



industriales  
etsii

Escuela Técnica  
Superior  
de Ingeniería  
Industrial

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CARTAGENA

Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial

## Biomateriales conductores

### TRABAJO FIN DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA ELECTRÓNICA INDUSTRIAL Y  
AUTOMÁTICA

**Alumno: Pablo Martínez Pérez**

Director: Isidoro José Martínez Mateo  
Co-director: María Dolores Avilés González



Universidad  
Politécnica  
de Cartagena

Cartagena, enero de 2024

# ÍNDICE

<b>1. Introducción</b> .....	4
1.1 ¿Qué es un biomaterial? .....	4
1.2 Historia.....	6
1.3 Tipos de biomateriales.....	10
1.3.1 Biomateriales metálicos .....	11
1.3.2 Biomateriales poliméricos.....	12
1.3.3 Biomateriales cerámicos .....	13
1.3.4 Biomateriales compuestos.....	14
<b>2. Propiedades de los biomateriales</b> .....	15
<b>3. Biomateriales conductores</b> .....	19
3.1 Polímeros conductores .....	19
3.1.1 Polipirrol .....	23
3.1.2 Poliacetileno .....	24
3.1.3 Politiofeno .....	25
3.1.4 Polianilina .....	26
3.1.5 Poli(p-fenileno) y poli(p-fenilenvinileno) .....	27
3.1.6 Hidrogel de Poli(acrilamida).....	29
<b>4. Aplicaciones de los biomateriales conductores</b> .....	31
4.1 Músculos artificiales .....	31
4.1.1 Músculos artificiales basados en polímeros conductores.....	34
4.1.1.1 Mecanismo .....	35
4.1.1.2 Tipos de polímeros conductores utilizados .....	37
4.1.1.3 Limitaciones.....	38
4.1.1.4 Aplicaciones.....	39
4.1.2 Músculos artificiales Cavatappi .....	41
4.2 Biosensores .....	42
4.2.1 Características de los biosensores .....	46

4.2.2	Clasificación de los biosensores.....	48
4.2.3	Aplicaciones de los biosensores.....	53
4.3	Paneles solares orgánicos.....	56
4.3.1	Funcionamiento de los paneles solares orgánicos.....	59
4.3.2	Ventajas y desventajas de los paneles solares orgánicos.....	60
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>62</b>
<b>6.</b>	<b>Líneas futuras</b> .....	<b>63</b>
<b>7.</b>	<b>Bibliografía</b> .....	<b>68</b>

## 1. Introducción

### 1.1 ¿Qué es un biomaterial?

Los biomateriales, también conocidos como materiales biocompatibles, se definen como cualquier sustancia o combinación de sustancias, naturales o sintéticas, que pueden ser utilizados en un sistema orgánico durante un período de tiempo limitado y realizando una labor singular. [1]

Como dice la definición de biomaterial, su objetivo es incorporarse a un sistema biológico, para ello, necesita tener unas características adecuadas, mecánicas, así como biológicas. La propiedad principal y que tienen que tener todos los biomateriales es la biocompatibilidad, que es conocida por “la cualidad de no inducir efectos tóxicos o dañinos sobre los sistemas biológicos donde actúan, devolviendo una respuesta apropiada por parte del receptor y con un fin específico”. [2]

Constituyen una categoría única de sustancias diseñadas para interactuar de manera segura y eficiente con sistemas biológicos, ya sea en el cuerpo humano o en entornos médicos. Estos materiales desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones, desde dispositivos médicos hasta implantes, y su desarrollo ha sido un pilar fundamental en el progreso de la medicina y la ingeniería biomédica. La versatilidad de los biomateriales radica en su capacidad para proporcionar soporte estructural, promover la regeneración de tejidos y, al mismo tiempo, minimizar las respuestas adversas del cuerpo.

El término es muy utilizado en el campo de la medicina para definir a los materiales empleados con propósitos terapéuticos o de diagnóstico, y también es ampliamente reconocido en el campo de las ciencias biológicas y químicas, así como en la ingeniería de materiales.[1]

Los biomateriales constituyen una categoría única de sustancias diseñadas para interactuar de manera segura y eficiente con sistemas biológicos, ya sea en el cuerpo humano o en entornos médicos. Estos materiales desempeñan un papel crucial en diversas aplicaciones, desde dispositivos médicos hasta implantes, y su desarrollo ha sido un pilar

fundamental en el progreso de la medicina y la ingeniería biomédica. La versatilidad de los biomateriales radica en su capacidad para proporcionar soporte estructural, promover la regeneración de tejidos y, al mismo tiempo, minimizar las respuestas adversas del cuerpo.

Los biomateriales tienen un protagonismo total en la medicina actual: regeneran la labor y ayudan a la recuperación de los pacientes tras una lesión o enfermedad. Los biomateriales se dividen en naturales y sintéticos y son utilizados para aspectos médicos con el fin de ayudar, regenerar o suplir tejidos afectados o una función biológica.[3]

Los polímeros, el vidrio, la cerámica, el metal, o las células y tejidos vivos pueden emplearse para formar un biomaterial. Pueden ser utilizados para el diseño de piezas moldeadas, revestimientos, fibras, películas, espumas y telas para utilizar en dispositivos y productos empleados en medicina. Dichos dispositivos pueden englobar válvulas cardíacas, sustituciones de articulaciones de cadera, implantes dentales o lentes de contacto. En muchas ocasiones son biodegradables, y, a veces, bioabsorbibles, lo que supone que desaparecen progresivamente del organismo tras realizar su labor.[3]

Las utilidades de los biomateriales implican diagnósticos (biosensores), suministros médicos (herramientas quirúrgicas), soluciones terapéuticas (implantes y dispositivos biomédicos) y medicina regenerativa (piel y cartílago diseñados por tejido). Los polímeros, al ser biológicos, poseen una versatilidad que los metales y cerámicas no llegan a tener. La gran variedad de cualidades, tanto físicas y mecánicas, como químicas que pueden ofrecer los polímeros ha animado a la profunda investigación, desarrollo y aplicaciones de biomateriales. [6]

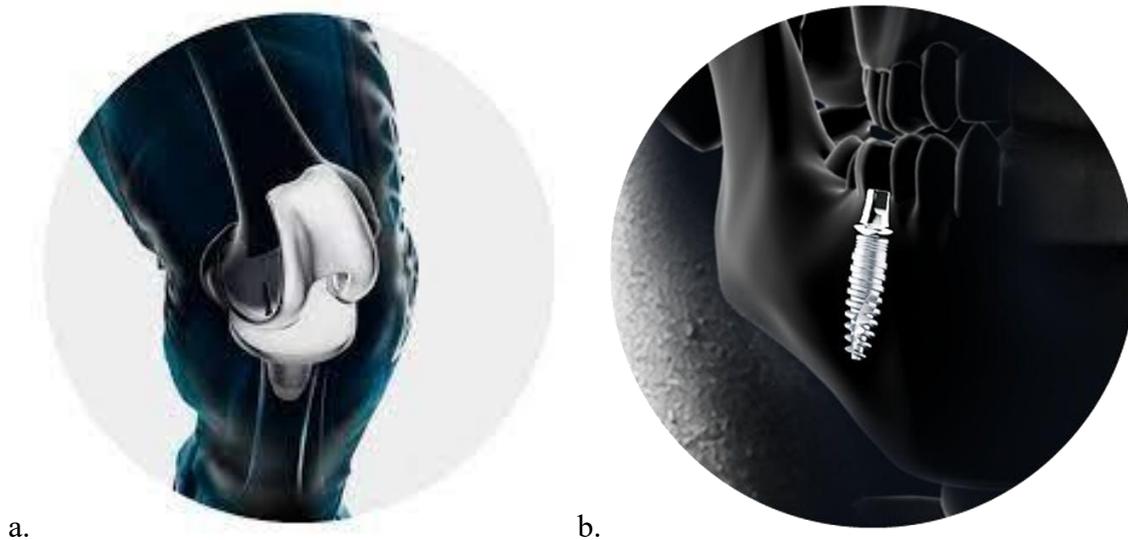


Figura 1: (a) *Implante de rodilla.* (b) *Implante dental* [7]

