

INFORME DE PROSPECTIVA DE NUEVOS MATERIALES INTELIGENTES



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN



FUNDACIÓN ESPAÑOLA
PARA LA CIENCIA
Y LA TECNOLOGÍA



Fundación **OPTI**

Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT)

Fundación OPTI

Octubre 2011

FECYT y la Fundación OPTI agradecen sinceramente el apoyo desinteresado de toda la comunidad científica y empresarial que ha participado en este informe, y más en concreto a los miembros del Panel de Expertos:

- Xavier Plantá, Fundación ASCAMM
- Francisco del Monte, Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC) - Departamento de Biomateriales y Materiales Bioinspirados
- Jaume Veciana, Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC) - Departamento de Nanociencia y Materiales Orgánicos
- José Carlos Rodríguez, Universidad de Valladolid - Grupo BIOFORGE
- José Luis Vilas, Universidad del País Vasco - Facultad de Ciencia y Tecnología - Departamento de Química Física
- José M. San Juan, Universidad del País Vasco Facultad de Ciencia y Tecnología - Departamento de la Materia Condensada
- Manuel Vázquez, Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC) - Departamento de Materiales para las Tecnologías de la Información
- Josetxo Pomposo Universidad del País Vasco - Donostia International Physics Center
- José Ramón Dios, Fundación GAIKER
- Juan María Pou, Universidad de Vigo - ETS de Ingenieros Industriales - Departamento de Física Aplicada
- Mari Cruz Moreno, Universidad Complutense de Madrid - Departamento de Química Analítica
- Joaquín Arias-Pardilla, Universidad Politécnica de Cartagena
- José Luis Viviente, TECNALIA - Unidad de Energía
- Víctor Puntos Instituto Catalán de Nanotecnología
- José Luis González, Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas
- Nora Ventosa, Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona (CSIC)-Departamento de Nanociencia y Materiales Orgánicos
- Daniel Aguilar, DEFCON Tissue Care
- Jesús Valero, TECNALIA - Unidad de Salud
- Liliana Chamudis, AIMPLAS
- Enrique Marchante, SENER, Ingeniería y Sistemas
- Fernando Seco, TECNALIA - Unidad Aeroespacial

Autores:

Daniela Velte (Tecnalia)

Izaskun Jiménez (Tecnalia)

Dr. Nieves Murillo (Tecnalia)

Olatz Adarraga (Tecnalia)

Ana Pérez (Tecnalia)

Coordinadores:

Ana Morato (Fundación OPTI)

Sergio Jiménez de Ochoa (Fundación OPTI)

Cristina Ortega (Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología, FECYT)

© Copyright: OPTI/FECYT

Diseño y maquetación: Global Diseña

NIPO: 470-11-046-1



ÍNDICE

1.	INTRODUCCIÓN.....	3
2.	OBJETIVOS DEL ESTUDIO.....	5
3.	ÁMBITO Y ALCANCE DEL ESTUDIO.....	6
	Materiales fotoactivos.....	9
	Materiales cromactivos.....	10
	Materiales bioactivos.....	11
	Materiales magnetostrictivos.....	11
	Materiales electrostrictivos.....	11
	Materiales piezoeléctricos.....	12
	Polímeros electroactivos.....	12
	Materiales piroeléctricos.....	12
	Materiales termoeléctricos.....	13
	Materiales electrorreológicos y magnetorreológicos.....	13
	Materiales con memoria de forma.....	13
4.	METODOLOGÍA.....	14
	Síntesis documental.....	15
	Panel general de expertos.....	15
	Paneles sectoriales de expertos.....	17
	Informe final.....	17
	Grado de conocimiento sobre materiales inteligentes y lagunas.....	17
5.	RESULTADOS DEL PANEL GENERAL.....	19
	Materiales de mayor interés desde la perspectiva sectorial.....	19
	Recomendaciones y consideraciones generales sobre I+D en materiales inteligentes en España.....	21
	Evaluación de la madurez de las familias de materiales y estimación de su impacto.....	22
6.	ANÁLISIS SECTORIAL.....	26
	Sector de salud.....	27
	Sector de transporte.....	30
	Sector de energía y medio ambiente.....	31
7.	CONCLUSIONES.....	33
8.	REFERENCIAS.....	34
	ANEXO I. EXPERTOS PARTICIPANTES EN LOS PANELES.....	37
	ANEXO II. INFORME “LOS MATERIALES INTELIGENTES Y SUS APLICACIONES EN LOS SECTORES DE TRANSPORTE, SALUD, ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE”.....	38

1. Introducción

El estudio de prospectiva tecnológica sobre “Nuevos materiales inteligentes” se enmarca dentro de las actividades que la Fundación Observatorio de Prospectiva Tecnológica Industrial (OPTI) viene realizando en colaboración con la Fundación Española para la Ciencia y la Tecnología (FECYT) y se ha contado para su ejecución con la participación de Tecnalia. En este informe se identifican, con la ayuda de un importante número de expertos consultados, una serie de tecnologías consideradas como críticas por la importancia que tendrán para la innovación en tres sectores básicos y que deberían ser objeto de actuaciones concretas dentro de las futuras políticas tecnológicas.

A pesar de que los materiales constituyen una disciplina eminentemente horizontal que alcanza todas las áreas de actividad, el ámbito del estudio de prospectiva de materiales inteligentes abordado desde la Fundación OPTI ha sido claramente orientado hacia las necesidades de los sectores del transporte, la salud y la energía y medio ambiente. Las razones que justifican esta perspectiva son diversas.

En primer lugar, nos referimos a la inexistencia de un sector exclusivo de los materiales, circunstancia que obliga a decidir entre uno u otro sector de aplicación a fin de garantizar en la práctica la viabilidad del estudio ante la profusión de sustancias, productos y aplicaciones existentes.

En segundo lugar, conviene recordar la importancia de los sectores tratados, insistiendo no sólo en su peso específico para la economía del país, sino también en su capacidad de condicionar la competitividad e, incluso, la propia existencia del resto de las actividades productivas.

Finalmente, hay que destacar la relevancia de los retos y desafíos a los que estos sectores se enfrentan y en los que los materiales inteligentes jugarán un papel muy importante. A pesar de que cada sector tiene que hacer frente a sus propios retos y cuenta con sus oportunidades, cabe destacar que los sectores de transporte, energía y medio ambiente jugarán un papel clave en dar respuesta a problemáticas globales tan significativas como el agotamiento de los combustibles fósiles, el cambio climático o el uso racional de los recursos.

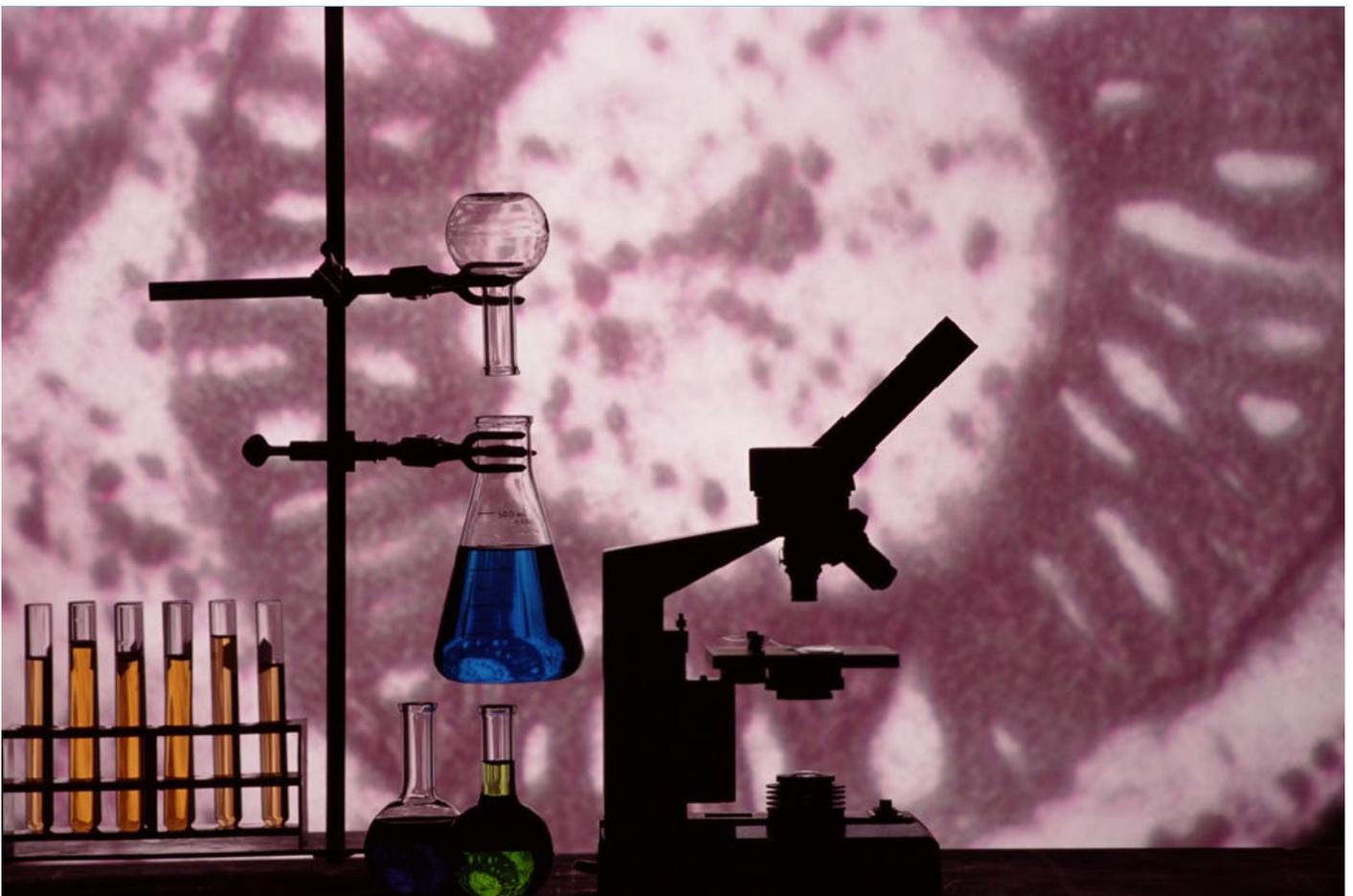
La metodología utilizada para la realización del estudio se basó en una evaluación principalmente cualitativa, dada la amplitud de los ámbitos de investigación relacionados con los materiales inteligentes y los sectores de aplicación de los mismos. Así mismo, se aplicó un método novedoso con el objetivo de analizar la sostenibilidad económica, social y medioambiental de las diferentes tecnologías identificadas.

2. Objetivos del estudio

El objetivo principal del presente estudio de prospectiva fue el de identificar y valorar las tendencias de investigación y los desarrollos tecnológicos relacionados con los nuevos materiales inteligentes, en un horizonte temporal de 10-15 años, aplicados a los sectores de salud, transporte, y energía y medio ambiente.

Más concretamente, el estudio abordó las siguientes cuestiones:

- Obtener una visión estratégica de futuro sobre las posibilidades de desarrollo de los nuevos materiales inteligentes y su impacto en los sectores considerados.
- Identificar las tendencias y tecnologías críticas relacionadas.
- Detectar las oportunidades y nuevas áreas de actividad.



3. Ámbito y alcance del estudio

Todos nosotros reaccionamos ante el mundo que nos rodea como “sensores” cuando oímos, vemos o sentimos, y como “actuadores” cuando reaccionamos a esos estímulos. Con el devenir de los años, la investigación tomó el camino de intentar dotar de una capacidad de reacción similar a los materiales, convirtiéndolos en “inteligentes”

Los materiales inteligentes, también denominados materiales activos o materiales multifuncionales, son aquellos que manifiestan un cambio en sus propiedades o en su forma como respuesta a los estímulos del entorno en el que se encuentran. Estos

estímulos externos (físicos o químicos) pueden ser tales como la presión, temperatura, humedad, pH, campos eléctricos o magnéticos, etc.

Si bien es complejo definirlos, más complejo es intentar clasificarlos; ya que la línea que separa las diversas familias de materiales no siempre tiene el mismo grosor y no todos los expertos coinciden en cuáles deben ser los materiales que se incluyen en la clase de los inteligentes. En las tablas 1 y 2, se propone una posible clasificación de los mismos, diferenciando entre sensores y actuadores.

	MATERIALES		ESTÍMULO	RESPUESTA
SENSORES	Fotoactivos	Electroluminiscentes	Campo Eléctrico	Emisión de Luz
		Fotoluminiscentes	Luz	
		Quimioluminiscentes	Estímulo químico	
		Termoluminiscentes	Temperatura	
	Cromoactivos	Electrocromáticos	Campo Eléctrico	Color
		Termocromático	Temperatura	
		Fotocromático	Luz	
		Quimiocromáticos	Estímulo químico	
	Materiales bioactivos		Temperatura, luz, campo eléctrico	Varias
	Magnetostrictivos		Deformación mecánica Campo Magnético/Eléctrico	Campo Magnético/Eléctrico Deformación mecánica
	Electrostrictivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica
	Electrocerámicas		Deformación mecánica Corriente eléctrica	Corriente eléctrica Deformación mecánica
Polímeros electroactivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica	
Piroeléctricos		Temperatura	Polarización eléctrica	

Tabla 1. Clasificación de materiales inteligentes en función de estímulo y respuesta (sensores)

		MATERIALES	ESTÍMULO	RESPUESTA	
ACTUADORES		Termoeléctricos	Calor	Corriente eléctrica	
		Piezoeléctricos	Deformación mecánica Corriente eléctrica	Corriente eléctrica Deformación mecánica	
		Electrostrictivos	Deformación mecánica	Polarización eléctrica	
		Magnetostrictivos	Deformación mecánica Campo Magnético/Eléctrico	Campo Magnético/Eléctrico Deformación mecánica	
		Polímeros electroactivos	Campo eléctrico/ pH	Deformación mecánica	
		Magnetoreológicos	Elastómero MR	Campo Magnético	Viscosidad
			Fluido MR		
			Ferrofluido		
		Electroreológicos	Elastómero ER	Campo Eléctrico	Viscosidad
			Fluido ER		
	Materiales Memoria de Forma	Shape Memory Alloys, SMA	Temperatura	Deformación mecánica	
		Polímeros SMA			
		Ferromagnéticos SMA, FSMA	Campo Magnético		

Tabla 2. Clasificación de materiales inteligentes en función de estímulo y respuesta (actuadores)

En las dos tablas encontramos materiales de naturalezas muy diversas como los polímeros, metales y aleaciones de los mismos, cerámicas, electrocerámicas, materiales compuestos o biomateriales, que responden a estímulos diferentes como la temperatura, luz, deformación, pH, campos magnéticos o corrientes eléctricas.

Las respuestas que provocan estos estímulos en los materiales también son muy variadas e incluyen cambios de la viscosidad, color, de forma, en su red cristalográfica o de estados energéticos de sus electrones. A continuación se puede encontrar una pequeña descripción de cada uno de ellos.

3.1. Materiales fotoactivos

Los materiales fotoactivos son aquellos capaces de emitir energía en forma de luz. La propiedad de la fotoactividad se da a consecuencia de que los electrones de valencia son excitados a niveles más elevados por distintos estímulos, y posteriormente vuelven a caer a niveles de energías inferiores emitiendo fotones, es decir, luz.

Electroluminiscentes

La electroluminiscencia, en términos generales, es la emisión de luz inducida por una corriente eléctrica aplicada. Los materiales electroluminiscentes, al igual que los fotoluminiscentes, incluyen tanto materiales orgánicos como inorgánicos.

Fotoluminiscentes

El principio básico de la fotoluminiscencia es que los electrones que orbitan alrededor de los átomos o las moléculas absorben energía debido a la colisión con protones durante la excitación y, a continuación, se emite ese exceso de energía en forma de fotones (normalmente luz visible) durante cierto tiempo.

Quimioluminiscentes

La luminiscencia es definida como la emisión de luz asociada con la disipación de energía con una sustancia electrónicamente excitada. En el caso de la quimioluminiscencia, la emisión de luz es causada por los productos de una reacción química específica, en la que se involucran las siguientes sustancias según el sistema automatizado que sea utilizado.

Termoluminiscentes

El fenómeno de la termoluminiscencia consiste en la emisión de luz por ciertos materiales al ser calentados, por debajo de su temperatura de incandescencia, habiendo sido previamente expuestos a la acción de un agente excitante como las radiaciones ionizantes.

3.2. Materiales cromoactivos

Los materiales cromoactivos son aquellos que responden a un estímulo externo cambiando sus propiedades ópticas de manera que el material modifica su apariencia de manera significativa. Es decir, sus propiedades de absorptividad, reflectividad y transmisividad cambian lo suficiente como para causar un cambio en su color, reflectividad o transparencia.

Electrocromicos

El mecanismo reside en reacciones electroquímicas que suponen una transferencia de electrones e iones entre electrodos y el material electrocromico. Cuando una corriente eléctrica se hace pasar a través del material y los iones y electrones cambian entre electrodos, hay una cantidad de energía incidente con longitudes de onda en el visible, que pueden ser absorbidas, causando un cambio de color en el material volviéndose menos transmisoro.

Termocromicos

El termocromismo es la habilidad de cambiar de color debido a un cambio en la temperatura de manera reversible.

Quimiocrómicos

Los materiales que presentan efecto quimio-crómico son aquellos que manifiestan un cambio de color frente a estímulos químicos como el cambio de polaridad, pH o la presencia de iones metálicos. Generalmente se clasifican en función del fenómeno que induce el cambio de color (solvatocromismo, ionocromismo, halocromismo, etc.). Estos materiales se emplean en el uso en superficies expuestas a la sustancia contaminante a detectar y entran dentro de la familia de sensores colorímetros.

Fotocrómicos

Un material fotocromático cambia de transparente a color cuando es expuesto a la luz y revierte a transparente cuando esa luz cesa.

3.3. Materiales bioactivos

Según la definición propuesta por Williams (1987), se consideran materiales bioactivos los materiales que inducen una actividad biológica específica. A diferencia de los materiales bioinertes, este nuevo tipo de material entra en interacción con procesos biológicos, estimulando, por ejemplo, la regeneración de tejidos humanos.

3.4. Materiales magnetostrictivos

Los materiales magnetostrictivos muestran un cambio en su geometría (deformación o elongación) cuando se aplica un campo magnético. El efecto inverso se denomina piezomagnetismo, donde un campo magnético es producido o modificado bajo la aplicación de una deformación mecánica.

3.5. Materiales electrostrictivos

Los materiales electrostrictivos, al igual que los piezoeléctricos, soportan un cambio dimensional bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado a una polarización bajo una tensión mecánica. La diferencia entre la piezoelectricidad y la electrostricción aparece cuando se invierte el sentido del campo eléctrico; mientras el piezoeléctrico puede alargarse o comprimirse el electrostrictivo solo puede alargarse, independientemente de la dirección del campo eléctrico aplicado mostrando un comportamiento no-lineal.

3.6. Materiales piezoeléctricos

Estos materiales presentan una propiedad descubierta por los hermanos Curie denominada piezoelectricidad que es la capacidad, que presentan ciertos materiales cristalinos cuando se ven sometidos a una deformación externa, para generar carga eléctrica debido al desplazamiento de cargas dentro de dicha red.

Al ejercer una tensión mecánica sobre estos materiales la polarización eléctrica del material cambia provocando la aparición de un campo eléctrico (efecto directo). Y viceversa, si se aplica un campo eléctrico sobre este material éste reacciona deformándose (efecto inverso), siendo éste un proceso reversible. Esto implica que recupera su forma o polarización en cuanto se deja ejercer el campo eléctrico o mecánico.

3.7. Polímeros electroactivos

Estos materiales deben sus propiedades a la conductividad que poseen, aun siendo materiales de naturaleza orgánica. La arquitectura básica de los actuadores EAP (Electroactive Polymer) se realiza a partir de una película de un material elastomérico

dieléctrico recubierto en ambas caras con otra película expandible de un electrodo conductor. Cuando se aplica el voltaje a ambos electrodos se crea una presión de Maxwell bajo la capa dieléctrica. El polímero dieléctrico elástico actúa como un fluido incompresible de manera que, al ir volviéndose más delgada la película dieléctrica, se expande en la dirección del plano. De esta manera la fuerza eléctrica se convierte en actuación y movimiento mecánico.

3.8. Materiales piroeléctricos

Los materiales piroeléctricos presentan la propiedad de cambiar su polarización interna cuando son sometidos a cambios de temperatura, generando así un potencial eléctrico producido por el movimiento de las cargas positivas y negativas a los extremos opuestos de la superficie a través de la migración.

3.9. Materiales termoeléctricos

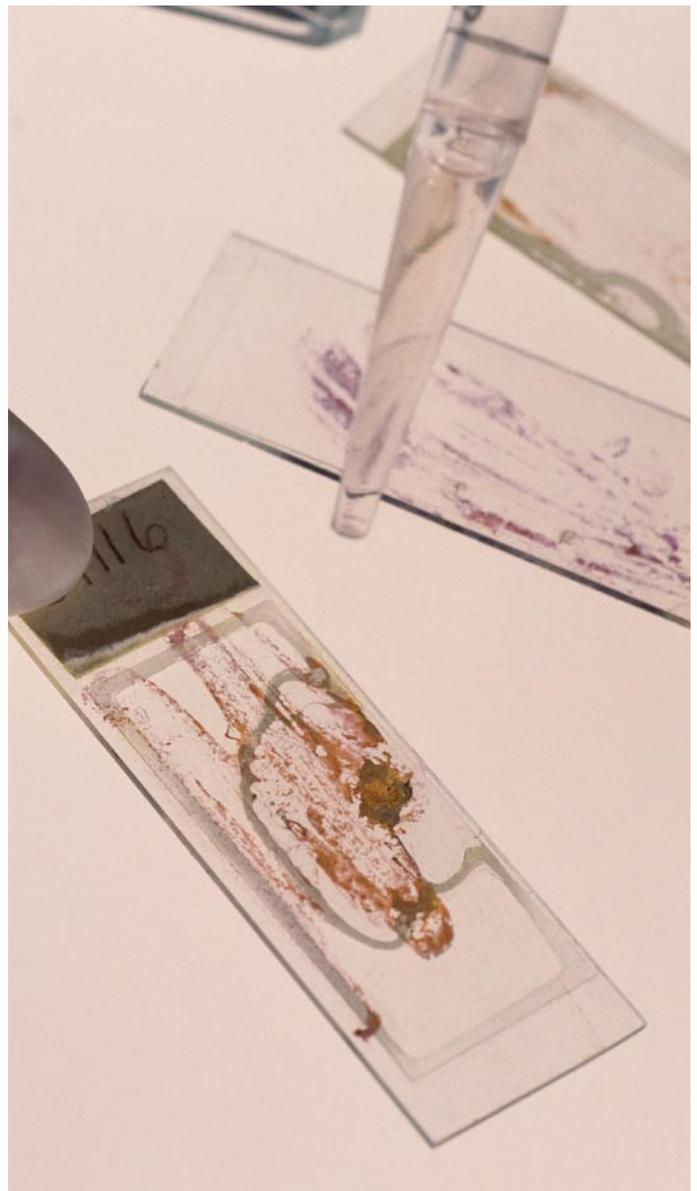
El efecto termoeléctrico en un material relaciona el flujo de calor que lo recorre con la corriente eléctrica que lo atraviesa. Por lo tanto, un material termoeléctrico permite transformar directamente calor en electricidad, o bien generar frío cuando se le aplica una corriente eléctrica.

3.10. Materiales electroreológicos y magnetoreológicos

Los fluidos electroreológicos y magnetoreológicos experimentan un cambio en sus propiedades reológicas bajo la influencia de un campo eléctrico o magnético, respectivamente. Este cambio es reversible y ocurre casi instantáneamente bajo la eliminación del campo aplicado. Los cambios físicos pueden ser bastante sustanciales, volviendo un fluido de baja viscosidad en una sustancia mucho más viscosa, casi sólida.

3.11. Materiales con memoria de forma

Los materiales de memoria de forma son capaces de volver a su forma inicial, incluso después de haber sido deformados, como consecuencia de un campo térmico o magnético, por lo que también resultan de interés para el control estructural.



4. Metodología

La metodología utilizada en la elaboración del presente estudio se basó en una evaluación principalmente cualitativa, dada la amplitud de los ámbitos de investigación relacionados con los materiales inteligentes y los sectores analizados. Como en otros estudios realizados por la Fundación OPTI, la labor de análisis se llevó a cabo mediante paneles de expertos. Como aspecto novedoso cabe destacar que, mediante una encuesta on-line previa

a los talleres se procedió a una evaluación de la sostenibilidad medioambiental, social y económica de cada tecnología identificada, usando para ello criterios adaptados a cada uno de los tres sectores objetos del estudio.

