una imagen que representa un diagrama esquemático del proceso de fusión de lecho de polvo:



**Figura 8.7** Diagrama esquemático de la fusión de lecho de polvo. (Fuente: [153])

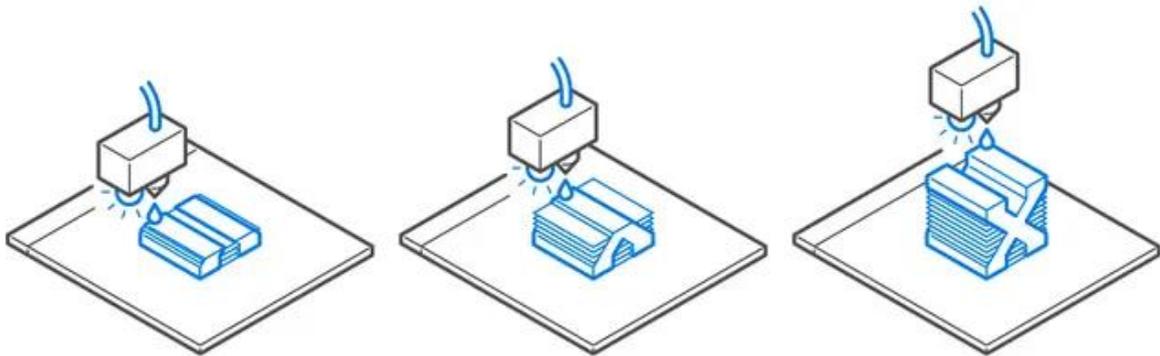
Por último, se presentan varias características del proceso de fusión de lecho de polvo:

- **Subtipos de fusión de lecho de polvo:**
  - Sinterización selectiva por láser (SLS).
  - Fusión de lecho de polvo por láser (LPBF).
  - Fusión por haz de electrones (EBM).
- **Materia prima:** diversos polvos: polímeros termoplásticos, generalmente metales puros o aleaciones metálicas, además de cerámicas estructurales o industriales. Cualquiera de los materiales en polvo podría utilizarse con o sin rellenos y aglutinantes.
- **Mecanismo de unión:** mediante reacción química.
- **Fuente de activación:** mediante energía térmica, normalmente transferida por el láser.
- **Procesado secundario:** eliminación del polvo suelto y, si es necesario, del

material de soporte, y diversas operaciones para mejorar el acabado superficial, la precisión dimensional y las propiedades del material.

- **Precisión dimensional:**  $\pm 0,3\%$  (límite inferior  $\pm 0,3$  mm).
- **Aplicaciones generales:** piezas funcionales, conductos complejos (diseños huecos) y producción de piezas de baja tirada.
- **Puntos fuertes:** piezas funcionales, excelentes propiedades mecánicas y geometrías complejas.
- **Puntos débiles:** mayor coste de las máquinas, materiales a menudo de alto coste y velocidades de fabricación más lentas.

#### 8.2.4 INYECCIÓN DE MATERIAL

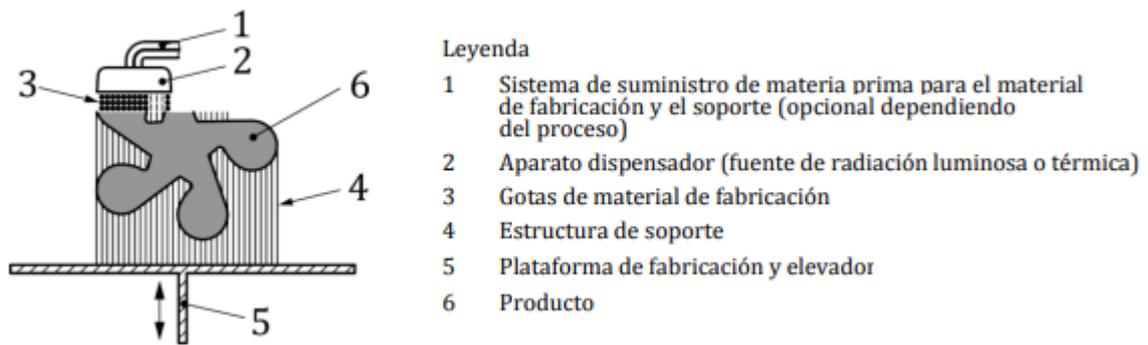


**Figura 8.8** Método de inyección de material. (Fuente: [152])

*“La inyección de material es un proceso de fabricación aditiva en el cual se depositan selectivamente gotas del material de fabricación.”*

La impresora va depositando diminutas gotas de material formando capas que se van endureciendo progresivamente. Es un proceso que se realiza capa por capa hasta que la pieza final es construida.

A continuación, se adjunta una imagen que representa un diagrama esquemático del proceso de inyección de material:

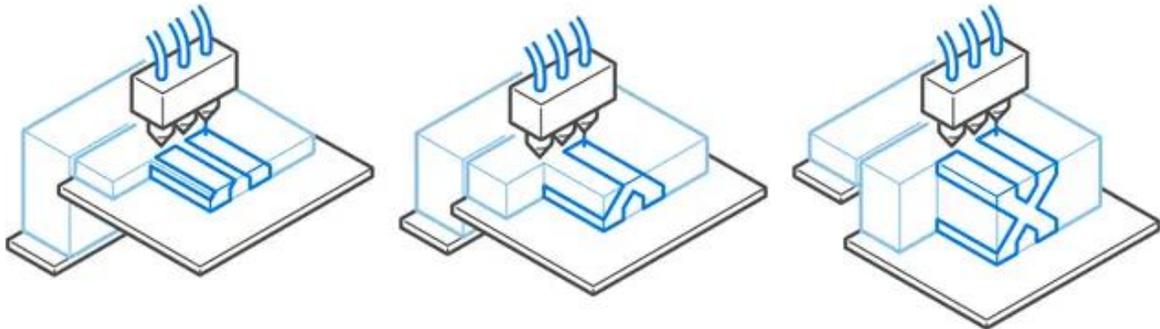


**Figura 8.9** Diagrama esquemático de la inyección de material. (Fuente: [153])

Por último, se presentan varias características del proceso de inyección de material:

- **Subtipos de inyección de material:**
  - Inyección de material (M-Jet).
  - Inyección de nanopartículas (NPJ).
- **Materia prima:** fotopolímero líquido o cera fundida, con o sin relleno.
- **Mecanismo de unión:** mediante reacción química o adhesión por solidificación de material fundido.
- **Fuente de activación:** mediante radiación luminosa para la unión mediante reacción química.
- **Procesado secundario:** eliminación del material de soporte y un curado posterior mediante una mayor exposición a radiación luminosa.
- **Precisión dimensional:**  $\pm 0,1$  mm.
- **Aplicaciones generales:** prototipos de productos a todo color, prototipos similares a moldes de inyección, moldes de inyección de baja tirada, modelos médicos y moda.
- **Puntos fuertes:** acabado superficial texturizado, a todo color y multimaterial disponible.
- **Puntos débiles:** materiales limitados, no apto para piezas mecánicas exigentes y coste más elevado que otras tecnologías de resina para fines visuales.

## 8.2.5 INYECCIÓN DE AGLUTINANTE

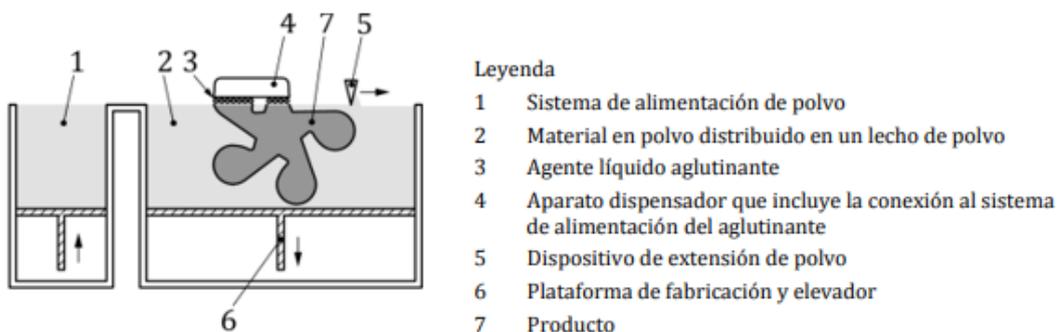


**Figura 8.10** Método de proyección de aglutinante. (Fuente: [152])

*“La inyección de aglutinante es un proceso de fabricación aditiva en el que un agente líquido aglutinante se deposita selectivamente para unir materiales en polvo.”*

Una cuchilla de recubrimiento extiende una capa fina de polvo sobre la plataforma de construcción. A continuación, un cabezal de impresión con boquillas de inyección de tinta pasa sobre el lecho, depositando selectivamente gotas de un agente aglutinante para unir las partículas de polvo. Una vez completada la capa, la plataforma de impresión sube o baja y la cuchilla vuelve a recubrir la superficie. El proceso se repite hasta que se completa toda la pieza capa por capa. Una vez finalizado el proceso, el objeto es envuelto en polvo no usado y se deja curar.

A continuación, se adjunta una imagen que representa un diagrama esquemático del proceso de inyección de aglutinante:

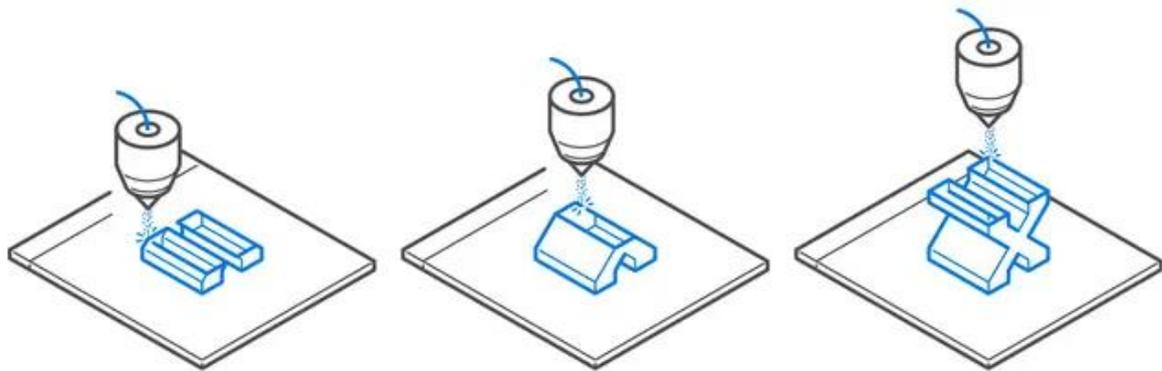


**Figura 8.11** Diagrama esquemático de la inyección de aglutinante. (Fuente: [153])

Por último, se presentan varias características del proceso de inyección de aglutinante:

- **Subtipos de inyección de aglutinante:**
  - Inyección de aglutinante metálico.
  - Inyección de aglutinante polimérico.
  - Inyección de aglutinante de arena.
  - Multi Jet fusion (MJF).
- **Materia prima:** polvos, mezclas de polvos o materiales en forma de partículas, y un agente líquido adhesivo/aglutinante.
- **Mecanismo de unión:** mediante reacción química y/o térmica.
- **Fuente de activación:** dependiendo del agente aglutinante, mediante reacción química.
- **Procesado secundario:** eliminación del polvo suelto, impregnación o infiltración de material líquido adecuado en función del material en polvo y de la aplicación prevista.
- **Precisión dimensional:**  $\pm 0,2$  mm (metal) o  $\pm 0,3$  mm (arena).
- **Aplicaciones generales:** piezas metálicas funcionales, modelos a todo color, moldes y coladas de arena
- **Puntos fuertes:** bajo coste, grandes volúmenes de construcción, piezas metálicas funcionales, magnífica reproducción del color, rápidas velocidades de impresión y flexibilidad de diseño sin soporte.
- **Puntos débiles:** es un proceso de varios pasos para los metales, y las piezas de polímero no son duraderas.

## 8.2.6 DEPOSICIÓN DIRECTA DE ENERGÍA

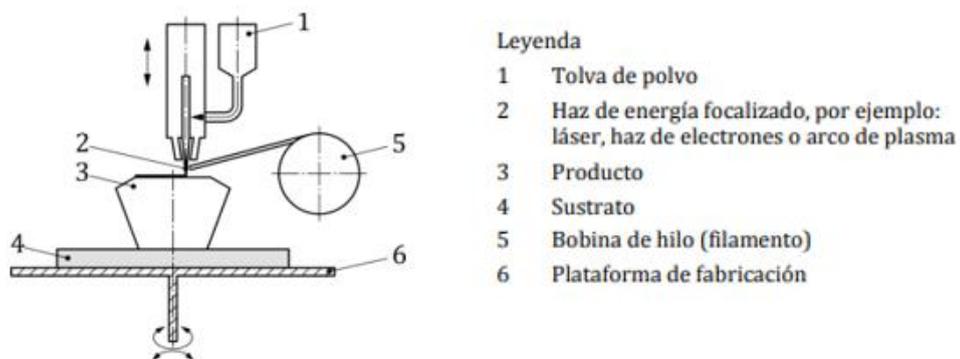


**Figura 8.12** Método de deposición directa de energía. (Fuente: [152])

*“La deposición directa de energía es un proceso de fabricación aditiva en el cual se utiliza energía térmica focalizada para unir materiales mediante fusión, a medida que se depositan.”*

Una boquilla montada en un brazo multieje dentro de un marco cerrado, deposita material fundido en la superficie de la pieza, donde se va solidificando capa por capa. El proceso es similar a la técnica de impresión 3D de extrusión de material, pero el material aquí no es extruido. Además, la boquilla puede moverse en múltiples direcciones, con hasta cinco ejes diferentes, en comparación con solo tres en la mayoría de las máquinas.

A continuación, se adjunta una imagen que representa un diagrama esquemático del proceso de deposición directa de energía:

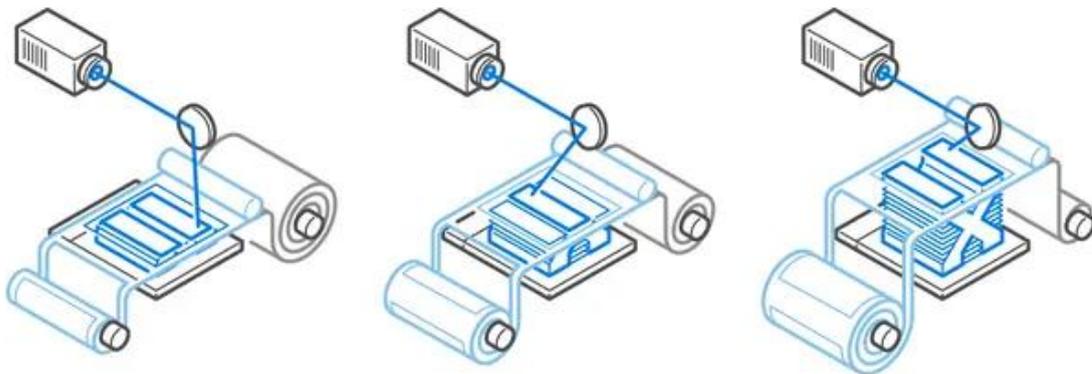


**Figura 8.13** Diagrama esquemático de la deposición directa de energía. (Fuente: [153])

Por último, se presentan varias características del proceso de deposición directa de energía:

- **Subtipos de deposición directa de energía:**
  - Deposición de energía dirigida por láser.
  - Deposición de energía por haz de electrones de alambre.
  - Deposición de energía por cable (WAAM).
  - Pulverización en frío.
  - Deposición de energía directa fundida.
- **Materia prima:** polvo o filamento, generalmente metálico; para determinadas aplicaciones se pueden añadir partículas cerámicas al material base.
- **Mecanismo de unión:** mediante reacción química: fusión y solidificación.
- **Fuente de activación:** mediante láser, haz de electrones o arco de plasma.
- **Procesado secundario:** mejora del acabado superficial, mediante tratamiento térmico.
- **Precisión dimensional:**  $\pm 0,1$  mm.
- **Aplicaciones generales:** reparación de componentes aeroespaciales y de automoción de gama alta, prototipos funcionales y piezas finales.
- **Puntos fuertes:** alta velocidad de acumulación y posibilidad de añadir metal a componentes existentes.
- **Puntos débiles:** Imposibilidad de fabricar formas complejas debido a la imposibilidad de fabricar estructuras de soporte, acabado superficial y precisión generalmente deficientes.