## 1.2 Historia

Ya en la prehistoria, los seres humanos desarrollaban materiales dependiendo de sus necesidades. Los orígenes de los biomateriales se remontan a civilizaciones antiguas, donde se utilizaban materiales como madera, marfil y hueso para fabricar prótesis dentales y reemplazos de extremidades. Aunque rudimentarios, estos primeros intentos evidencian la comprensión de la necesidad de sustituir tejidos o estructuras dañadas.

En la Edad de Piedra, los materiales que proporcionaba el ecosistema, como la piedra o el hueso eran golpeados o partidos con el fin de conseguir un elemento con las cualidades de interés para la función deseada, como podía ser, para herramientas.[1]

En el siglo XIX, con los avances en la metalurgia y la cirugía, surgieron los primeros intentos formales de utilizar materiales metálicos para dispositivos médicos. Sin embargo, la falta de comprensión sobre la biocompatibilidad y las reacciones del cuerpo limitó el éxito de estos primeros esfuerzos.

Además, con el desarrollo de la tecnología, los seres humanos comenzaron a utilizar los metales para formar instrumentos con mejores cualidades que antes de ser tratadas, a esta época se la conoce como la Edad de los Metales. Los metales que se emplearon para

ayudar al avance de esta tecnología fueron el cobre, el bronce y el hierro. Además, es necesario mencionar el descubrimiento y desarrollo de las aleaciones.

El avance en la tecnología de metales sigue creciendo a día de hoy presente por el descubrimiento de nuevas aleaciones. La aleación por excelencia, por la variedad de aplicaciones que posee, es el acero, que se emplea, en mayor cantidad, en la construcción. El segundo descubrimiento más significativo en la historia de los materiales por su impacto fue el del plástico a mitad del siglo XIX.[2]

El desarrollo moderno de los biomateriales ganó impulso en el siglo XX. Durante la Segunda Guerra Mundial, el interés en la investigación y desarrollo de biomateriales experimentó un notable aumento, impulsado en gran medida por la necesidad de encontrar soluciones médicas innovadoras para tratar las lesiones y heridas de los soldados en combate. A partir de entonces, el interés en la ingeniería de tejidos y la biocompatibilidad de los materiales experimentó un rápido crecimiento.[4]

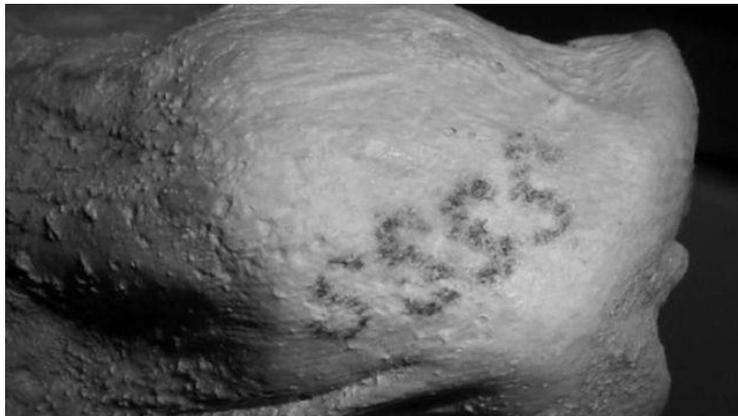


*Figura 2: Ejemplo de la conexión de una prótesis de brazo con el cerebro.[5]*

El siglo XXI ha presenciado una revolución en los biomateriales impulsada por avances en la nanotecnología y la ingeniería molecular. La capacidad para manipular materiales a una escala tan pequeña ha permitido el desarrollo de biomateriales con propiedades altamente personalizadas. Estos incluyen nanopartículas para administración de medicamentos, andamios tridimensionales para ingeniería de tejidos y materiales inteligentes que responden a estímulos biológicos.

Además, la impresión 3D ha transformado la fabricación de biomateriales, permitiendo la creación de estructuras más precisas y personalizadas para adaptarse a las necesidades específicas de cada paciente. La presente investigación se centra en la mejora de la funcionalidad de los biomateriales, la reducción de las respuestas inmunológicas y la creación de materiales que se integren de manera más eficiente con los sistemas biológicos. [5]

Las primeras veces en la historia que se dio uso a los biomateriales fue en épocas muy antiguas, cuando los antiguos egipcios empleaban suturas fabricadas con tendones animales.[3]



*Figura 3: Biomateriales en la piel hace 5000 años [6]*

El primer biomaterial, tal y como se conoce a día de hoy este elemento, se descubrió sobre el año 1920. Reiner Erdle y Charles Prange, combinaron sus conocimientos de médico dentista y metalurgia, correspondientemente, para llevar a cabo el desarrollo del primer biomaterial, una aleación metálica más concretamente. A partir de ese descubrimiento, este campo ha presentado un desarrollo acelerado, usando como ejemplo la línea de crecimiento de los materiales más “comunes”, pero en vez de desarrollarse en millones de años, haciéndolo en un siglo.[8]

Pero antes del desarrollo de este primer biomaterial, ya existían algunos ejemplos de la “buena” reacción del cuerpo humano a ciertos materiales, aunque no sean biomateriales como tal.

Todo se inició un 28 de julio de 1996, cuando dos hombres estaban disfrutando de una carrera en las aguas del ‘Río Columbia’, en ‘Kennewick’. En ese momento y lugar, junto a la orilla, vieron un cráneo humano. Informaron de ello a la policía que logró rescatar del río prácticamente el esqueleto en su totalidad. Al principio se pensó que eran los restos de un hombre asesinado –hasta 380 huesos y fragmentos-, pero con los análisis forenses se descubrió que se trataba de alguien con mucha más antigüedad. Tanta antigüedad como más de nueve mil años, lo que lo convirtió en el esqueleto más antiguo y completo encontrado en Norteamérica hasta el momento.[10]

Esta persona, al que se le dio el nombre de “El Hombre de Kennewick” fue analizado como una persona alta, sana y activa; y que se desplazaba con la punta de una flecha incrustada en su cadera. La herida había cicatrizado y el hecho de tener la flecha en su cuerpo, no parecía impedirle realizar su actividad. Este “implante no deseado” nos demuestra la capacidad que tiene un cuerpo humano para aceptar materiales externos. En este caso, la punta de la flecha no tiene ninguna cualidad de los biomateriales actuales, pero muestra cómo un material externo al cuerpo humano puede ser bien tolerado por él.[2]



*Figura 4: Primer examen paleontológico de “El Hombre de Kennewick” [10]*

### 1.3 Tipos de biomateriales

Con el tiempo, gracias a los avances de la ciencia, de la medicina y de la ingeniería de materiales, se ha agudizado cada vez más el desarrollo de nuevos biomateriales, cada uno con características fisicoquímicas diferentes, que los hacen útiles para propósitos muy particulares.[1]

Existen cantidad de posibilidades de clasificación de los biomateriales:

- Según su origen:
  - Natural, como, por ejemplo, lana, seda o colágeno.
  - Sintético, comúnmente denominados como materiales biomédicos.
  