Las diferentes fases del estudio se describen en el siguiente esquema explicativo:

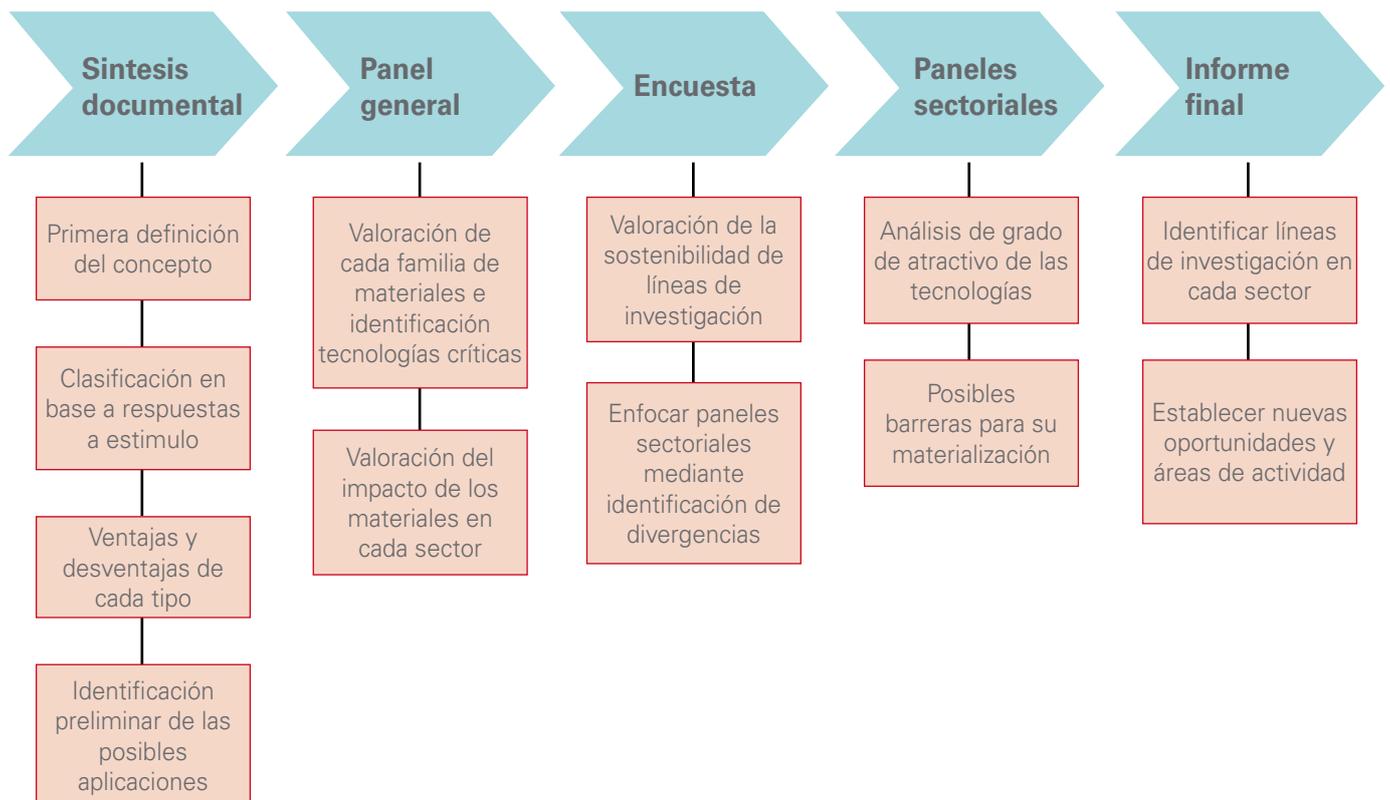


Figura 1: Proceso seguido en el estudio de prospectiva

4.1. Síntesis documental

Como primera fase del estudio de prospectiva, se llevó a cabo una síntesis documental cuyo objetivo era conocer el estado del arte a nivel nacional e internacional de la investigación en el campo de materiales inteligentes y recopilar los estudios y publicaciones más relevantes en la materia. Se consultaron estudios y artículos de revistas científicas relacionadas tanto con aspectos teóricos de los materiales inteligentes y sus características, como información sobre sus aplicaciones prácticas en los diferentes sectores objeto de estudio.

Esta síntesis aportó dos elementos clave que sirvieron de base para el trabajo posterior con los expertos en los paneles. Por un lado, una definición preliminar de lo que es un “material inteligente”, para posteriormente contrastarla y debatirla con los expertos. Y, por otro lado, la clasificación de los materiales inteligentes en base al estímulo al que responden, agrupándolos en “familias de materiales”.

Esta síntesis documental tuvo como resultado el informe “Los materiales inteligentes y sus aplicaciones en los sectores de transporte, salud, energía y medio ambiente”, que se adjunta al presente documento (Anexo II)

4.2. Panel general de expertos

Una vez realizada una clasificación de los materiales inteligentes, se constituyó un panel de expertos compuesto por 21 personas de alta cualificación y conocimiento respecto a materiales inteligentes, procedentes de diversos ámbitos de la industria, la universidad o la investigación (Anexo I).

Los criterios seguidos para la identificación de estos expertos fue la relación de estas personas con las tecnologías de los nuevos materiales inteligentes y/o su conocimiento respecto a la aplicación de estas tecnologías. La identificación de expertos se realizó mediante un análisis de la literatura y patentes y mediante consultas a redes de investigación establecidas, como Actimat. Posteriormente, la selección inicial de expertos fue contrastada con expertos de Inasmet-Tecnalia y se completó mediante el método de co-nominación (método bola de nieve).

En la reunión del panel general, y en base a la información recopilada y elaborada tras la síntesis documental realizada, los expertos debatieron sobre una serie de temas críticos. En primer lugar, se contrastó con los expertos la definición preliminar de lo que son los “materiales inteligentes”. En segundo lugar, en base a los desarrollos previstos y las necesidades de la demanda, los expertos realizaron una valoración de cada uno de los materiales e identificaron las tecnologías críticas con mayor repercusión en el futuro. En tercer lugar, se valoró el impacto que cada uno de los materiales puede tener en los diferentes sectores analizados, logrando una identificación de los materiales más críticos para cada uno de los sectores. Finalmente, los expertos también trabajaron en el contraste y la definición de las ventajas e inconvenientes de cada material y en la identificación de sus posibles aplicaciones. El panel general de expertos recomendó, además, que los paneles sectoriales analizaran cada material en su contexto, ya que el material, sus funciones y el proceso tienen que encajar en un medio ambiente determinado. Por este motivo, sugirieron una serie de aplicaciones de interés que debían de evaluarse posteriormente.

Encuesta de valoración de la sostenibilidad de las líneas de investigación

Antes de la celebración de los paneles de expertos sectoriales, se elaboró una encuesta que fue enviada a los expertos identificados en cada uno de estos sectores. El objetivo del envío de esta encuesta previa a los paneles fue el poder extraer las cuestiones

que mayores divergencias de opinión suscitan entre los expertos, para de esta manera poder enfocar de manera más eficiente los debates durante la celebración de los paneles.

En la siguiente imagen puede verse un ejemplo del formato y tipo de preguntas de la encuesta enviada a los expertos:

The screenshot shows a survey interface for Fundación OPTI. The header includes the logo and name of the foundation, along with logos for the Spanish Government and Tecnalia. The survey title is 'OPTI - MEDIO AMBIENTE Y ENERGÍA'. The main section is titled '3. MATERIALES FOTOACTIVOS-ELECTROLUMINISCENTES' and includes a sub-header '**** Aplicación: Electroluminiscentes orgánicos OLED ****'. There are three questions, each with a set of radio button options and a text box for comments:

1. ¿Los desarrollos basados en este material pueden verse afectados por la creciente escasez de materiales críticos?
 Ns/Rc Muy poco probable Poco probable No aplica Bastante probable Muy probable
 Si lo desea, añada un comentario para aclarar su valoración:
2. ¿La amplia difusión de esta tecnología ayuda a hacer un uso más eficiente de la energía?
 Ns/Rc Muy poco Poco No aplica Bastante Mucho
 Si lo desea, añada un comentario para aclarar su valoración:
3. ¿La amplia difusión de esta tecnología ayuda a hacer un uso más eficiente del agua?
 Ns/Rc Muy poco Poco No aplica Bastante Mucho
 Si lo desea, añada un comentario para aclarar su valoración:

Figura 2: Ejemplo de la encuesta enviada a los expertos

Además, por medio de la encuesta se logró obtener una valoración de las líneas de investigación identificadas en el panel general de expertos desde la perspectiva de su sostenibilidad económica, social y medioambiental y de la capacidad de cada familia de materiales para dar respuesta a tendencias críticas de futuro como,

por ejemplo, la creciente escasez de materias primas. Así mismo, se realizó una valoración de cada línea de investigación acorde con las características del sector analizado, identificando oportunidades y barreras para una serie de aplicaciones de interés.

4.3. Paneles sectoriales de expertos

Por cada uno de los sectores analizados por el presente estudio, se celebró un panel sectorial de expertos en el que se realizó un análisis del grado de atractivo de cada tecnología y las posibles barreras para su comercialización. Las divergencias de opinión identificadas mediante la encuesta permitieron centrar el debate en los aspectos más problemáticos de aplicaciones que incorporan materiales inteligentes.

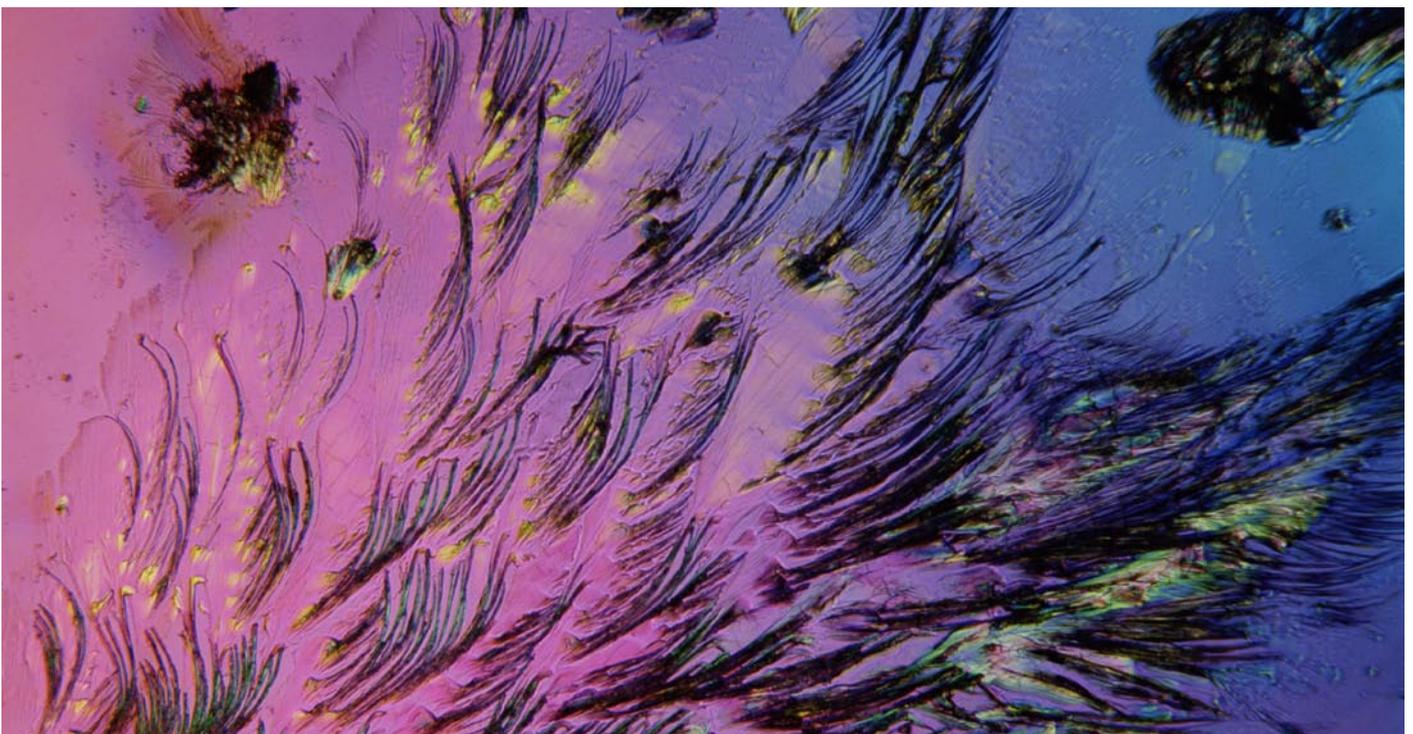
4.4. Informe final

Como conclusión del estudio de prospectiva sobre materiales inteligentes, se elaboró el presente informe final en el que se recogen los resultados de cada una de las fases del estudio y en el que se exponen las conclusiones del mismo.

Este informe final sirve para identificar las líneas prioritarias de investigación sobre materiales inteligentes en cada uno de los sectores analizados y para establecer las nuevas oportunidades y áreas de actividad que se presentan para los diferentes sectores tratados.

4.5. Grado de conocimiento sobre materiales inteligentes y lagunas

La identificación de las tecnologías críticas y el análisis de su impacto y sostenibilidad se basaron en diferentes etapas de contraste con expertos, partiendo de la identificación de familias de materiales inteligentes con propiedades similares.



Sin embargo, durante el proceso de contraste con expertos, y debido a la amplitud de los temas analizados y al reducido número de investigadores en España, se identificaron algunas áreas que no pudieron ser evaluadas en detalle en las fases posteriores

del proyecto, y que se documentan en la parte correspondiente de este informe.

A continuación se muestra el mapa de conocimiento de cada familia de materiales inteligentes:

Mapa de conocimiento de materiales inteligentes - panel general

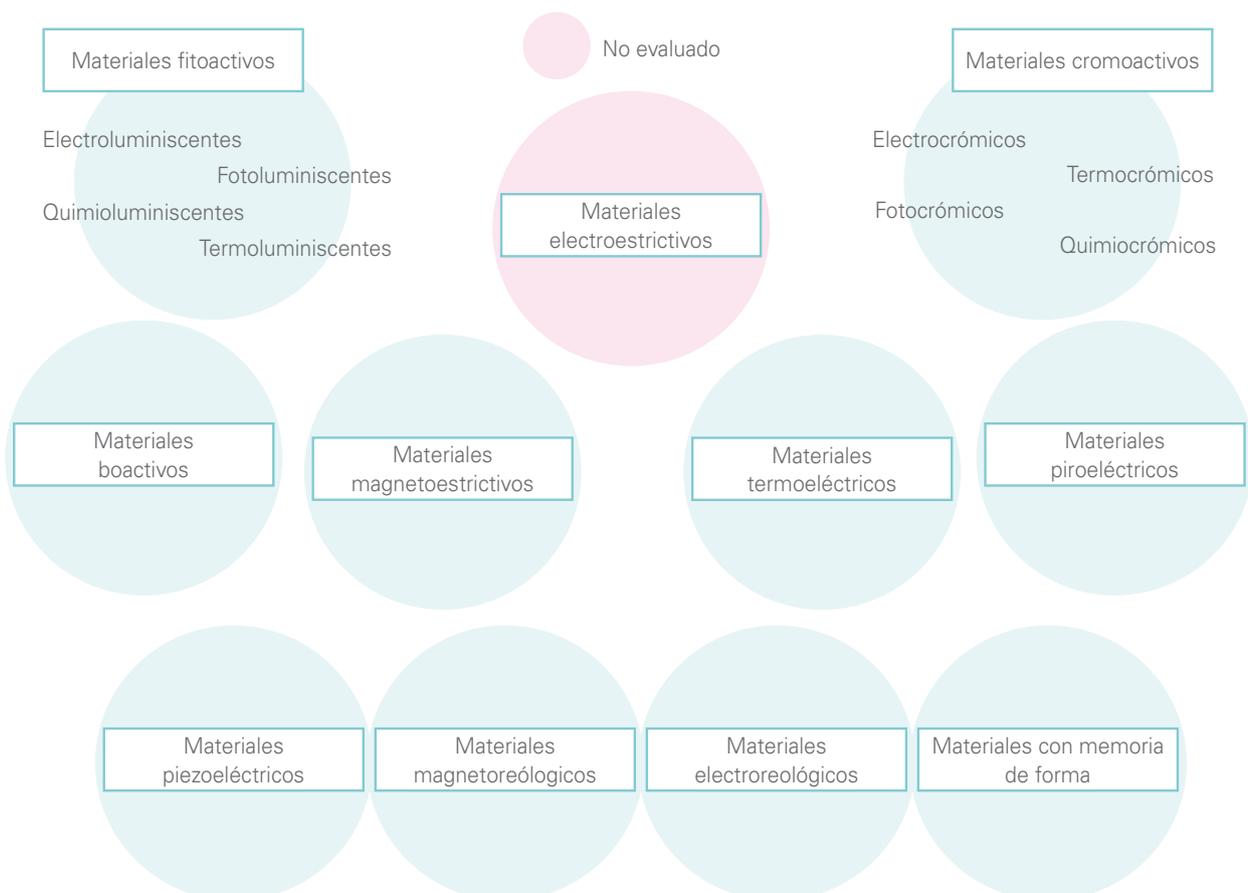


Figura 3: Mapa de conocimiento de materiales inteligentes

Concretamente, en el panel general de expertos, quedó sin evaluar una de las nueve familias identificadas durante la síntesis documental, pero los expertos ampliaron la selección original, añadiendo los materiales termoeléctricos y los

bioactivos. Se identificaron además dos subgrupos adicionales, una correspondiente a la familia de materiales fotoactivos (quimioluminiscentes) y otra perteneciente a los materiales cromocrómicos (quimiocrómicos).

5. Resultados del panel general

5.1. Materiales de mayor interés desde la perspectiva sectorial

A continuación, los expertos procedieron a evaluar cuáles eran las familias de materiales de mayor interés para cada uno de los tres sectores

incluidos en el estudio (salud, transporte, así como energía y medio ambiente). A continuación, se presentan gráficamente los resultados de esta evaluación, indicando, además, los temas que no pudieron ser analizados con la profundidad deseada.

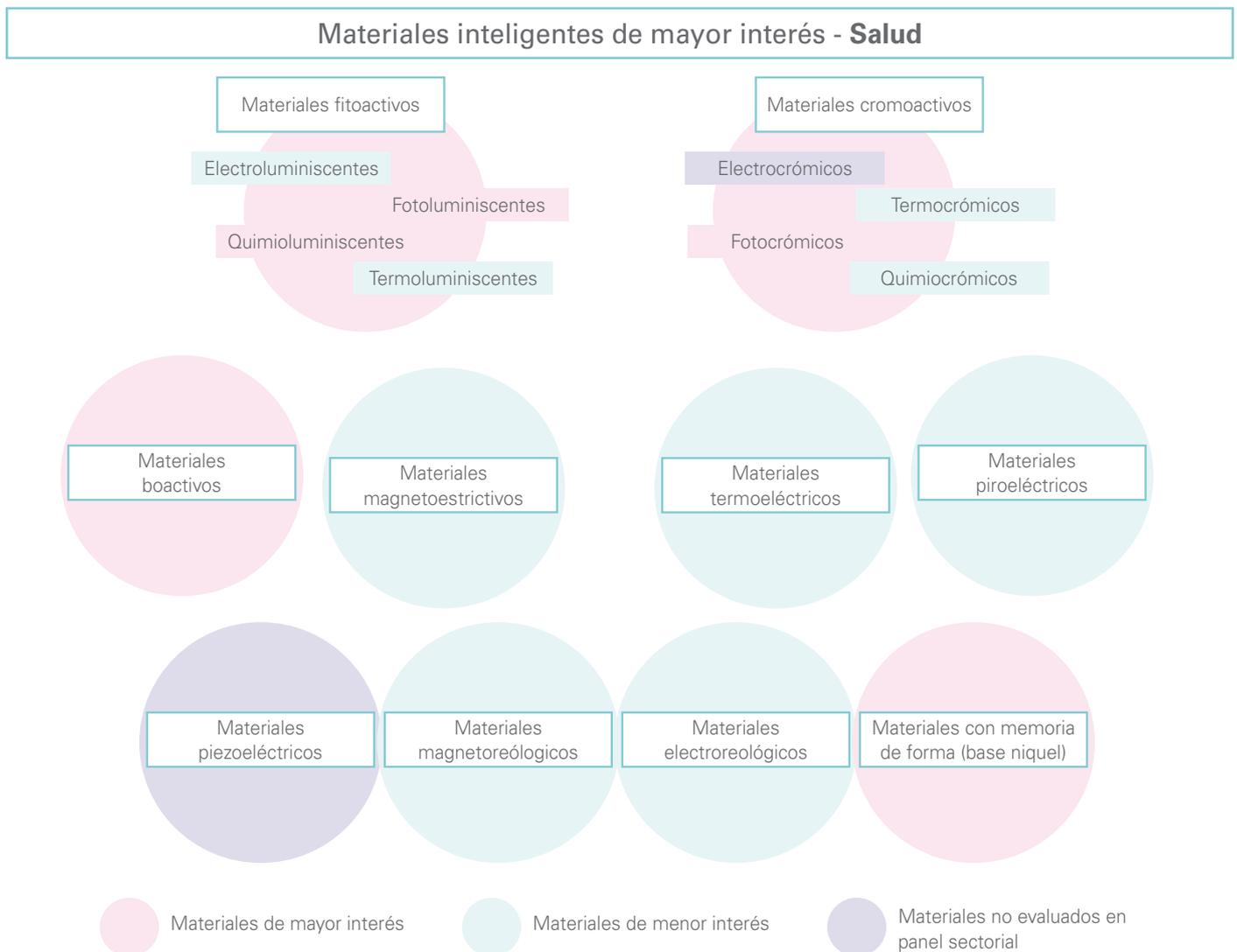


Figura 4: Materiales inteligentes de mayor interés para el sector de salud

Los materiales de mayor interés para el sector de salud son, de forma genérica, los materiales bioactivos y los de memoria de forma, mientras dentro del grupo de materiales fotoactivos destacan, por su interés los quimio- y fotoluminiscentes. En el caso de los materiales cromóactivos, se prevé que tendrán un alto impacto en la investigación médica los materiales fotocromáticos.

La figura 5 refleja claramente que siete ámbitos de investigación en materiales inteligentes son de especial relevancia para el sector transporte: los magnetostrictivos, los termo- y piezoeléctricos, los magneto- y electroreológicos, así como los materiales de memoria de forma en base cobre. Además, pueden tener un impacto alto en el sector la subfamilia de materiales electro- y quimioluminiscentes, así como los termo- y electrocromáticos.

Materiales inteligentes de mayor interés - Transporte

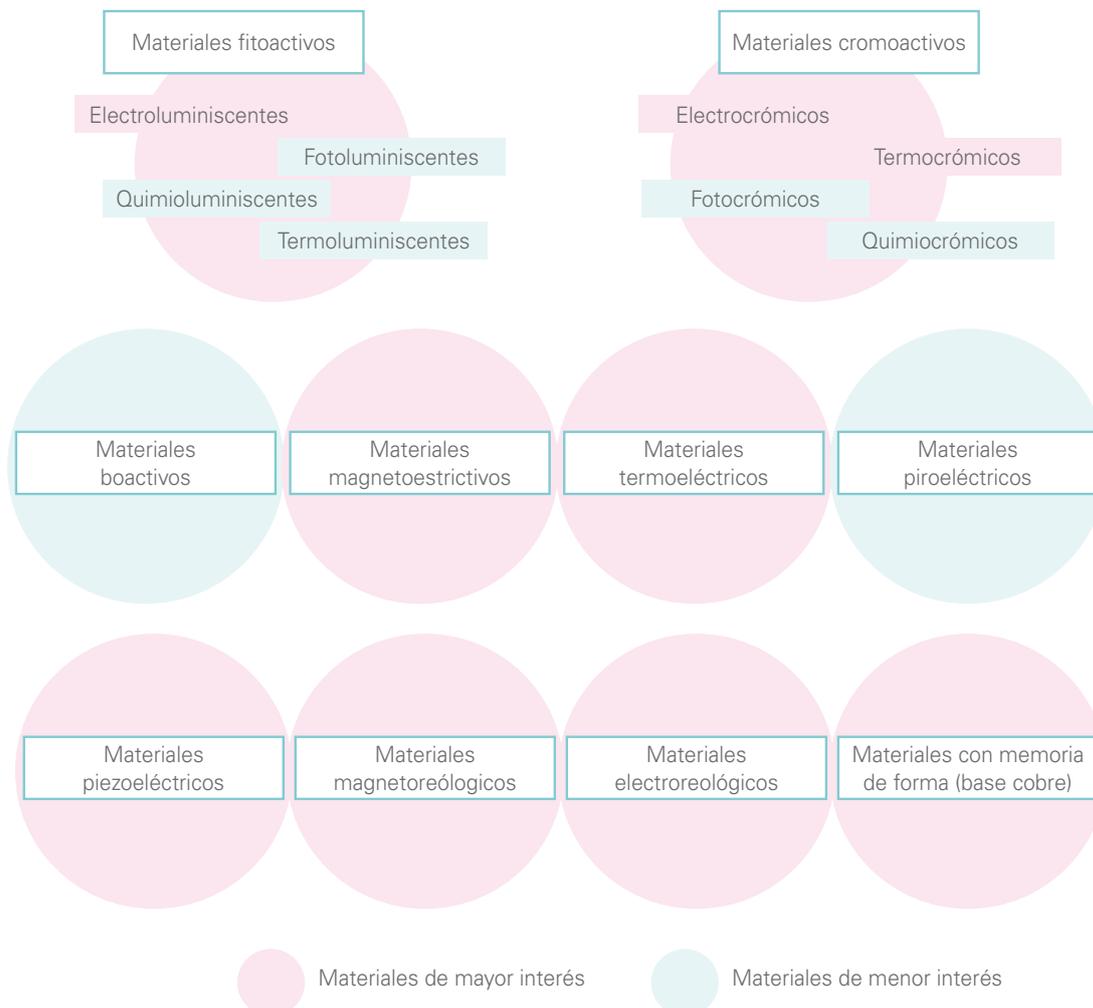


Figura 5: Materiales inteligentes de mayor interés para el sector de transporte

Según los expertos participantes en el panel general, la mayoría de los desarrollos en materiales inteligentes tendrán un impacto alto en el sector energético y el medioambiental. Sin embargo, ha resultado más difícil evaluar posteriormente la sostenibilidad de aplicaciones concretas por la dificultad para contar con expertos en cada una

de las materias. Los grupos de materiales que no pudieron ser convenientemente estudiados, (magnetoestrictivos, termoeléctricos, piro- y piezoeléctricos y materiales con memoria de forma en base cobre) serán analizados complementariamente mediante consulta a expertos internacionales.