## 8.2.7 LAMINACIÓN DE HOJAS

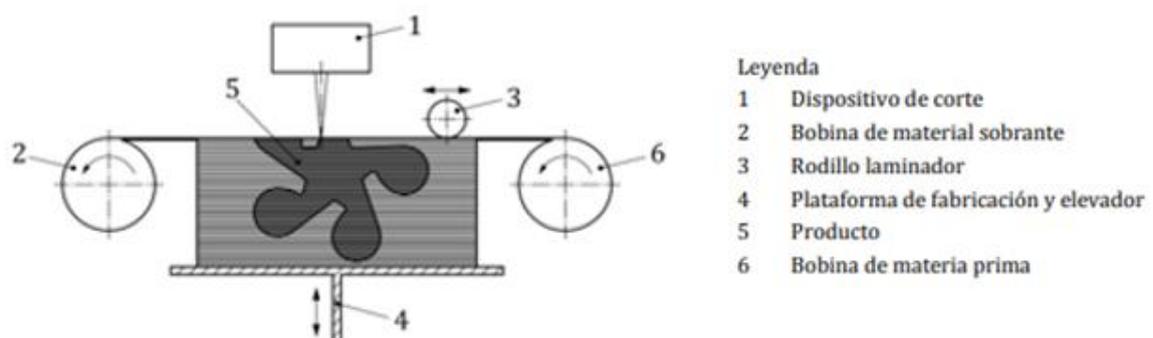


**Figura 8.14** Método de laminación de hojas. (Fuente: [152])

*“La laminación de hojas es un proceso de fabricación aditiva en el cual el material en forma de láminas u hojas se une para formar un objeto.”*

La laminación de hojas es técnicamente una forma de impresión 3D, aunque es bastante diferente de las técnicas anteriores. Funciona apilando y laminando hojas muy finas de material para crear objetos 3D, o pilas, que luego se cortan mecánicamente o con láser en su forma final. Las capas de material se pueden fusionar mediante varios métodos, como el calor o ultrasonidos, en función del material. En este proceso se producen más residuos que en otras tecnologías de impresión 3D.

A continuación, se adjunta una imagen que representa un diagrama esquemático del proceso de laminación de hojas:



**Figura 8.15** Diagrama esquemático de la laminación de hojas. (Fuente: [153])

Por último, se presentan varias características del proceso de laminación de hojas:

- **Subtipos de laminación de hojas:**
  - Fabricación de objetos laminados (LOM).
  - Consolidación ultrasónica (UC).
- **Materia prima:** material en láminas; generalmente papel, láminas metálicas, polímeros o láminas compuestas principalmente formadas por material metálico o de polvo cerámico, unidas entre sí mediante un aglutinante.
- **Mecanismo de unión:** mediante reacción térmica, química o ultrasonidos.
- **Fuente de activación:** calentamiento focalizado o a gran escala, reacción química o transductores.
- **Procesado secundario:** eliminación de residuos y, opcionalmente, infiltración, sinterizado, tratamiento térmico, arenado o mecanizado, para mejorar el acabado superficial.
- **Precisión dimensional:**  $\pm 0,1$  mm.
- **Aplicaciones generales:** prototipos no funcionales, impresiones multicolor, moldes de fundición.
- **Puntos fuertes:** posibilidad de producción rápida e impresiones compuestas.
- **Puntos débiles:** poca precisión, más residuos y trabajo de postproducción necesario para algunas piezas.

### 8.3 TÉCNICAS DE IMPRESIÓN 4D MÁS UTILIZADAS ACTUALMENTE

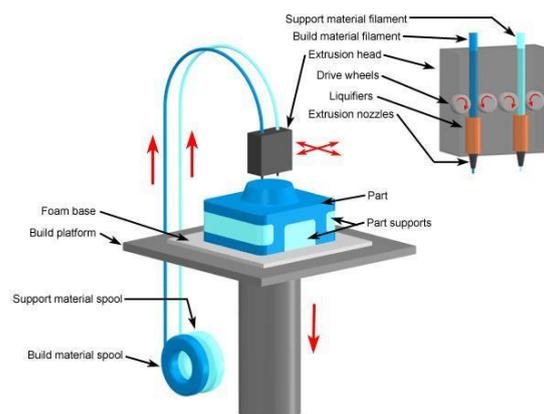
A pesar de que cualquier técnica de fabricación aditiva podría ser utilizada para la impresión 4D, hoy en día, debido a factores como el tamaño de pieza impresa y la velocidad de impresión, los procesos de impresión 4D más empleados son los siguientes: [154],[155],[156]

### 8.3.1 MODELADO POR DEPOSICIÓN FUNDIDA

El modelado por deposición fundida (FDM), subtipo de extrusión de material, es uno de los métodos más utilizados en la impresión 4D debido a su sencillez, versatilidad y amplitud de posibilidades. Se basa en la extrusión controlada de un filamento, generalmente de un polímero termoplástico, a través de una boquilla, que se deposita capa por capa con el fin de generar objetos en 3D. [171],[172]

Uno de los potenciales que presenta el FDM en la impresión 4D es que permite la fabricación de objetos con la capacidad de memoria de forma. Esto se logra a través de la mezcla de materiales con memoria de forma, como los polímeros termoplásticos que pueden cambiar de forma en función de la temperatura a la que son expuestos. [173]

El FDM destaca por ser económico, sencillo de utilizar y de escaso mantenimiento; sin embargo, también presenta algunos inconvenientes. En primer lugar, tiene una precisión limitada en la impresión de detalles finos y superficies suaves, lo que puede afectar a la calidad estética de la pieza. Además, la variedad de materiales disponibles es más reducida en comparación con otros procesos. Por último, debido a la extrusión del material capa por capa, la velocidad del proceso suele ser lenta.



**Figura 8.16** Representación del proceso de modelado por deposición fundida (FDM).

(Fuente: [173])

### 8.3.2 ESCRITURA DIRECTA DE TINTA

La escritura directa de tinta (DIW), subtipo de extrusión de material, es un proceso de fabricación aditiva, que recientemente está siendo muy utilizado en impresión 4D, debido a su capacidad para fabricar estructuras complejas y funcionales con materiales inteligentes. El proceso consiste en la extrusión de una tinta viscosa, compuesta por polímeros, partículas y diversos aditivos, a través de una boquilla o punta de impresión. Dicha tinta es depositada sobre una plataforma capa por capa siguiendo un patrón determinado hasta que la pieza final está impresa. [175]

El proceso de DIW ofrece significativas ventajas en la fabricación aditiva: permite crear estructuras altamente personalizadas y complejas con precisión y gran resolución. Además, brinda la posibilidad de imprimir una gran gama de materiales, convirtiéndolo en un proceso con gran flexibilidad y versatilidad.

Sin embargo, presenta el inconveniente de que el tiempo de impresión puede ser prolongado debido a la disposición de tinta capa por capa, pudiendo limitar la eficiencia en la fabricación de grandes piezas.



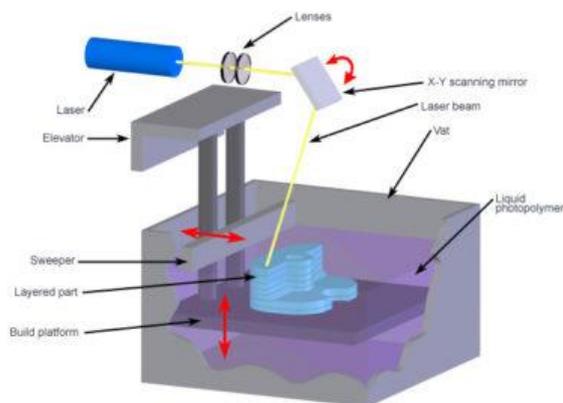
**Figura 8.17** Representación de una impresora basada en la escritura directa de tinta (DIW). (Fuente: [174])

### 8.3.3 ESTEREOLITOGRAFÍA

La estereolitografía (SLA), subtipo de fotopolimerización en tanque o cuba, es también uno de los métodos más empleados en impresión 4D. Este proceso se basa en el uso de un láser de luz ultravioleta, el cual solidifica capa por capa una resina fotosensible, dando lugar a objetos tridimensionales con alta precisión y finos detalles. [176]

La SLA presenta una serie de ventajas considerables. Destaca por su gran precisión en la impresión de detalles pequeños y superficies suaves. Además, ofrece una gran variedad de materiales y resinas disponibles, lo que brinda flexibilidad en la elección de propiedades para adaptarse a diversas aplicaciones.

No obstante, este proceso de fabricación aditiva es más costoso en comparación con otros procesos y puede ser más lento, debido a la necesidad de solidificar capa por capa. Otro inconveniente que presenta es el requerimiento de un postprocesamiento adicional, para eliminar el exceso de resina y curar completamente la pieza final.



**Figura 8.18** Representación del proceso de estereolitografía (SLA). (Fuente: [177])

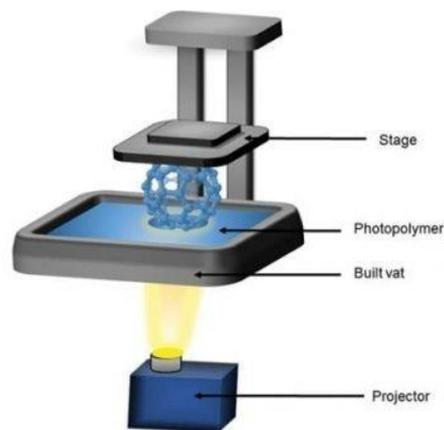
### 8.3.4 PROCESAMIENTO DIGITAL DE LUZ

El procesamiento digital de luz (DLP), subtipo de fotopolimerización en tanque o cuba, es otro método ampliamente utilizado en impresión 4D, gracias a su alta precisión y resolución. Es muy similar a la SLA con una diferencia significativa: mientras que las

máquinas de SLA utilizan un láser que va trazando una capa, las de DLP utilizan una fuente de luz proyectada para curar toda la capa a la vez. [178],[179]

En cuanto a las ventajas que presenta este proceso, podemos citar las siguientes: alta precisión y resolución, consiguiendo una excelente calidad visual y dimensional; velocidad de impresión mayor, ya que puede solidificar una capa completa en un solo paso; y una gran gama de materiales, al igual que en la SLA.

Los inconvenientes de este proceso son el coste, ya que es mayor que en otros procesos, la limitación en el tamaño de la pieza y la necesidad de un postprocesamiento adicional.



**Figura 8.19** Representación del proceso de procesamiento digital de luz (DLP). (Fuente: [180])

### 8.3.5 RAPID LIQUID PRINTING

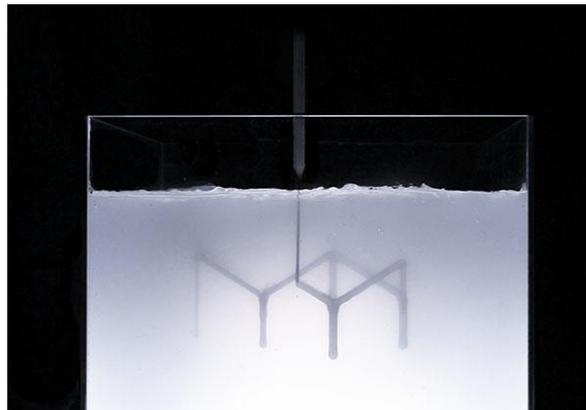
La impresión rápida de líquido (RLP), no se considera como tal un subtipo de ninguna técnica de fabricación aditiva. Este proceso, que es relativamente muy reciente combina elementos de la técnica de extrusión de material y de fotopolimerización en tanque o cuba. Se utiliza en impresión 4D gracias a su capacidad para producir objetos grandes y complejos de manera rápida y eficiente. [181],[182],[183]

Un sistema robotizado mediante una boquilla deposita el material de impresión en una suspensión de gel líquido dibujando en tres dimensiones la forma del objeto que se quiere fabricar. El gel sirve para suspender el material extruido, de modo que no tenga que lidiar

con la gravedad. A medida que se deposita el material, una fuente de calor o luz ultravioleta se utiliza para curarlo y solidificarlo instantáneamente, permitiendo así la construcción de objetos tridimensionales. El proceso solo dura unos minutos, y no hay limitación de tamaño, por lo que es posible imprimir piezas grandes o pequeñas. [184]

Este proceso presenta varias ventajas notables: a diferencia de otros métodos de impresión, la RLP puede imprimir prácticamente cualquier material, desde hormigón hasta plástico o silicona. Tiene la capacidad de imprimir objetos tridimensionales de manera rápida y eficiente, permitiendo tiempos de impresión más cortos. Además, ofrece una mayor libertad de diseño, ya que no requiere soportes adicionales durante el proceso.

Sin embargo, la RLP tiene el inconveniente de una posible falta de precisión dimensional, debido a la manipulación del material, además de que requiere una configuración y equipo específicos, lo que resulta en una mayor complejidad técnica y coste adicional. [186]



**Figura 8.20** Representación del proceso de Rapid Liquid Printing (RLP). (Fuente: [185])

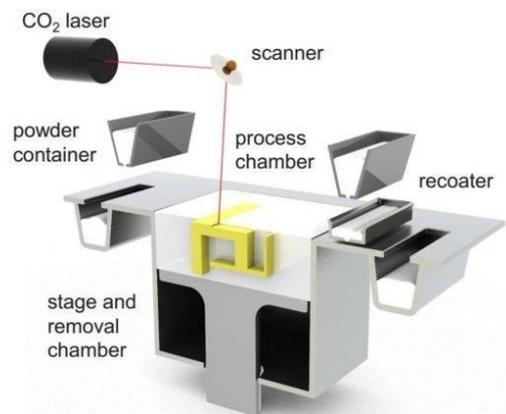
### 8.3.6 SINTERIZACIÓN SELECTIVA POR LÁSER

La sinterización selectiva por láser (SLS), subtipo de fusión de lecho de polvo, es un proceso empleado en la impresión 4D ya que presenta una gran versatilidad y capacidad para producir piezas funcionales de alta calidad. En el proceso SLS se utiliza un lecho de polvo de material, normalmente polímero, el cual es fusionado selectivamente capa por capa gracias a un láser de alta potencia. El láser traza el patrón de cada sección transversal de

un diseño 3D en una capa de polvo. Una vez la capa está construida, se construye otra encima de la anterior hasta que se crea la pieza final. [187],[188]

Una de las ventajas de este proceso es que el propio polvo actúa como soporte durante la impresión, por lo que no son necesarios soportes adicionales. Asimismo, permite el uso de una amplia gama de materiales, y la creación de piezas con alta precisión y detalle.

No obstante, la SLS también presenta algunos inconvenientes como el coste, ya que los sistemas de impresión SLS suelen ser más costosos que otros sistemas de impresión 3D, y la necesidad de un postprocesamiento adicional para eliminar el exceso de material.



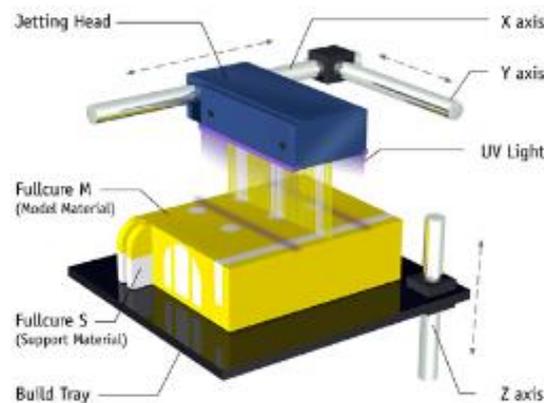
**Figura 8.21** Representación del proceso de sinterización selectiva por láser (SLS). (Fuente: [189])

### 8.3.7 POLYJET

La tecnología PolyJet, que se puede considerar como un subtipo de inyección de material, es uno de los métodos más utilizados en la impresión 4D debido a sus características únicas y capacidades versátiles. Fue desarrollada por primera vez por la empresa Objet, (ahora parte de Stratasys). El proceso se basa en la inyección de capas ultradelgadas de materiales fotopolímeros en una bandeja de construcción. Cada capa de fotopolímero se cura de inmediato después de su inyección mediante luz ultravioleta. Este ciclo de inyección y curado se repite capa a capa, dando lugar a piezas tridimensionales complejas y con gran precisión. [190],[191],[192]

Una de las grandes ventajas de PolyJet es su capacidad para imprimir objetos con diversos materiales y colores en una sola pasada. Además, el proceso ofrece una excelente resolución y precisión en detalles finos y superficies suaves. [193]

Sin embargo, también presenta algunas limitaciones. El coste de los sistemas de impresión PolyJet puede ser alto y el tiempo de impresión puede ser más prolongado que con otros métodos de fabricación aditiva debido a la necesidad de curar cada capa con luz ultravioleta.



**Figura 8.22** Representación del proceso PolyJet. (Fuente: [194])

## 8.4 EJEMPLOS DE LA IMPRESIÓN 4D

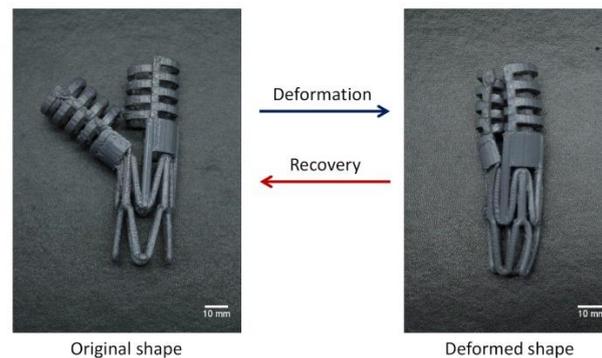
La impresión 4D representa una tecnología novedosa y avanzada que va más allá de la impresión 3D tradicional, al posibilitar la creación de objetos capaces de modificar su estructura, forma y funcionalidad como respuesta a un estímulo externo. Esta propiedad inteligente les confiere una gran versatilidad y un potencial extraordinario.