- En función de la respuesta del propio organismo:
  - Inertes
  - Bioactivos
  - Reimplantados
  - Biodegradables
  - No degradables

La clasificación más comúnmente aceptada para los diferentes tipos de biomateriales es la que existe dentro de los sintéticos y según su naturaleza. [8]

Se agrupan en tres tipos básicos: metales, cerámicos y polímeros. Esta clasificación se basa, principalmente, en la composición química y enlace, es decir, en las estructuras a nivel atómico y reticular.

Además, existe un cuarto tipo de material: los compuestos. Estos materiales son principalmente combinaciones físicas de dos o más de las tres clases de materiales básicos antes mencionadas. [11]

### 1.3.1 Biomateriales metálicos

Se trata de biomateriales formados por uno o más elementos metálicos como pueden ser los del grupo del hierro (Fe), níquel (Ni), aluminio (Al), cobre (Cu), zinc (Zn) y titanio (Ti), a veces, combinados con cantidades mínimas de otros elementos no metálicos como el carbono (C), el nitrógeno (N) y el oxígeno (O).

En los biomateriales metálicos o en sus aleaciones los átomos están muy estructurados, aliados entre sí debido a fuerzas electrostáticas atractivas entre los iones metálicos cargados positivamente y las nubes electrónicas cargadas negativamente, y los electrones libres funcionarían a modo de elemento de unión, como un “pegamento”.

Debido a esto, dichos biomateriales se caracterizan principalmente por tener buena conductividad tanto del calor como de la electricidad, además de por su dureza y ductilidad.[1]

Por el contrario, unidos iónicamente y covalentemente estos materiales suelen ser aislantes eléctricos y térmicos, debido a la ausencia de grandes números de electrones libres.[11]

Sin embargo, sufren problemas de corrosión cuando se exponen a humedad, agua salada, tierra y tejidos vivos, debido a que los iones metálicos actúan impulsivamente con el oxígeno, el hidrógeno y las sales para formar óxidos metálicos. Debido a este motivo, su durabilidad y uso dependen de su resistencia a la corrosión.[1]

Entre las aplicaciones de los biomateriales metálicos podemos encontrar: prótesis, válvulas cardiacas, instrumentación quirúrgica, aplicaciones dentales.[17]

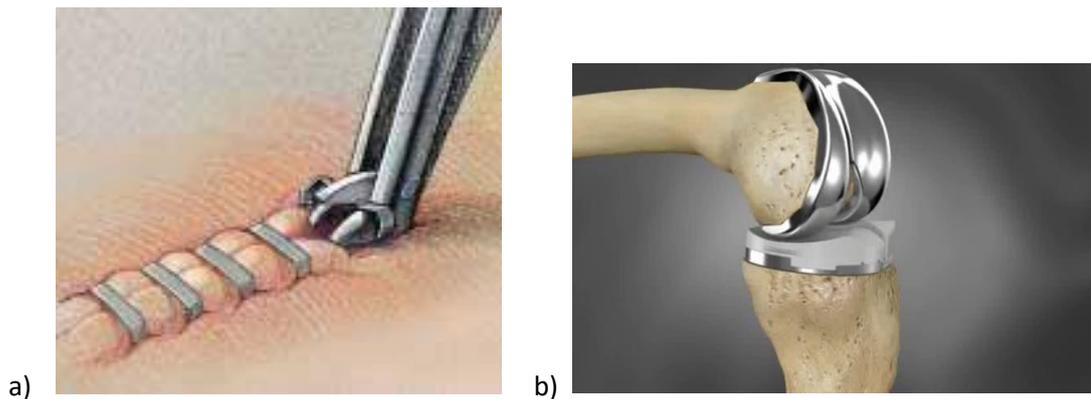


Figura 5: (a) Alambres para sutura (b) Implante para rodilla [14]

### 1.3.2 Biomateriales poliméricos

Se trata de biomateriales, naturales o sintéticos, orgánicos o inorgánicos, que están compuestos por muchas unidades que se repiten de una molécula y puede que sean los que se utilizan más comúnmente en aspectos médicos.

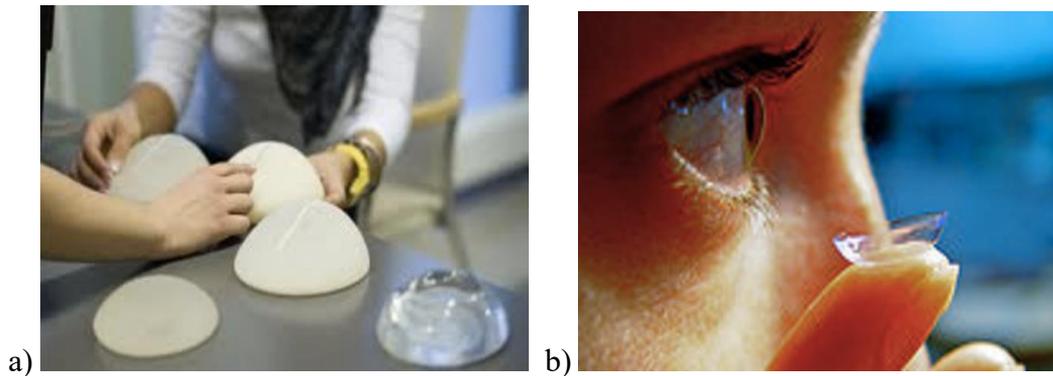
Algunos ejemplos pueden ser el nylon, el polietileno, el policarbonato, el policloruro de vinilo (PVC), el poliestireno y la silicona.

Por lo general son sustancias poco reactivas en multitud de situaciones: poseen una conductividad eléctrica pobre y no son magnéticos. Se diferencian de los biomateriales metálicos en bastantes características, por ejemplo, en su flexibilidad y suavidad, por lo que pueden tener diferentes formas.[1]

Juegan papeles omnipresentes en la vida cotidiana, desde los de los conocidos plásticos sintéticos, cauchos y resinas utilizadas en el trabajo diario y en la vida familiar, hasta los polímeros biológicos naturales fundamentales para la estructura y función biológica.[8]

No obstante, a temperaturas relativamente elevadas, estos materiales tienden a ablandarse y/o descomponerse o degradarse, por lo que este aspecto es considerado en el momento de emplearlos para distintos fines.