Materiales inteligentes de mayor interés - Energía y medio ambiente

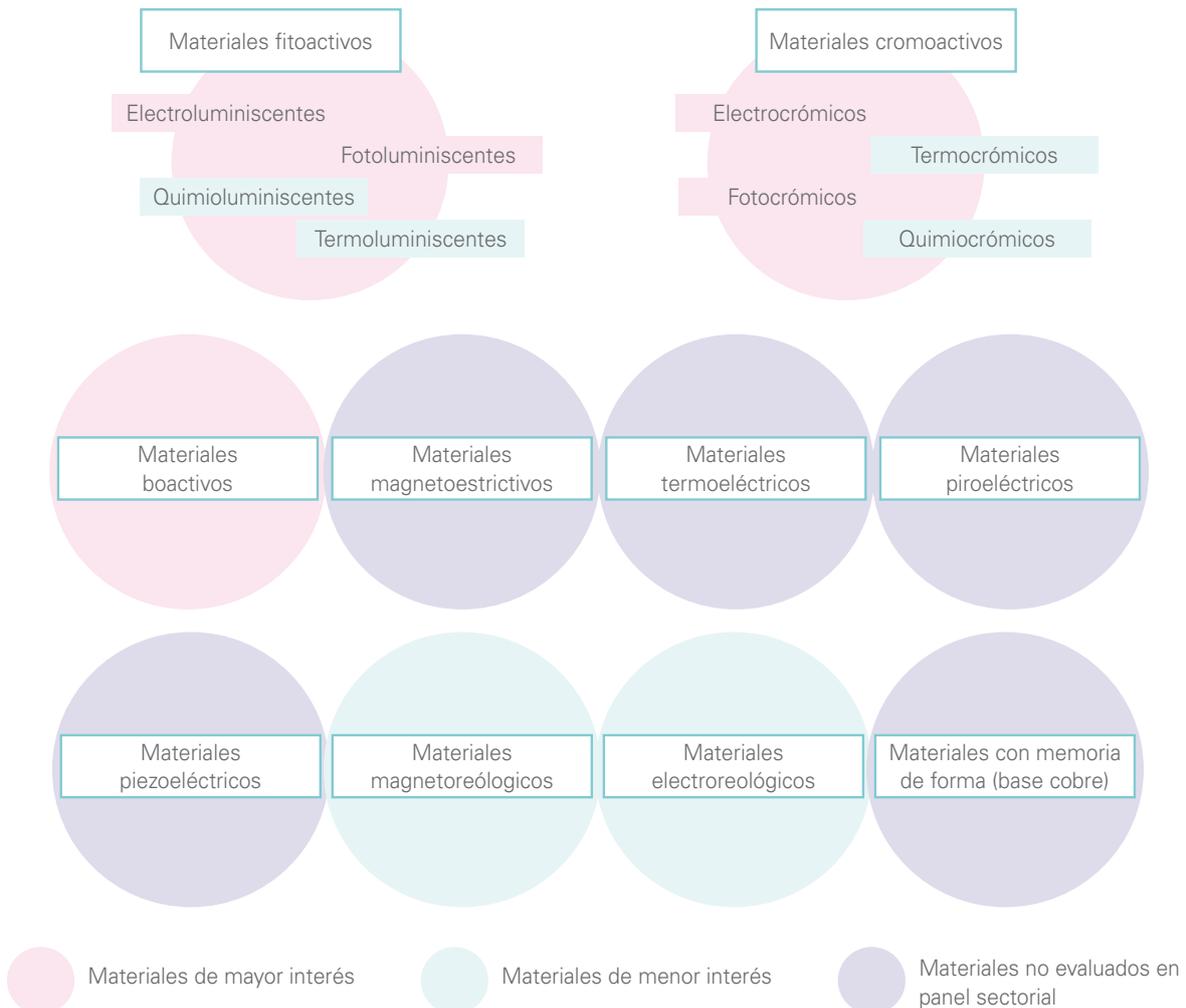


Figura 6: Materiales inteligentes de mayor interés para energía y medio ambiente

A continuación se presentan los resultados obtenidos de la encuesta on-line y la información aportada por los expertos en los paneles sectoriales.

5.2. Recomendaciones y consideraciones generales sobre I+D en materiales inteligentes en España

A lo largo del proceso de este estudio de prospectiva surgieron una serie de recomendaciones de carácter general que han de tenerse en consideración antes de analizar de manera más específica las diferentes familias de materiales y líneas de investigación potenciales en este ámbito.

Tal como se ha apuntado anteriormente, cuando se habla de materiales inteligentes hay que tener en cuenta que cada material inteligente debe valorarse en su contexto ya que el material, sus funciones y el proceso tienen que encajar en un medio ambiente determinado. Los materiales inteligentes se desarrollan principalmente a nivel de microtecnologías, embebidos en sistemas, por lo que la investigación en el ámbito de materiales inteligentes se desarrolla en paralelo al medio contenedor que los envuelve.

Por otra parte, cabe destacar que más allá de las oportunidades que puedan representar los diferentes materiales inteligentes y sus aplicaciones de manera individual, existe una tendencia hacia la investigación y desarrollo de materiales funcionales complejos o, mejor, multifuncionales. Se trata de materiales que responden a más de un estímulo ofreciendo mayores posibilidades de aplicación en distintos ámbitos.

En cuanto a la situación de España con respecto a otros países avanzados se puede decir que existe un buen nivel de investigación básica en España, pero los problemas surgen al pasar de esta investigación básica a la aplicada. En este sentido, se observa que serían necesarios instrumentos o instituciones multidisciplinares que faciliten el salto de la investigación básica a la aplicada o que sirvan de puente entre las dos disciplinas.

También se observan obstáculos a la hora de transferir los resultados de la investigación y los conocimientos a las empresas. Se considera que la forma más eficaz de dar respuesta a este obstáculo sería la creación de nuevas empresas, siendo necesario para ello mejorar el entorno, ya que el actual se considera como no-competitivo. Además, sería necesario eliminar las barreras administrativas que dificultan la creación de estas nuevas empresas.

5.3. Evaluación de la madurez de las familias de materiales y estimación de su impacto

Como resultado del panel general se extrajo una valoración por parte de los expertos del impacto que cada familia de material podría tener en cada uno de los sectores objeto de estudio, así como una identificación de las posibles aplicaciones relacionadas con cada uno de los materiales analizados. En la tabla 3 se presenta un resumen de los resultados obtenidos.

Material	Madurez	Impacto sectorial		
		Salud	Transporte	Energía y medio ambiente
Fotoactivos-Electroluminiscentes	Comercial, menor en OLED	Bajo	Alto	Alto
Fotoactivos-Fotoluminiscentes	Comercial, excepto nanomateriales	Alto	Difícil prever	Alto
Fotoactivos-Quimioluminiscentes	Comercial	Alto	Bajo	Bajo
Fotoactivos-Termoluminiscentes	Comercial	Alto	Bajo	Alto
Cromoactivos-Electrocromicos	Comercial, menor en inorgánicos	Alto	Alto	Alto
Cromoactivos-Fotocromicos	Demostración	Muy alto	Bajo	Alto
Cromoactivos-Quimiocromicos	Prototipo	Bajo	Bajo	Medio
Cromoactivos-Termocromicos	Prototipo	Bajo	Alto	Bajo
Bioactivos	Pre-comercial	Muy alto	Difícil prever	Alto
Magnetostrictivos	Comercial	Difícil de prever	Alto	Alto
Piroeléctricos		Medio	Bajo	Medio-alto
Termoeléctricos	Comercial (prototipo en alto rendimiento)	Bajo	Alto	Alto
Piezoeléctricos	Prototipo	Bajo	Muy alto	Alto
Magnetoreológicos y electroreológicos	Comercial	Bajo	Alto	Difícil de prever
Materiales con Memoria de Forma	Comercial (base Base Ti-Ni), emergente base cobre y sin Ni	Alto	Alto	Alto

Tabla 3: Impacto sectorial de los materiales inteligentes

Aunque muchos de los materiales incluidos en la tabla se encuentran ya en el mercado, se sigue investigando para mejorar sus propiedades y rendimiento y para buscar nuevas aplicaciones y prestaciones. Tomando como ejemplo los materiales termoeléctricos, se puede señalar que los materiales actualmente disponibles en el mercado alcanzan un rendimiento máximo del 7% en la conversión

de calor a electricidad, con lo cual aún no tienen un impacto importante en el sector energético. Existen, no obstante, vías de investigación) apuntan a que el valor de conversión (ZT) puede mejorarse de 0.3 en materiales tradicionales a 1.6 en mezclas de nanomateriales (Dresselhaus 2009). Son este tipo de saltos cualitativos en ámbitos de investigación iniciados hace décadas que convierten los materiales

inteligentes en un factor clave para alcanzar mayores niveles de eficiencia en procesos productivos y aplicaciones finales en los próximos 10 a 15 años.

A continuación, se detallan los resultados de los paneles de expertos sectoriales y de la encuesta previa, señalando posibles barreras a su comercialización derivadas de factores tales como impactos medioambientales no deseables o el posible surgimiento de una tecnología competidora con mejores prestaciones. También se describen las oportunidades de mercado y los impactos positivos que se pudieron identificar para el conjunto de la familia de materiales. La evaluación de las aplicaciones específicas de cada ámbito se presenta en el capítulo 6.

Cabe destacar que las familias de materiales y las aplicaciones seleccionadas presentan diferentes grados de madurez, encontrándose algunas ya en fase de comercialización y otras todavía a nivel de laboratorio. En este último caso, la incertidumbre sobre la futura evolución del mercado es, obviamente, mayor y, en algunos casos, los paneles de expertos no se consideraron competentes para realizar una evaluación de los mismos.

Fotoactivos - Electroluminiscentes

Se trata de materiales que ya presentan desarrollos comerciales, excepto los materiales **electroluminiscentes orgánicos**. Los materiales ya comercializados pueden mejorarse en cuanto al tiempo de operación (que es bajo), reduciendo su vulnerabilidad a la fotodegradación y mejorando las condiciones de fabricación que actualmente son limitantes (requieren sala blanca y atmósfera controlada). Los problemas técnicos en fase de

investigación son actualmente la protección de los sustratos flexibles ante el agua y el oxígeno, así como la fabricación de grandes superficies.

Se considera que su impacto en el sector de salud será escaso, mientras que en los sectores de transporte, energía y medio ambiente su impacto será alto, especialmente el de los materiales OLED (Organic Light Emitting Device). En el caso de sector del transporte, se trata de una tecnología que puede ser importante desde el punto de vista de la estética del producto y desde el punto de vista de la mejora de la seguridad. Además, se trata de materiales que pueden suponer una gran oportunidad para mejorar la eficiencia energética y el ahorro de energía, tratándose éste de un aspecto clave teniendo en cuenta el desafío que supone el uso eficiente de la energía para el futuro.

○ Posibles barreras y oportunidades

Como se ha mencionado anteriormente, los materiales electroluminiscentes orgánicos (OLED) ofrecen muchas posibilidades de desarrollo en los sectores de transporte y energía y medio ambiente, pero que deben hacer frente a ciertas barreras.

Si analizamos estos materiales desde el punto de vista de su sostenibilidad medioambiental, los materiales electroluminiscentes orgánicos no presentan el riesgo de generar un nuevo residuo tóxico, pero existen dificultades para el reciclado, puesto que se trata de materiales multi-capas que resultan difíciles de separar y, por lo tanto, de recuperar. Los polímeros, especialmente, al ser mezclados, pierden propiedades y no pueden ser reutilizados.

Se estima que los desarrollos basados en esta familia de materiales puede tener un significativo efecto en la creación de empleo y que además presentan la ventaja de ser fácilmente comercializables por el tejido empresarial existente. En cuanto a la creación de empleo, ésta podría ser más significativa en el sector del transporte y en lo relacionado tanto con la electrónica flexible para fines de iluminación. Se estima que el mercado para aplicaciones OLED crecerá fuertemente en los próximos años, hasta alcanzar los 2.450 millones de dólares, según estimaciones de Frost & Sullivan⁽¹⁾.

Sin embargo, la cuestión de si la producción de estos materiales se llevará a cabo en España o no dependerá de si la industria española pueda entrar a dominar con fuerza esta tecnología y encontrar nichos atractivos. La competencia internacional por el desarrollo comercial de la tecnología OLED es elevada, siendo especialmente bien posicionadas las empresas alemanas. Empresas tractoras como BASF, OSRAM y Philips investigan conjuntamente esta tecnología en el marco de la estrategia de alta tecnología del gobierno alemán, en un proyecto denominado "OLED 2015".

Por lo tanto, se puede concluir que a pesar de que el tejido industrial español se encuentra suficientemente preparado para la comercialización de estos materiales y de las oportunidades de creación de empleo que ofrecen, la cuestión de la capacidad de la industria española para competir con éxito

en este mercado emergente puede ser más problemática.

Se trata de una tecnología que cuenta con la ventaja clave de no tener tecnologías competidoras o que presenten similares prestaciones en el sector de transporte. En caso del sector de la energía puede producirse cierta competencia con los LEDs convencionales pero, en general, no compiten en las mismas aplicaciones.

Fotoactivos - Fotoluminiscentes

Se trata de materiales que ya se usan de forma comercial en el sector de salud y su impacto en el sector sanitario se considera alto. Las posibles aplicaciones incluyen microarrays **para la identificación de genes y proteínas** y otros tipos de **biosensores**.

Por lo que respecta al sector del transporte, su impacto en este sector resulta difícil de prever. Se encuentran aún en fase de investigación básica nuevos nanomateriales con propiedades similares que pueden ser de interés para fines de **señalización**. Esta misma función puede ser también interesante para el sector medioambiental.

○ Posibles barreras y oportunidades

Desde el punto de vista de la sostenibilidad medioambiental, uno de los elementos que pueden ser claves es el impacto que la escasez de materiales críticos puede tener en el desarrollo de los materiales inteligentes en general y de los fotoluminiscentes en particular. Aunque estos materiales se utilizan

⁽¹⁾BMBF Ministerio Federal de Educación e Investigación <http://www.bmbf.de/de/3604.php>

en pequeñas cantidades, algunos de los desarrollos en base a cadmio o galio podrían verse afectados por los problemas de suministro si llegan a usar en aplicaciones ampliamente comercializadas (US Department of Energy 2010).

Una ventaja de los esta familia de materiales es que no existen tecnologías competidoras con prestaciones similares, con lo cual el potencial para la creación de empleo se valora muy positivamente.

Cromoactivos - Electrocrómicos

En el caso de los materiales electrocrómicos para aplicaciones de salud, existen ya desarrollos comerciales en base a óxidos inorgánicos, mientras los materiales orgánicos son menos maduros y de menor duración. Se prevé que puedan contribuir de forma importante para tratar **enfermedades de visión** y, por lo tanto, su impacto en el sector salud será alto.

También será alto su impacto en el sector del transporte, en el que se prevé que puedan ser de interés para la mejora de la **estética de piezas de automóvil** y otras aplicaciones, como **retrovisores y otras superficies vídriosas**.

Por último, en relación con el sector de energía y medio ambiente, se prevé que estos materiales puedan contribuir de forma importante a mejorar la eficiencia energética, por ejemplo, en **ventanas que reducen su transparencia y en techos solares**.

○ Posibles barreras y oportunidades

Antes de pasar a analizar los materiales electrocrómicos desde el punto de vista de

su sostenibilidad medioambiental, social y económica, hay que señalar que éste análisis se ha centrado en las aplicaciones de estos materiales en los sectores del transporte y de la energía y medio ambiente. Esto se debe a que las aplicaciones en salud se consideran ya maduras.

Al igual que en el caso de los materiales fotoactivos anteriormente analizados, desde el punto de vista de su sostenibilidad medioambiental, la escasez de materiales críticos no tendrá un impacto significativo en los materiales electrocrómicos y en sus diferentes aplicaciones. En el caso de su aplicación en ventanas inteligentes esto se debe a la tendencia mayoritaria a utilizar materiales orgánicos. Además, en el caso de que se utilizaran materiales inorgánicos sería en cantidades mínimas por lo que se puede concluir que estos materiales no serán muy vulnerables a problemas de abastecimiento o incrementos de precio.

Por otro lado y siguiendo con el análisis de la sostenibilidad ambiental de estos materiales, al igual que en anteriores casos, los materiales electrocrómicos también son difíciles de separar y, por lo tanto, de reciclar, pudiendo este factor obstaculizar su desarrollo.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad social, la aplicación de estos materiales puede conllevar un aumento del confort para los usuarios de transporte y mediante la utilización de ventanas inteligentes en edificios, pudiendo redundar en una mejora de la salud de las personas.

Cromoactivos - Fotocrómicos

Se considera que estos materiales serán de muy alto impacto en el sector de salud gracias a su utilización en **sistemas de dosificación implantables**. Sin embargo, el impacto de estos materiales en el sector del transporte se considera escaso.

En cuanto al sector de la energía y el medio ambiente, estos materiales pueden tener un alto impacto en el sector gracias a su utilización en **ventanas**. Se emplean ya de forma comercial en lentes pero hay desarrollos menos maduros a nanoescala (fotónica). El ámbito de la fotónica es el más prometedor para los materiales fotocrómicos novedosos (Verga 2004), porque sus propiedades permiten que funcionen como actuadores dentro de microsistemas. Sin embargo, se trata de desarrollos destinados principalmente a la informática, con lo que estas aplicaciones no encajan en el ámbito temático elegido para este estudio y no han sido evaluados desde la perspectiva sectorial.

○ Posibles barreras y oportunidades

La principal ventaja de los materiales fotocrómicos consiste en que permiten realizar análisis de menor coste que los que se pueden realizar mediante luminiscencia, aunque resultan menos sensibles a estímulos que otras tecnologías.

Cromoactivos - Quimiocrómicos

Al igual que los fotocrómicos, los materiales quimiocrómicos se muestran menos sensibles que otras soluciones, pero pueden ser de interés como sensores para la detección de fugas en aplicaciones

energéticas y medioambientales. Sin embargo, se trata de una familia de materiales con pocas aplicaciones comerciales. Existen patentes para la utilización de sensores quimiocrómicos para la detección de fugas de hidrógeno, pero otros desarrollos, por ejemplo, para la detección de mutaciones en organismos, aún no han alcanzado la fase comercial.

Cromoactivos - Termocrómicos

Estos materiales tendrán un impacto alto en el sector de transporte gracias a su utilización en la **fabricación de pinturas**. Tienen un potencial importante en nichos de mercado muy concretos, como la **medición de temperaturas en superficies** en radiadores, partes de motores y también en carreteras para detectar si el asfalto está helado.

Se estima que en los otros dos sectores estudiados, el impacto de esta familia de materiales será bajo, por lo que los resultados de la evaluación se presentan en el capítulo 6.

Quimioluminiscentes

Los materiales quimioluminiscentes son considerados de alto impacto en el sector de salud, especialmente los "puntos cuánticos" que se utilizan como **marcadores para inmunoensayos**. Su impacto en el sector transporte y el de energía y medio ambiente, sin embargo, se considera bajo, por lo cual la evaluación posterior realizada sobre esta familia de materiales se ha ceñido al primero de los sectores estudiados (salud) y los resultados se presentan en el capítulo 6.

Materiales bioactivos

Por lo que respecta al sector de salud, los materiales con actividad biológica o biomimetismo son considerados de muy alto interés para el sector farmacéutico. Su grado de madurez varía en función de las aplicaciones, pero en general, su difusión comercial aún es escasa. Se encuentra en fase de desarrollo industrial la liberación controlada de fármacos, mientras aún se investiga en laboratorio la **ingeniería de tejidos y materiales para la liberación de fármacos**.

En cuanto al impacto que estos materiales pueden tener en el sector del transporte, es difícil de prever, principalmente porque su coste actual es alto.

Por último, y por lo que respecta al sector de energía y medio ambiente, estos materiales se pueden considerar de especial interés para la **detección de contaminantes**.

Desde la perspectiva de la sostenibilidad medioambiental de estos materiales, ninguna de las aplicaciones que se citan en este apartado se muestra vulnerable a la escasez de materiales críticos ya que se utilizan materiales orgánicos (polímeros) para el desarrollo de las mismas.

Materiales magnetostrictivos

Se trata en gran parte de materiales con desarrollos comerciales, cuyo impacto en el sector de la salud es, no obstante, difícil de prever.

Por lo que respecta al sector del transporte, se trata, en gran parte, de materiales con desarrollos comerciales empleados para el **control de ruido y**

vibraciones, con lo cual pueden tener alto impacto en este sector.

De la misma forma, se considera que el impacto de estos materiales en el sector de energía y medio ambiente puede ser alto, especialmente en desarrollos empleados en **transductores, transformadores y bombas**.

Materiales piroeléctricos

Son materiales de medio-alto interés para algunos nichos en el sector de salud, tales como la **monitorización de atletas mediante sensores**. Se encuentran en la mayoría de los casos a nivel de prototipo y no existe un tejido empresarial para su fabricación en España. Sin embargo, su rigidez es una desventaja frente a desarrollos con polímeros derivados de PVDF con similares prestaciones.

Por otra parte, la utilidad de este tipo de materiales para aplicaciones de transporte es dudosa. Como ocurre en el sector de salud, se encuentran, en la mayoría de los casos, a nivel de prototipo y no existe un tejido empresarial para su fabricación en España.

A pesar de los obstáculos mencionados, son materiales de interés medio-alto para el sector de la energía y medio ambiente, especialmente para aplicaciones en la **detección de incendios o el control de paneles solares**.

Materiales termoeléctricos

Son de especial interés los materiales termoeléctricos bidireccionales, con forma. Su incidencia en el sector salud se considera escasa.

En cuanto al sector del transporte, a pesar de que no hay aún desarrollos comerciales, estos materiales pueden considerarse claves para mejorar la eficiencia energética de aplicaciones como **tubos de escape** y otros dispositivos que generan calor residual. Sin embargo, a medio plazo, los cambios que se están produciendo en el sector del automóvil, concretamente la sustitución de los motores de combustión por motores eléctricos, puede actuar en contra de esta aplicación concreta, pero las oportunidades son amplias.

El impacto de los materiales termoeléctricos en el sector energético puede ser muy alto si se consigue mejorar el nivel de eficiencia en la conversión de energía térmica a eléctrica. De acuerdo con información publicada por el Massachusetts Institute of Technology en 2009⁽²⁾, ya se ha elevado la capacidad de transformación del 10% del límite teórico (Carnot) al 40% y se ha demostrado la capacidad de llegar al 90% del mismo.

Materiales piezoeléctricos

En el caso de los materiales piezoeléctricos, la situación competitiva de España es mala, puesto que Alemania tiene una posición poderosa. Sin embargo, existe un nicho que aún es emergente a nivel internacional: los polímeros piezoeléctricos amorfos que operan a más de 100 °C, que aún se investigan a nivel de laboratorio. Sus aplicaciones en el sector de transporte son múltiples, puesto que pueden funcionar como sensores, actuadores o transductores y se pueden aplicar para el control estructural, el control y amortiguación de vibraciones, el control del ruido, diseño de estructuras inteligentes, sonares de profundidad, indicadores

de espesores, detección de defectos, indicadores de nivel, sistemas de alarma, indicador de deformación, localizadores de balizas de aeronaves, o pruebas de resistencia exhaustivas en aeronáutica.

Una posible aplicación en el sector de la salud es la detección del latido fetal o los sensores craneales.

En cuanto al sector de energía y medio ambiente las aplicaciones de estos materiales pueden ser múltiples, como indicadores de alarma, sensores o controles de ruido y, por lo tanto, de alto impacto para el sector.

El principal problema que se percibe en relación a la utilización de materiales piezoeléctricos reside en que algunos de estos materiales, especialmente los PZT, contienen plomo y éste puede dar problemas en los procesos de fabricación, afectando de manera negativa a la salud de los trabajadores.

Materiales magneto - y electroreológicos

Se trata de una familia de materiales relativamente madura y en lo que se refiere al sector de salud, con potencial impacto en el equipamiento médico, por ejemplo camas adaptadas.

En cuanto a su impacto en el sector de transporte, éste será alto. Sus aplicaciones específicas incluyen válvulas, sistemas de embragues y frenos, al igual que control de vibraciones y sistemas de absorción de impacto, así como neumáticos.

Finalmente, el impacto de estos materiales en el sector energético y medioambiental es difícil de prever.

⁽¹⁾New MIT Thermoelectric Device Pushes Efficiency to Its Theoretical Limit | Thermoelectric

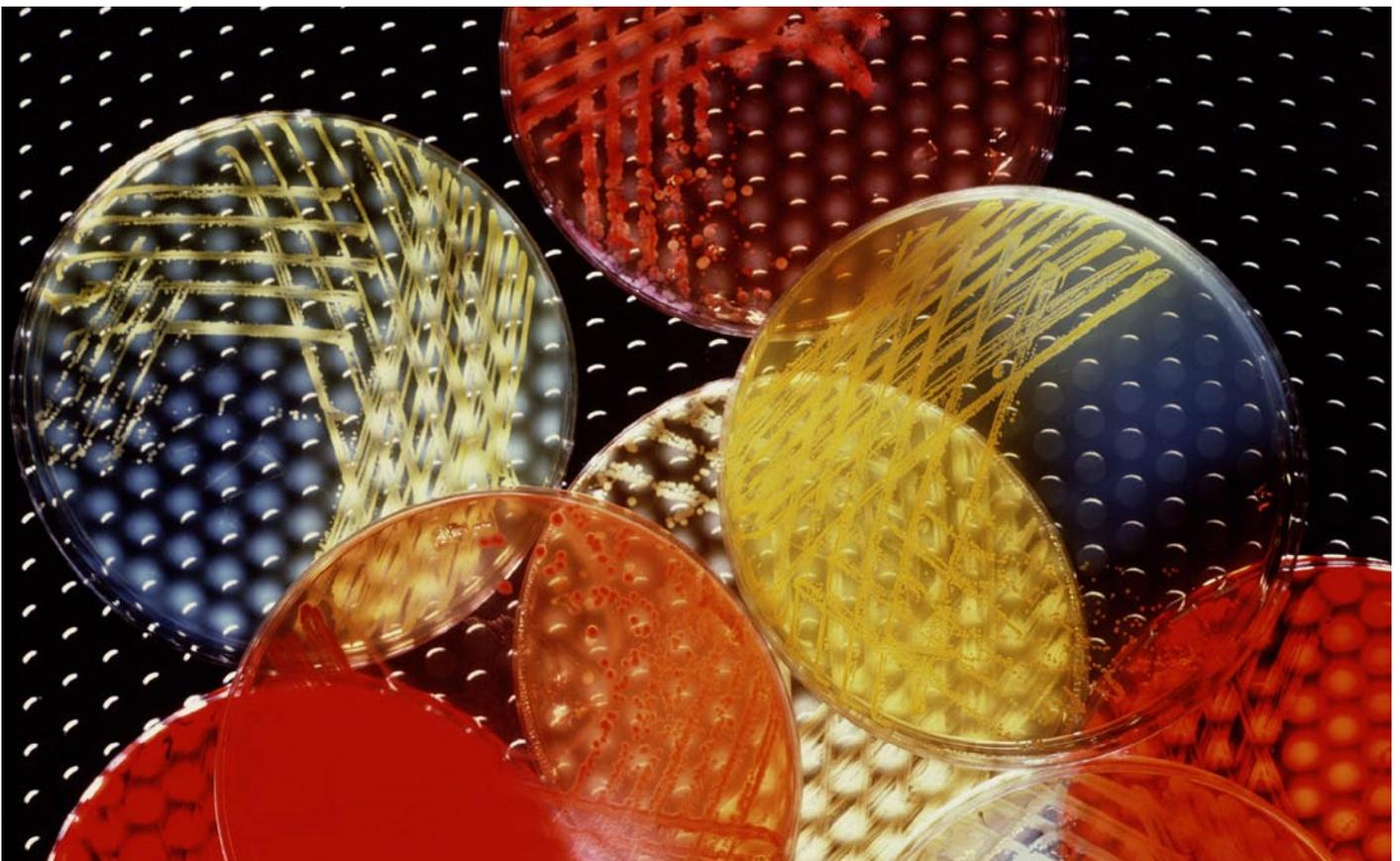
Materiales con memoria de forma

En este caso, deben de distinguirse dos clases de materiales: los de base Ti-Ni y los de base cobre. En el primer caso, y en lo que concierne al sector de salud, existe un nicho para el desarrollo de **stents cardíacos sin níquel**, puesto que este interfiere con las resonancias magnéticas. Desarrollos en esta línea pueden tener un impacto alto en el sector.