Debido a ello, se han desarrollado numerosos ejemplos en impresión 4D, algunos de los cuales serán brevemente explicados a continuación:

### 8.4.1 STENT MÉDICO IMPRESO EN 4D:

Durante los últimos años se ha buscado fabricar tecnologías menos invasivas en la implantación de endoprótesis en vasos sanguíneos ramificados o estrechados. Gracias al concepto del origami y a la impresión 4D, se ha logrado diseñar stents autoensamblables,

que podrán ser utilizados en numerosas aplicaciones biomédicas. Para su implementación, se ha considerado la forma, el ángulo de las celdas unitarias y el uso de ángulos helicoidales, para obtener diferentes relaciones de contracción. Además, su diseño ligero aumenta la flexibilidad estructural y mejora más la relación de contracción. Sin embargo, aún se deben abordar los desafíos de biocompatibilidad antes de su implementación clínica. [195],[196],[197]



**Figura 8.23** Imagen del stent biomédico impreso en 4D. (Fuente: [195])

#### 8.4.2 IMPLANTES IMPRESOS EN 4D

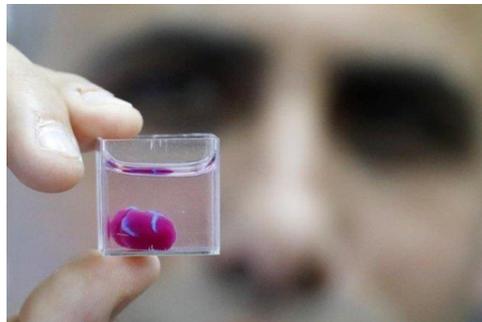
La impresión 4D es utilizada con más frecuencia en la fabricación de implantes. Debido a su capacidad de crear estructuras que pueden cambiar de forma y adaptarse con el tiempo, brinda personalizadas y efectivas soluciones que ayudan a mejorar la salud de los pacientes.

La traqueobroncomalacia es una enfermedad respiratoria mortal en los más pequeños. Gracias a la fabricación de unas férulas de vías respiratorias en 4D, que ayudan a mantener abiertas las vías aéreas y permiten una respiración normal, se ha podido salvarla vida de varios niños. Estas estructuras están formadas a partir de un biopolímero llamado policaprolactona y están diseñadas de manera personalizada según el paciente usando CAD e imágenes de alta resolución. [198],[199]



**Figura 8.24** Imagen de una férula impresa en 4D. (Fuente: [199])

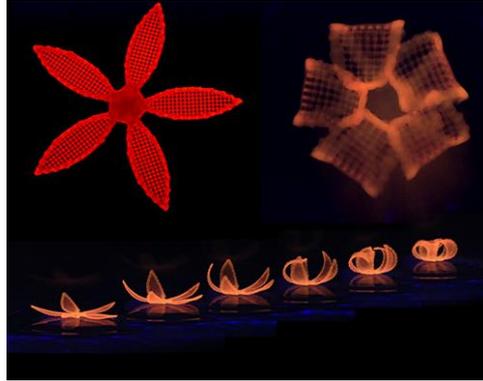
La impresión 4D también se ha utilizado en otros tipos de estructuras, como en odontología y cirugía maxilofacial o en implantes polivalentes para el tratamiento del cáncer de mama. Una de las aplicaciones más destacadas es la creación de un corazón impreso en 4D. Este fue desarrollado por un grupo de científicos en la Universidad de Tel Aviv y está formado por células y material biológico de un paciente. Aunque el corazón tiene el tamaño del de un conejo, es un paso muy prometedor en el diseño de un corazón de tamaño humano completamente funcional. [200],[201],[202]



**Figura 8.25** Representación de un corazón impreso en 4D. (Fuente: [203])

### 8.4.3 ARQUITECTURAS/PIEZAS QUE CAMBIAN DE FORMA

Un equipo del Instituto Wyss de Ingeniería Biológica y la Escuela John A. Paulson de Ingeniería y Ciencias Aplicadas de Harvard han desarrollado estructuras complejas de hidrogel en 4D. Su inspiración viene de propiedades dinámicas de las estructuras naturales, como las plantas que cambian de forma frente a estímulos ambientales. Estas estructuras son capaces de modificar su forma al sumergirse en agua gracias a su capacidad de programar sus propiedades anisótropas de hinchamiento y rigidez durante la impresión 4D.



**Figura 8.26** Representación de una estructura de hidrogel impresa en 4D. (Fuente: [206])

También se están desarrollando otras piezas que puedan deformarse cuando son sumergidas en el agua. Es el caso de un proyecto del MIT que consiste en fabricar piezas de madera artificial con capas cuidadosamente diseñadas para que se deformen según una forma deseada al añadir agua. Esto abre novedosas posibilidades en la personalización y optimización de objetos y podría emplearse en un futuro en el diseño de muebles que se monten por sí mismos al introducirlos en agua. [204],[205],[207]

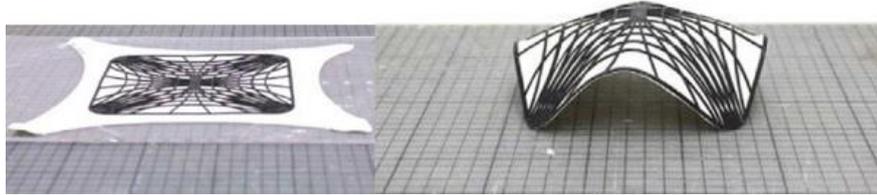


**Figura 8.27** Representación de una madera programable impresa en 4D. (Fuente: [208])

#### 8.4.4 TEXTILES IMPRESOS EN 4D:

Estas estructuras tienen el potencial de reemplazar sensores electrónicos, controladores digitales y motores en ciertos casos, lo que reduciría la complejidad en la construcción. No obstante, aún se enfrentan a desafíos en cuanto a los materiales, fabricación y métodos de diseño. Para abordar esto, se han desarrollado procesos de fabricación híbridos que combinan las ventajas de la fabricación textil y generativa. Tibbits, el creador de la

impresión 4D, creó una estructura híbrida 4D mediante superficies textiles pretensadas con refuerzos termoplásticos impresos. Estos textiles, gracias a sus propiedades de adaptabilidad, podrían utilizarse en pinzas, órtesis, guantes y ropa deportiva. [209]



**Figura 8.28** Representación de un textil impreso en 4D. (Fuente: [210])

#### **8.4.5 ROBOT IMPRESO EN 4D QUE ANALIZA LA CALIDAD DEL AIRE Y EL SUELO**

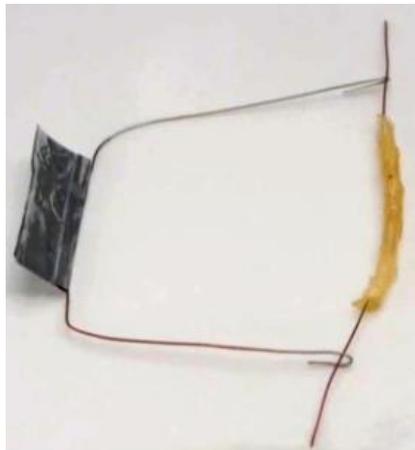
Se trata de un proyecto, desarrollado por el Instituto Italiano de Tecnología (IIT), que busca crear una nueva generación de robots de tamaño micrométrico, flexibles, autónomos y biodegradables impresos en 4D. Estos robots están fabricados a base de materiales biodegradables como la policaprolactona y fibras higroscópicas. Su inspiración se encuentra en las semillas de las plantas y tienen el objetivo de analizar y controlar el aire y el entorno en la capa superior del suelo, donde se encuentran los nutrientes que las plantas necesitan. Gracias a su diseño, permiten detectar la temperatura, humedad y presencia de contaminantes y niveles de CO<sub>2</sub> y, ya que son autónomos y no tienen batería, podrían utilizarse en zonas remotas donde es difícil la recopilación de datos. [211]



**Figura 8.29** Fotografía del robot I-Seed. (Fuente: [211])

#### 8.4.6 ROBOT GUSANO IMPRESO EN 4D QUE SE DESPLAZA

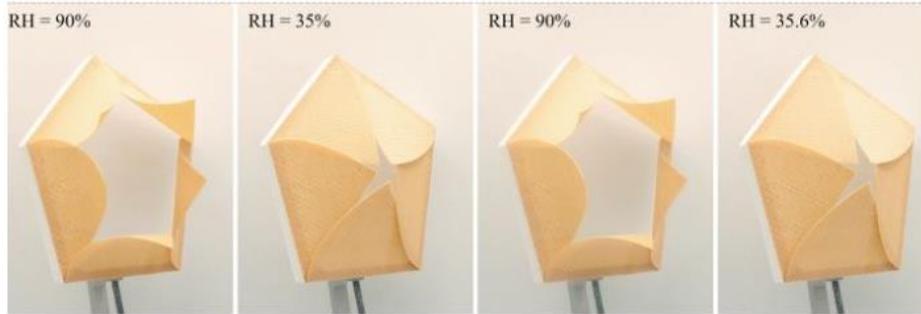
Se trata de una especie de gusano robotizado blando impreso en 4D, que tiene la capacidad de autoensamblarse cuando es expuesto a una temperatura superior a 160° C. Este robot, fabricado a partir de una lámina de elastómero de cristal líquido, adopta una forma tubular (similar a un gusano) en espiral que le permite desplazarse, además de cargar y arrastrar pesos significativamente mayores al suyo. El robot es capaz de ajustar su dirección, por lo que los obstáculos no son un impedimento y además puede moverse en toda clase de terrenos. Gracias a sus propiedades, tiene aplicaciones potenciales en espacios reducidos (como tuberías) y en condiciones extremas. [212],[213]



**Figura 8.30** Imagen del robot “gusano” impreso en 4D. (Fuente: [212])

#### 8.4.7 ESTRUCTURA IMPRESA EN 4D CON SENSORES DE HUMEDAD:

Se trata de un proyecto, desarrollado por la Universidad de Stuttgart, que consiste en estructuras higromorfas impresas en 4D mediante deposición de material fundido (FDM) que tienen la capacidad de cambiar su geometría como respuesta a cambios en la humedad. Esta propiedad los hace idóneos para aplicaciones arquitectónicas relacionadas con el clima; es por ello por lo que son especialmente usadas en revestimientos de edificios. En periodos de alta humedad, se abren para permitir la circulación del aire y reducir la humedad en los edificios. Por el contrario, en periodos de baja humedad, se cierran para proporcionar sombra y disminuir la entrada de calor. [2014]



**Figura 8.31** Funcionamiento estructuras higromorfas impresas en 4D. (Fuente: [214])

#### 8.4.8 ROBOT IMPRESO EN 4D CON ACTUADORES PIEZOELECTRICOS:

Investigadores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica e Informática de Georgia han desarrollado unos robots diminutos, denominados “micro-cerdas-bots” impresos en 4D, que se desplazan aprovechando la vibración de actuadores piezoeléctricos, fuentes de ultrasonido o altavoces pequeños. El uso de enjambres de estos microbots posibilita la detección de cambio ambientales, la manipulación de materiales e incluso la reparación de lesiones en el cuerpo humano. A pesar de su tamaño (similar al de una hormiga) pueden cubrir longitudes cuatro veces mayores en solo un segundo. Su diseño permite ajustar su respuesta a diferentes frecuencias de vibración, controlando su movimiento mediante la amplitud de las vibraciones. Esta tecnología tiene aplicaciones en campos como la medicina y la manipulación de materiales. [215],[216],[217]



**Figura 8.32** Representación del tamaño de los “micro-cerdas-robots” impresos en 4D. (Fuente: [215])

Página dejada intencionadamente en  
blanco

## 9. Aplicaciones de los materiales inteligentes en el sector aeroespacial

En la industria aeroespacial, los materiales inteligentes han despertado un notable interés entre investigadores y diseñadores debido a las propiedades únicas que poseen, que les confieren un gran potencial para potenciar la innovación y mejorar el rendimiento en dicho ámbito. Su capacidad de respuesta y versatilidad han impulsado grandes avances en la tecnología aeroespacial creando soluciones vanguardistas y revolucionarias.

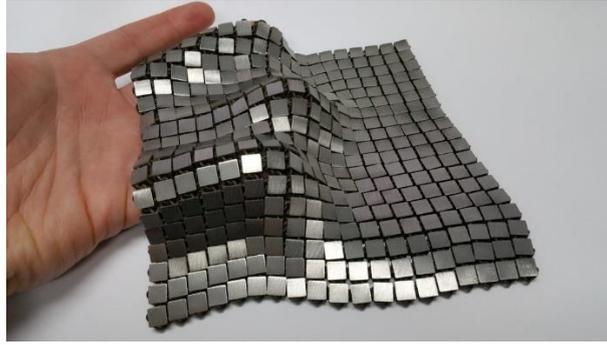
A continuación, se llevará a cabo una investigación exhaustiva sobre diferentes aplicaciones de los materiales inteligentes en el sector aeroespacial y se presentarán posibles oportunidades que ofrecen estos materiales en el desarrollo de futuras tecnologías.

### 9.1 TELA ESPACIAL INTELIGENTE

Se trata de un tejido de gran resistencia creado mediante impresión 4D diseñado por el ingeniero español Raúl Polit Casillas en el Laboratorio de Propulsión a Chorro (JPL) de la NASA en Pasadena. Este nuevo material tiene aplicaciones potenciales en el espacio, desde trajes de astronauta y grandes antenas hasta protección contra meteoritos en naves espaciales. Incluso podría utilizarse para capturar objetos en la superficie de otros planetas y satélites, como en Europa, una luna helada de Júpiter. [218]

La malla metálica está construida mediante fabricación aditiva y está compuesta por pequeñas piezas cuadradas de plata unidas entre sí, lo que le confiere una gran resistencia y flexibilidad. El tejido además incorpora funciones inteligentes como la capacidad de actuar de aislante térmico al reflejar el calor hacia el exterior y mantenerlo en el interior.

Esta tecnología de impresión 4D podría revolucionar el diseño de naves espaciales, permitiendo la creación de estructuras completas con funcionalidades integradas, reduciendo así el tiempo dedicado a la integración y las pruebas. [219]



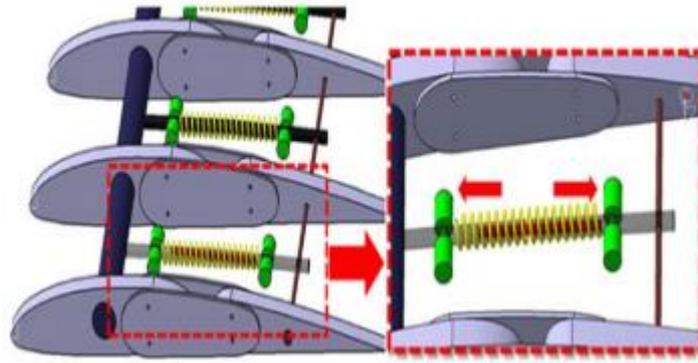
**Figura 9.1** Fotografía de la tela espacial inteligente impresa en 4D. (Fuente: [220])

## 9.2 ALAS CAMBIANTES

El equipo de investigación del Institut de Mecanique des Fluides de Toulouse (IMFT) y los Laboratorios Laplace han desarrollado un ala revolucionaria, denominada ala “morphing”, gracias a la financiación por la Comisión Europea del proyecto Smart Morphing & Sensing (SMS). Se trata de un ala “cambiante” que puede cambiar de forma y vibrar a lo largo de su borde de fuga, imitando la aerodinámica eficiente de las aves, lo que ha demostrado una reducción significativa de la resistencia aerodinámica en pruebas en túneles de viento.