Algunas de sus aplicaciones son: parches de absorción de fármacos, suturas quirúrgicas, suturas no absorbibles, suturas absorbibles, prótesis de brazo. [17]



*Figura 6: (a) Prótesis de silicona (b) Lentes de contacto [15]*

### 1.3.3 Biomateriales cerámicos

Son biomateriales principalmente inorgánicos, formados mediante elementos metálicos y no metálicos como óxidos, nitruros, carburos, sales, etc. Suelen presentar una estructura parcial o completamente cristalina, pero, por el contrario, pueden ser completamente amorfos también.[1] Ciertos elementos, como el carbono o el silicio también se consideran cerámicos. [11]

Estos materiales por lo general, son aislantes térmicos y eléctricos, debido a que no es frecuente que tengan un gran número de electrones conductores. Además, son inertes y con mayor resistencia a la corrosión que los metales. Por el contrario, suelen ser propensos a la degradación bajo condiciones particulares. Por lo general, son muy rígidos y duros, aunque ampliamente más frágiles o quebradizos que los metales.

Las principales aplicaciones médicas de las cerámicas incluyen lentes correctivos, implantes dentales, parte de las prótesis de reemplazo de cadera, andamio cerámico para huesos, entre otros. [1]



*Figura 7: Prótesis dental de zirconio [15]*

#### 1.3.4 Biomateriales compuestos

Se trata de biomateriales formados por dos o más materiales de los otros tipos anteriormente mencionados: metales, cerámicas y polímeros. Presentan una mezcla de propiedades y características, como consecuencia de la combinación de biomateriales, que nunca tendría cada uno por separado.[1]

Los empastes dentales blancos y las pastas/cementos para huesos artificiales son aplicaciones médicas típicas de los implantes sintéticos compuestos.

También hay algunos compuestos naturales, como la madera y hueso. El hueso es un composite reforzado con cerámica a base de polímeros, donde la molécula de proteína de colágeno es el polímero, y la hidroxiapatita de fosfato de calcio, es la cerámica. [11]

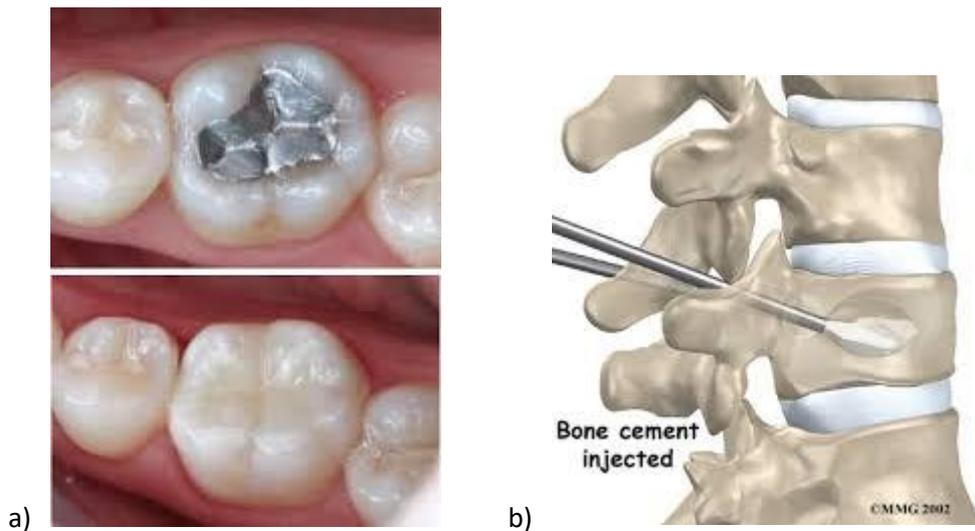


Figura 8: (a) Relleno metálico tradicional vs relleno de biomaterial compuesto blanco  
(b) Cemento óseo para tratar columna vertebral enferma [11]

## 2. Propiedades de los biomateriales

Los biomateriales tienen un papel crucial en el ámbito biomédico al ser diseñados para interactuar de manera segura y eficaz con sistemas biológicos. Estas sustancias, ya sean de origen natural o sintético, se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde implantes médicos hasta dispositivos para ingeniería de tejidos. La comprensión y manipulación de las propiedades de los biomateriales son fundamentales para lograr un rendimiento óptimo en aplicaciones específicas.[52]

Cómo bien dice la definición de biomaterial, que explico en el punto 1.1, un biomaterial es “cualquier sustancia o combinación de sustancias, naturales o sintéticas, que pueden ser empleadas en un sistema biológico por un tiempo determinado y con una función particular”. Y su objetivo será “entrar en contacto con un sistema biológico por lo que debe poseer unas propiedades características tanto mecánicas como biológicas”.

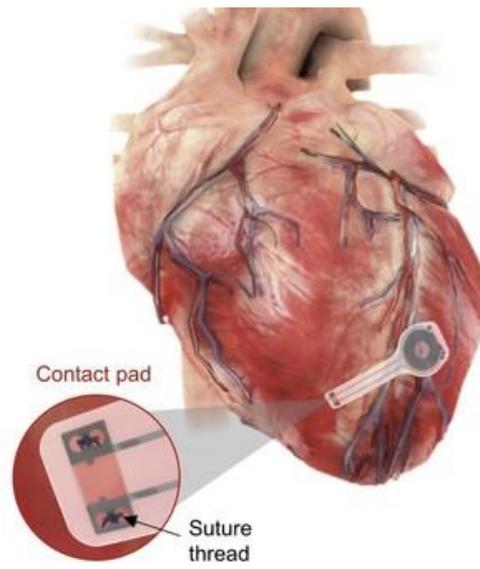
Estas características fundamentales se dividen en físicas, mecánicas y biológicas, pero estas son las fundamentales:

- **Biocompatibilidad:**

A causa de las cualidades del sistema inmunológico cuando se añade un cuerpo externo en el organismo éste suele rechazarlo o, a veces, atacarlo, provocando dolores, inflamaciones, las cuales, suelen ocasionar la retirada de este material. Debido a esta razón, se tiene que asegurar la biocompatibilidad previamente a decidir realizar la incorporación del material, e, incluso así, esperar algo de tiempo tras la operación para que el cuerpo externo no provoque ninguna consecuencia perjudicial en el organismo. La biocompatibilidad no se tiene o no se tiene, existen índices que nos indican las ventajas o desventajas de ese material, para poder emplearse como biomaterial en un ser vivo, considerando también la labor a realizar.[2]

- **Biodegradabilidad:**

Una cualidad importante de la mayoría de biomateriales es su biodegradabilidad. Cuanta más biodegradabilidad; más facilidad para descomponerse. Por ejemplo, en la ingeniería de tejidos, donde, debido a esta cualidad, es posible introducir un material que se comporte como reemplazo por un tiempo de un tejido dañado, mientras éste se recupera. Con el tiempo, la masa de este material irá desapareciendo por la acción de las células del organismo, metabolismo, y por mecanismos físico-químicos, como la hidrólisis, de manera regulada hasta que desaparece por completo en un tiempo determinado.[2] Si hablamos de implantes, la biodegradabilidad es fundamental, pues evita una segunda intervención para sacar el implante.[8]



*Figura 9: Marcapasos biodegradable que se disuelve en el cuerpo una vez el corazón ya late correctamente [22]*

- **Estabilidad Química:**

Los biomateriales deben mantener sus propiedades químicas y mecánicas en el entorno biológico durante el tiempo que dure su función. La degradación excesiva o la pérdida de propiedades pueden comprometer la eficacia y la seguridad de los biomateriales.