Los materiales con memoria de forma de base cobre pueden funcionar a altas temperaturas (mas de 200 °C) y son considerados una tecnología emergente con aplicaciones importantes en el sector del transporte,

especialmente en el sector aeronáutico y aeroespacial (**lanzadores de satélites**), así como otros ámbitos del transporte, como el ferrocarril, en los que se generan altas temperaturas. Por lo que respecta al sector aeronáutico, estos materiales tienen gran potencial en el ámbito de los conectores y para la unión de tubos sin soldadura.

Por último, en cuanto al sector de energía y medio ambiente, se considera que estos materiales pueden tener un alto impacto en el mismo, con aplicaciones para el **reciclaje** y en **válvulas** para diferentes aplicaciones energéticas.



6. Análisis Sectorial

Por medio de la encuesta enviada a los expertos y los posteriores paneles sectoriales, se ha analizado la sostenibilidad de las diferentes líneas de investigación identificadas, haciendo hincapié en las cuestiones que suscitaban mayor controversia. Los resultados de este análisis se muestran a continuación, detallando los principales obstáculos a los que se enfrentan estas líneas de investigación en

cada uno de los sectores así como las oportunidades o ventajas con las que cuentan.

Las aplicaciones evaluadas mediante la encuesta on-line y los paneles sectoriales se resumen en la tabla 4:

SALUD		TRANSPORTE		ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE	
Material avanzado	Aplicación	Material avanzado	Aplicación	Material avanzado	Aplicación
Fotoactivos - Fotoluminiscentes	Microarrays para la identificación de genes y proteínas	Fotoactivos - Electroluminiscentes	Electroluminiscentes orgánicos OLED	Fotoactivos - Electroluminiscentes	Electroluminiscentes orgánicos OLED
	Biosensores	Cromoactivos - Electrocrómicos	Materiales electrocrómicos orgánicos para retrovisores y otras superficies vídriosas	Fotoactivos - Fotoluminiscentes	Nanomateriales para señalización
Cromoactivos - Electrocrómicos	Tratamiento de enfermedades de visión (gafas, lentes)	Materiales magnetostrictivos	Tecnologías para el control a distancia de ruido y de vibraciones	Cromoactivos - Electrocrómicos	Ventanas inteligentes
Cromoactivos - Fotocrómicos	Sistemas de dosificación implantables	Materiales termoeléctricos bidireccionales, con forma	Aprovechamiento calor residual (tubos de escape)	Cromoactivos - Fotocrómicos	Membranas fotónicas (nanoescala)
Quimioluminiscentes (quantum dots)	Marcadores para inmunoensayos	Materiales piezoeléctricos	Sensores, actuadores o transductores para el control estructural y detección de defectos	Cromoactivos - Quimiocrómicos	Sensores quimiocrómicos para la detección de fugas de sustancias químicas
Bioactivos	Ingeniería de tejidos	Materiales magneto- y electroreológicos	Válvulas, sistemas de embragues y frenos para transporte ferroviario y aeronáutico	Bioactivos	Detección de contaminantes
Bioactivos	Liberación de fármacos (dosificación controlada)		Sistemas de absorción de impactos	Materiales magnetostrictivos	Transductores, transformadores y bombas

SALUD		TRANSPORTE		ENERGIA Y MEDIO AMBIENTE	
Material avanzado	Aplicación	Material avanzado	Aplicación	Material avanzado	Aplicación
Materiales piezoeléctricos	Sensores craneales	Materiales Memoria de Forma de base cobre	Sector aeroespacial (lanzadores de satélite)	Materiales piroeléctricos	Control de paneles solares
Materiales Memoria de Forma de base níquel	Stents sin níquel			Materiales termoeléctricos bidireccionales, con forma	Aprovechamiento calor residual
				Polímeros piezoeléctricos amorfos que operan a $> 100^{\circ}$	Sensores de alarma
				Materiales Memoria de Forma de base cobre	Reciclaje

En los apartados siguientes, se destacan las advertencias sobre posibles problemas o limitaciones de cada vía de investigación o aplicación evaluadas, así como su potencial concreto dentro de su contexto sectorial.

6.1. Sector de salud

Familia de materiales: Fotoactivos-electroluminiscentes

Aplicaciones: Microarrays para la identificación de genes y proteínas y biosensores

La aplicación de los materiales fotoactivos-electroluminiscentes en el sector salud, tanto en microarrays para la detección de genes y proteínas como en biosensores, tiene un gran potencial para mejorar el diagnóstico de las enfermedades. Los avances en este ámbito son especialmente prometedores para enfermedades en las que un

buen y temprano diagnóstico es importante tanto para la curación, como para mejorar la eficacia de los tratamientos en enfermedades no curables.

Aunque se haga uso de materiales críticos en el proceso de fabricación de los microarrays, los expertos estiman que un encarecimiento de los materiales de base no tendría un efecto grave, principalmente porque se trataría de sistemas de diagnóstico que se realizarían solamente una vez en la vida y porque la relación coste-beneficio de este tipo de diagnósticos es muy positiva.

El principal obstáculo al que se pueden enfrentar estos materiales para aplicaciones en microarrays puede ser el de su comercialización. A pesar de contar con un tejido empresarial que está preparado para su comercialización, el éxito de la misma puede depender del sistema de salud y de lo que este demande, teniendo especial relevancia el funcionamiento de los seguros privados de salud.

No se requiere una gran inversión en cuanto a equipamiento o infraestructuras para llevar a cabo la comercialización de estas aplicaciones ya que lo importante es contar con el conocimiento científico. Por lo tanto, sería suficiente con la existencia y/o impulso de pequeñas y medianas empresas intensivas en conocimiento.

Por lo que respecta a los materiales fotoactivos-fotoluminiscentes en aplicaciones para biosensores, cabe destacar que pueden suponer un riesgo para la salud laboral, siendo este un obstáculo que puede ser superado si se desarrollan los pertinentes protocolos de seguridad y análisis de riesgos.

Familia de materiales: Quimio-luminiscentes (quantum dots)

Aplicaciones: Marcadores para inmunoensayos

La aplicación de materiales quimioluminiscentes en marcadores para inmunoensayos ofrece muy buenas oportunidades para el sector de la salud. Se trata de materiales que desde el punto de vista de su sostenibilidad medioambiental no presentan barreras significativas. Por las características del sector de la salud, el uso de sustancias tóxicas o peligrosas es muy limitado por lo que la generación de residuos tóxicos no se considera una barrera significativa.

Por otra parte, mediante el análisis de la sostenibilidad social de estas aplicaciones, se ha comprobado que estos materiales ofrecen grandes beneficios ya que mejoran de manera significativa el diagnóstico de las enfermedades. Esta mejora será de especial importancia en el caso de las enfermedades consideradas "raras", ya que en estos casos el temprano y acertado diagnóstico es de vital importancia.

Además, esta tecnología impactará también de manera positiva en el tratamiento de las enfermedades, tanto contribuyendo a un tratamiento más efectivo de las mismas como reduciendo los riesgos de sufrir efectos secundarios de un tratamiento. La mejora del diagnóstico supone en este caso la posibilidad de personalizar los tratamientos, evitando así los efectos secundarios.

También es necesario tomar en consideración que se trata de materiales que tendrán especial incidencia en la población envejecida, siendo éste un factor que puede ser importante para su desarrollo teniendo en cuenta las proyecciones de aumento de la esperanza de vida de las personas. La aplicación de esta tecnología podría estar dirigida a enfermedades tales como el cáncer y las enfermedades neurodegenerativas, que tienen especial incidencia en las personas mayores. Por otra parte, estos materiales ofrecen significantes oportunidades a la hora de ayudar a tratar o diagnosticar enfermedades "raras" y en cuanto a la posibilidad de personalizar los tratamientos, disminuyendo los efectos secundarios de éstos. En el primer caso, sería importante poder transferir los ensayos utilizados en enfermedades normales a enfermedades raras (en el caso de que se dispongan fondos para investigar en estas enfermedades).

A pesar de los beneficios que ofrecen estos materiales, desde el punto de vista de su sostenibilidad económica se enfrentarán a dos obstáculos que sería necesario salvar para garantizar su desarrollo. Por un lado, se enfrentan a la falta de un tejido empresarial que pueda apoyar la comercialización de esta tecnología. Sería conveniente apoyarse en la labor de los centros tecnológicos y/o impulsar la creación de

spin-offs que faciliten la llegada de esta tecnología al mercado. Por otro lado, al igual que los materiales fotoluminiscentes anteriormente analizados, deberán superar el obstáculo que supone el impacto que pueden tener estos materiales en la salud laboral. De igual manera que en el caso anterior, esta barrera será superable mediante el desarrollo y aplicación de protocolos de seguridad ligados al manejo de estos materiales.

Familia de materiales: Bioactivos

Aplicaciones: Ingeniería de tejidos y liberación de fármacos

Uno de los obstáculos a los que podrían enfrentarse los materiales bioactivos, en el caso de la ingeniería de tejidos, es su alto coste inicial, pudiendo suponer una barrera al acceso universal a los servicios de salud. Sin embargo se trata de una tecnología que a largo plazo puede resultar más económica, ya que no requerirá que el tratamiento se repita. Además, cuenta con la ventaja de que pueden contribuir a mejorar el tratamiento de las enfermedades consideradas "raras". Asimismo, contribuirán a dar respuesta a enfermedades consideradas incurables y a mejorar la eficiencia de los tratamientos existentes.

En el plano comercial, el obstáculo principal al que se enfrenta esta tecnología es la inexistencia de un tejido empresarial que pueda garantizar la comercialización de la misma, principalmente en el ámbito de la terapia celular.

Sin embargo, una vez superada dicho obstáculo, esta tecnología puede tener gran impacto en cuanto a la creación de empleo, cambiando incluso el

concepto de quirófano que conocemos hoy. Se trata, además, de una tecnología que no presenta competidoras.

Sin embargo, ha de tenerse en cuenta que existan algunas tecnologías potencialmente competidoras, especialmente los MEMS. No obstante, a la larga los materiales bioactivos parecen tener más futuro por ser más naturales y sencillos.

Familia de materiales: Materiales de memoria de forma base níquel

Aplicaciones: Stents sin níquel

Los materiales de memoria de forma para aplicaciones en stents sin níquel podrían estar sujetos a ciertas restricciones por la utilización que se hace del niobio para su desarrollo. Sin embargo, la cantidad en la que se utiliza este material es tan pequeña que no se considera que llegue a ser un obstáculo significativo. Por otra parte, tampoco se plantea la generación de nuevos residuos tóxicos o peligrosos en estas aplicaciones.

Los materiales con memoria de forma para aplicaciones en stents sin níquel, presentan además el obstáculo de ser más caros que los materiales convencionales para stents (el acero inoxidable y el cromo-cobalto) y se considera que su impacto en la creación de empleo no es demasiado alto ya que supondrían solo una sustitución del producto.

Sin embargo, pueden ofrecer nuevas soluciones en cuanto a dar respuesta a enfermedades que son por el momento incurables y en cuanto a ofrecer un tratamiento más eficiente que los existentes

actualmente. Además, podría existir un nuevo nicho de mercado en el caso de stents cerebrales y cardiovasculares.

6.2. Sector de transporte

Familia de materiales: Fotoactivos-electroluminiscentes

Aplicaciones: Electroluminiscentes orgánicos OLED

Los materiales OLED aplicados al sector del transporte ofrecen un importante potencial que se refleja en el significativo efecto que pueden tener en la creación de empleo y la facilidad de comercialización por el tejido empresarial existente. Además, esta tecnología puede ser importante desde el punto de vista de la estética del producto y desde el punto de vista de la mejora de la seguridad.

Resulta relevante el hecho de que pueden contribuir a un ahorro de energía en el proceso de fabricación de piezas, si bien este ahorro difícilmente redundará en los usuarios finales de los sistemas de transporte al tener actualmente un coste mayor que los materiales tradicionales.

A pesar del gran potencial que muestran estos materiales, tendrán que hacer frente al obstáculo que supone la dificultad de reciclarlos, ya que al ser materiales multi-capas presentan problemas para poder separar y recuperar los residuos.

Familia de materiales: Cromoactivos-electrocromicos

Aplicaciones: Materiales electrocromicos orgánicos para retrovisores y otras superficies vidriosas

La aplicación de estos materiales puede suponer un

ahorro en los sistemas de transporte ya que pueden conllevar un importante ahorro de energía al facilitar el oscurecimiento del vehículo y, por lo tanto, ayudar a refrigerarlo.

Familia de materiales: Piezoeléctricos

Aplicaciones: Sensores, actuadores o transductores, control estructural y detección de defectos

Se trata de una tecnología que puede tener un impacto muy positivo en el sector del transporte desde el punto de vista de su contribución a hacer un uso más eficiente de la energía y a mejorar la seguridad en los sistemas de transporte. En el aspecto de la mejora de la seguridad cabe destacar que estos materiales pueden contribuir de manera significativa en el ámbito de "monitorización de la salud" en el sector de aviación en cuanto al mantenimiento y control de aeroestructuras y mantenimiento predictivo. También pueden ser importantes para el sector marítimo.

Además, la aplicación de estos materiales a la "monitorización de la salud" puede redundar en un ahorro económico para los usuarios de los sistemas de transporte, principalmente del sector aéreo, ya que pueden contribuir a que se reduzcan los tiempos de parada en los aeropuertos para las comprobaciones de seguridad.

Por otra parte, estos materiales pueden presentar un importante obstáculo que puede hacer peligrar su comercialización. Algunos de estos materiales, especialmente los PZT, contienen plomo y éste puede dar problemas en los procesos de fabricación, afectando de manera negativa a la salud de los trabajadores.

Familia de materiales: Magneto y electroreológicos

Aplicaciones: Válvulas, sistemas de embragues y frenos para transporte ferroviario y aeronáutico

Se trata de materiales que pueden ser muy competitivos y que, de hecho, ya lo están siendo y que además apenas cuentan con tecnologías competidoras con similares prestaciones y precio, especialmente en lo que respecta a la gestión de la energía del impacto, es decir, para la gestión de colisiones en automoción. Sin embargo, tienen aún gran margen de mejora principalmente en cuanto a su durabilidad.

Se trata de materiales con mayor potencial de impacto en el sector del transporte y que desde la perspectiva de sostenibilidad medioambiental, el único obstáculo puede estar relacionado con la reciclabilidad.

Por otro lado ofrecen grandes ventajas teniendo en cuenta su sostenibilidad social ya que contribuyen a la mejora de los sistemas de transporte y porque tienen un importante impacto en el confort de los usuarios de dichos sistemas.

6.3. Sector de energía y medio ambiente

Familia de materiales: Fotoactivos-electroluminiscentes

Aplicaciones Electroluminiscentes orgánicos OLED

Estos materiales pueden suponer una gran oportunidad para el ahorro energético, tratándose éste de un aspecto clave teniendo en cuenta el desafío que supone el uso eficiente de la energía para el futuro. Desde el punto de vista del ahorro económico, uno de

los aspectos más interesantes de estos materiales en el sector de energía y medio ambiente es su potencial efecto positivo en los hogares, en cuanto ayudarán a reducir el consumo de energía.

Sin embargo, esta tecnología se puede enfrentar a dos obstáculos importantes. Por una parte, a pesar de no generar nuevos residuos tóxicos o peligrosos estos materiales presentan dificultades para ser reciclados, ya que al ser multi-capa su separación resulta más complicada. Por otra parte, en cuanto a la creación de empleo, se considera que la producción de estos materiales se realizará fuera de España por lo que no tendrán un gran impacto en cuanto en ese sentido en España, a no ser que se promueva activamente el diseño de aplicaciones que incorporan la tecnología OLED en España para poder acceder a ciertos nichos de este mercado muy competitivo.

Familia de materiales: Fotoactivos-electroluminiscentes

Aplicaciones Nanomateriales para la señalización

Se trata de materiales que ofrecen buenas oportunidades para aplicaciones en señalización y que no presentan obstáculos significativos para su desarrollo. Destaca, sobre todo, su contribución al ahorro energético en edificios, aunque no tanto en hogares. También cabe mencionar que pueden ayudar a mejorar la seguridad en las instalaciones energéticas críticas, puesto que los nanomateriales pueden funcionar a baja intensidad de corriente, manteniendo su función cuando otras aplicaciones ya no pueden operar.

En el caso del uso de materiales fotoluminiscentes en el sector de energía y medio ambiente en

aplicaciones para la señalización, al igual que los OLED que se han descrito anteriormente, esta tecnología tendrá que hacer frente al obstáculo que supone su escasa reciclabilidad, dado que son materiales difíciles de separar y recuperar.

Familia de materiales: Cromoactivos-Electrocromicos

Aplicaciones: Ventanas inteligentes

La aplicación de los materiales electrocromicos para el desarrollo de ventanas inteligentes presenta buenas posibilidades de desarrollo ya que no se enfrentan a obstáculos significativos. La tendencia es a utilizar materiales orgánicos para estos desarrollos, porque estos serían menos vulnerables a problemas de abastecimiento.

Por otra parte, las ventajas que puede suponer la utilización de estos materiales son significativas, sobre todo en relación al uso más inteligente en edificios y a la mejora del confort de los usuarios. Se trata, además, de desarrollos que no presentan problemas para ser comercializados por el tejido empresarial existente y que teniendo en cuenta la importancia del sector de la construcción en España pueden tener un futuro prometedor. Juega a su favor también la creciente tendencia a construir edificios más eficientes energéticamente.

Familia de materiales: Cromoactivos-Quimio-cromicos

Aplicaciones: Detección de fugas de sustancias químicas

Los materiales quimio-cromicos aplicados a la detección de fugas ofrece grandes oportunidades desde la perspectiva de la sostenibilidad

medioambiental, ya que contribuyen a mantener la salud de las personas, evitando que puedan ser expuestas a escapes peligrosos.

En el caso de los materiales quimio-cromicos aplicados a las detección de fugas de sustancias químicas, a pesar de que se trata de una tecnología que podría tener un impacto favorable en la salud de los usuarios y de que existe un tejido empresarial capaz de comercializar estos desarrollos, se enfrentan a tecnologías con similares prestaciones que podrían tener un avance más rápido.

Familia de materiales: Bioactivos

Aplicaciones: Detección de contaminantes

La aplicación de esta tecnología podría suponer un ahorro energético en instalaciones de aire acondicionado en oficinas, hospitales y otros centros de trabajo. Sin embargo, no parece que probable que tengan un gran impacto en los hogares en cuanto a ahorro económico. En todo caso podrían ser utilizados como sensores en el caso de viviendas próximas a empresas potencialmente contaminantes. De esta manera, se considera que su impacto es positivo en cuanto a preservar la salud de los usuarios.

Por otra parte, en cuanto a tecnologías competidoras, se considera que los materiales bioactivos se utilizarán en los casos en los que no haya tecnologías competidoras, ya que son delicados y tienen menor duración que otros. Por lo tanto, serán confinados a ámbitos muy concretos en los que la especificidad y sensibilidad de los mismos sea clave.

7. Conclusiones

Tal como se ha podido observar a lo largo de este informe, el ámbito de investigación de los materiales inteligentes es enormemente amplio y su evaluación requiere un nivel de conocimiento técnico muy elevado. Gracias al conocimiento de los expertos participantes ha sido posible determinar cuáles son las familias de materiales más importantes para cada uno de los sectores incluidos en este estudio, destacando, por ejemplo, la relevancia de los materiales bioactivos para la investigación médica. Se espera que la utilización de materiales inteligentes en el sector de la salud provoque importantes avances en cuanto al diagnóstico de enfermedades y, en algunos casos, también en el tratamiento de las mismas. Sin embargo, ha de contemplarse en cada caso el coste asociado al desarrollo y comercialización del producto, puesto que las barreras identificadas por los expertos se refieren principalmente a la baja competitividad del tejido industrial español frente a los países, en los que se ubican los centros de I+D de las grandes empresas farmacéuticas. El análisis de patentes realizado al comienzo del estudio ya confirmó que el grueso de conocimiento sobre materiales inteligentes en fase comercial – y la propiedad intelectual – se encuentra en Alemania y Estados Unidos, mientras, en España, sólo se pudieron identificar unas pocas patentes, siendo los propietarios generalmente universidades.

La gran versatilidad de los materiales inteligentes y el hecho de que se encuentran embebidos en microsistemas abre, no obstante, muchas oportunidades en nichos concretos del mercado,

especialmente para materiales orgánicos que están menos expuestas al riesgo de la creciente escasez y aumento del precio al que se enfrentan muchos metales.

Una debilidad general que se ha identificado en los paneles de expertos y en la encuesta on-line es el hecho de que en muy pocos casos los desarrollos basados en materiales inteligentes en los sectores de transporte, energía y medio ambiente acaban beneficiando al usuario final de una aplicación o de un producto. Sin embargo, su potencial para mejorar y abaratar procesos en la industrias como la aeronáutica o la del automóvil parece alto.

Un reto especial al que se enfrentan muchos de los materiales evaluados en este estudio son las dificultades de reciclaje, que, a priori, pueden no parecer tan relevantes en aplicaciones a micro-escala, pero pueden llegar a serlo en caso de que se utilicen materiales escasos en aplicaciones destinadas de alto consumo. Ha de prestarse también atención a los posibles riesgos de salud laboral asociados a la manipulación de algunos de los materiales novedosos que contengan quantum dots o plomo, aunque se trata de riesgos que pueden controlarse con los protocolos adecuados.

Los materiales más prometedores para cada sector deberían ser objeto de estudios específicos para identificar nichos de mercados concretos en los que la posición competitiva de las empresas sea aceptable y las expectativas para una rápida comercialización de la nueva tecnología sean positivas.

8. Referencias

"Intelligent Window Coatings that Allow Light In but Keep Heat Out" <http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=2587>.

Amberger, B.; Savji, N. (2008), "Thermochromism of Transition Metal Compounds" <http://www3.amherst.edu/~thoughts/contents/amberger-thermochromism.html>.

Azorín, J. (1990), "Luminescence Dosimetry. Theory and Applications": Ediciones Técnico Científicas, México, 108p.

Behl, Marc; Lendlein, Andreas (2007), "Shape Memory Polymers" *Materials Today* April 2007 Vol 10 Number 4.

Belluco, Paolo (2007), "EAP - ElectroActive Polymers: A Short Introduction to Robotics Applications" Disponible online: <http://home.dei.polimi.it/gini/introEAP.pdf>.

Bent, Aaron A.; Hagood, Nesbitt W. (1997), "Piezoelectric Fiber Composites with Interdigitated Electrodes", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol. 8, No. 11, 903-919 (1997).

Cano Serrano, Encarnación; Fraile, Marina Urbina (2009), "Polímeros inteligentes y aplicaciones" Informe de Vigilancia Tecnológica 2009.

Departamento de Biomateriales ICTP CSIC <http://www.ictp.csic.es/bm/es/inicio.htm>.

Dresselhaus, Mildred (2009), "Perspectives on Recent Advances in Thermoelectric Materials Research", Massachusetts Institute of Technology.

Galaev, IY.; Mattiason, B. (1999), "'Smart' Polymers and what they could do in Biotechnology and medicine", *Trends in Biotechnol.* 1999; 17(8):335-340.

Gray, HN; Bergbreiter, DE (1997) "Applications of Polymeric Smart Materials to Environmental Problems" *Environmental Health Perspectives*, vol 105, supplement 1, February, 1997.

Guzman, G. (sin fecha), "Vanadium dioxide as infrared active coating" <http://www.solgel.com/articles/August00/thermo/Guzman.htm>.

Hartl, Darren; Lagoudas, Dimitris C. (2007), "Aerospace applications of shape memory alloys"

Kornmann, X.; C. Huber, C.; and Elsener, H.R. (2003), "Piezoelectric ceramic fibers for active fiber composites: a comparative study", SPIE Conf. Proc. 5056 (2003), pp. 330–337.

Lane, R.; Craig, B. (2003), "Materials that sense and responde: an introduction to smart materials", Material Ease AMPTIAC Quarterly, Volume 7, Number 2. Disponible on-line: <http://ammtiac.alionscience.com/pdf/2003MaterialEase22.pdf>.

Luprano, Jean; Sola i Caros, Josep ; Ridolfi, Andrea ; Pasche, Stéphanie; Gros, Bertrand (2007), "New generation of smart sensors for biochemical and bioelectrical applications". Disponible on-line http://www.biotex-eu.com/pdf/phealth07_smartsensors.pdf.

Otsuka, Kazuhiro; Kakeshita, Tomoyuki (2002), "Science and Technology of Shape-Memory Alloys: New Developments", Mrs Bulletin/February 2002.

Pons, J.L.; Rocon, E.; Forner-Cordero, A.; Moreno, J. (2007) "Biomedical instrumentation based on piezoelectric ceramics", Journal of the European Ceramic Society 27 (2007) 4191–4194.

Ritter, A. (2006) "Smart materials in architecture, interior architecture and design", Birkhäuser Basel.

Rzaev, ZMO; Dincer, S.; Piskin, E. (2007), "Functional copolymers of N-Isopropylacrylamide for bBioengineering applications". Progress in Polymer Science. 2007; 32(5):534-595.

Smith, R.C. (2004), "Smart material Systems: model development".

Sodano, H. A.; Park, G.; Inman, D. J., (2004)a, "An Investigation into the Performance of Macro-Fiber composites for Sensing and Structural Vibration Applications," Mechanical Systems and Signal Processing, Vol. 18, 2004, pp. 683–697.

Songa, G.; Sethib, V.; Li, H.-N. (2003), "Vibration control of civil structures using piezoceramic smart materials: A review." Engineering Structures, Volume 28, Issue 11, September 2006, p. 1513-1524.

Trease, B.P. (2001), "A Survey and Comparison of Smart Material Linear Actuators". Disponible online http://www.personal.umich.edu/~btrease/share/Trease_Actuator_Report.pdf.

US Department of Energy (2010), "Critical Materials Strategy".