A diferencia de las alas convencionales, que están diseñadas para un rendimiento óptimo en vuelo de crucero, estas alas cambiantes pueden adaptarse a diferentes estados de vuelo, optimizando así su eficiencia en todas las etapas de la misión. Esto es posible mediante el uso de aleaciones con memoria de forma (SMA) y materiales compuestos piezoeléctricos que se activan eléctricamente para modificar la forma e inclinación de los alerones. [221]

Estas alas, gracias a la aplicación de parches de material compuesto piezoeléctrico, producen vibraciones a lo largo del borde de fuga, imitando las plumas de las aves rapaces. Debido a esta vibración, se generan pequeños vórtices que rompen los vórtices existentes, reduciendo con ello la resistencia aerodinámica y el ruido. [222]



**Figura 9.2** Actuador de aleación con memoria de forma en la extensión del ala morphing.

(Fuente: [222])

### 9.3 RUEDAS SUPERELÁSTICAS

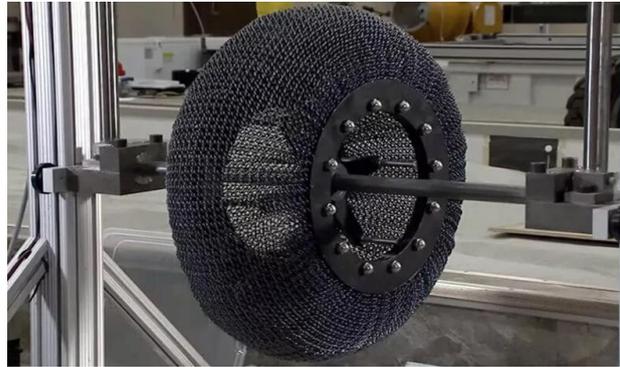
La exploración espacial requiere una movilidad eficiente, ya sea en la Tierra o en lugares remotos como la Luna o Marte, donde unos buenos neumáticos son indispensables para desplazar los vehículos de un lugar a otro. Durante los últimos años, el Centro de Investigación NASA Glenn ha estado investigando el desarrollo de neumáticos para misiones espaciales. [223]

Para las primeras exploraciones se presentaron tres diseños principales de ruedas: el vehículo ruso “Lunokhod” (Moon Walker en inglés), el “Modularized Equipment Transporter” (MET) estadounidense y el “Lunar Roving Vehicle” (LRV) de la NASA; enfocados en el transporte de equipos y astronautas en la superficie lunar.

Cuando la atención de las misiones espaciales se desvió de la Luna hacia el planeta rojo, la exploración del terreno recayó en los Rovers. Estos vehículos utilizaban ruedas de aluminio sólido; sin embargo, para el Rover Curiosity, debido a su gran peso y tamaño, resultaron problemáticas y acabaron sufriendo daños. Para resolver este problema, los ingenieros del NASA Glenn investigaron nuevos diseños de ruedas y surgió el concepto de ruedas de muelles, ideado por Vivake Asnami.

Se trataba de unas ruedas flexibles y duraderas, compuestas por una malla con alambres de acero enroscados en forma de muelle, con la capacidad de soportar grandes cargas y adaptarse al terreno ofreciendo una adecuada tracción. Además, los neumáticos no se

hundían y eran capaces de absorber impactos. Estas propiedades se consiguieron gracias al uso de Nitinol, una aleación de níquel y titanio con efecto de superelasticidad, la cual permitía a las ruedas deformarse y recuperar su forma original de manera excepcional, lo que las hacía ideales para futuros vehículos de exploración espacial. [224]



**Figura 9.3** Representación del neumático superelástico. (Fuente: [224])

#### **9.4 VELAS SOLARES AUTODESPLEGABLES**

Las velas solares autodesplegables son sistemas innovadores que aprovechan la luz solar como fuente de propulsión en el espacio. Requieren una gran superficie de vela para aprovechar la presión de la radiación solar ya que esta es reducida, aunque, sin embargo, proporciona un empuje constante para acelerar la nave espacial. [225]

Estas velas están fabricadas con materiales inteligentes, como aleaciones con memoria de forma a base de Nitinol (NiTi), que les permiten desplegarse de forma automática y reducir su peso. Se colocarían en los pliegues de la vela y, al calentarse, se estirarían para lograr un despliegue preciso y simplificado en comparación con los sistemas actuales. [226]

El uso de estos materiales permitirá en un futuro optimizar más su diseño, además de reducir su peso y superficie y mejorar su eficiencia. De esta manera, se podrá garantizar el éxito de las velas solares autodesplegables en misiones futuras.



**Figura 9.4** Secuencia de la configuración de plegado de una vela solar autodesplegable.

(Fuente: [225])

## 9.5 HORMIGÓN INTELIGENTE

Aunque su uso en el sector aeroespacial estaría prácticamente limitado a los aeropuertos, (el Aeropuerto de la Ciudad de Londres lo utiliza, por ejemplo) el hormigón inteligente es también un material que podría revolucionar la construcción. Gracias a su capacidad de repararse a sí mismo, presenta una gran variedad de aplicaciones ya que reduce significativamente el mantenimiento en edificios e infraestructuras. [227],[228]

El material está compuesto por una mezcla de cemento tradicional con cepas de una bacteria microscópica sintéticamente diseñada y lactato de calcio. Cuando entra en contacto con el agua, estas bacterias se activan y se alimentan del calcio, produciendo con ello un material con la propiedad de sellar fisuras del hormigón.

Con el uso de esta tecnología, la infraestructura podría adaptarse a cambios de temperatura y sería capaz de identificar vulnerabilidades y mejorar su seguridad y resistencia. [229],[230]



**Figura 9.5** Representación del hormigón inteligente. (Fuente: [227])

## 9.6 POSIBLES APLICACIONES FUTURAS

Los materiales inteligentes están destinados a desempeñar un papel significativo en el sector aeroespacial gracias a su capacidad de adaptarse y responder a estímulos externos. Mediante el uso de estos materiales se podrán construir aeronaves más ligeras y eficientes y con mejores prestaciones y rendimiento en todas las fases de vuelo. Estos materiales pueden ajustar sus propiedades mecánicas para optimizar la aerodinámica, reducir la resistencia y mejorar la eficiencia energética. [231]

Entre las posibles aplicaciones futuras de los materiales inteligentes se podría mencionar la de control térmico adaptativo, permitiendo regular y distribuir el calor de manera más eficiente en las aeronaves, lo que resultaría en un mayor rendimiento y un menor consumo de energía. [231]

Otra aplicación podría ser la utilización de sensores integrados en la estructura de las aeronaves para el monitoreo en tiempo real del rendimiento y la integridad estructural, gracias a la cual se podrá detectar de forma rápida posibles daños, mejorando la seguridad y reduciendo la necesidad de inspecciones frecuentes. [232]

Los materiales inteligentes podrían ser utilizados en la reducción de ruido aeronáutico, tanto en el interior como el exterior de la aeronave, disminuyendo el impacto acústico y mejorando la comodidad de los pasajeros. [233]

Una posible aplicación futura de estos materiales, en relación con el efecto ferroeléctrico, podría estar relacionada con la generación y almacenamiento de energía. Los materiales

inteligentes podrían utilizarse para capturar y convertir la energía generada durante el vuelo (vibraciones, fuerzas aerodinámicas u otras fuentes de electricidad) y almacenarla para un uso posterior. [231]

Por último, la aplicación de los metamateriales en un futuro, si se logran desarrollar y optimizar, sería un área prometedora, sobre todo en el ámbito militar. Serían opciones idóneas para desarrollar tecnologías de camuflaje, sistemas de ocultación y reducción de firma y, además, mejorarían la capacidad de supervivencia y sigilo de las aeronaves militares. [231]

Página dejada intencionadamente en  
blanco

# 10. Proyectos relacionados con materiales inteligentes en el sector aeroespacial

Como se ha podido observar en el apartado anterior, los materiales inteligentes se han convertido un campo de investigación prometedor en el sector aeroespacial. Además de aplicaciones de estos materiales, a lo largo de los últimos años, se han creado diversos proyectos en este sector relacionados con los materiales inteligentes.

A continuación, se presentará una investigación sobre algunos de los proyectos más destacados en el ámbito de los materiales inteligentes dentro de la industria aeroespacial, ordenados cronológicamente. Todos ellos están reflejados en el Servicio de Información Comunitario sobre Investigación y Desarrollo (CORDIS).

## 10.1 PROYECTO ARTIMA

**Fechas de inicio y final del proyecto:** 1 diciembre 2004 - 30 noviembre 2007

El proyecto ARTIMA (Aircraft Reliability Through Intelligent Materials Application) tenía el objetivo de lograr una mejora en la fiabilidad de las aeronaves mediante la aplicación de materiales inteligentes. Pretendía desarrollar la capacidad de supervisar el estado estructural de las aeronaves en tiempo real y de manera confiable, mejorando así la seguridad y reduciendo los costes de mantenimiento. Además, para solucionar los problemas de vibración y ruido en los aviones se propuso el uso de materiales inteligentes en actuadores activados por campos externos eléctricos o magnéticos. El proyecto se centró en la implementación de soluciones industriales realistas para la monitorización de la salud estructural y la reducción de vibraciones en aeronaves. [234]

## 10.2 PROYECTO SARISTU

**Fechas de inicio y final del proyecto:** 1 septiembre 2011 – 31 agosto 2015

El proyecto SARISTU (SmARt Intelligent aircraft STructUres) tenía el objetivo de abordar los desafíos de la integración física de conceptos estructurales inteligentes en aeronaves comerciales, con el fin de reducir el peso y los costes operativos, además de mejorar el rendimiento aerodinámico. El enfoque se centró en el desarrollo de materiales que permitieran una distorsión conformada y controlada de superficies aerodinámicamente importantes, así como la capacidad de adaptación del fuselaje y otras funcionalidades. Además, se buscaba demostrar la viabilidad estructural de los diferentes conceptos de “morphing”, incluyendo el borde de ataque, el borde de fuga y el winglet. También se consideraba la implementación de sistemas independientes e integrados para el control óptimo de las superficies morphing y la evaluación de daños en servicio. [235]

## 10.3 PROYECTO PEASSS

**Fechas de inicio y final del proyecto:** 1 enero 2013 - 30 abril 2017

El proyecto PEASSS (PiezoElectric Assisted Smart Satellite Structure) tenía el objetivo de desarrollar, fabricar, probar y calificar "estructuras inteligentes" que combinaban paneles compuestos, materiales piezoeléctricos y sensores de última generación para mejorar de forma autónoma la precisión de apuntamiento y la generación de energía en el espacio. Estas estructuras inteligentes permitirían un control preciso del ángulo, la compensación térmica y de vibraciones, mejorando las observaciones de la Tierra (cartografía medioambiental y planetaria) y la obtención de imágenes fronterizas y regionales. El enfoque del proyecto era mejorar la precisión y reducir el coste y el tiempo de desarrollo de futuras plataformas de sensores más avanzadas. [236]

## 10.4 PROYECTO SMS

**Fechas de inicio y final del proyecto:** 1 mayo 2017 - 30 abril 2020

El proyecto SMS (Smart Morphing & Sensing) tenía el objetivo de desarrollar una tecnología innovadora que combinara actuadores electroactivos y sensores para mejorar la eficiencia aerodinámica, reducir las vibraciones y mitigar el ruido en estructuras aeroespaciales. El enfoque del proyecto era el uso de materiales inteligentes (piezoactuadores, aleaciones con memoria de forma (SMA) y polímeros electroactivos) para conseguir un “morphing” económico y deformar la estructura según el diseño óptimo y los comandos de control de vuelo. Además, se implementaron sensores de presión para obtener información sobre el rendimiento de la actuación del vuelo, permitiendo así una optimización eficiente en tiempo real.

## 10.5 PROYECTO MASTRO

**Fechas de inicio y final del proyecto:** 1 diciembre 2017 – 31 agosto 2021

El proyecto MASTRO (Intelligent bulk MAterials for Smart TRanspOrt industries) tenía el objetivo de desarrollar materiales inteligentes al por mayor para el sector del transporte, implementando conceptos innovadores como autodetección, autodeshielo, autocurado, autorreparación y autoprotección, todos ellos basados en fenómenos como la piezoresistividad y el efecto Joule. El enfoque principal era mejorar la seguridad de los consumidores, aumentar la vida útil de los componentes y mejorar su rendimiento, al mismo tiempo que se reducían los costes de mantenimiento y fabricación. El proyecto pretendía demostrar la funcionalidad de estos componentes en condiciones relevantes a nivel de prototipo. Para conseguirlo, se investigaron matrices que solían ser polímeros reforzados con fibra de vidrio o carbono, materiales termoplásticos, asfalto y hormigón, con la incorporación de nanomateriales conductores eléctricos basados en carbono. [237]

## 10.6 PROYECTO SMARTFAN

**Fechas de inicio y final del proyecto:** 1 enero 2018 – 31 diciembre 2021

El proyecto Smartfan tenía el objetivo de desarrollar materiales inteligentes al por mayor utilizando micro y nanocomponentes con propiedades fisicoquímicas especiales. Materiales como fibras de carbono (CF), nanotubos de carbono (CNT), nanofibras de carbono (CNF), microcontenedores, nanopartículas electromagnéticas, colorantes, y piezoeléctricos, se utilizaban combinados con matrices poliméricas como Epoxi, PEEK o PVDF para la fabricación de nuevos materiales inteligentes. El enfoque final era crear materiales compuestos ligeros que transfiriesen las propiedades de los componentes inteligentes y que fueran compatibles, de bajo coste y reciclables o reutilizables. [238]

## 10.7 PROYECTO INCOMESS

**Fechas de inicio y final del proyecto:** 1 marzo 2020 – 29 febrero 2024

El proyecto InComEss (INnovative polymer-based COMposite systems for high-efficient Energy Scavenging and Storage) tiene el objetivo de desarrollar materiales inteligentes eficientes capaces de captar y almacenar energía. Esto es posible gracias a la combinación de materiales compuestos avanzados basados en polímeros en un concepto nuevo de fuente única/múltiple, que permite convertir la energía mecánica y el calor residual en energía eléctrica. El proyecto pretende crear sistemas de recolección de energía (EHS) utilizando generadores piezoeléctricos, termoeléctricos y termo-piezoeléctricos de alto rendimiento, además de supercondensadores monolíticos. Estos sistemas serán utilizados en la supervisión de la salud estructural en edificios y aeronaves, en la localización precisa de vehículos y en la mejora de la eficiencia de conversión energética. [239]

## 10.8 PROYECTO DOMMINIO

**Fechas de inicio y final del proyecto:** 1 enero 2021 - 30 junio 2024

El proyecto DOMMINIO (Digital method for imprOved Manufacturing of next-generation Multifunctional airframe parts) tiene el objetivo de desarrollar una metodología innovadora basada en datos para el diseño, fabricación, mantenimiento y precertificación de piezas de fuselaje multifuncionales e inteligentes. El proyecto pretende utilizar una combinación de tecnologías de fabricación rentables y flexibles (ATL o FFF) en conjunto con herramientas de simulación avanzadas y sistemas de control de calidad, con el fin de fabricar laminados compuestos de alta calidad y refuerzos impresos en 3D. Se desarrollarán sistemas de control de calidad por ultrasonidos que permitan garantizar la integridad estructural de las piezas. Además, se utilizarán modelos basados en la física para proporcionar datos con la finalidad de realizar un seguimiento en tiempo real de las piezas y detectar fallos, lo que respaldará la aplicación de nuevas metodologías de mantenimiento y reparación. [240]

## 10.9 PROYECTO INFINITE

**Fechas de inicio y final del proyecto:** 1 julio 2022 - 31 mayo 2025

El proyecto INFINITE tiene el objetivo de desarrollar sensores y analizadores basados en el uso de hilos diminutos ferromagnéticos para ser incorporados en piezas estructurales compuestas del sector aeroespacial, que sean capaces de monitorear la fabricación y la salud estructural a lo largo de la vida útil del componente. Esto será posible gracias a la aplicación de una señal magnética segura, que proporcionará información sobre la integridad, el rendimiento y la seguridad del componente, la cual permitirá mejorar las operaciones de mantenimiento. El enfoque del proyecto es evaluar también el efecto del hardware de detección en los métodos actuales de reciclaje de materiales compuestos. Esto abrirá nuevas posibilidades en su diseño y mejorará la calidad, el coste y la confiabilidad de los componentes. [241]

Página dejada intencionadamente en  
blanco

# 11. Conclusiones

A lo largo de este trabajo se han estudiado los diferentes tipos de materiales inteligentes que existen, incluidos los metamateriales, con sus propiedades y aplicaciones. Además, se ha presentado una investigación sobre la impresión 4D, atendiendo a sus principios básicos y las diversas técnicas de fabricación utilizadas. En última instancia se han expuesto aplicaciones de los materiales inteligentes en el sector aeroespacial y proyectos basados en el uso de estos.

Con todo esto, se puede llegar a la conclusión de que los materiales inteligentes están destinados a revolucionar la tecnología y los diferentes sectores gracias a sus propiedades únicas y potenciales aplicaciones.

En primer lugar, se encuentran los materiales piezoeléctricos (PE), que son aquellos que tienen la capacidad de transformar energía mecánica en energía eléctrica (piezoelectricidad directa) o viceversa, convertir energía eléctrica en energía mecánica (piezoelectricidad inversa). Se pueden distinguir entre cristales PE, que son principalmente los que se encuentran en la naturaleza, destacando el cuarzo y la sal de Rochelle, los cuales son empleados en relojes muy precisos y filtros de banda estrecha; cerámicas PE, compuestas por policristales y usadas en equipos de limpieza de ultrasonidos, sensores, actuadores o acelerómetros entre otras aplicaciones y polímeros PE, que son compuestos orgánicos que pueden polarizarse en presencia de un campo magnético externo. Destaca en este grupo el PVDF y estos son empleados en transductores electroacústicos, sensores de presión y sistema de ultrasonidos por imagen, principalmente. Gracias al efecto piezoeléctrico directo, una aplicación prometedora en el futuro de los materiales piezoeléctricos podría ser la creación de pavimentos inteligentes que convirtieran la energía cinética de los vehículos en electricidad o el diseño de “wearables”, como pulseras o relojes inteligentes, que aprovecharan los movimientos del cuerpo humano para generar electricidad utilizable.