La estabilidad química se refiere a la propiedad que da a conocer si un elemento determinado o compuesto químico reacciona repentinamente o a descomponerse en cuanto se topa con otro elemento, o justo lo contrario, si requiere una acción externa para que dicha reacción ocurra.[21]

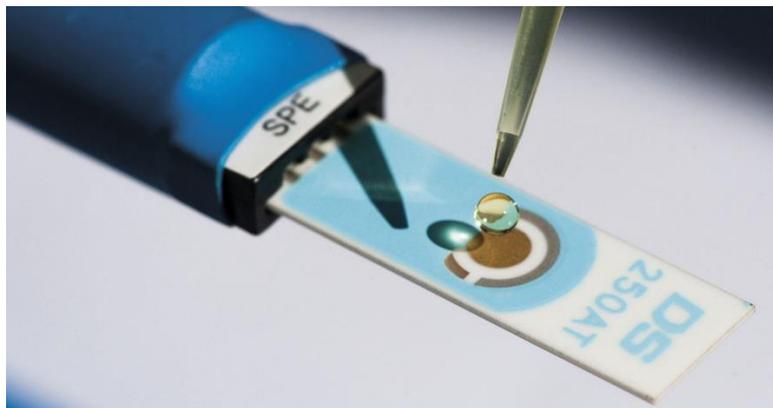
- **Conductividad:**

La conductividad eléctrica es una propiedad relevante en biomateriales conductores utilizados en aplicaciones como la estimulación eléctrica de tejidos y dispositivos electrónicos biomédicos. Permite la transmisión de señales eléctricas a través del material y la interacción con células o tejidos.

La conductividad en biomateriales es esencial en aplicaciones biomédicas y biotecnológicas, ya que permite la transmisión de señales eléctricas en el cuerpo y la

interacción efectiva entre dispositivos electrónicos y sistemas biológicos. Esto es fundamental para la estimulación eléctrica en terapias de rehabilitación, como marcapasos cardíacos y estimulación cerebral profunda, así como en la ingeniería de tejidos para promover el crecimiento de tejidos como el músculo cardíaco y el nervioso. Además, facilita la detección de señales fisiológicas y el control preciso de la liberación de medicamentos, lo que es vital en aplicaciones de diagnóstico y tratamiento médico.[23]

Ejemplos incluyen polímeros conductores y nanomateriales como el grafeno, que son conocidos por su alta conductividad.



*Figura 10: Electrodo empleado para la concepción de dispositivos con el objetivo de detectar antígenos y anticuerpos [24]*

- **Compatibilidad Mecánica:**

El biomaterial debe cumplir ciertas propiedades metálicas de acuerdo con su utilidad, y tiempo de vida. Las propiedades que más se tienen en cuenta pueden ser la flexibilidad, la dureza y la resistencia a la fatiga.

El material debe tener la densidad, peso y diseño adecuados para lo que se requiere de él.

Un buen ejemplo de esto, si nos referimos a cualidades mecánicas, dependerá del tipo de dispositivo a elaborar. Una prótesis de cadera tiene que ser fuerte y rígida; un material para sustituir un tendón tiene que ser fuerte y flexible; una válvula de corazón tiene que ser flexible y dura; una membrana de diálisis tiene que ser fuerte y flexible; un sustituto de cartílago de articulaciones tiene que ser suave y elastomérico. [20]

- **Elasticidad y Flexibilidad:**

La elasticidad y la flexibilidad son características muy importantes en aplicaciones médicas relacionadas con los diferentes tejidos del organismo. Los biomateriales deben ser conformables y capaces de adaptarse a los movimientos y morfología de los tejidos próximos.



*Figura 11: Prótesis mamarias [25]*

### **3. Biomateriales conductores**

#### **3.1 Polímeros conductores**

Los polímeros conductores, a diferencia de los polímeros tradicionales, que tienen la capacidad de ser aislantes eléctricos, estos tienen la propiedad de transportar la corriente eléctrica, debido a razones como, la existencia de insaturaciones o heteroátomos en sus estructuras, esta cualidad aporta electrones de no enlace, y estos son cómodamente deslocalizables a lo largo de la cadena polimérica, esto lo podemos ver en polímeros como

el polipirrol (PPy), politiofeno (PTh), polianilina (PANI) y el poliacetileno (PA). Entre las propiedades más conocidas de los polímeros conductores, destacamos su fácil elaboración, la mayoría de veces son económicos, si los comparamos con otro tipo de materiales, y gran parte de ellos son considerados materiales inteligentes o biocompatibles. El uso dado a este tipo de materiales es amplio, se emplean en diversos campos de la ciencia como son la electrónica, la química ambiental, la medicina, entre otras.[26]

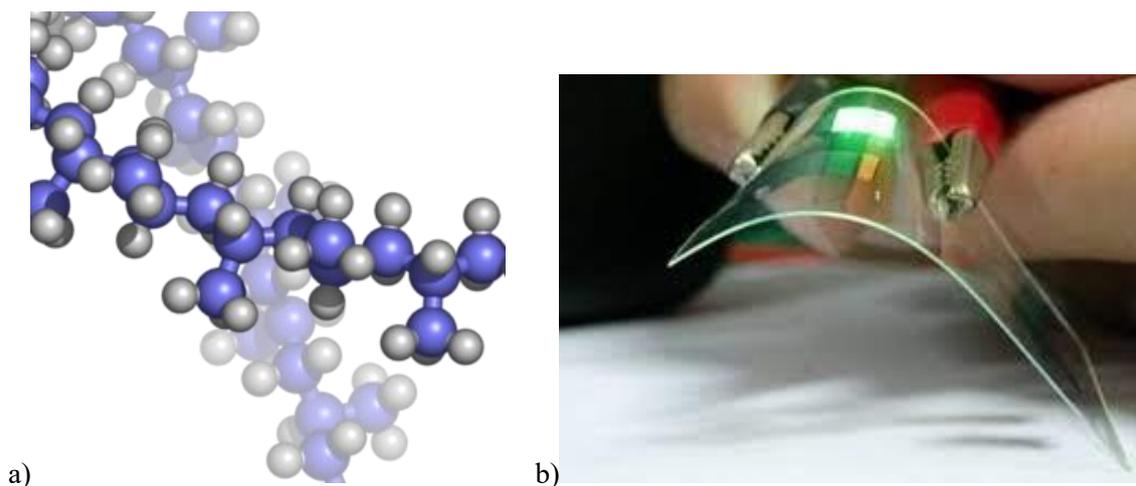


Figura 12: a) Estructura de un polímero [24]; b) Polímero conductor [26]

Los polímeros conductores se pueden sintetizar química o electroquímicamente, y cada una tiene ventajas y desventajas, como se resume en la Tabla 1.