Verga, R. et al (2004, Nuevos materiales electrocrómicos para aplicaciones fotónicas y domóticas de alto valor añadido. Aplicaciones y futuro (y II)

Wang; Lei; Yuan, F. G. (2007) "Energy harvesting by magnetostrictive material (MsM) for powering wireless sensors in SHM", Smart Structures and Materials & NDE and Health Monitoring, 14th International Symposium (SSN07), 18-22 March, 2007

Wickramasinghe, Vireshe K.; Hagood, Nesbitt W. (2004), "Durability Characterization of Active Fiber Composite Actuators for Helicopter Rotor Blade Applications", Journal of Aircraft, 2004

Wilkie, W. K., Bryant, G. R.; High, J. W. et al. (2000), "Low-Cost Piezocomposite Actuator for Structural Control Applications", Proceedings, SPIE 7th Annual International Symposium on Smart Structures and Materials, Newport Beach, CA, March 5-9, 2000.

Williams, D.F. (1987), "Definitions in Biomaterials. Progress in Biomedical Engineering." Ed. Elsevier, Amsterdam, 1987

Williams, R. B.; Grimsley, B. W.; Inman, D. J. and Wilkie, W. K. (2002), "Manufacturing and Mechanics-Based Characterization of Macro Fiber Composite Actuators", in Proceedings of 2002 ASME International Adaptive Structures and Materials Systems Symposium, New Orleans, LA, November 17-22, 2002.

Wilson, S.A. et al, (2007), "New materials for micro-scale sensors and actuators. An engineering review", S A Wilson, et al., Materials Science and Engineering R 56 (2007) 1-12

9. Anexo I - Expertos participantes en los paneles

EXPERTO	PROCEDENCIA
Xavier Plantá	Fundación ASCAMM
Francisco del Monte	Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC)- Departamento de Biomateriales y Materiales Bioinspirados
Jaume Veciana	Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona(CSIC)-Departamento de Nanociencia y Materiales Orgánicos
José Carlos Rodríguez	Universidad de Valladolid- Grupo BIOFORGE
José Luis Vilas	Universidad del País Vasco- Facultad de Ciencia y Tecnología- Departamento de Química Física
José M. San Juan	Universidad del País Vasco Facultad de Ciencia y Tecnología- Departamento de la Materia Condensada
Manuel Vázquez	Instituto de Ciencia de Materiales de Madrid (CSIC)- Departamento de Materiales para las Tecnologías de la Información
Josetxo Pomposo	Universidad del País Vasco- Donostia International Physics Center
José Ramón Dios	Fundación GAIKER
Juan María Pou	Universidad de Vigo- ETS de Ingenieros Industriales- Departamento de Física Aplicada
Marí Cruz Moreno	Universidad Complutense de Madrid- Departamento de Química Analítica
Joaquín Arias-Pardilla	Universidad Politécnica de Cartagena
José Luis Viviente	TECNALIA- Unidad de Energía
Víctor Puntos	Instituto Catalán de Nanotecnología
José Luis González	Centro Nacional de Investigaciones Metalúrgicas
Nora Ventosa	Instituto de Ciencia de Materiales de Barcelona(CSIC)-Departamento de Nanociencia y Materiales Orgánicos
Daniel Aguilar	DEFCON Tissue Care
Jesús Valero	TECNALIA- Unidad de Salud
Liliana Chamudis	AIMPLAS
Enrique Marchante	SENER, Ingeniería y Sistemas
Fernando Seco	TECNALIA - Unidad Aeroespacial

10. Anexo II - Informe “los materiales inteligentes y sus aplicaciones en los sectores de transporte, salud, energía y medio ambiente”

1. INTRODUCCION	4
2. MATERIALES INTELIGENTES	8
2.1 Piezoeléctricos.....	8
2.2 Electrocerámicas	9
2.3 Polímeros piezoeléctricos: PvDF	12
2.5 Piroeléctricos.....	14
2.6 Fotoactivos	15
2.7 Electroluminiscentes	15
2.8 Fotoluminiscentes	16
2.9 Termoluminiscentes.....	17
2.10 Cromoactivos.....	17
2.11 Electrocrómicos	18
2.12 Termocrómicos	18
2.13 Fotocrómicos.....	20
2.14 Electrostrictivos	20
2.15 Magnetostrictivos.....	21
2.16 Polímeros Electroactivos	22
2.17 Fluidos electrorreológicos y magnetoreológicos.....	25
3. MATERIALES CON MEMORIA DE FORMA	27
3.1 SMAs.....	27
3.2 FSMA	28
3.3 Polímeros con memoria de forma	28

4. APLICACIONES GENERALES	29
4.1 Piezoeléctricos.....	29
4.2 Piroeléctricos.....	30
4.3 Fotoactivos	30
4.4 Cromoactivos.....	31
4.5 Electrostrictivos.....	31
4.6 Magnetostrictivos.....	32
4.7 Polímeros electroactivos.....	32
4.8 Fluidos electro- y magnetoreológicos.....	32
4.9 Materiales con memoria de forma	32
5. APLICACIONES SECTORIALES	33
5.1 Biotecnología y Medicina	33
5.2 Energía	36
5.3 Medio Ambiente	40
5.4 Transporte.....	43

1. Introducción

Todos nosotros reaccionamos ante el mundo que nos rodea como “sensores” cuando oímos, vemos o sentimos, y como “actuadores” cuando reaccionamos a esos estímulos. Con el devenir de los años, la investigación ha tomado el camino de intentar dotar de una capacidad de reacción similar a los materiales, convirtiéndolos en “inteligentes”

Los materiales inteligentes son aquellos que manifiestan un cambio en sus propiedades o en su forma como respuesta a los estímulos del entorno en el que se encuentran. Estos interesantes materiales tienen y tendrán un gran impacto en sectores como el transporte, las comunicaciones, la medicina, la biotecnología, las ciencias de la salud o la energía.

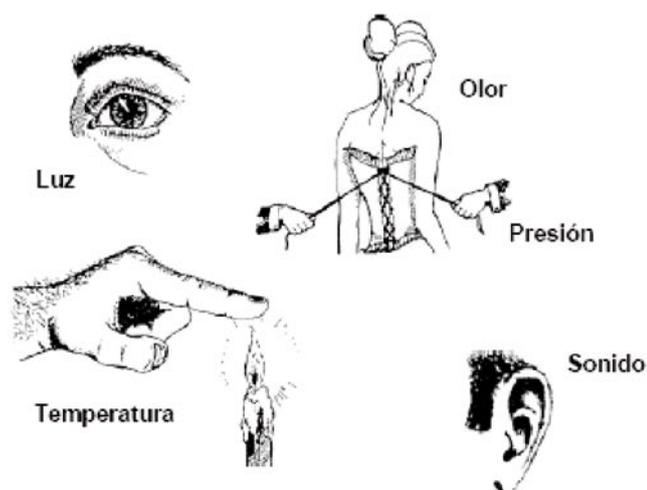


Figura 1: Los “sensores” que integra nuestro cuerpo humano y que interaccionan con el mundo que nos rodea.

Si bien es complejo definirlos, más complejo es intentar clasificarlos; ya que, la línea que separa las diversas familias de materiales no siempre tiene el mismo grosor y no todos los expertos

coinciden en cuáles deben ser los materiales que se incluyen en la clase de los inteligentes. En la siguiente página, se propone una posible clasificación de los mismos.

	MATERIALES		ESTÍMULO	RESPUESTA	
SENSORES	Fotoactivos	Electroluminiscentes	Campo Eléctrico	Emisión de Luz	
		Fotoluminiscentes	Luz		
	Cromoactivos	Electrocromicos	Campo Eléctrico	Color	
		Termocrómico	Temperatura		
	Magnetostrictivos		Deformación mecánica Campo Magnético/Eléctrico	Campo Magnético/Eléctrico Deformación mecánica	
	Electrostrictivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica	
	Electrocerámicas		Deformación mecánica Corriente eléctrica	Corriente eléctrica Deformación mecánica	
	Polímeros electroactivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica	
Piroeléctricos		Temperatura	Polarización eléctrica		
ACTUADORES	Piezoeléctricos		Deformación mecánica Corriente eléctrica	Corriente eléctrica Deformación mecánica	
	Electrostrictivos		Deformación mecánica	Polarización eléctrica	
	Magnetostrictivos		Deformación mecánica Campo Magnético/Eléctrico	Campo Magnético/Eléctrico Deformación mecánica	
	Polímeros electroactivos		Campo eléctrico/ pH	Deformación mecánica	
	Magnetoreológicos	Elastómero MR	Campo Magnético		Viscosidad
		Fluido MR			
		Ferrofluido			
	Electroreológicos	Elastómero ER	Campo Eléctrico		Viscosidad
		Fluido ER			
	Materiales Memoria de Forma	Shape Memory Alloys, SMA	Temperatura		Deformación mecánica
Polimeros SMA					
Ferromagnetic SMA, FSMA		Campo Magnético			

En estas casillas encontramos materiales de naturalezas muy diversas, polímeros, metales y aleaciones de los mismos, cerámicas, electrocerámicas, materiales compuestos o biomateriales, que responden a estímulos tan diversos como la temperatura, luz, deformación, pH, campos magnéticos o corrientes eléctricas y con cambios de propiedades tan diversos como los cambios de la viscosidad, color, de forma, en su red cristalográfica o de estados energéticos de sus electrones.

La gran importancia que presentan estos materiales se refleja en el incremento en el número de patentes y publicaciones que se han presentado en los últimos años. El número de publicaciones en torno a los materiales inteligentes ha crecido de manera exponencial. Otra medida del interés mundial que suscitan estos materiales es el creciente incremento de las patentes concedidas en el marco de los materiales y los sistemas inteligentes.

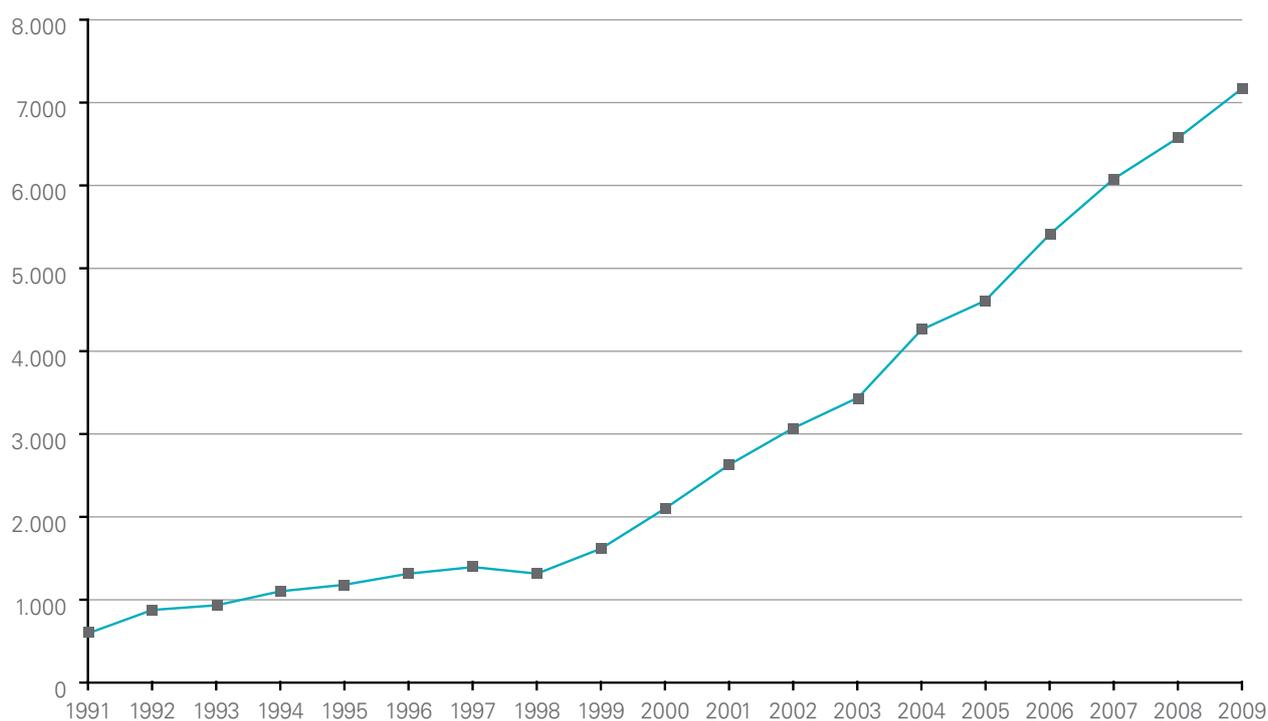


Figura 2: Evolución de las publicaciones presentadas en el campo de los materiales inteligentes en los últimos 18 años. (Sciencedirect).

En este informe introductorio, se describen primero los diferentes tipos de materiales en vías de investigación o ya disponibles comercialmente, con sus ventajas y desventajas respectivas, para exponer posteriormente algunas de sus aplicaciones

en los sectores objeto del estudio: transporte, salud, energía y medio ambiente. Al final del documento, se ha incluido una tabla que resume las ventajas y desventajas de los diferentes materiales, así como sus principales usos actuales.

2. Materiales inteligentes

Pasemos a definir algunos de estos materiales, a comentar sus ventajas y desventajas ya que en algunas aplicaciones podemos pensar a priori que dos o más de estas familias de materiales pueden servirnos a la hora de diseñar nuestra aplicación o elegir nuestro material en función del sector al que quiere enfocar la aplicación.

2.1. Piezoeléctricos

De entre todos los materiales inteligentes comenzaremos por los materiales piezoeléctricos ya que son por excelencia los de mayor uso en el desarrollo de aplicaciones industriales. Dichas aplicaciones están enfocadas al desarrollo de sensores y/o actuadores en campos tan diversos como el del transporte, la biomedicina o la salud.

Estos materiales presentan una propiedad descubierta por los hermanos Curie y denominada **piezoelectricidad** y que es la capacidad que presentan ciertos materiales cristalinos cuando se ven sometidos a una deformación externa para generar carga eléctrica debido al desplazamiento de cargas dentro de dicha red. Si bien estos materiales también poseen la capacidad inversa de experimentar una deformación de sus dimensiones cuando se ven sometidos a un campo eléctrico externo.

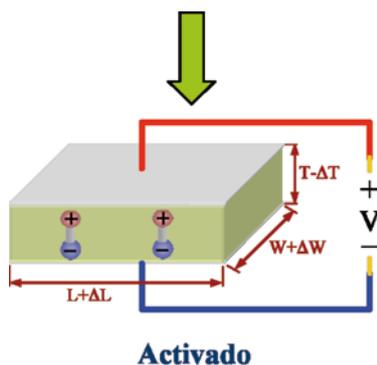


Figura 3: Manifestación macroscópica del efecto piezoeléctrico. El material genera un campo eléctrico al verse sometido a una deformación (compresión, flecha verde).

El material piezoeléctrico, debido a su falta de simetría entre los iones positivos y negativos en su estructura cristalográfica, posee momento bipolar neto de manera espontánea, es decir, sin campo externo aplicado. Al ejercer una tensión mecánica sobre estos materiales, la polarización eléctrica del material (es decir, orientación de la estructura cristalina) cambia provocando la aparición de un campo eléctrico (**efecto directo**). Y viceversa, si se aplica un campo eléctrico sobre el material, éste reacciona deformándose (**efecto inverso**), siendo este un proceso reversible. Esto implica que recupera su forma o polarización en cuanto se deja de ejercer el campo eléctrico o mecánico.

Existe una gran variedad de materiales piezoeléctricos en la naturaleza, entre los que se pueden encontrar el cuarzo, el rubidio, el bario, el titanio y otros. Los materiales piezoeléctricos más utilizados en aplicaciones industriales por sus buenas propiedades son las electrocerámicas como el titanato de bario (BaTiO_3), el tantalato de litio, nitrato de litio o berlinita. Actualmente, el material piezoeléctrico más ampliamente utilizado es el PZT ($\text{Pb}(\text{Zr}_x\text{Ti}_{1-x})\text{O}_3$). El PZT se puede dopar para modificar o mejorar algunas de sus constantes dieléctricas en función de los requerimientos de la aplicación.

Además de las electrocerámicas y los minerales piezoeléctricos que hemos comentado anteriormente, tenemos que mencionar la existencia de materiales piezoeléctricos de naturaleza orgánica. Entre estos materiales tenemos el polifluoruro de vinilideno (PVDF) y sus derivados (copolímeros) o las poliimidas.

La principal diferencia que existe entre ambos materiales es el carácter amorfo o cristalino de dichos polímeros y las temperaturas de operación de los mismos. La ventaja que presentan los materiales piezoeléctricos poliméricos frente a los materiales inorgánicos es su elevada capacidad de deformación que puede llegar a un 10%, frente a 0,1% de los materiales inorgánicos.

2.2. Electrocerámicas

Comenzaremos por comentar las diversas formas en que podemos encontrar el material piezoeléctrico - por excelencia el PZT -, para continuar con un acercamiento al concepto de los materiales piezoeléctricos poliméricos.

Los materiales piezoeléctricos se presentan en distintos formatos entre los que podemos encontrar discos macizos u obleas de material cerámico (denominados wafers) o en forma de parches compuestos de microfibras para el desarrollo de actuadores más flexibles y versátiles.

Los materiales macizos o wafers tienen importantes limitaciones, ya que se trata de un material muy frágil y vulnerable durante su manipulación e integración que muestra una limitada adaptación a superficies curvas o con geometrías complejas. Estos materiales tienen, no obstante, muy buenas propiedades electromecánicas.

Los distintos tipos de materiales piezoeléctricos que podemos encontrar para el diseño de aplicaciones industriales son:

- Tipo *pila*, con varias capas de material cerámico con dos salidas eléctricas, colocadas en una carcasa.
- Tipo *flexor*, consisten en dos (sistemas bimorfos) o más capas de material piezoeléctrico que se polarizan y activan de manera que se unen a lados opuestos de una estructura. Las capas en lados opuestos del eje neutro tienen deformación opuesta, y esta carga provoca que toda la estructura se doble. Esto otorga una ampliación de la capacidad electromecánica del actuador, es decir, mayor deformación frente a campo eléctrico.
- Tipo *unimorfo*, este es un caso especial del anterior. Se trata de una estructura de composite, o metálica con una capa de material activo y una capa inactiva o sustrato.

En el mercado se puede encontrar una amplia oferta de PZTs, desde macizos en distintas geometrías, con distintos niveles de porosidad y composición relativa entre titanio y zirconio u otros compuestos, otorgando todas estas variables distintas propiedades electro-mecánicas y por tanto adecuadas para aplicaciones concretas.

Los parches piezoeléctricos (AFCs o MFCs) son una serie de fibras cerámicas, circulares o rectangulares, embebidas en una matriz polimérica que las protege (encapsuladas entre dos finas pieles de poliamida), en las cuales se han depositado previamente los electrodos necesarios para activar las fibras. De esta manera se generan una serie de microsistemas piezoeléctricos que actúan al unísono, otorgando al parche

piezoeléctrico mejores cualidades electromecánicas y mayor capacidad flexora. Además, el parche ostenta mayor flexibilidad y durabilidad, debido a la envoltura de epoxy que mantiene el piezoeléctrico unido. Otra ventaja importante de este tipo de elementos es que se adaptan a una amplia gama de geometrías.

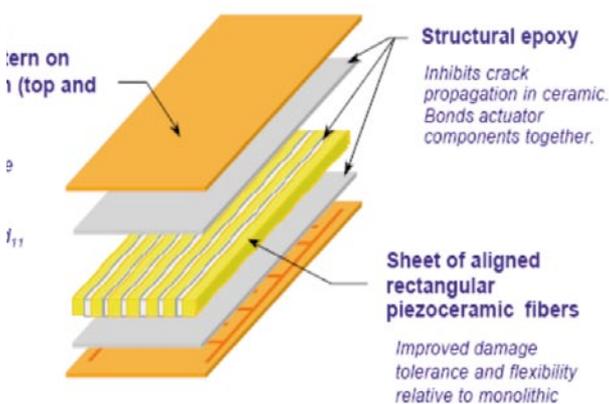
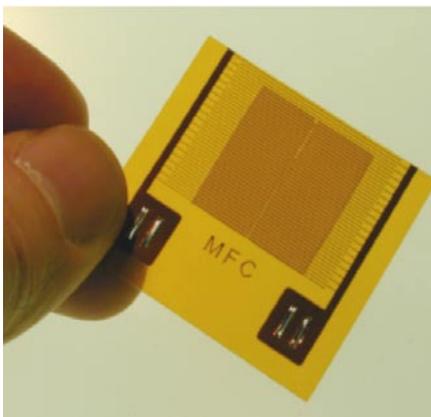


Figura 4: Parches MFC comerciales.

Estos parches de fibras muestran un gran potencial ya que mantienen las buenas propiedades de las fibras piezoeléctricas mientras que mejoran sus propiedades mecánicas, dado que el material piezoeléctrico es por su naturaleza cerámica un material frágil y por tanto, vulnerable a rotura en servicio, además de poco adaptable a superficies de geometrías no planas.

Existen distintos parches piezoeléctricos denominados AFC y MFC, es decir, Active Fibre Composite o Macro Fibre Composite. Los AFC fueron inicialmente desarrollados en el laboratorio de materiales y estructuras activas (AMSL) del Instituto Tecnológico de Massachussets. Se fabrican a partir de fibras cilíndricas piezoeléctricas con un diámetro que varía hasta los 250 μm . Estas fibras están disponibles comercialmente y se producen vía procesos de spinning. Kornmann y Huber encontraron que las propiedades mecánicas de las fibras dependen de manera importante del proceso de fabricación.

Los MFCs por el contrario se han desarrollado en el Langley Research Center NASA y son comercializados actualmente por Smart Materials GmbH Dresde, Alemania. Están compuestos por fibras rectangulares obtenidas a partir de una piezocerámica rectangular. Su comportamiento en aplicaciones de vibraciones estructurales fue investigado, por ejemplo, por Sodano et al. Williams et al. que dieron una visión general detallada de ambos sistemas (AFC y MFC) y una comparación entre ambos. La mayor ventaja de los MFCs sobre los AFCs es su proceso de fabricación que reduce los costes de producción y manipulación. De todas formas, desde un punto de vista de comportamiento (electromecánico), no

está aún claro cuál de los dos es mejor. Los últimos trabajos publicados dan unas ligeramente mejores propiedades electromecánicas bajo condición de libertad para el MFC que para el AFC (2000 μE para los MFC mientras que es de unos 1500 μE para los AFCs), lo que se puede explicar considerando el mejor contacto entre electrodos y piezoeléctrico si este último es plano en lugar de cilíndrico como es el caso de los AFCs.

2.3. Polímeros piezoeléctricos: PvDF

Los materiales ferroeléctricos, al igual que los imanes ferromagnéticos, presentan una estructura dipolar que puede ordenarse en presencia de un campo eléctrico externo a temperaturas inferiores a la temperatura de Curie. La piezoelectricidad del PvDF se debe a la gran electronegatividad que ejercen los átomos de fluor en el enlace F—C. Si bien, al ser un polímero cristalino presenta diferentes estructuras polimórficas en función de su configuración.; fase-b(TTTT), a y d fases (TG TG') y por último la g y E fases (T3GT3G'). La fase b es la de mayor polarización por unidad de celda y por lo tanto es la fase que exhibe mayor piezo-, piro- y ferro-electricidad y posee un mayor campo de aplicación para el desarrollo de actuadores en sectores tan diversos como la aeronáutica, el espacial, el transporte de superficies o la maquinaria-herramienta. Muestran mejor rendimiento que los materiales piezoeléctricos inorgánicos en aplicaciones que requieren de reducción de peso y aumento de la capacidad de deformación.

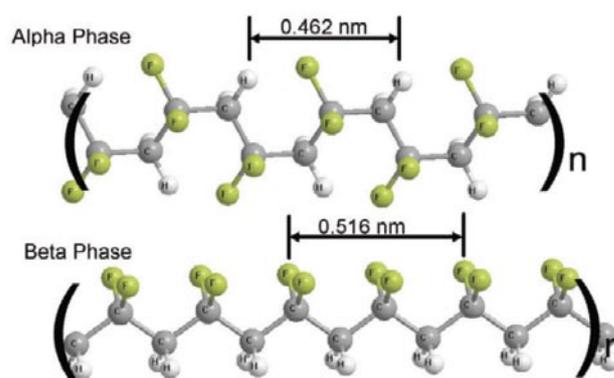


Figura 5: Fases a y b en PvDF.

Ventajas y desventajas

El mayor inconveniente de los materiales piezoeléctricos son los límites de temperatura. Dado que el fenómeno piezoeléctrico se basa en la estructura cristalina de los materiales piezoeléctricos, a partir de una temperatura dada (temperatura de Curie) la estructura cristalina soporta una transición de fase, por la que el material deja de ser piezoeléctrico. Debido a este fenómeno, la utilización de estos materiales se restringe a zonas "frías". Por otro lado, para su funcionamiento es necesaria la integración de un sistema de control y una fuente eléctrica, además de los sensores necesarios para el adecuado control de los actuadores, siempre y cuando se trate de control activo lo que conlleva una periferia electrónica importante.

La diferencia entre las cerámicas y los polímeros consiste en que las piezocerámicas son rígidas y frágiles, mientras los polímeros son flexibles y dúctiles, si bien la diferencia principal es la temperatura de operación de los mismos.

Teniendo en cuenta sus características, los piezocerámicos son magníficos candidatos para ser empleados como actuadores debido a su gran módulo de elasticidad, lo cual facilita el acoplamiento mecánico con la estructura.

En cambio, los piezopolímeros están mejor preparados para actuar como sensores porque añaden una rigidez mínima a la estructura dada su flexibilidad y además son de fácil fabricación. De hecho, la forma más habitual de emplearlos es como sensores de contacto y transductores acústicos en forma de lámina delgada de fácil incorporación a plásticos y composites.

Se debe recordar la creciente preocupación sobre los componentes eléctricos y electrónicos desde el punto de vista ecológico, dados los problemas existentes en el reciclado de ciertos componentes y materiales. El plomo es en parte responsable de esta creciente preocupación y por tanto un elemento que se debe reducir en los elementos a implementar en los componentes en general, lo que tiene un impacto directo sobre las cerámicas de base plomo como los PZT.

Material	NiTiNOL	Terfenol	PMN	PZT-5H	PVdF
Actuation Method	Shape Memory	Magnetostrictive	Electrostrictive	Piezoelectric	Piezoelectric
Max Free Strain (μ strain)	20000	2000	1000	1000	700
Stress Capability (GPa)	50	100	50-100	50-100	1
Frecuency (Hz)	1	2000	10^8	10^8	10^9
Cost	Low	High	High	Moderate	Moderate
Hysteresis	High	Low	Low	Moderate	Moderate
Technical Maturity	Good	Fair	Fair	Good	Good
Strain-Voltage Linearity	Non-linear	Quadratic	Quadratic	Linear	Linear

2.5. Piroeléctricos

Los materiales piroeléctricos presentan la propiedad de cambiar su polarización interna cuando son sometidos a cambios de temperatura, generando así un potencial eléctrico producido por el movimiento de las cargas positivas y negativas a los extremos opuestos de la superficie a través de la migración.