En segundo lugar, se puede hablar de los materiales con memoria de forma (SMM), que son aquellos que tienen la capacidad de recuperar su forma original una vez han sido deformados. En este grupo se pueden observar varios tipos de materiales con esta propiedad; sin embargo, los más desarrollados y utilizados son las aleaciones (SMA) y los polímeros (SMP). Las aleaciones son uno de los materiales inteligentes más prometedores actualmente. Gracias a diferentes aleaciones como puede ser el Nitinol (NiTi), se han desarrollado numerosos avances en medicina, además de en industria e ingeniería civil. Se prevé que en un futuro tengan aún muchas más aplicaciones en el sector biomédico debido a su biocompatibilidad, propiedades que no tienen muchas SMA. En el caso de los polímeros con memoria de forma (SMP), también son empleado en numerosas aplicaciones interesantes, como biomedicina, ingeniería o industria textil. Sin embargo, su aplicación más importante y revolucionaria es la fabricación de material autorreparable, el cual es capaz de arreglar roturas producidas por grietas. El desarrollo y perfeccionamiento de este material podría tener aplicaciones significativas en el futuro en la construcción de edificios, automóviles o aeronaves con una estructura autorreparables.

El siguiente grupo de materiales son los magnetorreológicos (MR), que son aquellos que pueden alterar sus propiedades reológicas (viscosidad y rigidez) en presencia de campos magnéticos. Se distinguen entre fluidos MR, utilizados en amortiguadores, sistemas de frenos y en medicina en la fabricación de prótesis; y elastómeros MR, empleados sobre todo en amortiguación y aislamiento de vibraciones y en robótica. En un futuro cercano, estos materiales podrían ser utilizados en sistemas de control de vibraciones en aviones y cohetes, lo que ayudaría a mejorar la estabilidad y la eficiencia del vuelo.

En cuarto lugar, están los materiales cromóactivos (CA), que presentan la capacidad de cambiar de color en respuesta a un estímulo externo. Estos presentan la gran ventaja de que existe una gran variedad de estímulos a los que pueden responder, pero los principales son la temperatura, la luz y la corriente eléctrica. Principalmente son utilizados en objetos del día a día, como tazas, ropa, gafas de sol o juguetes. Sin embargo, hay diversas aplicaciones significativas que usan estos materiales: ventanas inteligentes, espejos retrovisores antideslumbrantes o revestimientos de edificios. Este último uso será importante en el futuro, ya que mejorará la eficiencia energética de los edificios

Por último, se encuentran los materiales fotoactivos (FA), capaces de emitir luz cuando son expuestos a radiación electromagnética. Esta propiedad les confiere numerosas aplicaciones, tanto en el día a día (lámparas, pantallas, señalización...) como en el futuro, ya que, gracias al efecto de la fluorescencia, estos materiales podrán ser empleados en la fabricación de estructuras y objetos que puedan emitir luz directamente en la oscuridad, como es el caso del cemento fosforescente.

Estos son los cinco tipos principales de materiales inteligentes, debido a que son los más utilizados actualmente y están presentes en diversas aplicaciones. Sin embargo, como se ha explicado en este trabajo, existen otros tipos de SM, que, aunque no están tan empleados como los anteriores, también tienen propiedades y aplicaciones muy interesantes.

Es el caso por ejemplo de los materiales piroeléctricos (PyE), una clase de piezoeléctricos que generan una carga eléctrica como respuesta a cambios de temperatura. Estos son usados en sensores infrarrojos, generadores de energía térmica e incluso en fusión nuclear (fusión piroeléctrica). La posibilidad de generar electricidad aprovechando el calor residual de los procesos industriales les abre un gran abanico de futuras aplicaciones en numerosas industrias.

Otro ejemplo son los materiales ferroeléctricos (FeE), otra clase de piezoeléctricos que tienen la capacidad de modificar y retener una carga eléctrica frente a un estímulo eléctrico. Esta propiedad les hace idóneos para fabricar capacitadores y condensadores cerámicos y dispositivos de memoria no volátil. Una aplicación prometedora de estos materiales se encuentra en la posibilidad de capturar la energía generada durante un vuelo y almacenarla para un uso posterior.

Un último caso, aunque posiblemente existan más tipos de materiales inteligentes, son los materiales electrorreológicos (ER), muy similares a los magnetorreológicos. Gracias a su capacidad de variar sus propiedades físicas, como la rigidez y la viscosidad, en presencia de campos eléctricos, estos fluidos son ampliamente utilizados en la industria. Se pueden encontrar en sistemas de amortiguación, sistemas de frenado, embragues, e incluso en dispositivos como controladores hápticos y pantallas. Se prevé que en un futuro serán más

usados en industrias como la aeroespacial, en sistemas de control y amortiguación de vibraciones; y la robótica, con la creación de robots flexibles.

Existe otra gama de materiales, denominados metamateriales (MM), que presentan unas propiedades electromagnéticas excepcionales que no se encuentran en los materiales convencionales. Por dicha razón, en varias fuentes de información y en este trabajo se han considerado también inteligentes. El desarrollo y la optimización de estos metamateriales podría suponer el hecho de lograr uno de los mayores retos actuales de la ciencia: la creación de una “capa de invisibilidad”.

Este acontecimiento sería revolucionario y tendría una enorme cantidad de aplicaciones, sobre todo en el ámbito militar. No obstante, actualmente solo se han creado prototipos de pequeña escala y poco optimizados, por lo que, de conseguir desarrollarla (si al final se logra) esto sería en un futuro muy lejano, gracias a un gran avance de las tecnologías.

Sin embargo, estos metamateriales son usados en otras aplicaciones como la creación de ropa transparente (Metaflex) o en espejos retrovisores para eliminar los puntos muertos o ciegos, consiguiendo una mejora en la seguridad vial; aunque aún varios siguen en etapas de desarrollo.

Una ventaja que presentan los materiales inteligentes es la posibilidad de añadir una cuarta dimensión (el tiempo) en el proceso de fabricación aditiva, dando lugar a lo que se conoce como impresión 4D. Casi cualquier proceso de impresión 3D puede ser aplicado a la impresión 4D, simplemente la diferencia recae en el uso de materiales inteligentes como material de fabricación.

No obstante, como se ha reflejado en el trabajo, son solo unos pocos procesos los que actualmente se aplican en 4D, debido a factores como el tamaño de pieza impresa y la velocidad de impresión. Dos de los métodos más utilizados son el modelado por deposición fundida (FDM) y la estereolitografía (SLA), aunque está empezando a hacerse cada vez más presente la impresión de líquido rápida (RLP) debido a su alta velocidad de impresión.

Como se ha observado en el trabajo, son numerosos los ejemplos de objetos fabricados con esta tecnología 4D y los sectores en los que son aplicados. Gracias a esta nueva fabricación de objetos “cambiantes” se ha conseguido un avance notable en la industria e incluso se ha podido salvar la vida de personas.

Uno de los sectores más beneficiados del uso de estos materiales inteligentes es el sector aeroespacial, en el cual los SM brindan la posibilidad de cuantiosas mejoras en diversos aspectos, como en eficiencia energética, rendimientos de operación en las diferentes fases de vuelo y reducción de la resistencia y el ruido aerodinámicos. Todos estos progresos permiten que la aviación sea cada vez más eficiente, cómoda y segura. Ejemplos de usos de estos materiales son las alas “cambiantes” para lograr rendimientos óptimos durante todo el vuelo o incluso el hormigón inteligente, que permitirá un menor mantenimiento y mejores prestaciones en los aeropuertos.

Además, los materiales inteligentes también son utilizados en diversas misiones espaciales, y su desarrollo y perfeccionamiento posibilitarán un gran avance en el ámbito de la exploración espacial. Ejemplos de usos de estos materiales son las ruedas superelásticas de los Rover en el planeta rojo, las velas solares autodesplegables o la tela espacial inteligente de la NASA.

Como se ha podido ver, los materiales inteligentes ofrecen perspectivas prometedoras en este sector; ejemplo de ello son los numerosos proyectos basados en el uso de estos materiales que se han llevado y se están llevando a cabo. Por lo tanto, se puede afirmar que, con el paso del tiempo, estos materiales van a ser protagonistas en la industria y tienen el potencial de la industria por completo.

En conclusión, resumiendo todo lo anterior, el avance de la industria dependerá en gran medida del progreso de los materiales, y los materiales inteligentes desempeñan un papel fundamental en esta evolución. Junto a otros materiales innovadores, como los “materiales del futuro”, se posicionan como protagonistas en el impulso de las nuevas tecnologías.

Página dejada intencionadamente en  
blanco

## 12. Bibliografía

- [1] ITMA - Instituto Tecnológico de Materiales de Asturias. “Materiales Activos”. [En línea]. Disponible en: <http://www.itma.es/index.php/areas-de-i-d/materiales-activos-menu-2107>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [2] Universidad de Cantabria. “Guía de Trabajo Fin de Grado - Mención Ingeniería de Materiales”. [En línea]. Disponible en: <https://web.unican.es/estudios/Documents/Guias/2016/es/M1301.pdf>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [3] Dynatec. “Materiales inteligentes y su impacto en la industria I”. [En línea]. Disponible en: <https://dynatec.es/2021/10/26/materiales-inteligentes-y-su-impacto-en-la-industria-i/>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [4] ATIGA. “Estado del Arte Materiales Inteligentes”. [En línea]. Disponible en: <https://www.atiga.es/web/wp-content/uploads/2017/03/Estado-del-Arte-Materiales-Inteligentes.pdf>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [5] Iberdrola. “Materiales inteligentes: aplicaciones y ejemplos”. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/innovacion/materiales-inteligentes-aplicaciones-ejemplos>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [6] Atria Innovation. “Materiales inteligentes para la sostenibilidad”. [En línea]. Disponible en: <https://www.atriainnovation.com/materiales-inteligentes-para-la-sostenibilidad/#:~:text=Su%20objetivo%20es%20reducir%20al,la%20economía%20circular%20y%20sostenibilidad>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [7] Futuro Eléctrico. “Materiales inteligentes”. [En línea]. Disponible en: <https://futuroelectrico.com/materiales-inteligentes/>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [8] Atria Innovation. “Materiales inteligentes”. [En línea]. Disponible en: <https://www.atriainnovation.com/materiales-inteligentes/>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [9] Materiales Inteligentes. “Materiales inteligentes: ejemplos”. [En línea]. Disponible en: <https://materialesinteligentes.win/materiales-inteligentes-ejemplos/>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [10] Silo Tips. “Se denominan materiales inteligentes (smart materials) a todos aquellos materiales”. [En línea]. Disponible en: <https://silo.tips/download/se-denominan-materiales-inteligentes-smart-materials-a-todos-aquellos-materiales>. [Accedido: 29 de mayo, 2023].
- [11] Sciencing. “Piezoelectric Materials”. [En línea]. Disponible en: <https://sciencing.com/piezoelectric-materials-8251088.html>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [12] P. Bañuls, Universidad Politécnica de Valencia, 2016. “Desarrollo de materiales

- piezoeléctricos mediante la aplicación de polímeros espumados”. [En línea]. Disponible en: [https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG\\_Gomez\\_Molina\\_2018.pdf?sequence=1](https://ebuah.uah.es/dspace/bitstream/handle/10017/33621/TFG_Gomez_Molina_2018.pdf?sequence=1). [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [13] Industrias GSL. “Materiales piezoeléctricos”. [En línea]. Disponible en: <https://industriassgsl.com/blogs/automatizacion/materiales-piezoelctricos>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [14] P. Monllor, Universidad Miguel Hernández de Elche, 2021. “Transductores piezoeléctricos aplicados a la generación de energía. Estudio experimental”. [En línea]. Disponible en: <http://dspace.umh.es/bitstream/11000/8523/1/TFG-Monllor%20Martínez%2C%20Pedro.pdf>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [15] Tomorrow City. “Piezoelectricidad: generar energía con movimiento”. [En línea]. Disponible en: <https://tomorrow.city/a/piezoelectricidad-generar-energia-con-movimiento>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [16] Xataka Ciencia. “Por qué un trozo de cuarzo es capaz de mantener los relojes en hora”. [En línea]. Disponible en: <https://www.xatakaciencia.com/fisica/por-que-un-trozo-de-cuarzo-es-capaz-de-mantener-los-relojes-en-hora>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [17] Enciclopedia de Química. “Turmalina”. [En línea]. Disponible en: <https://www.quimica.es/enciclopedia/Turmalina.html>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [18] Electronica2000. “Cristales de cuarzo, sales de Rochelle, turmalina”. [En línea]. Disponible en: <http://www.electronica2000.com/cristales-de-cuarzo-sales-de-rochelle-turmalina/>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [19] Hmong. “Lithium tantalate”. [En línea]. Disponible en: [https://hmn.wiki/es/Lithium\\_tantalate](https://hmn.wiki/es/Lithium_tantalate). [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [20] Hmong. “Lithium niobate”. [En línea]. Disponible en: [https://hmong.es/wiki/Lithium\\_niobate](https://hmong.es/wiki/Lithium_niobate). [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [21] Limpieza Ultrasonidos. “Ultrasonidos”. [En línea]. Disponible en: <http://www.limpieza-ultrasonidos.com/ultrasonidos/169.html>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [22] M. S. Castro, J. E. Camargo, J. Taub, J. F. Fernandez, F. Rubio-Marcos, L. A. Ramajo, “Cerámicos piezoeléctricos libres de plomo basados en los sistemas  $\text{Bi}_{0.5}(\text{Na}_{0.8}\text{K}_{0.2})_{0.5}\text{TiO}_3$  y  $\text{K}_{0.5}\text{Na}_{0.5}\text{NbO}_3$ ”, Anales de la Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales de Buenos Aires, vol. 65, no. 3, pp. 393-402, ago. 2013. [En línea]. Disponible en: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/4115>.
- [23] A. C. Caballero, J. F. Fernandez, P. Duran, C. Moure, “Titanato de bario cerámico”, Departamento de Electrocerámica, Instituto de Cerámica y Vidrio, CSIC, Arganda del Rey, 28500 Madrid, España. Disponible en: <http://boletines.secv.es/upload/199433005.pdf>
- [24] [1] TermWiki. “Barium Strontium Titanate”. [En línea]. Disponible en: [https://es.termwiki.com/ES/barium\\_strontium\\_titanate](https://es.termwiki.com/ES/barium_strontium_titanate). [Accedido: 3 de junio, 2023].

- [25] Zhongfu. “Dyneon PVDF 6010/6010-0000 Polyvinylidene Fluoride Resin”. [En línea]. Disponible en: [https://es.made-in-china.com/co\\_zhongfu/product\\_Dyneon-PVDF-6010-6010-0000-Polyvinylidene-Fluoride-Resin\\_rynehseug.html](https://es.made-in-china.com/co_zhongfu/product_Dyneon-PVDF-6010-6010-0000-Polyvinylidene-Fluoride-Resin_rynehseug.html). [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [26] Mexpolímeros. “LCP (Liquid Crystal Polymers)”. [En línea]. Disponible en: <https://www.mexpolimeros.com/lcp.html>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [27] Todoenpolímeros. “Polímeros de Cristal Líquido”. [En línea]. Disponible en: <https://todoenpolimeros.com/2018/04/06/polimeros-de-cristal-liquido/>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [28] J. Kim, A. Cheng, and Y.-C. Tai, “Parylene-C as a piezoelectric material,” in Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS), 2011, pp. 473-476, doi: 10.1109/MEMSYS.2011.5734464.
- [29] A. Gómez-Molina, Universidad de Alcalá, 2018. “Diseño de un Sistema de energy harvesting basado en piezoeléctricos”. [En línea]. Disponible en: [https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/87858/35596767N\\_TFG\\_14993602592226783101036341256939.pdf?sequence=2..](https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/87858/35596767N_TFG_14993602592226783101036341256939.pdf?sequence=2..) [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [30] Repsol. “Piezoelectricidad”. [En línea]. Disponible en: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/transicion-energetica/piezoelectricidad/index.cshtml>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [31] Planeta Electrónico. “Zumbador Piezoeléctrico 50mm sin Oscilador”. [En línea]. Disponible en: <https://www.planetaelectronico.com/zumbador-piezoelectrico-50mm-sin-oscilador-p-15871.html>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [32] Thorlabs. “Productos - Lente acromática de dobletes cementados”. [En línea]. Disponible en: <https://www.directindustry.es/prod/thorlabs/product-36188-460133.html>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [33] PiezoDisc. “Ultrasonic Piezoelectric Cleaning Transducer”. [En línea]. Disponible en: <http://es.piezodisc.com/piezoceramic-transducer/ultrasonic-piezoelectric-cleaning-transducer.html>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [34] Sensores de Medida. “Acelerómetro Piezoeléctrico Económico Metra KS78B”. [En línea]. Disponible en: <https://sensores-de-medida.es/catalogo/acelerometro-piezoelectrico-economico-metra-ks78b/>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [35] Museo Virtual CSIC. “Laboratorio Virtual del CSIC”. [En línea]. Disponible en: <https://museovirtual.csic.es/csic75/laboratorios/lab1/lab1b.html>. [Accedido: 3 de junio, 2023].
- [36] Atria Innovation. “¿Qué son los materiales con memoria de forma?”. [En línea]. Disponible en: <https://www.atriainnovation.com/que-son-los-materiales-con-memoria-de-forma/>. [Accedido: 5 de junio, 2023].
- [37] Triple Enlace. “Materiales con memoria de forma”. [En línea]. Disponible en: <https://triplenlace.com/2020/11/17/materiales-con-memoria-de-forma/>. [Accedido: 5 de junio, 2023].