Los diferentes métodos de síntesis química incluyen polimerización por condensación (es decir, polimerización por crecimiento en etapas) o polimerización por adición (es decir, polimerización por crecimiento en cadena). La polimerización por condensación se produce mediante la pérdida de moléculas pequeñas, como el ácido clorhídrico o el agua. Las polimerizaciones radicalarias, catiónicas y aniónicas son ejemplos de polimerización por adición, que se distinguen por el respectivo estado intermedio radical, catiónico o aniónico del extremo vivo o reactivo de la cadena polimérica durante la síntesis. La síntesis química no solo proporciona muchas rutas posibles diferentes para sintetizar una variedad de polímeros conductores, sino que también permite ampliar estos materiales, lo que actualmente no es posible con la síntesis electroquímica.[28]

*Tabla 1: Comparación de polimerización CP química y electroquímica.[28]*

Enfoque de polimerización	Ventajas	Desventajas
Polimerización química	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es posible una producción a mayor escala</li> <li>• Es posible la modificación poscovalente de la CP masiva</li> <li>• Más opciones para modificar la columna vertebral de CP de forma covalente</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No se pueden hacer películas delgadas</li> <li>• Síntesis más complicada</li> </ul>
Polimerización electroquímica	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Es posible la síntesis de películas delgadas</li> <li>• Facilidad de síntesis</li> <li>• Atrapamiento de moléculas en CP.</li> <li>• El dopaje es simultáneo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Difícil quitar la película de la superficie del electrodo.</li> <li>• La modificación poscovalente de la CP masiva es difícil</li> </ul>

Los polímeros conductores poseen la mezcla de las propiedades eléctricas de los metales y los beneficios de los plásticos que tanta expectación crearon en los años cuarenta. Cuando se demostró la posibilidad de conducir la electricidad de los polímeros la idea se difundió con gran velocidad.[27]

Los polímeros conductores pueden conducir cargas gracias a la facilidad con la que los electrones saltan dentro y entre las cadenas del polímero. En realidad, la conductividad surge de una combinación de varios factores. Los polímeros poseen una columna vertebral conjugada, lo que significa que está formada por una serie de enlaces simples y dobles alternos. Tanto los enlaces simples como los dobles contienen un enlace  $\sigma$

químicamente fuerte, mientras que los dobles contienen además un enlace  $\pi$  menos fuertemente localizado. Los orbitales  $p$  en la serie de enlaces  $\pi$  se superponen entre sí, lo que permite que los electrones se deslocalicen más fácilmente (es decir, no pertenecen a un solo átomo, sino a un grupo de átomos) y se mueven con libertad entre los átomos. La clave final para la conductividad de estos polímeros está en el dopante.[56]

Dopaje se conoce como el proceso de oxidar (dopaje p) o reducir (dopaje n) un polímero neutro y proporcionar un contraanión o catión (es decir, dopante), respectivamente. Tras el dopaje, se produce un sistema CP con una carga neta de cero debido a la estrecha asociación de los contraiones con la columna vertebral cargada de CP. Este proceso introduce portadores de carga, en forma de polarones cargados (es decir, iones radicales) o bipolarones (es decir, dicaciones o dianiones), en el polímero. La atracción de los electrones de una unidad repetida hacia los núcleos de las unidades vecinas produce movilidad de carga a lo largo de las cadenas y entre cadenas, lo que a menudo se denomina "salto de electrones". El movimiento ordenado de estos portadores de carga a lo largo de la columna vertebral del CP conjugado produce conductividad eléctrica.[28]

La mayor limitación de los polímeros conductores para aplicaciones *in vivo* es su incapacidad inherente para degradarse, lo que puede inducir inflamación crónica y requerir extirpación quirúrgica. Para abordar los inconvenientes de los polímeros conductores existentes, se han llevado a cabo intentos de mezclarlos con polímeros biodegradables adecuados. Ya hubo intentos de sintetizar un polímero conductor biodegradable a partir de oligómeros conductores de pirrol y tiofeno que estaban conectados entre sí mediante enlaces éster degradables. Los enlaces éster pudieron escindirse mediante enzimas *in vivo* y el polímero resultante tenía las propiedades únicas de ser conductor de electricidad y biodegradable. Así que, la mayor limitación de estos polímeros tiene solución.

Dentro de los polímeros conductores, existen cuatro que son los más utilizados. En la siguiente imagen se pueden ver las estructuras del poliacetileno (PA), del politiofeno (PTf), de la polianilina (PANI) y del polipirrol (PPy). Son los polímeros conductores más simples y comúnmente utilizados.

A partir de ellos se han ido sintetizando otros polímeros más complejos.

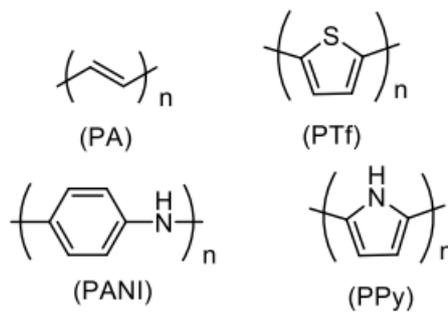


Figura 13: Estructuras químicas de los polímeros conductores más importantes.[31]

El desarrollo de polímeros orgánicos conductores fue globalmente conocido con el logro del Premio Nobel de Química en el año 2000 a Alan J. Heeger, Alan MacDiarmid y Hideki Shirakawa "por el descubrimiento y desarrollo de polímeros conductores".

Este premio reconoció la importancia de los polímeros conductores, ya que sus características han permitido encontrarles infinidad de aplicaciones (sobre todo biomédicas) muy beneficiosas para todos.

### 3.1.1 Polipirrol

Se trata del polímero más estudiado y es conocido por ser un biomaterial inteligente, el pirrol es un compuesto heterocíclico que presenta un átomo de nitrógeno en su estructura, una vez que es oxidado se obtiene el PPy, en gran parte de los casos la oxidación se produce por la electropolimerización en un electrodo mediante la acción de un potencial externo originando películas depositadas sobre el electrodo de trabajo, o bien por polimerización química en solución a través del empleo de un oxidante químico generando polvo de PPy. [26]

Se ha demostrado que este compuesto puede ser flexible y dúctil, aparte tiene cualidades eléctricas muy buenas y una estupenda capacidad 'REDOX'. Es por esto por lo que ha demostrado gran potencial en aplicaciones biomédicas y en la elaboración de electrodos super capacitores y de sensores. [31]

El PPy, se considera como un biomaterial inteligente, esto son los biomateriales utilizados para tratar problemas biológicos, estos biomateriales producen un soporte funcional o estructural, pero se mantienen relativamente inertes en el organismo, algunos ejemplos de materiales inteligentes pueden ser: los empastes dentales, las caderas artificiales y los implantes ortopédicos [26]

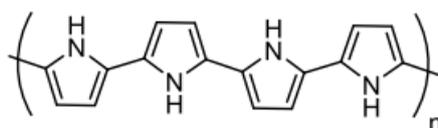


Figura 14: Estructuras base del polipirrol.[31]

A día de hoy este biomaterial se utiliza para muchas aplicaciones tecnológicas como microelectrónica, óptica, blindajes electromagnéticos o iónicos, conductores electrónicos, películas calefactoras o emisores de luz. Si hablamos de sus características electro químicas, tenemos que comentar aplicaciones interesantes como la producción de músculos artificiales. Un músculo puede ser considerado como un dispositivo electro químico mecánico: el cerebro manda un pulso eléctrico por del sistema nervioso provocando reacciones químicas y desencadenando una variación de una longitud, consiguiendo como resultado un movimiento macroscópico.