La piroelectricidad se observa en materiales dieléctricos que contienen polarizaciones espontáneas producidas por dipolos orientados. Esta propiedad está estrechamente relacionada con la piezoelectricidad, de modo que todos los materiales piroeléctricos son también piezoeléctricos.

Los materiales utilizados incluyen el titanato de bario estroncio ($\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{TiO}_3$), titanato zirconato de plomo ($\text{PbZr}_{1-x}\text{Ti}_x\text{O}_3$), niobato de bario estroncio ($\text{Ba}_{1-x}\text{Sr}_x\text{Nb}_2\text{O}_6$), sulfatos de triglicina (TGS), tantalato de litio (LiTaO_3), y fluoruro de polivinilideno (PVDF).

Ventajas y desventajas

Las cerámicas son ampliamente utilizadas debido a su menor coste, incluyendo disponibilidad y facilidad de procesamiento, y la buena estabilidad. Su debilidad es su inherente fragilidad.

Los polímeros, PVDF y sus copolímeros con trifluoroetileno (PVDFTrFE), otorgan una alternativa no frágil pero no obtienen los niveles de comportamiento de las cerámicas.

2.6. Fotoactivos

Los materiales **fotoactivos** son aquellos capaces de emitir energía en forma de luz. La propiedad de la fotoactividad se da a consecuencia de que los electrones de valencia son excitados a niveles más elevados por distintos estímulos, y posteriormente vuelven a caer a niveles de energías inferiores emitiendo fotones, es decir, luz. Es necesario diferenciar estos materiales de los que resultan excitados por efecto de la energía y emiten calor además de luz, y que disipan la mayor parte de su energía de excitación en forma de calor y no se consideran materiales inteligentes. Los materiales más importantes en la actualidad se clasifican como *electroluminiscentes* y *fotoluminiscentes* en función de los estímulos a los que responden, siendo estos el campo eléctrico aplicado y fotones que inciden sobre él, respectivamente. Aunque existen otros tipos de materiales como los *termoluminiscentes* (o radiofotoluminiscentes, puesto que se excitan mediante radiación radiactiva seguida de calor), *bioluminiscentes* (mediante una reacción química se excita una molécula en un ser vivo para que emita luz), *quimicoluminiscentes* (se excitan moléculas mediante reacciones químicas para que emitan luz), *cristaloluminiscentes* (se excita una molécula debido a la cristalización), *radioluminiscentes* (se excita una molécula mediante radiación) y *triboluminiscentes* (se excita mediante un efecto mecánico).

2.7. Electroluminiscentes

La electroluminiscencia (EL), en términos generales, es la emisión de luz inducida por una corriente eléctrica aplicada. Los materiales electroluminiscentes, al igual que

los fotoluminiscentes, incluyen tanto materiales orgánicos como inorgánicos.

Muchas veces los materiales inorgánicos están hechos de una combinación de elementos de los grupos II, III, V y VI de la tabla periódica. Algunos de los materiales de base inorgánica, que han sido estudiados, incluyen los GaAs, CdS, InP y GaN.

La electroluminiscencia en polímeros ha centrado la atención de los investigadores. Estos pueden ser fabricados para emitir luz roja, amarilla o azul, siendo la azul la más difícil de lograr. Algunos ejemplos de polímeros electroluminiscentes conductores o conjugados incluyen a los polialkylfluoruros, poliparafenilenos (PPP), y Poli(p-piridina) (PPy). Otros polímeros electroluminiscentes incluyen politiofenos (PT) poli(fenileno vinileno) (PPV), poli(p-fenileno), y polifluorenos. Los politiofenos y los PPVs pueden mostrar electroluminiscencia desde el azul al casi infra-rojo, dependiendo en el grupo lateral. Los copolímeros con un segmento electroactivo de poly(p-phenylene benzobisthiazole) (PBZT) muestran fotoluminiscencia con longitudes desde el azul al rojo en el espectro visible. En general los poliquinolinos conjugados pueden ser modificados para emitir luz con una longitud de onda en cualquier lugar del espectro visible.

Ventajas y desventajas

El bajo consumo de energía hace que la tecnología electroluminiscente sea una de las fuentes de luz energéticamente más eficientes disponible. Los dispositivos electroluminiscentes presentan muchas ventajas como fuentes emisoras de luz con respecto a las fuentes convencionales que se han venido empleando hasta el momento. Así, desde el punto

de vista tecnológico se podrían preparar pantallas extraplanas y flexibles de alto brillo con diversidad de colores y bajo consumo basándonos en dispositivos OLEDs, por lo cual el impacto de esta tecnología en pantallas de dispositivos eléctricos, anuncios luminosos, señales viales, etc. sería enorme. Otra ventaja de los OLEDs sería su fácil manufactura e industrialización, empleando tecnología de impresión de alta velocidad. Así mismo, se ha establecido que el brillo que se consigue con OLEDs es el mayor entre las fuentes de iluminación a igualdad de consumo. Además, el ángulo de visión de una pantalla OLED es muy grande.

A pesar de todas las ventajas mencionadas, la implantación a nivel masivo de los OLEDs se ha visto dificultada por una serie de limitaciones como un tiempo de operación demasiado corto o el requerimiento para su preparación de habitaciones limpias y atmósfera seca o inerte.

2.8. Fotoluminiscentes

El principio básico de la fotoluminiscencia es simple: los electrones que orbitan alrededor de los átomos o las moléculas absorben energía debido a la colisión con protones durante la excitación. A continuación, se emite ese exceso de energía en forma de fotones (normalmente luz visible) durante cierto tiempo.

Ventajas y desventajas.

Esta tecnología ofrece ventajas por ejemplo respecto a la energía eléctrica. Al ser una radiación electromagnética, una vez cargada, no puede fallar (es, por lo tanto, 100% fiable), ni tampoco puede ser detenida. La carga se produce con la luz ambiental que existe en cualquier lugar, con lo cual no se requiere

una fuente de electricidad o una batería en caso de emergencia, y permite ahorrar energía. Se recargan con la luz existente y por lo tanto tienen "consumo cero".

2.9. Termoluminiscentes

El fenómeno de luminiscencia térmicamente estimulada, mejor conocido como termoluminiscencia (TL), consiste en la emisión de luz por ciertos materiales al ser calentados por debajo de su temperatura de incandescencia, habiendo sido previamente expuestos a la acción de un agente excitante tal como las radiaciones ionizantes (ref -8-). La razón de que este fenómeno se use para medir la cantidad de radiación, es que la cantidad de luz emitida por el material es proporcional a la cantidad de radiación absorbida por éste, dando origen a la disciplina conocida como dosimetría termoluminiscente (DTL).

Se conoce por termoluminiscencia a toda emisión de luz, independiente de aquella provocada por la incandescencia, que emite un sólido aislante o semiconductor cuando es calentado. Se trata de la emisión de una energía previamente absorbida como resultado de un estímulo térmico. Esta propiedad física, presente en muchos minerales, es utilizada como técnica de datación. LiF:Mg,Cu,P es uno de los fosforescentes usados, pero su estabilidad térmica presenta problemas, debido a agregaciones de impurezas.

2.10. Cromoactivos

Los materiales cromo-activos son aquellos que responden a un estímulo externo cambiando sus

propiedades ópticas, de manera que el material modifica su apariencia de manera significativa, es decir, sus propiedades de absorptividad, reflectividad y transmisividad cambian lo suficiente como para causar un cambio en su color, reflectividad o transparencia. Estos materiales responden a estímulos como la temperatura, luz o presión.

2.11. Electrocrómicos

El mecanismo reside en reacciones electroquímicas (oxidación/reducción) que involucra una transferencia de electrones e iones entre electrodos y el material electrocrómico. Cuando una corriente eléctrica se hace pasar a través del material y los iones y electrones se intercambian entre los electrodos, hay una cantidad de energía incidente con longitudes de onda en el visible, que pueden ser absorbidas, causando un cambio de color en el material volviéndose menos transmisor. El grado al que el material se cambia depende de la reacción, que se controla por el campo eléctrico aplicado. Los óxidos de los siguientes metales muestran propiedades electrocrómicas: tungsteno, molibdeno, titanio, manganeso, vanadio, rutenio, iridio, rodio y niobio.

El WO_3 , que se vuelve de claro a azul, es el material electrocrómico más estudiado. La reacción es lenta, pero la coloración permanece durante un tiempo significativo tras la eliminación del campo eléctrico. V_2O_5 cambia del rojo al azul. El óxido de litio níquel, $\text{Li}_x\text{Ni}_{1-x}\text{O}$ (x está típicamente 0.3-0.5) es otro material utilizado con frecuencia.

La oxidación electroquímica de la polianilina puede hacer que cambie de transparente a verde, luego azul y finalmente violeta. Bajo la reducción electroquímica

este esquema de color se invierte, y por tanto es un proceso electrocrómico. La polidifenilamina (PDPA) es otro polímero electrocrómico.

Ventajas y desventajas

La ventaja de los polímeros electrocrómicos consiste en que solo requieren potencia eléctrica durante el estado de “encendido”. Además, el voltaje de operación y consumo de energías son muy bajos. En cuanto al proceso, éste se da en tiempos muy cortos, de manera que el tiempo de respuesta de los electrocrómicos es bajo y el proceso es repetible. Estos materiales son de fácil fabricación y la disponibilidad de colores de los mismos es muy amplia.

2.12. Termocrómicos

Termocromismo es la habilidad de cambiar el color debido a un cambio en la temperatura de manera reversible. Un anillo de estado de ánimo es un excelente ejemplo de esto, pero tiene otros muchos usos como biberones (que cambia a un color diferente cuando está lo suficientemente frío para beber) y tazas.

Se pueden hacer como componentes semiconductores, a partir de cristales líquidos o compuestos metálicos. El cambio de color ocurre a una determinada temperatura, que se puede variar dopando el material.

Dos aplicaciones básicas son los cristales líquidos y las leuco-tinturas. Los cristales líquidos se utilizan en aplicaciones de precisión, dado que su respuesta puede ser ajustada a temperaturas concretas, pero su rango de color está limitado por su principio de

operación. Las leuco-tinturas permiten utilizar un rango de colores más amplio, pero su temperatura de respuesta es más difícil de ajustar.

Un compuesto sencillo de realizar es el óxido de zinc, que es blanco a temperatura ambiente pero cuando se calienta cambia a amarillo debido a varios defectos en la red cristalina. Al ser enfriado el óxido de zinc revierte al blanco. El óxido de plomo (II) tiene un cambio de color similar al ser calentado. Estos sólidos son técnicamente semiconductores, y el cambio de color está vinculado a sus propiedades electrónicas.

El yoduro de cobre mercurio (Cu_2HgI_4) padece una transición de fase a 55°C , cambiando reversiblemente de rojo claro, a baja temperatura, a un marrón oscuro a alta temperatura. Otro material similar es el ioduro de mercurio (II), un material cristalino que a 126°C se ve sometido a una transición de fase; de la fase alfa roja a fase beta amarilla clara. Otro ejemplo es el sulfato de níquel, verde a temperatura ambiente que se transforma en amarillo a 155°C . Ag_2HgI_4 es amarillo a bajas temperaturas y naranja por encima $47\text{-}51^\circ\text{C}$.

El dióxido de vanadio ha sido investigado para su uso como un recubrimiento de ventana “selectivo espectralmente” para bloquear la transmisión infrarroja y reducir la pérdida de calor interior de los edificios a través de la ventana. Este material se comporta como un semiconductor a temperaturas inferiores, permitiendo una mayor transmisión, y como un conductor a temperaturas superiores, ofreciendo una mayor reflectividad.

El cambio de fase entre las fases transparente semiconductor y reflectora conductora ocurre a 68°C ; dopando el material con un 1,9% de tungsteno se reduce la temperatura de transición a 29°C .

Otros materiales semiconductores sólidos termocrómicos que se investigan para aplicaciones comerciales son $\text{Cd}_x\text{Zn}_{1-x}\text{S}_y\text{Se}_{1-y}$ ($x=0.5\dots 1$, $y=0.5\dots 1$), $\text{Zn}_x\text{Cd}_y\text{Hg}_{1-x-y}\text{O}_a\text{S}_b\text{Se}_c\text{Te}_{1-a-b-c}$ ($x=0\dots 0.5$, $y=0.5\dots 1$, $a=0\dots 0.5$, $b=0.5\dots 1$, $c=0\dots 0.5$), $\text{Hg}_x\text{Cd}_y\text{Zn}_{1-x-y}\text{S}_b\text{Se}_{1-b}$ ($x=0\dots 1$, $y=0\dots 1$, $b=0.5\dots 1$).

Algunos minerales son termocrómicos, por ejemplo el granate o silicato de aluminio y magnesio rico en cromo, que se vuelve verde cuando se calienta a 80°C .

Ventajas y desventajas

Las temperaturas de ajuste del proceso son en algunos casos difíciles de controlar, mientras que, en otros, el proceso sucede a temperaturas concretas. En cuanto se enfría, el material cambia su estado.

2.13. Fotocrómicos

Un material fotocrómico cambia de transparente a color cuando es expuesto a la luz y revierte a transparente cuando cesa la luz.

Existen diversos materiales fotocrómicos como los naftopiranos, spiropiranos, spiroxazino (spironaphtoaxazino), spirodihidroindolizinos, cromóforos, etc., todos ellos materiales orgánicos, y otros como los haluros de plata (bromuro de plata AgBr , yoduro de plata AgI , cloruro de plata AgCl), todos ellos de naturaleza inorgánica.

Ventajas y desventajas.

Los tiempos de ajuste del proceso son definidos, es decir, es necesario cierto tiempo para revertir el proceso.

2.14. Electrostrictivos

Los electrostrictivos, al igual que los piezoeléctricos, soportan un cambio dimensional bajo la influencia de un campo eléctrico aplicado o una polarización bajo una tensión mecánica. La diferencia entre la piezoelectricidad y la electroestricción aparece cuando se invierte el sentido del campo eléctrico: mientras el piezoeléctrico puede alargarse o comprimirse, el electrostrictivo sólo puede alargarse independientemente de la dirección del campo eléctrico aplicado, mostrando un comportamiento no-lineal.

Ventajas y desventajas

Las ventajas de los materiales electrostrictivos sobre los piezoeléctricos son que no tiene prácticamente histéresis, un tiempo de respuesta rápido y mayores desplazamientos con buena reproducibilidad. Estas propiedades son muy buenas para microposicionadores y aplicaciones de actuación de óptica adaptiva.

Una desventaja importante es su mayor coste comparado a los piezoeléctricos.

Los materiales cerámicos utilizados en los aparatos electrostrictivos se clasifican como relaxores ferroeléctricos. El término relaxor hace referencia a la reducción significativa en la constante dieléctrica según aumenta la frecuencia. El niobato de plomo magnesio-titanato de plomo ($_{0.9}\text{PbMg}_{1/3}\text{Nb}_{2/3}\text{O}_3 - _{0.1}\text{PbTiO}_3$) es el material electrostrictivo más popular. Aunque se ha investigado el material polimérico electrostrictor, no se ha desarrollado ninguno a nivel práctico.

2.15. Magnetostrictivos

Los materiales magnetostrictivos (que se utilizan en actuadores) muestran un cambio en su geometría (deformación o elongación) cuando se aplica un campo magnético. El efecto inverso se denomina piezomagnetismo (se utiliza en sensores), donde un campo magnético es producido/modificado bajo la aplicación de una deformación mecánica. A pesar de ser en una mínima expresión, los materiales ferromagnéticos (e.g. Fe, Ni, Co, etc.) muestran cierta magnetostricción.

Los elementos ferromagnéticos tales como el cobalto, se alean habitualmente con el hierro. Otros elementos (tierras raras) muestran propiedades magnetostrictivas mayores, pero únicamente a temperaturas más bajas que la ambiental. Otros materiales magnetostrictivos comunes incluyen las aleaciones base níquel y macropartículas de composites que contienen partículas magnetostrictivas.

Ventajas y desventajas

Con el TerfenolD se pueden generar deformaciones 20 veces mayores que las de los materiales magnetostrictivos tradicionales y de 2 a 5 veces mayores que las cerámicas piezoeléctricas. El terfenol es un compuesto intermetálico, $TbFe_2$ (TER – Terbio; FE – Hierro; NOL – Naval Ordnance Laboratory, ahora denominado Naval Surface Warfare Center), y la D denota la presencia del metal tierra rara disprosio. Su temperatura de Curie es alta (380 °C), lo que permite obtener deformaciones magnetostrictivas de hasta 1000 ppm a 200 °C. La fuerza desarrollada es también muy grande. Una barra de 2,5 pulgadas de diámetro es capaz de dar más de 50.000 libras de empuje dinámico.

2.16. Polímeros Electroactivos

Dentro de los materiales electroactivos merecen especial mención por su versatilidad los polímeros electroactivos o EAP, que deben sus propiedades a la conductividad que poseen, aun siendo materiales de naturaleza orgánica.

La arquitectura básica de los actuadores EAP está realizada a partir de una película de un material elastomérico dieléctrico recubierto en ambas caras con otra película expandible de un electrodo conductor. Cuando se aplica el voltaje a ambos electrodos se crea una presión de Maxwell bajo la capa dieléctrica. El polímero dieléctrico elástico actúa como un fluido incompresible de manera que, al volviéndose más delgada la película dieléctrica, se expande en la dirección del plano. De esta manera la fuerza eléctrica se convierte en actuación y movimiento mecánico.

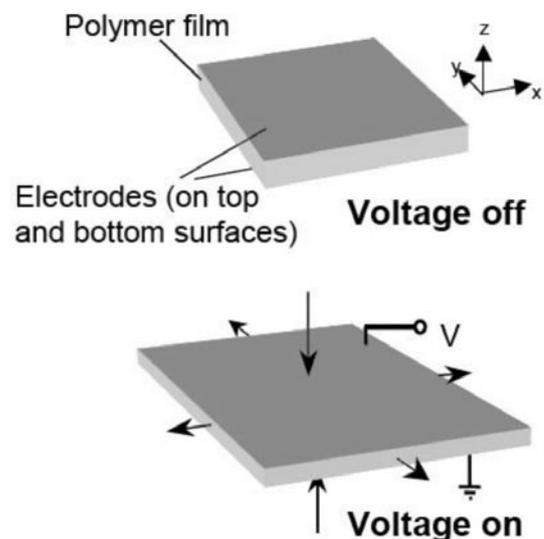


Figura 6: Funcionamiento de un actuador basado en polímeros electroactivos.

Existen dos grandes familias de polímeros electroactivos o EAPs: los basados en polímeros de naturaleza conductora y los que fundamentan su funcionamiento en su carácter iónico.

A. Polímeros de naturaleza conductora

- i. Polímeros piezoeléctricos,
- ii. Polímeros electrostrictivos,
- iii. Elastómeros dieléctricos y
- iv. Elastómero basados en cristales líquidos (LCE),

B. Polímeros de naturaleza iónica

- i. Polímero iónicos en base a composites metálicos (IPMC),
- ii. Geles a partir de poliméricos iónicos (IPG) y
- iii. Polímeros basados en nanotubos de carbono (CNT)

Los primeros grupos se incluyen dentro de los grupos de piezoeléctricos, electrostrictivos, etc. junto con los cerámicos o metálicos, pero los polímeros electroactivos iónicos son un caso especial que se va a tratar a continuación

Los polímeros electroactivos húmedos, también denominados líquidos iónicos son polímeros inmersos en un fluido electrolítico que, bajo la aplicación de un estímulo externo (como un campo eléctrico), se ven sometidos a cambios en dimensión o geometría. Los EAP pueden actuar como sensores y/o actuadores.

El composite metal polímero iónico es un EAP que se dobla en respuesta a una activación eléctrica como resultado de la movilidad de cationes en la red polimérica o iones negativos en clústeres conectados. Las fuerzas electrostáticas y los cationes móviles son responsables del doblado.

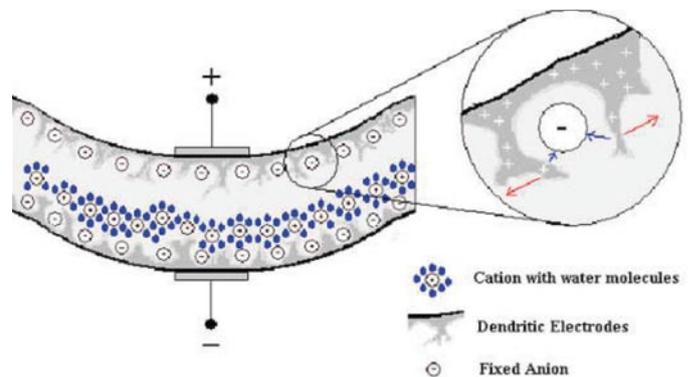


Figura 7: Esquema de polímero de naturaleza iónica.

Los geles poliméricos pueden mezclarse y expandirse en el agua, o, por el contrario, expeler el agua y contraerse en respuesta a un cambio en el entorno químico. El movimiento del agua puede ser inducido por un cambio del pH, campo eléctrico, temperatura, luz u otras condiciones ambientales. El poliacrilonitrilo (PAN) ha sido utilizado en sistemas de gel poliméricos, dado que es un polielectrolito. Otro gel polimérico activado por un cambio en el pH incluye un componente de ácido polivinil alcohol-poliacrílico (PVA/PAA). Los compuestos iónicos de polímero-metal (IPMCs) están compuestos de una membrana perfluorada cuyos átomos de hidrógeno unidos a los átomos de carbono son reemplazados por átomos de fluor, con un recubrimiento de metal noble, normalmente oro o platino, como electrodos. Los polímeros iónicos utilizados habitualmente son flemion (o

perfluorocarboxylate) o Nafion (perfluorosulfanate), que se inflan en el agua debido a su naturaleza iónica e hidrofílica. Los aniones están localizados en la membrana polimérica, mientras que los cationes están presentes y moviéndose libremente en el fluido. Cuando se aplica un campo eléctrico al IPMC, los cationes difunden hacia el electrodo negativo, lo que provoca que el composite se deforme.

Los polímeros conductivos (CP) experimentan un cambio de volumen cuando son sometidos a un proceso de oxidación o reducción electroquímica denominada dopado. Poliacetileno, polianilina (PANI), nylon, polipirrol (PPy) y politiopfeno (PT) son ejemplos de polímeros conductivos. Para ello, un electrolito debe estar presente para suministrar los iones. La aplicación de campos eléctricos pequeños provocará que las reacciones electroquímicas causen que el polímero se convierta en conductivo o aislante, de manera que los iones y disolventes migren tanto hacia como desde la matriz polimérica, resultando en un cambio de volumen. A pesar de que los nanotubos de carbono no son polímeros, se consideran la más reciente adición a esta lista de actuadores electroactivos. Los nanotubos de carbono, conocidos por mostrar capacidades sensoras y actuadoras, son hojas de grafito de un átomo de espesor enrolladas en cilindros, formando una estructura con un diámetro muy pequeño en longitudes mayores que las micras. Al aplicar un voltaje a una estructura de nanotubos de carbono que se encuentren sobre un electrolito, estos se doblan, alcanzando deformaciones de hasta el 0,2%.

Ventajas y desventajas

Estos materiales producen altos desplazamientos de doblado y requieren un voltaje bajo. La actuación bidireccional de estos materiales depende de la polaridad del voltaje, siendo el proceso reversible.

Como contrapunto hay que decir que, salvo en el caso de los CPs y NTs, los iónicos no mantienen la deformación bajo voltaje DC. Su respuesta es lenta, del orden de una fracción de segundo. Los EAPs iónicos con capacidad de doblado inducen fuerzas de actuación relativamente bajas. Excepto en el caso de los CPs, es difícil producir un material consistente (particularmente IMPC). En los sistemas acuosos, los materiales padecen electrólisis por encima de 1,23 V. Es necesario considerar un electrolito y encapsulación para su utilización. Tienen una baja eficiencia de acoplamiento electromecánico.

2.17. Fluidos electroreológicos y magnetoreológicos

Los fluidos electroreológicos (ER) y magnetoreológicos (MR) experimentan un cambio en sus propiedades reológicas bajo la influencia de un campo eléctrico o magnético, respectivamente. Este cambio es reversible y ocurre casi instantáneamente bajo la eliminación del campo aplicado. Los cambios físicos pueden ser bastante sustanciales, volviendo un fluido de baja viscosidad en una sustancia mucho más viscosa, casi sólida.

Los fluidos ER y MR consisten típicamente en partículas dispersas y polarizables suspendidas en un fluido portador. Los fluidos ER y MR pueden utilizar el mismo tipo de portador, por ejemplo aceites hidrocarburos o silicona, de alta resistividad eléctrica y baja viscosidad.

El efecto electroreológico ocurre en un fluido ER cuando se aplica un campo eléctrico, causando que las partículas sólidas uniformemente dispersadas se polaricen. Una vez polarizadas, empiezan a interactuar entre ellas y forman estructuras en forma de cadena, paralelas a la dirección del campo eléctrico, conectando ambos electrodos. Bajo mayor intensificación del campo eléctrico, las cadenas empiezan a formar columnas de mayor espesor, lo que conlleva un cambio en las propiedades reológicas de la suspensión.

Las estructuras columnares de partículas dan al fluido un mayor flujo plástico, mientras que al eliminar el campo eléctrico, las partículas pierden su polarización y vuelven a flotar libremente en el fluido portador. El periodo de tiempo sobre el que estos eventos suceden es del orden de los milisegundos. El efecto magnetoreológico es similar al efecto ER, pero en lugar del campo eléctrico se requiere un campo magnético para polarizar las partículas. En ambos casos las partículas en suspensión son diferentes:

- **Fluidos ER:** habitualmente, las partículas en suspensión son óxidos metálicos, aluminosilicatos, sílica, orgánicos o polímeros.
- **Fluidos MR:** habitualmente, sus partículas en suspensión son partículas sólidas ferromagnéticas o paramagnéticas. Los activadores, surfactantes y otros aditivos se incluyen en ambos tipos de fluidos para mejorar sus propiedades.

Ventajas y desventajas

Se da una activación inmediata del proceso, cambiando las propiedades electro y magnetoreológicas en cuanto se aplica el campo estimulante. Es necesario utilizar un contenedor para los fluidos, lo que limita sobremanera la aplicación, si bien se está trabajando en la actualidad para el desarrollo de polímeros ER y MR.