- [38] SEAS - Estudios Superiores Abiertos. "Materiales con memoria de forma: el Nitinol". [En línea]. Disponible en: [https://www.seas.es/blog/disenio\\_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/](https://www.seas.es/blog/disenio_mecanico/materiales-con-memoria-de-forma-el-nitinol/). [Accedido: 5 de junio, 2023].
- [39] S. de la Flor. "Aleaciones con memoria de forma". [En línea]. Disponible en: <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6863/06Sfl06de14.pdf>. [Accedido: 5 de junio, 2023].
- [40] Gobierno de Argentina. "Los metales con memoria de forma". [En línea]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/noticias/los-metales-con-memoria-de-forma#:~:text=Esos%20metales%20tienen%20la%20caracter%C3%ADstica,los%20llama%20%22materiales%20inteligentes%22>. [Accedido: 5 de junio, 2023].
- [41] H. Hosoda and T. Inamura, "Mechanical properties of shape memory alloys," in *Shape Memory Alloys for Biomedical Applications*, T. Yoneyama and S. Miyazaki, Eds. Woodhead Publishing, 2009, pp. 20-36. doi: 10.1533/9781845695248.1.20.
- [42] L. Moreno, M. Muñoz, S. Garrido, and D. Blanco, "Materiales inteligentes: aleaciones con memoria de forma (SMA)," *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Serie A: Matemáticas*, vol. 103, no. 2, pp. 299-313, 2009. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/258108524>.
- [43] K. Tsuchiya, "Mechanisms and properties of shape memory effect and superelasticity in alloys and other materials: a practical guide," in *Shape Memory and Superelastic Alloys*, K. Yamauchi, I. Ohkata, K. Tsuchiya, and S. Miyazaki, Eds. Woodhead Publishing, 2011, pp. 3-14. doi: 10.1533/9780857092625.1.3.
- [44] S. Miyazaki and R.L. Sachdeva, "Shape memory effect and superelasticity in Ti—Ni alloys," in *Shape Memory Alloys for Biomedical Applications*, T. Yoneyama and S. Miyazaki, Eds. Woodhead Publishing, 2009, pp. 3-19. doi: 10.1533/9781845695248.1.3.
- [45] Es Ingeniería. "Materiales con memoria de forma". [En línea]. Disponible en: <https://esingenieria.pro/materiales-con-memoria-de-forma/>. [Accedido: 5 de junio, 2023].
- [46] F.J. Gil and J.A. Planell, "Shape memory alloys for medical applications," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 1, no. 3, pp. 229-242, 1998. doi: 10.1243/0954411981534231.
- [47] A. Marcos-Fernández. "Polímeros con memoria de forma: Un nuevo horizonte para los elastómeros". [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Angel-Marcos-Fernandez/publication/236171393\\_Polimeros\\_con\\_memoria\\_de\\_forma\\_Un\\_nuevo\\_horizonte\\_para\\_los\\_elastomeros/links/00b49517f82af1fe0f000000/Polimeros-con-memoria-de-forma-Un-nuevo-horizonte-para-los-elastomeros.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Angel-Marcos-Fernandez/publication/236171393_Polimeros_con_memoria_de_forma_Un_nuevo_horizonte_para_los_elastomeros/links/00b49517f82af1fe0f000000/Polimeros-con-memoria-de-forma-Un-nuevo-horizonte-para-los-elastomeros.pdf). [Accedido: 5 de junio, 2023].
- [48] M. Behl and A. Lendlein, "Shape-memory polymers," *Materials Today*, vol. 10, no. 4, pp. 20-28, 2007. doi: 10.1016/S1369-7021(07)70047-0.
- [49] Polímeros.com. "Descubre los polímeros termoplásticos con memoria de forma". [En línea]. Disponible en: <https://polimeros.com.es/categoria-polimeros-con-memoria-de-forma/descubre-la-increible-capacidad-de-los-polimeros-termoplasticos-con-memoria-de-forma-ejemplos-sorprendentes-que-no-crearas/>. [Accedido: 5 de junio, 2023].

- [50] M. D. Hager, S. Bode, C. Weber, U. S. Schubert, "Shape memory polymers: Past, present and future developments," *Prog. Polym. Sci.*, vol. 49-50, pp. 3-33, 2015. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2015.04.002.
- [51] Areametalurgia. "El nuevo polímero autoreparable tiene memoria de forma y es reciclable". [En línea]. Disponible en: <https://www.areametalurgia.com/post/el-nuevo-polimero-autorreparable-tiene-memoria-de-forma-y-es-reciclable>. [Accedido: 5 de junio, 2023].
- [52] PolymerExpert. "The Complete Guide: Shape Memory Materials and Their Applications". [En línea]. Disponible en: <https://polymerexpert.fr/en/r-d/the-complete-guide-shape-memory-materials-and-their-applications/>. [Accedido: 5 de junio, 2023].
- [53] Y. Xu, G. Liao, and T. Liu, "Magneto-Sensitive Smart Materials and Magnetorheological Mechanism," *Nanofluid Flow in Porous Media*, Mar. 2019, doi: 10.5772/INTECHOPEN.84742.
- [54] Interempresas. "Materiales y estructuras inteligentes". [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Plastico/Articulos/2971-Materiales-y-estructuras-inteligentes.html>. [Accedido: 8 de junio, 2023].
- [55] Actimat. "Magnetorreológicos". [En línea]. Disponible en: <http://www.actimat.es/web/magnetoreologicos.asp>. [Accedido: 8 de junio, 2023].
- [56] Docplayer. "Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica". [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/131041587-Departamento-de-ciencias-de-la-energia-y-mecanica.html>. [Accedido: 8 de junio, 2023].
- [57] Materiales Inteligentes. "Magnetorreológicos". [En línea]. Disponible en: <https://materialesinteligentes.win/magnetoreologicos/>. [Accedido: 8 de junio, 2023].
- [58] M. A. Sánchez-Alonso, J. E. Camporredondo-Saucedo, L. G. Castruita-Avila, F. Equihua-Guillén, A. M. García-Lara, y A. A. Muñoz-Zertuche, "Fluidos magnetorreológicos: síntesis, propiedades y aplicaciones," *Respuestas*, vol. 25, no. 1, pp. 184-194, 2020. doi: 10.22463/0122820X.2436.
- [59] Materfad. "Nuevos fluidos magnetorreológicos". [En línea]. Disponible en: <http://blog.materfad.com/2013/10/nuevos-fluidos-magnetorreologicos/#:~:text=Los%20materiales%20magnetorreol%C3%B3gicos%20consisten%20en,modificando%20la%20estructura%20del%20fluido>. [Accedido: 8 de junio, 2023].
- [60] Interempresas. "Propiedades y aplicaciones de los fluidos magnetorreológicos". [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/MetalMecanica/Articulos/115833-Propiedades-y-aplicaciones-de-los-fluidos-magnetoreologicos.html>. [Accedido: 8 de junio, 2023].
- [61] GQ. "Ford Mustang: La suspensión MagneRide y sus novedades". [En línea]. Disponible en: <https://www.revistagq.com/la-buena-vida/motor/articulos/ford-mustang-suspension-magneride-novedades-caracteristicas-precio/30512>. [Accedido: 8 de junio, 2023].
- [62] T. Liu and Y. Xu, "Magnetorheological Elastomers: Materials and Applications," *Smart and Functional Soft Materials*, Mar. 2019, doi: 10.5772/INTECHOPEN.85083.

- [63] J. David Carlson and Mark R. Jolly, "MR fluid, foam and elastomer devices," *Mechatronics*, vol. 10, no. 4-5, pp. 555-569, 2000. doi: 10.1016/S0957-4158(99)00064-1.
- [64] D. de la Calzada Lorenzo, "Trabajo de revisión bibliográfica de materiales termocrómicos para su integración en aplicaciones de uso industrial", Unileon Buleria, Disponible en: [https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/5429/jul2016\\_energía\\_71456375K.pdf?sequence=1](https://buleria.unileon.es/bitstream/handle/10612/5429/jul2016_energía_71456375K.pdf?sequence=1). [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [65] Virtual Pro. "Nuevos materiales y aplicaciones". [En línea]. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/revista/nuevos-materiales-y-aplicaciones/4>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [66] D. Masip, Universitat Politècnica de Catalunya. "Estudio de materiales termocrómicos para su aplicación en vidrios con control solar". [En línea]. Disponible en: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/328031/TFM\\_David%20Masip.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/328031/TFM_David%20Masip.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [67] S. Zheng, Y. Xu, Q. Shen, and H. Yang, "Preparation of thermochromic coatings and their energy saving analysis," *Sol. Energy*, vol. 112, pp. 263–271, Feb. 2015. doi: 10.1016/j.solener.2014.09.049.
- [68] Series Nemo. "Materiales termocrómicos". [En línea]. Disponible en: <http://blog.seriesnemo.com/materiales-termocromicos/>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [69] Hisour. "Thermochromism". [En línea]. Disponible en: <https://www.hisour.com/es/thermochromism-24806/>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [70] SFXC. "Thermochromic Pigment". [En línea]. Disponible en: <https://www.sfxc.co.uk/es/collections/thermochromic-pigment>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [71] Motorpasion. "Señalización vial que cambia de color según la temperatura". [En línea]. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/tecnologia/senalizacion-vial-que-cambia-de-color-segun-la-temperatura>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [72] Mamaluz Cajas de Luz. "Lámina termocrómica". [En línea]. Disponible en: <https://mamaluzcajasdeluz.es/producto/lamina-termocromica/>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [73] SFXC. "5 Pack Thermochromic Irreversible Label - 1 Level 82". [En línea]. Disponible en: <https://www.sfxc.co.uk/es/products/5-pack-thermax-thermochromic-irreversible-label-1-level-82>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [74] Hmong. "Mood Ring". [En línea]. Disponible en: [https://hmong.es/wiki/Mood\\_ring](https://hmong.es/wiki/Mood_ring). [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [75] Virtual Pro Biblioteca. "Materiales poliméricos termotrópicos y termocrómicos para control adaptativo solar". [En línea]. Disponible en: <https://www.virtualpro.co/biblioteca/materiales-polimericos-termotropicos-y-termocromicos-para-control-adaptativo-solar>. [Accedido: 11 de junio, 2023].

- [76] The Groyne. "Materiales inteligentes: la fusión perfecta entre diseño y tecnología". [En línea]. Disponible en: <https://thegroyne.com/2014/08/materiales-inteligentes-fusion-perfecta-diseno-tecnologia/>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [77] Observatorio Tecnológico Cerámico. "Termocrómicos". [En línea]. Disponible en: <https://observatoriotecnologicoceramico.es/termocromaticos/>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [78] J.-L. Zhao et al., "Photochromic crystalline hybrid materials with switchable properties: Recent advances and potential applications," *Coord. Chem. Rev.*, vol. 475, pp. 10882-10885, 2023. doi: 10.1016/j.ccr.2022.214918.
- [79] Hmn Wiki. "Tenebrescence". [En línea]. Disponible en: <https://hmn.wiki/es/Tenebrescence>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [80] S. Zamora. "Compuestos fotocromáticos: moléculas inteligentes y con buena memoria". [En línea]. Disponible en: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/492/1/Compuestos%20fotocromáticos%20moléculas%20inteligentes%20y%20con%20buena%20memoria.pdf>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [81] Química Orgánica. "Isómeros Geométricos o Cis-Trans". [En línea]. Disponible en: <https://www.quimicaorganica.org/estereoquimica/87-isomeros-geometricos-o-cis-trans.html>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [82] Wikipedia, la enciclopedia libre. "Cicloadición". [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Cicloadición#:~:text=Una%20cicloadición%20es%20una%20reacción,del%20esqueleto%20de%20los%20participantes>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [83] Liceo AGB. "Reacciones pericíclicas IV. Reacción de [4+4]. Ciclo de Diels-Alder". [En línea]. Disponible en: <https://www.liceoagb.es/quimiorq/periciclica4.html>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [84] Gafa Deportiva. "Características de las lentes fotocromáticas y ventajas que tienen las gafas deportivas fotocromáticas". [En línea]. Disponible en: [https://gafadeportiva.com/es/blog/70\\_caracteristicas-de-las-lentes-fotocromaticas-y-ventajas-que-tienen-las-gafas-deportivas-fotocromaticas.html](https://gafadeportiva.com/es/blog/70_caracteristicas-de-las-lentes-fotocromaticas-y-ventajas-que-tienen-las-gafas-deportivas-fotocromaticas.html). [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [85] J. González-Velasco, ResearchGate. "Electrocromismo". [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/322332426\\_Electrocromismo](https://www.researchgate.net/publication/322332426_Electrocromismo). [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [86] CIEINGMAT. "Materiales electrocrómicos". [En línea]. Disponible en: <https://cieingmat.wordpress.com/2014/07/02/materiales-electrocromaticos/>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [87] A. Bueno, Universidad Carlos III de Madrid. "Nuevos materiales electrocrómicos". [En línea]. Disponible en: [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/3196/nuevos\\_materiales\\_electrocromaticos1.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/3196/nuevos_materiales_electrocromaticos1.pdf?sequence=1&isAllowed=y). [Accedido: 11 de junio, 2023].

- [88] S. Wu, H. Sun, M. Duan, H. Mao, Y. Wu, H. Zhao, and B. Lin, "Applications of thermochromic and electrochromic smart windows: Materials to buildings," *Cell Reports Physical Science*, vol. 4, no. 5, pp. 101370, 2023. doi: 10.1016/j.xcrp.2023.101370.
- [89] Kirio. "¿Qué son los vidrios electrocrómicos?". [En línea]. Disponible en: <https://kirio.com.co/que-son-los-vidrios-electrocromicos/>. [Accedido: 11 de junio, 2023].
- [90] ScienceDirect. "Electroluminescence". [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/electroluminescence>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [91] EfectoLED Blog. "¿Qué es la electroluminiscencia?". [En línea]. Disponible en: <https://www.efectoled.com/blog/es/que-es-la-electroluminiscencia/>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [92] Techopedia. "Electroluminescence (EL) – Definition". [En línea]. Disponible en: <https://www.techopedia.com/definition/11455/electroluminescence-el>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [93] Universidad de Córdoba. "Resumen - FQM204: Química Física". [En línea]. Disponible en: <https://www.uco.es/organiza/departamentos/quimica-fisica/quimica-fisica/FQM204/Resumen.pdf>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [94] J-RPM. "Luz electroluminiscente". [En línea]. Disponible en: <http://j-rpm.com/2017/09/luz-electroluminiscente/>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [95] C. Moretti, X. Tao, L. Koehl y V. Koncar, "Electrochromic textile displays for personal communication", en V. Koncar (ed.), "Smart Textiles and their Applications", Woodhead Publishing, pp. 539-5682016, doi: 10.1016/B978-0-08-100574-3.00024-2.
- [96] Orient Display. "What is LCD (Liquid Crystal Display)?". [En línea]. Disponible en: <https://www.orientdisplay.com/es/knowledge-base/lcd-basics/what-is-lcd-liquid-crystal-display/>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [97] Visual LED. "Cómo funciona una pantalla LCD". [En línea]. Disponible en: <https://visualled.com/pantallas-led-info/como-funciona-una-pantalla-lcd/>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [98] Alquera. "Fluoresceína Sódica – Fluorescencia". [En línea]. Disponible en: <https://www.alquera.com/fluoresceina-sodica/fluorescencia/>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [99] Thermo Fisher Scientific. "Introduction to Fluorescence Techniques". [En línea]. Disponible en: <https://www.thermofisher.com/es/es/home/references/molecular-probes-the-handbook/introduction-to-fluorescence-techniques.html>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [100] Wikipedia. "Fluorescencia". [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Fluorescencia>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [101] Wikiwand. "Fotoblanqueo". [En línea]. Disponible en: <https://www.wikiwand.com/es/Fotoblanqueo>. [Accedido: 12 de junio, 2023].