### 3.1.2 Poliacetileno

Se le conoce así por su construcción conceptual a partir de la polimerización del acetileno.[33] Este compuesto es muy importante, debido a que es el polímero conductor más simple [26], y su descubrimiento y su alta conductividad tras el dopaje fue importante para lanzar el área de los polímeros conductores orgánicos,[31] este biomaterial es muy empleado para la creación de baterías recargables y de celdas de combustible para vehículos eléctricos.[26]

El PA es un polímero conductor que tiene la capacidad de ser sintetizado a través de monómeros de naturales, y, de la misma forma que en los casos mencionados antes, es un biomaterial, ya que es compatible con el organismo, y se ha mostrado su éxito como antitumoral, sumado a que su síntesis es sencilla y puede producirse en pocos pasos.[26]

Los compuestos llamados poliacetilenos también se pueden encontrar en la naturaleza, aunque en este contexto el término habla de a polinos, compuestos que presentan múltiples grupos acetileno ("poli" significa muchos). [33]

La forma cis del PA se consigue cuando la reacción se produce a bajas temperaturas, pero la forma trans se obtiene cuando las temperaturas superan los 100 °C.[26]

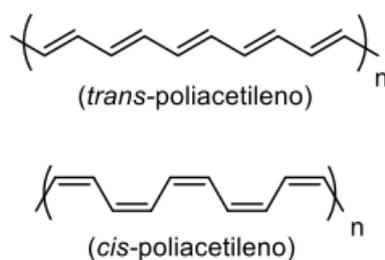


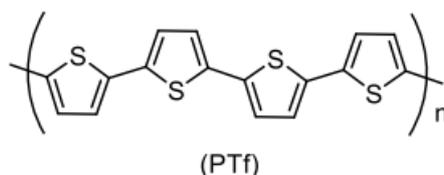
Figura 15: Estructuras origen del trans-poliacetileno y cis-poliacetileno.[31]

### 3.1.3 Politiofeno

El politiofeno (PTh) es un polímero con estructura muy parecida al PPy, se diferencian en que el heteroátomo que encontramos en el monómero, es uno de los polímeros conductores comúnmente más utilizados, se sintetiza a partir de la oxidación de la cadena polimérica, esta oxidación provoca la conducción eléctrica. La conductividad eléctrica en el PTh se obtiene de la deslocalización de electrones a lo largo de la cadena polimérica, es el polímero con mayor conductividad gracias a sus enlaces.[26]

Los PTh se convierten en conductores cuando se oxidan. La conductividad eléctrica se obtiene de la deslocalización de electrones a través de la columna vertebral del polímero. Sin embargo, la conductividad no es la única cualidad importante que se obtiene de la deslocalización de electrones. Las propiedades ópticas de estos materiales reaccionan a los estímulos ambientales, con variaciones en el color dramáticos respondiendo a las modificaciones en el solvente, la temperatura, el potencial aplicado y la unión a otras moléculas. Los cambios tanto en su color como en la conductividad son provocados por el mismo mecanismo, retorciendo el esqueleto del polímero y parando por completo la conjugación, lo que provoca que los polímeros conjugados sean atractivos como sensores que puede dar una gama de respuestas ópticas y electrónicas.[35]

Es un polímero orgánico común, es un sólido rojizo con poca solubilidad en muchos casos. No obstante, al ser trabajado con agentes oxidantes (receptores de electrones), el material toma un tono oscuro y se vuelve conductor de la electricidad. La oxidación se conoce como «dopaje». Se emplea cerca de un equivalente de 0,2 de oxidante para transformar los politiofenos (y otros polímeros conductores) a un estado conductivo óptimo. [34]



*Figura 16: Estructura base del politiofeno.[31]*

El PTh y sus derivados presentan aplicaciones importantes en sensores, celdas fotovoltaicas orgánicas, transistores orgánicos de efecto de campo, diodos orgánicos emisores de luz y en áreas biomédicas. [31]

### 3.1.4 Polianilina

La polianilina (PANI) es de los polímeros conductores con mayor antigüedad.

Es uno de los polímeros conductores más estudiados, se le define también como negro de anilina. Es un polímero de fácil sintetización y de bajo coste, es estable a condiciones ambientales normales y es un buen conductor eléctrico, pero, no todo son ventajas, no presenta una buena compatibilidad biológica, provocado por su baja procesabilidad, la carencia de flexibilidad y la no biodegradabilidad, lo cual provoca una inflamación crónica tras el implantado. Para combatir estas limitaciones, la polianilina se combina con polímeros termoplásticos.[36]

La polianilina (PANI) se consigue con la oxidación química o electroquímica a partir de anilina líquida. Los oxidantes químicos usados son: persulfato de sodio, persulfato de

amonio o peróxido de hidrógeno. Debido a la poca solubilidad del monómero en agua se lo solubiliza en ácido clorhídrico con la obtención de cloruro de anilinio.[37]

La PANI se suele reconocer por tres estructuras principales que dependen de su estado de oxidación. El cambio de color que se asocia a la polianilina en sus diferentes estados de oxidación puede ser utilizado para la configuración de sensores y dispositivos electrocrómicos. Aunque el cambio de color es útil, el mejor procedimiento para la elaboración de un biosensor a partir de polianilina es el que se aprovecha de la ventaja de los cambios que se producen en la conductividad eléctrica entre los diferentes estados de oxidación, o grados de dopaje.[39]

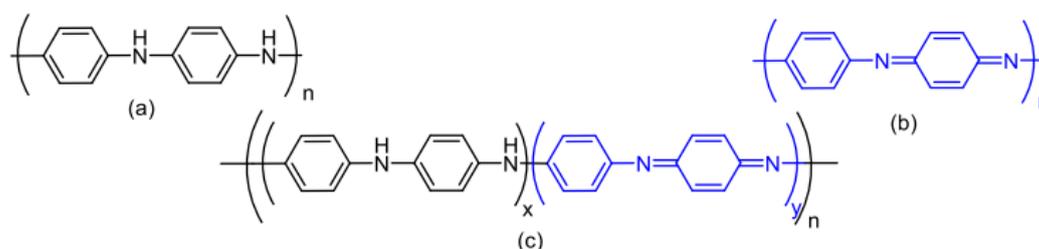


Figura 17: Estructuras origen de las tres estructuras de la PANI: leucoemeraldina (a), pernigranilina (b) y emeraldina (c).[31]

### 3.1.5 Poli(p-fenileno) y poli(p-fenilenvinileno)

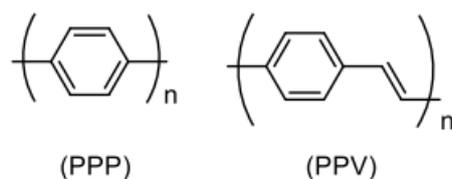
Se trata de otros dos polímeros conductores conocidos, aunque no tanto como los anteriormente mencionados, que no poseen heteroátomos en su estructura inicial. Se utilizan en la elaboración de diodos orgánicos con emisión de luz. El PPP fue el primer caso estudiado de un polímero de tipo no acetilénico que presentó cualidades conductoras tras ser dopado. El PPV es una sustancia diamagnética, con capacidad para manifestar electroluminiscencia y con una baja conductividad eléctrica.[31]

El poli (p - fenileno vinileno) (PPV, o polifenileno vinileno) es un polímero conductor orgánico con una variedad de aplicaciones que van desde la electrónica hasta los revestimientos. El PPV es el único polímero de este grupo que se puede procesar en una película delgada cristalina muy bien estructurada. El PPV y sus derivados son

conductores de electricidad tras el dopaje. Aunque insoluble en agua, sus precursores pueden manipularse en solución acuosa. La pequeña brecha de banda óptica y su fluorescencia amarilla brillante hacen que PPV sea un candidato en aplicaciones como diodos emisores de luz (LED) y dispositivos fotovoltaicos.[40]