3. Materiales con memoria de forma

Los materiales con **memoria de forma** son capaces de volver a su forma inicial, incluso después de haber sido deformados, como consecuencia de un campo térmico o magnético, por lo que también resultan de interés para el control estructural.

3.1. SMAs

Se denomina aleación de memoria de forma (SMA) a materiales que se caracterizan en que la transición de fase, como se denomina al cambio de la estructura cristalográfica de sus átomos, se da en el paso de la fase Austenita (alta temperatura) a la Martensita (baja temperatura) o viceversa. El proceso es reversible, es decir, que bajo condiciones térmicas y mecánicas adecuadas, tienen la habilidad de recordar hasta dos geometrías. Además, estas aleaciones se caracterizan también por el llamado efecto superelástico, que permite que estos metales se deformen con la aplicación de una tensión y recuperen su forma originaria de forma instantánea en cuanto se calienten por encima de una temperatura determinada. En las aleaciones de memoria de forma, al cambiar la microestructura, también se modifica la rigidez del material y el módulo de elasticidad.

Las aleaciones níquel-titanio (como Ni-Ti, Ni-Ti-X) son los SMA más habituales y tienen algunas de las mejores propiedades de memoria de forma, pero tienen temperaturas de transformación relativamente bajas. A pesar de no alcanzar las propiedades de las aleaciones Ni-Ti, las aleaciones base cobre son una alternativa menos cara. Las aleaciones base cobre ternarias más comunes son Cu-Zn-Al and Cu-Al-Ni que pueden alcanzar una deformación de memoria de forma de hasta el 4-5% (en comparación al 8% del Ni-Ti) y tienen un rango de temperaturas de transformación más amplio.

Otras aleaciones como las base hierro (i.e. Fe-Mn, Fe-Mn-Si, Fe-Pt, Fe-Ni, Fe-Co-Ni y Fe-Pd) muestran memoria de forma, pero no son capaces de recuperar su forma al mismo nivel que los Ni-Ti o base cobre.

Ventajas y desventajas

El inconveniente principal de estos materiales es que la respuesta del SMA es larga, debido a la inercia térmica de la aleación, pero tiene la ventaja de ser un sistema simple. Por otro lado, el calentamiento y enfriamiento del SMA se suele llevar a cabo mediante corriente eléctrica y aunque parece que los parámetros de "entonación" son dependientes de manera no lineal con la corriente aplicada el SMA, tiene un comportamiento razonable.

Por diferentes razones de índole práctica, en la actualidad, en un 90% de las aplicaciones, se emplean aleaciones binarias Ni-Ti o ternarias Ni-Ti-X. Las ventajas de este tipo de aleaciones son que se generan tensiones más altas, la recuperación del material tras la deformación es mejor (hasta un orden del 8%) y ofrecen mayor estabilidad en aplicaciones cíclicas. Además, al presentar una mayor resistividad eléctrica, el calentamiento es más rápido.

3.2. FSMA

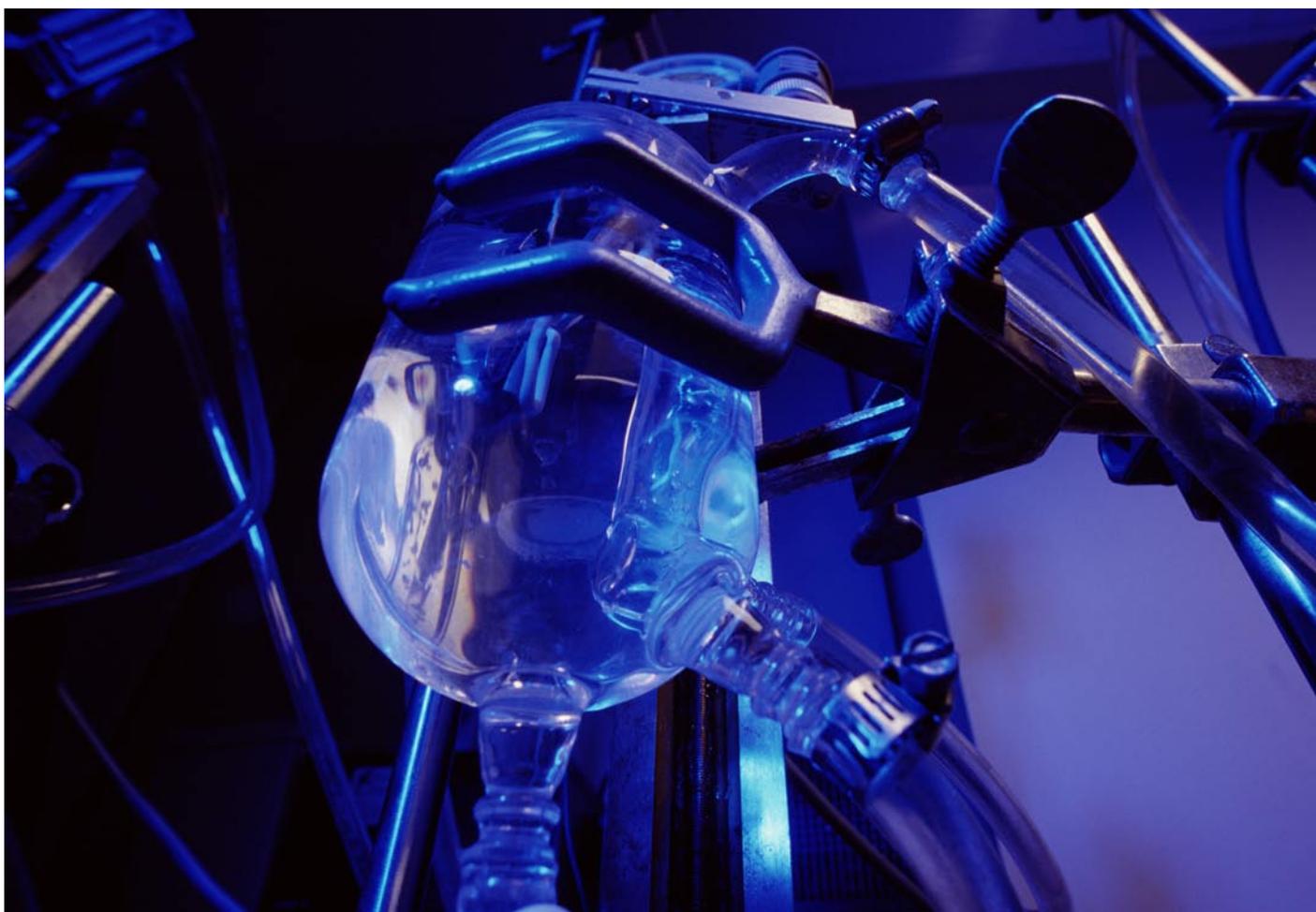
Dentro de las aleaciones con memoria de forma están también las ferromagnéticas (FSMA), las cuales no son conducidas por campos térmicos sino magnéticos. Los FSMA están todavía en fase de desarrollo, tanto que sólo aleaciones ternarias de Ni-Mn-Ga han mostrado un comportamiento satisfactorio, pero otros sistemas tienen un potencial interesante.

3.3. Polímeros con memoria de forma

Los polímeros con memoria de forma son materiales poliméricos con la capacidad de recordar su forma original. Al contrario que en el caso de las aleaciones, donde el cambio de forma se produce debido a transiciones inducidas térmicamente entre diferentes fases cristalinas del material (la fase martensítica y la fase austenítica), el efecto de memoria de forma de los materiales poliméricos no se debe a cambios estructurales. Este efecto no

es una propiedad específica de un solo polímero, sino que está relacionado con la combinación de la estructura del polímero y la morfología del mismo, junto con la tecnología de programación y procesado empleadas.

Comparando las aleaciones con memoria de forma con los polímeros con memoria de forma, estos últimos presentan propiedades que los hacen ventajosos, tales como la baja densidad, buena moldeabilidad, y bajos costos.



4. Aplicaciones generales

Esta sección la dedicamos a comentar brevemente las aplicaciones generales de las diversas familias de materiales inteligentes.

4.1. Piezoeléctricos

Los materiales piezoeléctricos poseen un amplio rango de aplicaciones, principalmente como:

- (A) Sensores, capaces de detectar una acción externa relacionada con la variación de una propiedad física (temperatura, desplazamiento, deformación, vibración,...).
- (B) Actuadores, dispositivos capaces de responder frente a un estímulo externo, por ejemplo, de transformar una señal eléctrica en una salida mecánica (fuerza, ángulo o posición).
- (C) Transductores de interacciones química entre compuestos (concentración, pH, moléculas, especies orgánicas o inorgánicas, grupos funcionales,...).

Los materiales piezoeléctricos se emplean en el control estructural, con aplicaciones, por ejemplo, en la industria aeroespacial para el control de vibraciones, disminución de vibraciones en la cola de los aviones, control del ruido en el interior de un jet, usando actuadores adheridos al fuselaje.

Por su sensibilidad o capacidad de actuación, estos materiales pueden ser utilizados para el diseño y desarrollo de sensores, actuadores y productos multifuncionales, así como también pueden llegar a configurar estructuras y sistemas inteligentes de aplicaciones múltiples. En este último caso, las estructuras inteligentes son, por ejemplo, aquellas

que gracias a la combinación de estos materiales son capaces de auto-diagnosticarse y auto-adaptarse a las condiciones que se les ha marcado como óptimas o correctas.

Otras aplicaciones son la óptica adaptiva, hidrófobos y sono-boyas, sonares de profundidad, indicadores de espesores, detección de defectos, indicadores de nivel, sistemas de alarma, indicadores de deformación, localizadores de balizas de aeronaves, detectores de latido fetal, indicadores de presión en los neumáticos, generación de ondas de choque y posicionamiento de herramientas en máquinas, etc.

4.2. Piroeléctricos

Los piroeléctricos son ampliamente utilizados para detección infrarroja en el estudio y aplicaciones objetivo. Un detector infrarrojo piroeléctrico generalmente emplea una película delgada de material piroeléctrico orientada con las superficies que coinciden con el electrodo, normal a la dirección de polarización. Cuando la radiación infrarroja es absorbida por el detector, la temperatura del material piroeléctrico aumenta. Este cambio en la temperatura altera la polarización del material, causando un cambio en las cargas superficiales, y, en consecuencia, el material produce una señal eléctrica a través de los electrodos. La señal resultante es proporcional a la radiación a la que es expuesto el material.

4.3. Fotoactivos

Electroluminiscentes

Los usos más típicos de un material electroluminiscente son los diodos emisores de luz (LED). Los LEDs consisten en un material

electroluminescente entre dos electrodos, uno transparente que permite la transmitancia de la luz emitida.

Fotoluminiscentes

La tecnología fotoluminiscente no es la iluminación de un espacio, sino la orientación en el mismo. Si pensamos que estos productos se pueden llegar a utilizar para señalar salidas de emergencia, delimitar rutas de evacuación, áreas de peligro, herramientas, áreas de trabajo o prevención de accidentes el tema cobra una relevancia vital.

En los últimos años, la seguridad pública en edificios y lugares de trabajo ha adquirido creciente atención e importancia. El riesgo de incendio en edificios públicos, centros comerciales, estaciones de transporte subterráneo o en transporte aeromarítimo ha determinado la necesidad incuestionable de marcar vías de escape bajo las peores circunstancias, tales como cortes totales de electricidad, presencia de humos y situaciones de pánico.

Termoluminiscentes

Dosímetros termoluminiscentes para radiación. Este método es el oficialmente aceptado para controlar la dosis recibida por el personal profesionalmente expuesto es a través de los TLD o dosímetros de termoluminiscencia.

Otras aplicaciones son la datación absoluta por termoluminiscencia (TL) de materiales cerámicos arqueológicos y la dosimetría retrospectiva para la reconstrucción de las dosis absorbidas causadas por accidentes radiológicos con liberación de radiactividad o la irradiación del medio ambiente

y sus habitantes. En ocasiones puede resultar necesario realizar mapas de dosis en escenarios muy amplios y en ausencia total y parcial de sistemas convencionales de medida, por lo cual la dosimetría retrospectiva ha de utilizar materiales naturales como dosímetros, utilizando las propiedades termoluminiscentes de diversos materiales naturales (feldespatos, leucita y caolín) y cerámicos (ladrillos).

4.4. Cromoactivos

Electrocromicos

Los materiales electrocromicos se pueden utilizar para crear ventanas inteligentes capaces de reducir su transmitancia en al menos un 65% en menos de un minuto cuando se les aplica un campo eléctrico. Una vez que el campo eléctrico se elimina el efecto se mantiene, pero es reversible cuando la corriente se invierte.

Termocromicos

Se utilizan para hacer pinturas, tintas, papel o son mezclados con diferentes materiales.

De esta manera se suele determinar si una superficie está fría o caliente, así se pueden usar en radiadores, partes de motores, equipamiento doméstico, puertas antifuego, incluso en carreteras para detectar si el asfalto está helado. Las diferentes respuestas en color se pueden utilizar para plantear distintas escalas de alarma.

Fotocromicos

Se emplean en la producción de tintas de seguridad, muñecas que se ponen morenas al sol, lentes de visión que se oscurecen al ser expuestos a la luz solar, ventanas, paneles, etc.

4.5. Electrostrictivos

Sus aplicaciones más comunes son, junto con los magnetostrictivos, a modo de sónar, motores lineales, sensores de medida de tensiones mecánicas, medidas del par en ejes, sensores de posición y antirrobo.

4.6. Magnetostrictivos

Los sensores y actuadores magnetostrictivos se utilizan para transductores, transformadores, MEMS, control de ruido y vibraciones, motores lineales, óptica adaptiva, ultrasonidos, altavoces, taladros, bombas, y sensores de posición y mecánicos de torque.

Terfenol-D se utiliza casi exclusivamente para aplicaciones magnetostrictivas por sus excepcionales propiedades.

4.7. Polímeros electroactivos

Este tipo de materiales tienen un gran potencial en lo que a aplicaciones biomédicas se refiere.

4.8. Fluidos electro - y magnetoreológicos

Los fluidos ER y MR son utilizados principalmente para su uso en aplicaciones de amortiguamiento. Aplicaciones específicas incluyen equipos de ejercicio, válvulas, sistemas de embragues y frenos, al igual que control de vibraciones y sistemas de absorción de impacto.

4.9. Materiales con memoria de forma

Algunas de sus aplicaciones incluyen naves espaciales, aeronaves, electrónica, medicina, sistemas de procesos, robótica, domótica, aparatos domésticos, etc.



5. Aplicaciones sectoriales

Los materiales más versátiles son los piezoeléctricos, electrostrictivos, magnetostrictivos y en menor medida los EAP, porque pueden operar bien como sensores, bien como actuadores. Los materiales con memoria de forma pueden emplearse como actuadores, pero no como sensores. Los fluidos reológicos se emplean principalmente en aplicaciones muy específicas. Los fotoactivos y cromoactivos se utilizan como sensores.

Los productos inteligentes abren un amplio abanico de oportunidades para la mejora de productos y procesos en distintos sectores industriales tanto militares como civiles. Se utilizan en sistemas de monitorización y control activo en muchos procesos y en algunos productos. Sin embargo, la evolución de estos materiales puede permitir que sean incorporados durante el mismísimo proceso de elaboración del producto, simplificando los procesos de fabricación.

5.1. Biotecnología y Medicina

Existen diversas aplicaciones relacionadas con la biotecnología y medicina para las que resultan de gran interés los materiales inteligentes por sus buenas cualidades como la biocompatibilidad y conformabilidad, sobre todo en el caso de algunos

materiales con memoria de forma y los piezoeléctricos, los cuales permiten incorporar al organismo distintos componentes mejorando así los tratamientos frente a diversas enfermedades. También se puede hablar de materiales inteligentes utilizados para la bioseparación, dosificación de fármacos o incluso desarrollo de nuevos biocatalizadores. Otros materiales inteligentes permiten mejorar y facilitar las herramientas de diagnóstico como inspecciones invasivas (p.e. endoscopias) o externas (p.e. mediante ultrasonidos).

Es necesario analizar el carácter funcional de este tipo de materiales y sus propiedades, así como los factores de diseño con miras a la posible construcción de novedosos elementos y artefactos médicos, o bien de mecanismos integrantes de la mecatrónica, la microrrobótica o sistemas biomiméticos, aportando algunos ejemplos representativos.

Diagnóstico

Las cerámicas piezoeléctricas se pueden utilizar para obtener información médica como, por ejemplo, la presión ejercida durante la pisada de una persona. Se puede utilizar para obtener información a partir de la pisada, además de otros parámetros como el ángulo de la rodilla en exoesqueletos activos, etc. (ref -22-)

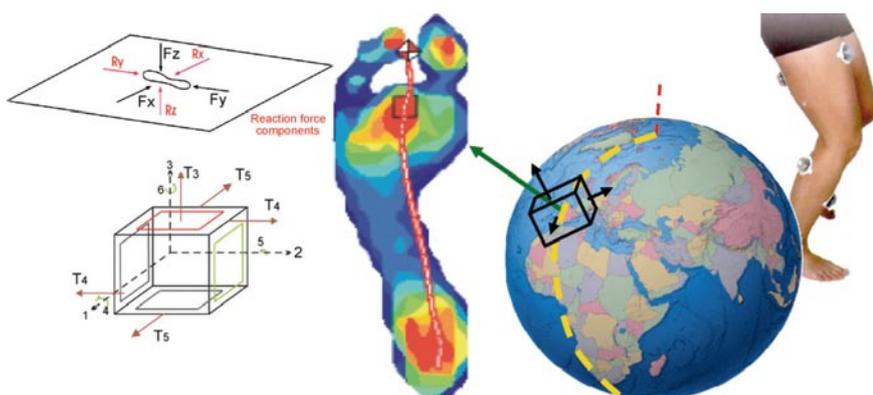


Figura 8: Simulación de la pisada y medidas exteriores con PZT

Stents vasculares

Los materiales SMA, en particular el Nitinol, pueden ser empleados para fabricar alambres superelásticos con el objeto de adoptar geometrías determinadas una vez instalados en el cuerpo o para lograr capturar elementos que se desplazan en el torrente sanguíneo como coágulos. Estos alambres o tejidos de Nitinol son los materiales utilizados como stents vasculares para reforzar los vasos sanguíneos, o pequeñas garras que capturan pequeños cuerpos (como coágulos) que se transportan a través del flujo sanguíneo y se introducen en las venas mediante catéteres o guías de Nitinol. El funcionamiento es el siguiente: se introduce el stent o el catéter con las garras comprimidas en el vaso sanguíneo y posteriormente se expande recuperando la forma que tiene memorizada. Se calienta el material por encima de su temperatura de transformación, proporcionando tanto la rigidez necesaria al vaso sanguíneo en el caso del stent como el atrapamiento del coágulo en el caso del catéter. En este sentido también se pueden utilizar los polímeros de memoria de forma como implantes intragástricos que se inflan tras un tiempo dando sensación de llenado al paciente. (ref -23-).

Los sensores bioquímicos se están desarrollando para monitorizar la concentración de electrolitos y pH en el dulce e incluso para detectar proteínas específicas en sangre o plasma. También se pueden utilizar para sensorizar glucosa, anticuerpos, antígenos, fragmentos de ADN y otros componentes biomédicos. (ref -24-)

Los materiales SMA como Nitinol se emplean para las correcciones dentales mediante alambres

ortodónticos que ejercen una presión progresiva y adaptativa sobre los anclajes unidos a las piezas dentales, y también para realizar ganchos de unión entre el tendón y el hueso.

Regeneración de huesos y tejidos

En el caso de los materiales electroactivos poliméricos como el PVDF, las propiedades de los mismos como la biocompatibilidad, conformabilidad e impedancia hacen de ellos excelentes candidatos para una amplia gama de aplicaciones biomédicas. Destacan entre ellas los implantes de actuadores para estimular la regeneración del hueso y tejidos, actuadores para simular músculos artificiales o sensores para monitorizar implantes vasculares. Los sistemas combinados, basados en polímeros y copolímeros derivados del ácido láctico y monómeros acrílicos, son sensibles a la temperatura y el pH, cualidades que pueden ser explotadas para su uso como soporte o andamiaje en la regeneración de tejidos o bien como implante para la fijación de fracturas óseas. (ref -25-).

La aplicación de estímulos bioquímicos y biofísicos del crecimiento celular es un potente método para mejorar la formación reparadora del hueso in vivo. Gracias al desarrollo de nuevos materiales que permiten controlar la manera en que éstos se integran en el tejido vivo, ahora es posible reparar tejidos óseos dañados en el interior del cuerpo humano. Un ejemplo son los compuestos de fosfato cálcico y nuevos materiales poliméricos que poseen propiedades fisicoquímicas que pueden alterarse por medio de modificaciones de la superficie para posibilitar la adherencia selectiva de distintos tipos de célula.

Las estructuras tridimensionales de materiales biodegradables proporcionan un soporte mecánico inicial adecuado para que las células sembradas se integren en el tejido circundante. Además, ayudan al tejido óseo a recuperar su forma original en la región del defecto que es objeto del tratamiento.

5.2. Energía

Energy Harvesting

La capacidad de los materiales inteligentes de convertir energía mecánica, temperatura, luz, etc. en energía eléctrica, puede ser aprovechada para desarrollar aplicaciones que generen energía eléctrica a partir de esa energía que se da en el entorno. A esta rama de las aplicaciones de los materiales inteligentes se le denomina "Energy Harvesting". En la actualidad, la energía obtenida mediante estos sistemas es menor que la obtenida a través de baterías químicas, de manera que estos sistemas no deben contemplarse como medios eficaces de generar energía, sino como sistemas para recuperar parte de la energía mecánica que habitualmente se pierde a través de procesos disipativos. Dados los avances en los distintos campos de interés de esta aplicación, y el menor consumo de energía que se requiere por parte de ciertos componentes a consecuencia de esta evolución, estos materiales están adquiriendo una gran importancia.

A parte de la energía solar y termoeléctrica, las energías electromagnéticas, electrostáticas y piezoeléctricas son los tres mecanismos de obtención de energía del ambiente. Considerando los materiales inteligentes, los piezoeléctricos y magnetostrictivos son los que presentan mayor potencial para esta aplicación. En la actualidad los piezoeléctricos, y más concretamente los PZTs y PVDFs, son los materiales más populares por su buen comportamiento, su configuración compacta y compatibilidad con los MEMS (Micro-Electro-Mechanical System). De cualquier forma estos materiales se ven limitados en sus aplicaciones por efectos como el envejecimiento, depolarización, fragilidad en el caso del PZT y su elevada impedancia de salida.

Aprovechando la capacidad de los materiales magnetostrictivos, que soportan un cambio en la magnetización del material al ser sometidos a una deformación inducida por vibraciones a través del efecto Villari, se ha desarrollado diversos conceptos de Energy Harvesting basados en estos materiales.

En este sentido se ha trabajado con la aleación de Terfenol-D ($Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,9-2}$)₉ y un cristal metálico amorfo Metglas 2605SC ($Fe_{81}B_{13,5}Si_{3,5}C_2$)₁₀. Estos materiales se han utilizado, por ejemplo, para una red de sensores inalámbricos de un edificio. Se pueden comparar los piezoeléctricos y los magnetostrictivos considerando uno u otro, en función de las necesidades específicas de cada aplicación, tal como se indica en la tabla nº 3.

Tabla 3.-Comparación entre diferentes materiales inteligentes para “energy harvesting”

Tipo	Ventajas	Desventajas
Piezoelectrico	• no necesidad de fuente externa de voltaje	• depolarización
	• Altos voltajes de 2~10V	• fragilidad en PZT
	• configuración compacta	• acoplamiento pobre en el PVDF
	• compatible con MEMS	• pérdidas de carga
	• alto acoplamiento en monocristales	• impedancia de salida elevada
Magnetostrictivo	• coeficiente de acoplamiento ultra-alto >0,9	• efecto no-lineal
	• no problema de depolarización	• bobina pick-up
	• adecuado para vibraciones de alta frecuencia	• difícil de integrar con MEMS
	• alta flexibilidad	• puede necesitar imanes

Una interesante aplicación de los PVDF es la recuperación de la energía disipada durante un paseo, por ejemplo. A partir de la energía liberada en el apoyo delantero del pie y mediante el uso de una lámina de PVDF en la planta del zapato, así como transformando la energía liberada en el apoyo del talón a través de un sistema de materiales piezoelectricos, la energía mecánica disipada puede transformarse en eléctrica que a su vez puede alimentar componentes electrónicos de baja potencia.

Fotovoltaica

Celda solar fotoelectroquímica

El sistema fotovoltaico más moderno y estudiado es la celda solar fotoelectroquímica, tipo Grätzel, desarrollada por el profesor Michael Grätzel en 1991. Esta celda está compuesta por un electrodo negativo que consta de vidrio conductor (cubierto por una delgada capa de óxido de estaño dopado con indio conocido por sus siglas en inglés como ITO Indium-doped Tin Oxide). Se trata de un material transparente revestido con una película

porosa de óxido de titanio nanocrystalino ($n\text{-TiO}_2$), a la cual se encuentran unidas moléculas de un colorante fotosensitivo como el cis-ditiocianato-N,N'bis(bipiridina 4,4'dicarboxilato) de rutenio (II), conocido como N3. A ello se añade un electrolito que contenga un par electroquímico para la óxido-reducción y el electrodo positivo que consta de un vidrio ITO recubierto por una fina capa de un catalizador de platino.

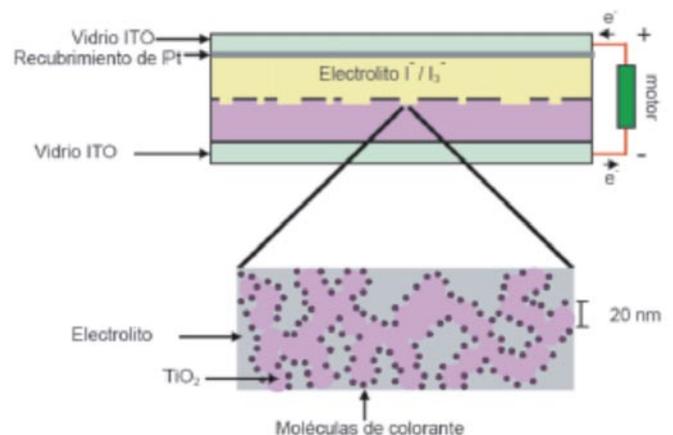


Figura 8: Esquema de una celda solar.