- [102] Technologies. “Fluoróforos y sus aplicaciones”. [En línea]. Disponible en: <https://www.ibiantech.com/fluoroforos-y-sus-aplicaciones/>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [103] Xataka. “Crean nuevo material fluorescente que dicen que es el más brillante jamás hecho”. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/otros/crean-nuevo-material-fluorescente-dicen-que-brillante-jamas-hecho>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [104] Quimica. “Los investigadores descubren nuevos materiales fluorescentes”. [En línea]. Disponible en: <https://www.quimica.es/noticias/1179809/los-investigadores-descubren-nuevos-materiales-fluorescentes.html>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [105] 3M, “Fluorescent Materials and Their Benefits”. [En línea]. Disponible en: [https://www.3m.com.ar/3M/es\\_AR/seguridad-vial/recursos/blog-seguridad-vial/full-story/~fluorescent-materials-benefits/?storyid=a92a5991-8d49-4f80-b5c0-9cb72c721257](https://www.3m.com.ar/3M/es_AR/seguridad-vial/recursos/blog-seguridad-vial/full-story/~fluorescent-materials-benefits/?storyid=a92a5991-8d49-4f80-b5c0-9cb72c721257). [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [106] Libretexts. “Fluorescence and Phosphorescence”. [En línea]. Disponible en: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\\_Textbook\\_Maps/Supplemental\\_Modules\\_\(Physical\\_and\\_Theoretical\\_Chemistry\)/Spectroscopy/Electronic\\_Spectroscopy/Fluorescence\\_and\\_Phosphorescence](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Physical_and_Theoretical_Chemistry_Textbook_Maps/Supplemental_Modules_(Physical_and_Theoretical_Chemistry)/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Fluorescence_and_Phosphorescence). [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [107] Bombillas y Tubos. “Luminiscencia: la fluorescencia y la fosforescencia”. [En línea]. Disponible en: <https://www.bombillasytubos.com/b2c/noticia/1/21/luminiscencia-la-fluorescencia-y-la-fosforescencia>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [108] Crónica Jalisco. “Investigan en México sobre los materiales fosforescentes”. [En línea]. Disponible en: <https://www.cronicajalisco.com/notas/2014/13491.html>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [109] Tecindagu. “Materiales fosforescentes”. [En línea]. Disponible en: <https://tecindagu.home.blog/2019/11/26/materiales-fosforescentes/>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [110] Wikipedia. “Fosforescencia”. [En línea]. Disponible en: <https://es.wikipedia.org/wiki/Fosforescencia>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [111] RSEF Alicante. “Color: La luminiscencia”. [En línea]. Disponible en: <http://rsefalicante.umh.es/TemasColor/color09.htm>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [112] Inarquia “Nuevos materiales de construcción: cemento fosforescente”. [En línea]. Disponible en: <https://inarquia.es/nuevos-materiales-construccion-cemento-fosforescente/>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [113] Cultura Científica. “La pantalla móvil: ¿solo tres colores?”. [En línea]. Disponible en: <https://culturacientifica.com/2017/03/23/la-pantalla-movil-solo-tres-colores/>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [114] Vicky Casellas. “¿Qué es arte fluorescente?”. [En línea]. Disponible en: <https://vickycasellas.es/que-es-arte-fluorescente>. [Accedido: 12 de junio, 2023].
- [115] Academia Lab. “Piroelectricidad”. [En línea]. Disponible en: <https://academia-lab.com/enciclopedia/piroelectricidad/>. [Accedido: 14 de junio, 2023].

- [116] INCB. “Materiales piroeléctricos”. [En línea]. Disponible en: <http://www.incb.com.mx/index.php/cursos-de-electronica/98-banco-de-informaciones-almanaque/7171-materiales-piroelectricos-alm205s>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [117] Hmong. “Pyroelectricity”. [En línea]. Disponible en: <https://hmong.es/wiki/Pyroelectricity>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [118] Materia XXI. “Propiedades de los materiales”. [En línea]. Disponible en: <http://materiaxxi.blogspot.com/2011/07/propiedades-de-los-materiales.html>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [119] R. Mondal, M. A. M. Hasan, J. M. Baik, and Y. Yang, “Advanced pyroelectric materials for energy harvesting and sensing applications,” *Materials Today*, vol. 66, pp. 273-301, 2023. doi: 10.1016/j.mattod.2023.03.023.
- [120] M. M. Nasser, “Virtual experiment of pyroelectric fusion,” *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, vol. 362, pp. 45-48, 2015. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2015.09.028>.
- [121] Textos Científicos. “Materiales ferroeléctricos”. [En línea]. Disponible en: <https://www.textoscientificos.com/fisica/materiales-ferroelectricos>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [122] J. M. Gil, ResearchGate. “Materiales Ferroicos”. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Martin-Gil/publication/340560423\\_Materiales\\_Ferroicos/links/5e90a318a6fdcca78906bd5b/Materiales-Ferroicos.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Jesus-Martin-Gil/publication/340560423_Materiales_Ferroicos/links/5e90a318a6fdcca78906bd5b/Materiales-Ferroicos.pdf). [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [123] RIULL, Universidad de La Laguna. “Introducción a los ferroeléctricos cerámicos”. [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/6178/Introduccion+a+los+ferroelectricos+ceramicos.pdf?sequence=1>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [124] Universidad Politécnica de Valencia. “Materiales Ferroeléctricos”. [En línea]. Disponible en: [https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm09/pfcm9\\_4\\_1.html](https://www.upv.es/materiales/Fcm/Fcm09/pfcm9_4_1.html). [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [125] D. Wang, S. Hao, B. Dkhil, B. Tian, C. Duan, “Ferroelectric materials for neuroinspired computing applications,” *Fundamental Research*, 2023, ISSN 2667-3258. doi: 10.1016/j.fmre.2023.04.013
- [126] Profesional Review. “Feram, la revolución en el almacenamiento de datos”. [En línea]. Disponible en: <https://www.profesionalreview.com/2020/08/20/feram-revolucionar-almacenamiento-datos/#:~:text=La%20memoria%20ferroel%C3%A9ctrica%20de%20acceso,con%20un%20campo%20el%C3%A9ctrico%20externo>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [127] El Periódico de la Energía. “Desarrollan un nuevo material ferroeléctrico para células solares de perovskita sin plomo”. [En línea]. Disponible en: <https://elperiodicodelaenergia.com/desarrollan-un-nuevo-material-ferroelectrico-para-celulas-solares-de-perovskita-sin-plomo/>. [Accedido: 14 de junio, 2023].

- [128] TA Instruments. "Electrorheology (ER) Accessory". [En línea]. Disponible en: <https://www.tainstruments.com/electrorheology-er-accessory/?lang=es>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [129] Hmong. "Electrorheological fluid". [En línea]. Disponible en: [https://hmong.es/wiki/Electrorheological\\_fluid](https://hmong.es/wiki/Electrorheological_fluid). [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [130] Muy Interesante. "Fluidos electrorreológicos y magnetorreológicos". [En línea]. Disponible en: <https://www.muyinteresante.es/curiosidades/13148.html#:~:text=Fáciles%20de%20producir%2C%20los%20fluidos,y%20en%20líquido%20s on%20abrasivos>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [131] IMT. "Resumen Boletines". [En línea]. Disponible en: <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=3&IdBoletin=1>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [132] T. Aoyama, I. Inasaki, "Application of Electrorheological Fluid Dampers to Machine Tool Elements," CIRP Annals, vol. 46, no. 1, pp. 309-312, 1997. doi: 10.1016/S0007-8506(07)60832-4.
- [133] Hipertextual. "Motorola patenta una pantalla enrollable". [En línea]. Disponible en: <https://hipertextual.com/2008/01/motorola-patenta-una-pantalla-enrollable>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [134] A. B. Arauz Solis, CIQA Repositorio Institucional. "Desarrollo de materiales "inteligentes" con propiedades magnetoreológicas". [En línea]. Disponible en: <https://ciqa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1025/341/1/Adriana%20Berenice%20Arauz%20Solis.pdf>. [Accedido: 14 de junio, 2023].
- [135] Infinia Research. "Materiales del futuro: ciencia, tecnología e innovación". [En línea]. Disponible en: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/materiales-del-futuro-ciencia/>. [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [136] Atria Innovation. "7 materiales del futuro". [En línea]. Disponible en: <https://www.atriainnovation.com/7-materiales-del-futuro/>. [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [137] Universidad Politécnica de Madrid. "Materiales del futuro". [En línea]. Disponible en: <https://www.upm.es/e-politecnica/?p=4331>. [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [138] Revista Poli. "Metamateriales: una revisión". [En línea]. Disponible en: <https://revistas.elpoli.edu.co/index.php/pol/article/view/1382/1228>. [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [139] Infinia Research. "Metamateriales: ¿qué son y cuáles son sus propiedades?". [En línea]. Disponible en: <https://www.infinitiaresearch.com/noticias/metamateriales-que-son-propiedades/>. [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [140] Atria Innovation. "Metamateriales: Propiedades, Beneficios y Utilidades". [En línea]. Disponible en: <https://www.atriainnovation.com/metamateriales-propiedades-beneficios-utilidades/>. [Accedido: 15 de junio, 2023].

- [141] Ministerio de Defensa. “Materiales y tecnologías emergentes en sistemas de armas”. [En línea]. Disponible en: [https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/m/o/monografia\\_s\\_opt\\_9.pdf](https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/m/o/monografia_s_opt_9.pdf). [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [142] La Razón. “Descubren una manera de mejorar la estabilidad de los nanomateriales”. [En línea]. Disponible en: <https://www.larazon.es/ciencia/20210703/evqexjtstrhgdcsv3kvett2ax4.html>. [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [143] Mundo Digital. “Metamateriales: los materiales inteligentes”. [En línea]. Disponible en: <https://mundodigital.net/metamateriales-los-materiales-inteligentes>. [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [144] Enter. “Científicos desarrollan material para obtener ropa invisible”. [En línea]. Disponible en: <https://www.enter.co/cultura-digital/el-popurri/cientificos-desarrollan-material-para-obtener-ropa-invisible-2/>. [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [145] Prensa Libre. “Metaflex, el material que hace realidad el efecto de invisibilidad”. [En línea]. Disponible en: [https://www.prensalibre.com/internacional/metaflex-material-realidad-efecto-invisibilidad\\_0\\_368363228-html/](https://www.prensalibre.com/internacional/metaflex-material-realidad-efecto-invisibilidad_0_368363228-html/). [Accedido: 15 de junio, 2023].
- [146] Xataka. “¿Qué es la impresión 4D y qué materiales se usan? ¿Puede servir para algo más que hacer cosas bonitas?”. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/basics/que-impresion-4d-que-materiales-se-usan-puede-servir>. [Accedido: 18 de junio, 2023].
- [147] 3D Natives. “¿Qué es la impresión 4D?”. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/que-es-la-impresion-4d-021020192/>. [Accedido: 18 de junio, 2023].
- [148] Filament2Print. “Impresión 4D: Qué es realmente, cómo funciona y ejemplos”. [En línea]. Disponible en: [https://filament2print.com/es/blog/151\\_impresion-4d.html#:~:text=¿Qué%20es%20realmente%20la%20impresión,luz%20u%20otros%20estímulos%20ambientales](https://filament2print.com/es/blog/151_impresion-4d.html#:~:text=¿Qué%20es%20realmente%20la%20impresión,luz%20u%20otros%20estímulos%20ambientales). [Accedido: 18 de junio, 2023].
- [149] Iberdrola. “¿Qué es la impresión 4D?”. [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/innovacion/que-es-la-impresion-4d>. [Accedido: 18 de junio, 2023].
- [150] Cursos Aula 21. “¿Qué es la impresión 3D?”. [En línea]. Disponible en: <https://www.cursosaula21.com/que-es-la-impresion-3d/>. [Accedido: 18 de junio, 2023].
- [151] Eco Inventos. “Impresión 4D: Qué es y cómo funciona”. [En línea]. Disponible en: <https://ecoinventos.com/impresion-4d/>. [Accedido: 18 de junio, 2023].
- [152] All3DP. “Types of 3D Printers - 3D Printing Technology”. [En línea]. Disponible en: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>. [Accedido: 19 de junio, 2023].
- [153] Norma Española UNE-EN ISO 17296-2, “Fabricación aditiva: Principios generales. Parte 2: Visión general de categorías de procesos y de materias primas,” ISO 17296-2:2015, mayo 2017

- [154] S. A. Ansar, A. Singh, S. Aggrawal, N. Soni, and P. C. Pathak, "A Systematic Review on 4D Printing Technology," *Materials Today: Proceedings*, vol. 2023, 2023. doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.413.
- [155] Innovación y Tecnología. "Fabricación aditiva". [En línea]. Disponible en: <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/>. [Accedido: 19 de junio, 2023].
- [156] A. Ahmed, S. Arya, V. Gupta, H. Furukawa, and A. Khosla, "4D printing: Fundamentals, materials, applications and challenges," *Polymer (Guildf)*, vol. 228, p. 123926, 2021, doi: 10.1016/J.POLYMER.2021.123926.
- [157] F. Cerbe, M. Sinapius, M. Böl, "Methodology for FDM 4D printing with thermo-responsive SMPs," *Materials Today: Proceedings*, 2022, ISSN 2214-7853, doi: 10.1016/j.matpr.2022.11.440.
- [158] B. B. Samal, A. Jena, S. K. Varshney, C. S. Kumar, "FDM 4D printing: A low-cost approach of shape programming and assessing the shape memory properties using angle measurement methods in hot water actuation testing apparatus," *Materials Today: Proceedings*, 2023, ISSN 2214-7853, doi: 10.1016/j.matpr.2023.02.038.
- [159] M. Hosseinzadeh, M. Ghoreishi, K. Narooei, "4D printing of shape memory polylactic acid beams: An experimental investigation into FDM additive manufacturing process parameters, mathematical modeling, and optimization," *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 85, pp. 774-782, 2023, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.12.006.
- [160] A. Chinnakorn, W. Nuansing, M. Bodaghi, B. Rolfe, A. Zolfagharian, "Recent progress of 4D printing in cancer therapeutics studies," *SLAS Technology*, vol. 28, no. 3, pp. 127-141, 2023, doi: 10.1016/j.slast.2023.02.002.
- [161] P. Rastogi and B. Kandasubramanian, "Breakthrough in the printing tactics for stimulus-responsive materials: 4D printing," *Chemical Engineering Journal*, vol. 366, pp. 264-304, 2019, doi: 10.1016/J.CEJ.2019.02.085.
- [162] A. Andreu, P.-C. Su, J.-H. Kim, C. S. Ng, S. Kim, I. Kim, J. Lee, J. Noh, A. S. Subramanian, and Y.-J. Yoon, "4D printing materials for vat photopolymerization," *Additive Manufacturing*, vol. 44, p. 102024, 2021. doi: 10.1016/j.addma.2021.102024.
- [163] Protolabs. "Comprender la tecnología de fusión por lecho de polvo". [En línea]. Disponible en: <https://www.protolabs.com/es-es/recursos/sugerencias-de-diseno/comprender-la-tecnologia-de-fusion-por-lecho-de-polvo/>. [Accedido: 19 de junio, 2023].
- [164] Díaz, S., Ramos, G. y Galán, R., Universidad de La Laguna "Revisión de las técnicas de fabricación aditiva y sus aplicaciones". [En línea]. Disponible en: <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/21410/Revision%20de%20las%20tecnicas%20de%20fabricacion%20aditiva%20y%20sus%20aplicaciones.pdf?sequence=1>. [Accedido: 19 de junio, 2023].
- [165] H. G. Hosseinabadi, D. Nieto, A. Yousefinejad, H. Fattel, L. Ionov, and A. K. Miri, "Ink material selection and optical design considerations in DLP 3D printing," *Applied Materials Today*, vol. 30, p. 101721, 2023. doi: 10.1016/j.apmt.2022.101721.

- [166] Sculpteo. “Materiales Binder Jetting”. [En línea]. Disponible en: <https://www.sculpteo.com/es/materiales/materiales-binder-jetting/>. [Accedido: 19 de junio, 2023].
- [167] Dassault Systèmes. “Directed Energy Deposition”. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/directed-energy-deposition>. [Accedido: 19 de junio, 2023].
- [168] S. Mei, J. Wang, Z. Li, B. Ding, S. Li, X. Chen, W. Zhao, Y. Zhang, X. Zhang, Z. Cui, P. Fu, X. Pang, and M. Liu, “4D printing of polyamide 1212 based shape memory thermoplastic polyamide elastomers by selective laser sintering,” *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 92, pp. 157-164, 2023. doi: 10.1016/j.jmapro.2023.02.033.
- [169] Actualidad Aidimme. “¿Qué es la deposición de energía focalizada (DED)?”. [En línea]. Disponible en: <https://actualidad.aidimme.es/2023/06/15/que-es-la-deposicion-de-energia-focalizada-ded/#:~:text=La%20tecnología%20de%20deposición%20de,para%20fundir%20materiales%20a%20medida>. [Accedido: 19 de junio, 2023].
- [170] Dassault Systèmes. “Sheet Lamination”. [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/sheet-lamination>. [Accedido: 19 de junio, 2023].
- [171] 3Dnatives. “Modelado por deposición fundida (FDM)”. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/modelado-por-deposicion-fundida29072015/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [172] INEO. “Modelado por deposición fundida (FDM)”. [En línea]. Disponible en: <https://www.ineo.es/es/tecnologias/modelado-deposicion-fundida-fdm>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [173] Todo-3D. “FDM (FFF): Modelado por deposición fundida”. [En línea]. Disponible en: <https://todo-3d.com/fdm-fff-modelado-deposicion-fundida/?v=911e8753d716>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [174] 3Dnatives. “PowerDiw: La impresora 3D híbrida de CIM UPC”. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/powerdiw-impresora-3d-hibrida-cim-upc-290920222/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [175] 3D Printing Design. “PowerDiw: Una nueva impresora 3D híbrida experimental con tecnología DIW”. [En línea]. Disponible en: <http://www.3dprintingdesign.es/es/noticia/powerdiw-una-nueva-impresora-3d-hibrida-experimental-con-tecnologia-diw>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [176] 3D Systems. “Stereolithography”. [En línea]. Disponible en: <https://es.3dsystems.com/stereolithography>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [177] ComprarImpresoras-3D. “Impresoras 3D SLA”. [En línea]. Disponible en: <https://comprarimpresoras-3d.com/tipo/sla/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].