Materiales para electrolitos

El electrolito es uno de los componentes clave de una celda solar y sus propiedades poseen un gran efecto en la eficiencia de conversión de energía, así como en la estabilidad de las celdas solares.

Un aspecto importante que concierne la estabilidad de la celda fotoelectroquímica es la volatilidad del electrolito en el rango de temperatura de trabajo de la celda. Hasta la actualidad, se utiliza el par redox KI/I₂ disuelto en alcohol isopropílico,

que brinda excelentes resultados en relación a la conductividad de los iones. Sin embargo, presenta un mal desempeño en relación a la ciclabilidad electroquímica, debido a la volatilidad del solvente empleado. Para superar tal problema de volatilidad se ha propuesto la aplicación de sales fundidas. Entre la variedad de sales fundidas se encuentran los líquidos iónicos para los cuales su volatilidad se considera despreciable. Son sales líquidas a bajas temperaturas. Entre los principales líquidos iónicos se pueden mencionar los amonios, piridinius, picolinos y fosfonio.

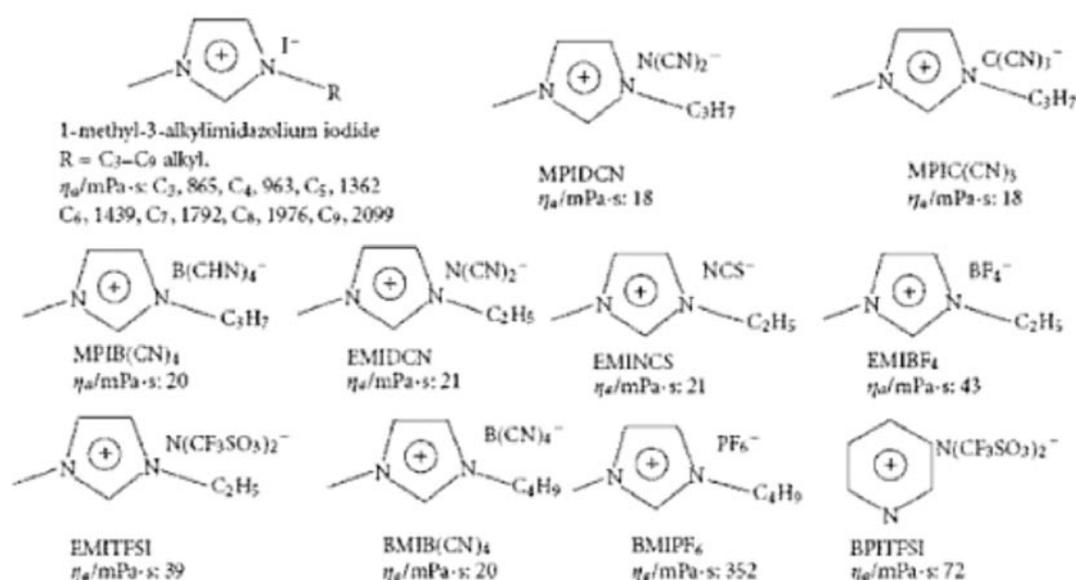


Figura 8: Estructura y viscosidad de algunos líquidos iónicos.

Materiales para contraelectrodos

El contraelectrodo más comúnmente utilizado es un sustrato de vidrio conductor recubierto de una capa de platino, el cual actúa como catalizador. Sin embargo este tipo de sustratos tiene como limitaciones su coste, así como sus formas y su

fragilidad. Por ello, se ha estudiado la posibilidad de reducir, por un lado, el espesor de la capa de recubrimiento manteniendo a la vez un alto rendimiento debido a las propiedades del Pt. Por otro lado, se han estudiado paralelamente otros materiales como sustitutos del Pt.

TABLE 2. Properties of different metal substrate used as counter electrode.⁴⁴

Substrates	Thickness of substrates (μm)	$10^{-3} R_s$ of substrates (Ωsq)	$10^{-3} R_s$ of counter electrodes (Ωsq)	Stabilities in electrolyte
Stainless steel	100	3.8	3.7	Stable
Nickel	100	0.35	0.46	Stable
Copper	100	0.09	0.15	Dissolves
Aluminium	100	0.19	0.27	Dissolves

TABLE 3. Properties of different plastic substrate used as counter electrode.⁴⁴

Substrate	Thickness of substrate (μm)	R_s of substrate (Ωsq)	R_s of Pt sputtered CE (Ωsq)	Stability in electrolyte
ITO-PEN110	125	10	16	Stable
ITO-PEN120	188	20	27	Stable
ITO-PEN150	188	50	62	Stable
Polyester film	100	Insulation	61	Stable
PET	1000	Insulation	48	Unstable
Polyethylene	1000	Insulation	82	Unstable
Polystyrene	1506	Insulation	81	Unstable

TABLE 4. Performance characteristics of DSCs based on different metal substrates and different platinization method.⁴⁴

Substrate	Platinizing methods	V_{oc} (mV)	j_{sc} (mA cm^{-2})	FF (%)	η (%)
FTO glass	Sputtering	695	13.10	65	5.94
Stainless steel	Sputtering	703	12.40	60	5.24
	Plating	613	5.20	61	1.95
	Thermal deposition	576	12.40	46	3.26
Ni	Sputtering	685	12.30	61	5.13
	Electro-deposition	650	13.30	46	3.96

TABLE 5. Performance characteristics of DSCs based on different plastic substrates and different platinization method.⁴⁴

Substrate	Platinizing method	V_{oc} (mV)	j_{sc} (mA cm^{-2})	FF (%)	η (%)
ITO-PEN110	Sputtering	693	12.90	60	5.39
	Thermal deposition	624	16.32	46	4.65
ITO-PEN120	Sputtering	675	12.30	58	4.81
ITO-PEN150	Sputtering	671	11.90	53	4.24
Polyester	Sputtering	647	12.50	49	3.99
Polystyrene	Sputtering	712	7.56	59	3.19
Polyethylene	Sputtering	632	6.90	43	1.90

5.3. Medio Ambiente

Aprovechando la capacidad de los materiales inteligentes de sensorizar y responder a cambios en el ambiente de forma controlada y reproducible, se pueden obtener aplicaciones interesantes para el medio ambiente. Los cambios se pueden manifestar respecto a la temperatura, campo eléctrico, presión, sonido e iluminación. Los estímulos químicos como cambios en pH o la presencia de algunas sustancias peligrosas pueden ser detectadas por polímeros, pudiéndose diseñar sistemas que lo hagan de forma adecuada para la eliminación del riesgo medioambiental asociado.

Existe un número significativo de publicaciones referentes al diseño de materiales inteligentes poliméricos y biopoliméricos para su uso como catalizadores, sensores, descontaminantes y otros. La mayoría de las aplicaciones de los materiales inteligentes poliméricos se pueden considerar medioambientalmente importantes desde la detección, prevención y hasta la eliminación de las sustancias dañinas en el medioambiente.

Catálisis selectiva

Existen catalizadores basados en polímeros inteligentes cuya estimulación térmica varía su solubilidad. Los materiales tipo PEO-PPO-PEO, en los que los grupos terminales hidroxilo reaccionan con cloruro de metanosulfonil y la sustitución nucleofílica con $\text{LiP}(\text{C}_6\text{H}_5)_2$ seguido de un intercambio con un complejo $\text{Rh}(\text{I})$, pueden utilizarse para crear un catalizador inteligente. Inicialmente, esta mezcla es homogénea a bajas temperaturas y heterogénea a altas temperaturas,

de manera que se modifica su solubilidad. A consecuencia de este cambio, los ritmos de hidrogenación se ven modificados como se puede ver en la siguiente figura (Ref -30).

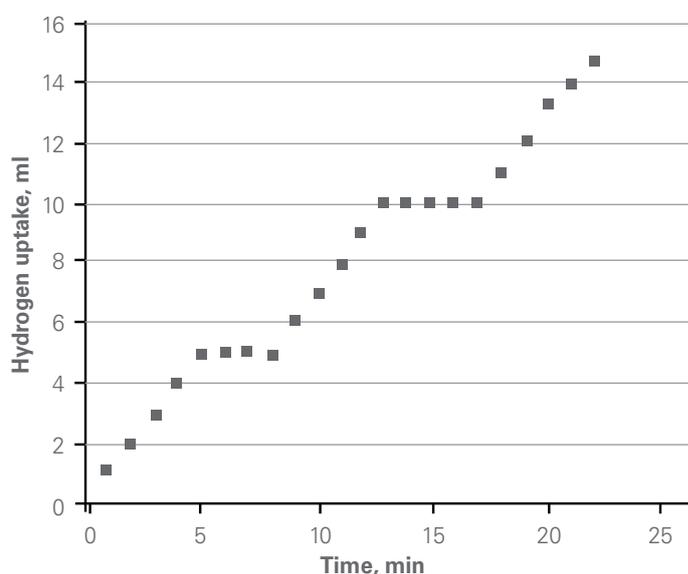


Figura 10: La dependencia de la temperatura del ritmo de hidrogenación del allyl alcohol por catálisis de rodio catiónico mostrando la reactividad a 0°C y la inactividad a 25°C.

Se puede observar que el catalizador se apaga cuando se calienta a 25°C, que es la temperatura de disolución crítica menor. Esta temperatura se puede modificar variando la estructura de los ligandos, pudiendo así elegir la temperatura a la que suceda la reacción.

Esta propiedad, puede ayudar a moderar una reacción exotérmica, lo que minimizaría los productos intermedios y constituiría un aspecto medioambiental importante de catálisis que

actualmente únicamente se puede realizar mediante control externo de temperatura.

De modo que el desarrollo de este tipo de controladores mejorará de forma considerable los catalizadores selectivos, de manera que los utilizados para la mejora medioambiental podrán ser más eficientes desde el punto de vista tanto atómico y como energético.

Adhesión

Los geles y superficies inteligentes tienen interesantes aplicaciones. A modo de ejemplo se puede hablar de la adhesión reversible de células. En el caso concreto del poliestireno con una cadena de PNIPAM injertada, donde la capacidad de respuesta térmica del polímero se ha convertido en una aplicación interfase, las células se pueden adherir de manera reversible. Esta aplicación es muy interesante para campos como la bioadhesión, incrustación biológica marina, y en química de recubrimiento, y otras áreas con gran impacto medioambiental.

Detección y descontaminación

Otras problemáticas medioambientales que generan gran preocupación en la sociedad son los residuos nucleares y la contaminación química. Para ello, es necesario el desarrollo de detectores y eliminadores de ese tipo de contaminantes. Los materiales poliméricos inteligentes pueden actuar como sensores con capacidad de respuesta. Estos se basan en el diseño y uso de recubrimientos poliméricos inteligentes de base acuosa para la descontaminación de superficies contaminadas. Este concepto consiste en composiciones

poliméricas desmontables en tiras que contienen mezclas de polímeros, copolímeros y aditivos que pueden ser esparcidos sobre una superficie como una solución o dispersado en medio acuoso. Cuando se aplican sobre una superficie contaminada, estos recubrimientos muestran una cierta respuesta, indicando las áreas contaminadas mediante un color naranja.

Mientras el recubrimiento así dispuesto se seca, el contaminante es absorbido y fijado en la matriz polimérica. De manera que al retirar la capa de recubrimiento el contaminante también es eliminado en cierta medida. Este proceso se está aplicando en la descontaminación de superficies con presencia de sustancias como uranio, plutonio, y plomo.

Un ejemplo concreto es la mezcla de un polivinil alcohol parcialmente hidrolizado de baja densidad y polivinil pirrolidona en agua. El recubrimiento contiene además un plastificante (glicerina), un agente de enmascaramiento de quelante y un indicador colorimétrico, de manera que informa sobre la presencia de uranio y plutonio mediante un cambio de color (de naranja a morado para el uranio y de naranja a rojo para el plutonio). El recubrimiento resulta extremadamente efectivo a la hora de eliminar niveles variables de ambos contaminantes de la superficie.

En esta aplicación la parte inteligente está asociada a la sensorización mediante color, dando lugar a la posibilidad de eliminar únicamente las zonas contaminadas. Además, estos polímeros tienen el potencial de ser rediseñados, purificados y reutilizados. Sensores que incorporan polímeros inteligentes también se han utilizado

para la detección de trazas de pesticidas organofosforescentes, agentes nerviosos, y Be(II). Estos sensores utilizan ensamblaje molecular como método para hacer de interfase entre el polímero con componentes bioquímicos pudiendo detectar pesticidas fosforescentes y agentes nerviosos en concentraciones a partir de 500ppb y Be(II) a partir de 1 ppm.

5.4. Transporte

En lo que a las aplicaciones estructurales en el transporte se refiere, tanto los materiales piezoeléctricos, bien en su forma polimérica y bien en su forma metálica, como los electrostrictivos, magnetostrictivos y SMA son materiales inteligentes adecuados por sus buenas propiedades relacionadas con deformaciones y tensiones mecánicas.

La detección de daño y monitorización estructural, así como el control de vibraciones son los campos en los que el uso de materiales inteligentes parece tener mayores posibilidades de desarrollo.

En este sentido existen dos vertientes bien diferenciadas:

- Monitorización estructural
- Amortiguamiento de vibraciones

Monitorización estructural

Existen diversas estrategias para detectar el daño en una estructura empleando materiales inteligentes. En este caso los materiales piezoeléctricos y electrostrictivos presentan

interesantes ventajas frente al resto de materiales inteligentes por su buen comportamiento electromecánico.

En este apartado los materiales PZT cerámicos y los PVDF son utilizados por su alta capacidad de transformación de las deformaciones en campo eléctrico, pudiendo ser esta señal recogida para monitorizar el daño. Ciertas configuraciones de los materiales PZT, como pueden ser los MFC y los polímeros como el PVDF, destacan por las grandes ventajas que ofrecen por su flexibilidad y adaptabilidad a distintas geometrías superficiales, y su elevada sensibilidad. En estas aplicaciones, se distribuyen los sensores sobre la estructura objeto de manera que recogen la señal del parámetro considerado (habitualmente vibraciones). En algunos sistemas, la señal que se recoge es generada de forma natural (mediante un impacto, o respuestas naturales en funcionamiento del equipo), mientras que en otros la señal se produce utilizando para ello unos actuadores (que en el caso del PZT puede ser el mismo sensor).

Si se trata de únicamente recoger la señal, este tipo de diagnosis proporciona información limitada, de manera que es necesario establecer la relación a priori entre la medida de los sensores y el daño estructural que se desea detectar, teniendo en cuenta que tanto la selección de los sensores como su distribución deberá ser adecuada. En el caso de las señales que se generan y detectan mediante piezoeléctricos (actuadores y sensores) embebidos en la estructura, la identificación del daño se puede conseguir mediante el análisis de las diferencias entre las señales medidas antes y después de producirse el daño. Para ello es necesario desarrollar un sistema de identificación que sea

capaz de determinar la localización y extensión del daño. Se pueden monitorizar estructuras enteras con un número limitado de sensores-actuadores. Empleando estos sistemas se han podido detectar efectos de delaminación en estructuras de materiales compuestos, caracterizando no solo la localización del impacto sino también reconstruyendo la fuerza del impacto.

Amortiguamiento de vibraciones

El control de vibraciones es un campo con gran aplicación de materiales inteligentes y de alto interés para la industria aeroespacial o la automoción. La respuesta acústica de las estructuras está directamente relacionada con el amortiguamiento de vibraciones, de manera que la reducción de vibraciones conlleva la reducción de ruido estructural. Los materiales inteligentes se emplean para suprimir vibraciones en sistemas ópticos espaciales, empleando fluidos electroreológicos o magnetoreológicos, además de embragues, válvulas, etc.

Para disminuir los niveles de ruido se pueden emplear materiales piezoeléctricos que detectan los cambios de la presión del aire debido a las ondas de sonido, y que convierten ese estímulo en una señal eléctrica que se emplea para alimentar un actuador que transmite ondas de presión en el aire en contrafase a la recibida, de forma que la superposición amortigua el ruido o incluso lo anula.

Mediante el empleo de señales eléctricas se pueden inducir vibraciones en materiales piezoeléctricos para producir materiales compuestos que presenten rigidez elásticas variable e incluso

ajustable. Este tipo de material se puede utilizar para el amortiguamiento de vibraciones de forma que las propiedades del material son ajustadas de tal manera que absorban las vibraciones y eviten problemas de resonancias. Toyota ha desarrollado un sistema de suspensión que implanta este sistema de rigidez controlada y que se ha incorporado a la gama Lexus.

El amortiguamiento dinámico también se utiliza no sólo para reducir ruido sino también para mejorar la vida a fatiga. Durante el proceso de recuperación del SMA, éste puede cambiar la rigidez del componente estructural donde esté instalado. Por tanto, cuando se da una vibración el aumento en la rigidez de estos materiales produce una disminución de la amplitud de la vibración, cambiando también la frecuencia de resonancia de la estructura previniendo con este cambio que bajo una excitación la estructura entre en resonancia. Este fenómeno produce como consecuencia directa la absorción de las vibraciones.

Por otro lado están los sistemas de amortiguación activa es decir, aquellos activados mediante una unidad de control para reducir el ruido y vibraciones. Uno de los métodos incorpora fibras pretensionadas en una matriz polimérica induciendo mediante cambios de temperatura una variación en la frecuencia de resonancia, que aumenta con la fracción volumétrica de las fibras de SMA y decrece con el aumento del espesor del composite. El pretensionado se puede inducir tanto a temperatura ambiente mediante medios mecánicos como por transformación de fase. Para validar este concepto se aplicó en un prototipo con pequeñas aletas introducido en un aeroplano, donde mostró un buen comportamiento

en reducción de vibraciones. Este método se denomina ASET (Active Strain Energy Tuning).

Otro método de reducción activa con SMA se denomina AMM (Active Modal Modification), en cuyo caso no se pretensionan las fibras embebidas y para cambiar la respuesta modal se calientan las fibras produciendo un cambio en el módulo elástico del sistema.

Finalmente también el método denominado ASC (Active Shape Control) es utilizado de manera que se cambia la forma del sistema, lo que influye en los modos de vibración.

Por ejemplo se suelen integrar fibras de Ni-Ti pretensionadas en estado martensítico en estructuras, de manera que si el componente entrara en resonancia durante el servicio las fibras de SMA se activan por calentamiento y se modifica la frecuencia natural de la estructura amortiguando la frecuencia anterior.

Aligeramiento

La industria aeronáutica se encuentra desarrollando alas de rigidez variable que responden a la carga del viento de forma activa para conseguir distintos objetivos como, por ejemplo, la disminución de cargas de fatiga, optimización aerodinámica, etc. La idea es reemplazar los actuadores hidráulicos convencionales por sistemas basados en materiales inteligentes, en concreto por aleaciones de memoria de forma. De esta forma se consigue una evidente disminución de peso y el sistema resultante es más sencillo, eficiente y compacto.

Otras aplicaciones

Fabricación de cierres y juntas

Los materiales SMA se utilizan, aprovechando su capacidad de recobrar geometrías anteriores cuando supera una temperatura determinada para la fabricación de cierres, conectores y anclajes. Por ejemplo, se usan anillas a partir de Nitinol para el sellamiento de juntas, fabricándolas en la fase cristalina de alta temperatura con diámetros ligeramente inferiores a las piezas o tubos que se quieren sellar. Luego, se enfría a la fase martensítica forzándolo a un diámetro superior al de los tubos. Así se insertan los tubos dentro de la junta sellante y se calienta quedando unidos. (ref -21-) También se emplea para la fabricación de arandelas de pretensado de pernos. El proceso de tensado es sencillo y preciso: se inserta la arandela y se calienta a la temperatura de activación, de forma que ésta se expande y tensa el perno. Sistemas basados en cerámicas piezoeléctricas también se están empleando para la medida de pretensión de tornillos. De hecho, el uso de estos materiales como células de carga ya ha desbancado en algunos campos a las tradicionales células basadas en puentes de bandas extensométricas.

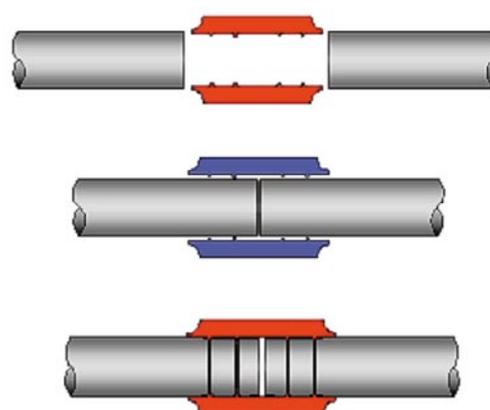


Figura 11: Sellamiento de juntas mediante SMA

Se realizan con estos materiales también actuadores robóticos, detección de incendios, grifería para el control de la temperatura del agua, aspersores y válvulas de cierre de gas que

sensorizan y responden a elevadas temperaturas, antenas de móviles altamente flexibles que explotan la propiedad pseudoelástica del material. (ref -28-).

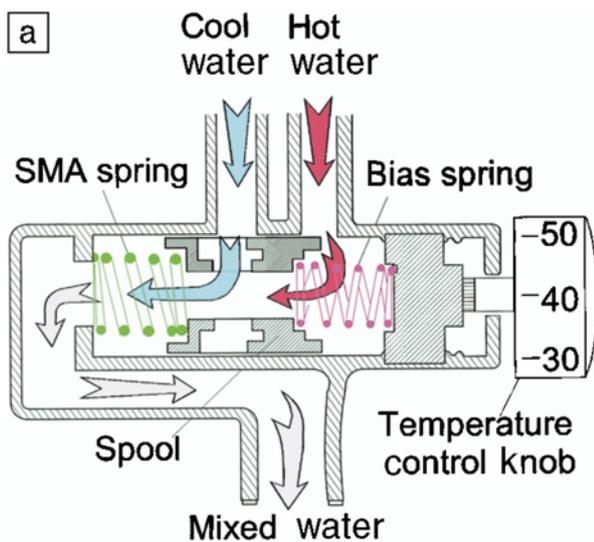


Figura 13: Una antena altamente flexible de cable de Ti-Ni. (NTT Mobile Communications Network Inc.)

Figura 12: Esquema de un grifo con control por SMA



Tabla 5.-Tabla resumen de materiales con sus ventajas y desventajas y sus principales aplicaciones

Material Inteligente		Ventajas	Desventajas	Sectores	Aplicaciones
Fotoactivos	Electroluminiscentes	Bajo consumo Fácil industrialización Mejores prestaciones frente a las tecnologías convencionales (mayor ángulo de visión) Mayor intensidad	Tiempo de operación bajo Condiciones de fabricación limitantes (sala blanca, atmósfera controlada)	TICs	Emisores de luz (LED)
	Fotoluminiscentes			Transporte	Señalizar salidas de emergencia, delimitar rutas de evacuación, áreas de peligro, herramientas, áreas de trabajo o prevención de accidentes
	Termoluminiscentes			Biomédico	Dosímetros termoluminiscentes para radiación, datación absoluta por termoluminiscencia (TL) aplicado a la datación de materiales cerámicos arqueológicos
Cromoactivos	Electrocromicos	Consumo limitado a su tiempo de operación Baja potencia de uso Tiempo de respuesta bajo Repetitividad Fácil fabricación Amplia gama de color		Transporte Construcción	Ventanas inteligentes capaces de reducir su transmitancia en al menos un 65%
	Termocrómico		Sensibilidad no controlable (rango de T°)	Transporte	Fabricar pinturas, tintas, papel o son mezclados con diferentes materiales para determinar temperaturas de superficies (radiadores, partes de motores, equipamiento doméstico, puertas antifuego, incluso en carreteras para detectar si el asfalto está helado)
	Fotocrómico		Tiempo de inversión del proceso alto	Transporte TICs Seguridad	Tintas de seguridad, muñecas que se ponen morenas al sol, lentes de visión que se oscurecen al ser expuestos a la luz solar, ventanas, paneles, etc
Magnetostrictivos		Elevada temperatura de funcionamiento Gran capacidad de esfuerzo como actuador		Transporte Biomédico	Transductores, transformadores, MEMS, control de ruido y vibraciones, motores lineales, óptica adaptativa, ultrasonidos, altavoces, taladros, bombas, y sensores de posición y mecánicos de torque.

Material Inteligente	Ventajas	Desventajas	Sectores	Aplicaciones	
Electrostrictivos	Baja histéresis Elevado tiempo de respuesta Reproducibilidad	Elevado coste	Transporte TICs	Para sonar, motores lineales, sensores de medida de tensiones mecánicas, medidas del par en ejes, sensores de posición y antirrobo	
Polímeros electroactivos	Gran desplazamiento de flexión	Capacidad bidireccional limitada en función del voltaje Respuesta lenta Baja capacidad de actuación en los de tipo iónico Bajo acoplamiento electromecánico		Aplicaciones biomédicas para el desarrollo de actuadores para prótesis herramientas quirúrgicas.	
Piroeléctricos	Bajo coste (Materiales cerámicos) Facilidad de procesamiento Elevada estabilidad Alta elasticidad en el caso de los polímeros		Transporte Fabricación Biomedicina	Detección infrarroja en el estudio y aplicaciones objetivo	
Piezoeléctricos	Elevado módulo elástico Gran acoplamiento mecánico	Temperatura de operación limitada por la Temperatura de Curie del material Requiere control para las aplicaciones activas	Transporte Biomédico TICs Energía	Como sensores, actuadores o transductores para el control estructural, control y amortiguación vibraciones, control del ruido, diseño de estructuras inteligentes, óptica adaptiva, hidrófobos y sono-boyas, sonares de profundidad, indicadores de espesores, detección de defectos, indicadores de nivel, sistemas de alarma, indicador de deformación, localizadores de balizas de aeronaves, detectores de latido fetal, indicadores de presión en los neumáticos, generación de ondas de choque y posicionamiento de herramientas en máquinas	
Magnetoreológicos	Elastómero MR Fluido MR Ferrofluido	Fácil activación	Es necesario el desarrollo de un sistema contenedor	Transporte Biomédico	Amortiguamiento. Aplicaciones específicas incluyen equipos de ejercicio, válvulas, sistemas de embragues y frenos, al igual que control de vibraciones y sistemas de absorción de impacto.
Electroreológicos	Elastómero ER Fluido ER				
Materiales Memoria de Forma	Shape Memory Alloys, SMA Polímeros SMA Ferromagnetic SMA, FSMA	Dispositivos sencillos Producen tensiones elevadas Gran estabilidad Gran ciclabilidad	Tiempo de respuesta elevado Comportamiento no lineal con la corriente	Biomédico Transporte	Naves espaciales, aeronaves, electrónica, medicina, sistemas de procesos, robótica, domótica, aparatos domésticos, etc.