- [178] Markforged. "What Is Digital Light Processing (DLP)?". [En línea]. Disponible en: <https://markforged.com/es/resources/learn/3d-printing-basics/3d-printing-processes/what-is-digital-light-processing-dlp>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [179] ComprarImpresoras-3D. "Impresoras 3D DLP". [En línea]. Disponible en: <https://comprarimpresoras-3d.com/tipo/dlp/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [180] Innovación y Tecnología. "Impresoras 3D: Tecnología DLP". [En línea]. Disponible en: <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/impresoras-3d-tecnologia-dlp/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [181] Iberdrola. "¿Qué es la impresión 4D?". [En línea]. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/innovacion/que-es-la-impresion-4d>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [182] L. Scott, Sculpteo Blog. "Rapid Liquid Printing: Creating Inflatable Structures Between 3D and 4D Printing". [En línea]. Disponible en: <https://www.sculpteo.com/blog/2018/08/03/rapid-liquid-printing-creating-inflatable-structures-between-3d-and-4d-printing/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [183] Rapid Liquid Printing. "RLP". [En línea]. Disponible en: <https://www.rapidliquidprint.co>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [184] J. Wise, Visionary Hub. "Rapid Liquid Printing: How 3D Printers Might Replace Factories". [En línea]. Disponible en: <https://medium.com/visionary-hub/rapid-liquid-printing-how-3d-printers-might-replace-factories-82d6c4f90ec3>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [185] Self-Assembly Lab, MIT. "Rapid Liquid Printing". [En línea]. Disponible en: <https://selfassemblylab.mit.edu/rapid-liquid-printing>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [186] Impresion3Daily. "Rapid Liquid Printing, el soporte se vuelve gel". [En línea]. Disponible en: <https://www.impresion3daily.es/rapid-liquid-printing-soporte-gel/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [187] 3D Systems. "Selective Laser Sintering". [En línea]. Disponible en: <https://es.3dsystems.com/selective-laser-sintering>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [188] 3Dnatives. "Sinterizado Selectivo por Láser: Les explicamos todo". [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/sinterizado-selectivo-por-laser-les-explicamos-todo/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [189] Innovación y Tecnología. "Sinterizado Selectivo por Láser". [En línea]. Disponible en: <https://www.innovacion-tecnologia.com/fabricacion-aditiva/sinterizado-selectivo-por-laser/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [190] Dassault Systèmes. "Material Jetting". [En línea]. Disponible en: <https://www.3ds.com/es/make/guide/process/material-jetting>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [191] 3Dnatives. "Nicole Hone y Hydrophytes: Diseño bioinspirado y 4D printing". [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/nicole-hone-hydrophytes-041020182/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].

- [192] SAMT SUDOE. “Hydrophytes sorprende con técnicas 4D”. [En línea]. Disponible en: <https://www.samtsudoe.com/es/hydrophytes-sorprende-con-tecnicas-4d/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [193] Stratasys. “PolyJet Technology”. [En línea]. Disponible en: <https://www.stratasys.com/es/guide-to-3d-printing/technologies-and-materials/polyjet-technology/>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [194] Undo Prototipos, “Prototipos en PolyJet”. [En línea]. Disponible en: <https://www.undoprototipos.com/es/tecnologias/prototipos-en-polyjet>. [Accedido: 22 de junio, 2023].
- [195] D. Kim, T. Kim, and Y.-G. Lee, “4D Printed Bifurcated Stents with Kirigami-Inspired Structures,” *Journal of Visualized Experiments (JoVE)*, e59746, July 25, 2019. doi: 10.3791/59746.
- [196] W. Zhao, N. Li, L. Liu, J. Leng, and Y. Liu, “Origami derived self-assembly stents fabricated via 4D printing,” *Composite Structures*, vol. 293, pp. 1-10, 2022. doi: 10.1016/j.compstruct.2022.115669.
- [197] Interempresas. “BMF 4D y Biomaterials se asocian para llevar materiales biorreabsorbibles a la microimpresión 3D”. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Fabricacion-aditiva/Articulos/374732-BMF-4D-Biomaterials-se-asocian-llevar-materiales-biorreabsorbibles-microimpresion-3D.html>. [Accedido: 25 de junio, 2023].
- [198] ABC Salud. “Implantes de pulmón: un hito en la ciencia médica”. [En línea]. Disponible en: <https://www.abc.es/salud/noticias/20150430/abci-implantes-pulmon-science-201504291837.html?ref=https%3A%2F%2Fwww.google.com%2F>. [Accedido: 25 de junio, 2023].
- [199] La Nación. “Una férula hecha con una impresora 3D le salvó la vida a tres chicos”. [En línea]. Disponible en: <https://www.lanacion.com.ar/tecnologia/una-ferula-hecha-con-una-impresora-3d-le-salvo-la-vida-a-tres-chicos-nid1789022/>. [Accedido: 25 de junio, 2023].
- [200] M. Javid, A. Haleem, R.P. Singh, S. Rab, R. Suman, L. Kumar, “Significance of 4D printing for dentistry: Materials, process, and potentials,” *J. Oral Biol. Craniofac. Res.*, vol. 12, no. 3, pp. 388-395, 2022. doi: 10.1016/j.jobcr.2022.05.002.
- [201] S. Moroni, R. Bingham, N. Buckley, L. Casettari, and D. A. Lamprou, “4D printed multipurpose smart implants for breast cancer management,” *International Journal of Pharmaceutics*, vol. 642, pp. 1-10, 2023. doi: 10.1016/j.ijpharm.2023.123154.
- [202] Xataka. “Este es el primer corazón impreso en 3D con células del propio paciente”. [En línea]. Disponible en: <https://www.xataka.com/medicina-y-salud/este-primer-corazon-impreso-3d-celulas-propio-paciente>. [Accedido: 25 de junio, 2023].
- [203] El Día. “Presentan un corazón hecho con impresora 3D a partir de tejidos humanos”. [En línea]. Disponible en: <https://www.eldia.com/nota/2019-4-21-3-6-25-presentan-un-corazon-hecho-con-impresora-3d-a-partir-de-tejidos-humanos-salud>. [Accedido: 25 de junio, 2023].

- [204] ABB. “Transformadores de instrumento y medición”. [En línea]. Disponible en: [https://library.e.abb.com/public/02be3a1ff55c4965849bfb67668a6d6a/56-63%20m9065\\_ES\\_72dpi.pdf?x-sign=QCZqvSfYq7cTYl+GgZXnY4UUjOlwLvSplbhyWYfnfjoYoyppeWb3gjUTEXsLwuZA](https://library.e.abb.com/public/02be3a1ff55c4965849bfb67668a6d6a/56-63%20m9065_ES_72dpi.pdf?x-sign=QCZqvSfYq7cTYl+GgZXnY4UUjOlwLvSplbhyWYfnfjoYoyppeWb3gjUTEXsLwuZA). [Accedido: 25 de junio, 2023].
- [205] ABB Future Labs. “Impresión 4D”. [En línea]. Disponible en: [https://library.e.abb.com/public/02be3a1ff55c4965849bfb67668a6d6a/56-63%20m9065\\_ES\\_72dpi.pdf](https://library.e.abb.com/public/02be3a1ff55c4965849bfb67668a6d6a/56-63%20m9065_ES_72dpi.pdf) [Accedido: 25 de junio, 2023].
- [206] Wyss Institute, Harvard University. “Novel 4D Printing Method”. [En línea]. Disponible en: <https://wyss.harvard.edu/news/novel-4d-printing-method/>. [Accedido: 25 de junio, 2023].
- [207] IEEE Spectrum. “4D Printing Turns Carbon Fiber, Wood into Shapeshifting, Programmable Materials”. [En línea]. Disponible en: <https://spectrum.ieee.org/4d-printing-turns-carbon-fiber-wood-into-shapeshifting-programmable-materials>. [Accedido: 25 de junio, 2023].
- [208] Diagnosis de la Madera. “Madera programable: la revolución en el sector de la construcción”. [En línea]. Disponible en: <https://diagnosisdelamadera.com/madera-programable/>. [Accedido: 25 de junio, 2023].
- [209] D. Schmelzeisen, H. Kelbel, and T. Gries, “4D textiles: Materials, processes, and future applications,” in *Additive Manufacturing Materials and Technologies*, Ed. M. Bodaghi and A. Zolfagharian, Smart Materials in Additive Manufacturing, Elsevier, 2022, pp. 229-249, ISBN 9780323954303, doi: 10.1016/B978-0-323-95430-3.00008-7.
- [210] Parametric House. “4D Printing on Textiles”. [En línea]. Disponible en: <https://parametrichouse.com/4d-printing-on-textiles/>. [Accedido: 26 de junio, 2023].
- [211] 3D Natives. “I-Seed: El robot impreso en 4D”. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/i-seed-el-robot-impreso-en-4d-030520232/#!>. [Accedido: 26 de junio, 2023].
- [212] 3D Printing Design. “Un robot impreso en 4D capaz de transportar una carga y navegar”. [En línea]. Disponible en: <http://www.3dprintingdesign.es/es/noticia/un-robot-impreso-en-4d-capaz-de-transportar-una-carga-y-navegar>. [Accedido: 30 de junio, 2023].
- [213] ScienceDaily. “Researchers have designed a 4D-printed soft robot that self-assembles when heated”. [En línea]. Disponible en: <https://www.sciencedaily.com/releases/2021/09/210922121823.htm>. [Accedido: 26 de junio, 2023].
- [214] 3D Natives. “Impresión 4D de estructuras inteligentes para edificios”. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/impresion-4d-de-estructuras-inteligentes-para-edificios-240320232/>. [Accedido: 26 de junio, 2023].
- [215] 3D Printing Design. “Robots microscópicos impresos en 3D para reparar lesiones internas”. [En línea]. Disponible en: <http://www.3dprintingdesign.es/es/noticia/robots-microscopicos-impresos-en-3d-para-reparar-lesiones-internas>. [Accedido: 26 de junio, 2023].

- [216] Mundiario. “Nuevos robots por vibración que son del tamaño de la hormiga más pequeña del mundo”. [En línea]. Disponible en: <https://www.mundiario.com/articulo/sociedad/nuevos-robots-vibracion-son-tamano-hormiga-mas-pequena-mundo/20190723231105158940.html>. [Accedido: 26 de junio, 2023].
- [217] 3Dnatives. “Micro-robots impresos en 3D: cuando la realidad supera la ficción”. [En línea]. Disponible en: <https://www.3dnatives.com/es/micro-robots-impresos-en-3d-260720192/>. [Accedido: 26 de junio, 2023].
- [218] Europa Press. “Un ingeniero español crea para la NASA una tela espacial inteligente mediante impresión 4D”. [En línea]. Disponible en: <https://www.europapress.es/portaltic/sector/noticia-ingeniero-espanol-crea-nasa-tela-espacial-inteligente-impresion-4d-20170421145119.html>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [219] TED. “Raul Polit Casillas: Impossible architectures: 4D printed spacecraft”. [En línea]. Disponible en: [https://www.ted.com/talks/raul\\_polit\\_casillas\\_impossible\\_architectures\\_4d\\_printed\\_spacecraft](https://www.ted.com/talks/raul_polit_casillas_impossible_architectures_4d_printed_spacecraft). [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [220] Jet Propulsion Laboratory – NASA. “Space Fabric Links Fashion and Engineering”. [En línea]. Disponible en: <https://www.jpl.nasa.gov/news/space-fabric-links-fashion-and-engineering>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [221] GlobalSpec Insights. “Morphing Wing Created Using Smart Materials and Actuators”. [En línea]. Disponible: <https://insights.globalspec.com/article/7578/morphing-wing-created-using-smart-materials-and-actuators>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [222] M. Bashir, P. Rajendran, C. Sharma, and D. Smrutiranjana, “Investigation of Smart Material Actuators & Aerodynamic optimization of Morphing Wing,” *Materials Today: Proceedings*, vol. 5, pp. 21069-21075, 2018. doi: 10.1016/j.matpr.2018.06.501.
- [223] NASA. “Wheels on Mars Rover”. [En línea]. Disponible en: <https://www.nasa.gov/specials/wheels/>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [224] Avatar Energía. “Neumáticos Smart”. [En línea]. Disponible en: <https://avatarenergia.com/neumaticos-smart/>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [225] G. Bovesecchi, S. Corasaniti, G. Costanza, and M. E. Tata, “A Novel Self-Deployable Solar Sail System Activated by Shape Memory Alloys,” *Aerospace*, vol. 6, no. 7, p. 78, 2019. doi: 10.3390/aerospace6070078.
- [226] A. Boschetto, L. Bottini, G. Costanza, and M. E. Tata, “Shape Memory Activated Self-Deployable Solar Sails: Small-Scale Prototypes Manufacturing and Planarity Analysis by 3D Laser Scanner,” *Actuators*, vol. 8, no. 2, p. 38, 2019. doi: 10.3390/act8020038.
- [227] Interempresas. “Hormigón inteligente: la solución que evita las grietas”. [En línea]. Disponible en: <https://www.interempresas.net/Mineria/Articulos/418250-Hormigon-inteligente-la-solucion-que-evita-las-grietas.html>. [Accedido: 28 de junio, 2023].

- [228] Constructivo. “Concreto autoreparable: la nueva industria de los materiales inteligentes”. [En línea]. Disponible en: <https://constructivo.com/noticia/concreto-autoreparable-la-nueva-industria-de-los-materiales-inteligentes-1577371100>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [229] Inmoley. “Construcción sostenible: los avances en materiales inteligentes”. [En línea]. Disponible en: <https://www.inmoley.com/NOTICIAS/2012345/2020-1-inmobiliario-urbanismo-vivienda/01-20-inmobiliario-027-20.html>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [230] Muy Interesante. “La tecnología de los materiales inteligentes”. [En línea]. Disponible en: <https://www.muyinteresante.es/tecnologia/18903.html>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [231] J.J. Sánchez, “Impresión 4D de materiales inteligentes aplicado al sector aeroespacial”, Trabajo de fin de grado, Ingeniería Aeroespacial, Universidad de León (ULE), León, 2023.
- [232] InfoPLC. “Sensores inalámbricos para monitorizar de por vida los aviones”. [En línea]. Disponible en: <https://www.infopl.net/noticias/item/111427-sensores-inalambricos-para-monitorizar-de-por-vida-los-aviones>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [233] Futurizable. “Materiales inteligentes”. [En línea]. Disponible en: <https://futurizable.com/materiales-inteligentes/>. [Accedido: 28 de junio, 2023].
- [234] Proyecto ID: 502725. Cordis Europa. “Aircraft Reliability Through Intelligent Materials Application”. [En línea]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/502725>. [Accedido: 1 de julio, 2023].
- [235] Proyecto ID: 284562. Cordis Europa. “Smart Intelligent Aircraft Structures”. [En línea]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/284562>. [Accedido: 1 de julio, 2023].
- [236] Proyecto ID: 312216. Cordis Europa. “Piezoelectric Assisted Smart Satellite Structure”. [En línea]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/312216>. [Accedido: 1 de julio, 2023].
- [237] Proyecto ID: 760940. Cordis Europa. “Intelligent bulk MAterials for Smart TRanspOrt industries”. [En línea]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/760940>. [Accedido: 1 de julio, 2023].
- [238] Proyecto ID: 760779. Cordis Europa. “Smart by Design and Intelligent by Architecture for turbine blade fan and structural components systems”. [En línea]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/760779>. [Accedido: 1 de julio, 2023].
- [239] Proyecto ID: 862597. Cordis Europa. “INovative polymer-based COMposite systems for high-Efficient energy Scavenging and Storage”. [En línea]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/862597>. [Accedido: 1 de julio, 2023].
- [240] Proyecto ID: 101007022. Cordis Europa. “Digital method for imprOved Manufacturing of next-generation MultifuNctIOnal airframe parts”. [En línea]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/101007022>. [Accedido: 1 de julio, 2023].
- [241] Proyecto ID: 101056884. Cordis Europa. “Aerospace Composites digitally sensorised from manufacturing to end-of-life”. [En línea]. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/101056884>. [Accedido: 1 de julio, 2023].