El poli (p -fenileno) (PPP) está conformado de unidades repetidas de p - fenileno, que hacen de precursores de un polímero conductor de la familia de polímeros de varilla rígida. La síntesis de PPP ha demostrado ser complejo de realizar, pero se consiguió a través de un exceso de policondensación con el método de acoplamiento de Suzuki.[31]

El PPP es un plástico amorfo de alto rendimiento. La temperatura de transición vítrea es de 215 °C, pero se puede modificar combinándolo junto a poliestireno. A través de esta variación y añadiendo cargas como fibras de vidrio, las cualidades pueden modificarse bastante.[42]



*Figura 18: Estructuras origen del poli(p-fenileno) y poli(p-fenilenvinileno). [31]*

La tabla 2 muestra las principales características (conductividad, estabilidad y procesabilidad) de los polímeros conductores explicado anteriormente.

*Tabla 2: La conductividad, estabilidad y procesabilidad de varios polímeros conductores dopados.[38]*

<b>Polímero</b>	<b>Conductividad (S/cm)</b>	<b>Estabilidad</b>	<b>Procesabilidad</b>
Poliacetileno	$10^3 - 10^5$	Pobre	Limitado
polifenileno	1000	Pobre	Limitado
Poli(fenileno vinileno)	1000	Pobre	Limitado
Poli(sulfuro de fenileno)	100	Pobre	Excelente
polipirroles	100	Bien	Bien
Politiofenos	100	Bien	Excelente
polianilina	10	Bien	Bien

### 3.1.6 Hidrogel de Poliacrilamida

El hidrogel de poliacrilamida es un material polimérico con la capacidad de retener grandes cantidades de agua en su estructura tridimensional. Es un tipo de hidrogel ampliamente utilizado en diversas aplicaciones debido a sus propiedades únicas.

La poliacrilamida es un polímero sintético que se obtiene mediante la polimerización de la acrilamida. Cuando se forma un hidrogel a partir de la poliacrilamida, se crea una red tridimensional en la que las cadenas poliméricas están entrelazadas, formando una estructura porosa capaz de retener grandes cantidades de agua. Puede retener y liberar agua de manera reversible, por lo que puede ser de gran utilidad cuando se necesita la liberación controlada de líquidos.

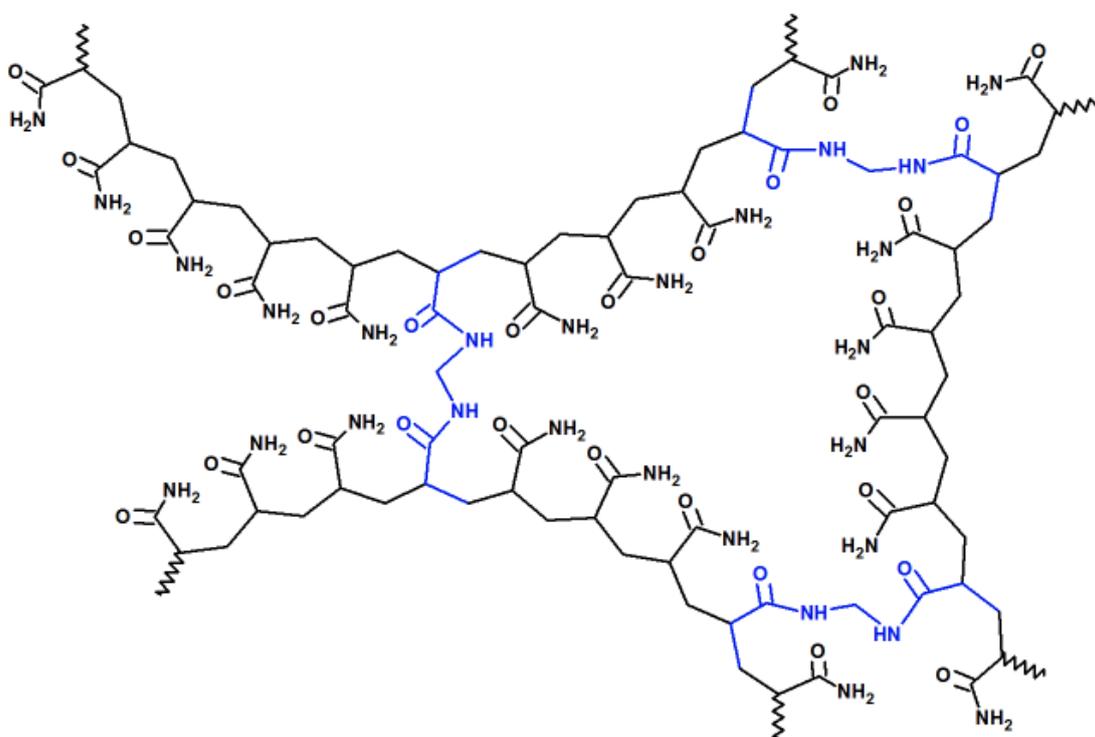


Figura 19. Representación esquemática del hidrogel de poli(acrilamida) [60].

Por otro lado, dependiendo de su formulación y modificación, el hidrogel de poliacrilamida puede ser biocompatible, lo que significa que es compatible con sistemas biológicos. Esto lo hace adecuado para diversas aplicaciones biomédicas como, por ejemplo:

- Ingeniería de Tejidos: El hidrogel de poliacrilamida se utiliza en ingeniería de tejidos como matriz para el cultivo celular y la regeneración de tejidos, debido a su capacidad para mantener las células en un entorno tridimensional similar al tejido natural.
- Liberación Controlada de Medicamentos: Su capacidad para retener y liberar sustancias en respuesta a cambios en el entorno lo hace adecuado para sistemas de liberación controlada de medicamentos.

Además de las aplicaciones biomédicas, el hidrogel de poliacrilamida se ha utilizado en dispositivos electrónicos y como componente en sensores debido a su capacidad para cambiar de forma en respuesta a estímulos ambientales. Puede ser dopado con partículas

conductoras (como nanotubos de carbono) para mejorar su capacidad de conducción eléctrica, haciéndolo útil en aplicaciones que requieren propiedades eléctricas.

En resumen, el hidrogel de poliacrilamida es un material versátil con propiedades únicas que lo hacen valioso en campos como la medicina, la ingeniería de tejidos y la investigación biomédica. Su capacidad para retener agua y adaptarse a diferentes entornos lo convierte en una solución interesante para multitud de aplicaciones.

## 4. Aplicaciones de los biomateriales conductores

### 4.1 Músculos artificiales

Los músculos son partes complejas y muy importantes del cuerpo humano. Sin músculos, la vida en la forma actual no sería posible. Los músculos ayudan en todos los procesos humanos. Respirar, eliminar desechos, comer y moverse, cualquier cosa que haga una persona requiere el uso de músculos. Los músculos pueden dañarse, ser deficiente o sufrir distrofia o atrofia. Por ejemplo, la ptosis es una deficiencia muscular que conduce al síndrome del párpado caído en muchas personas, lo que no puede corregirse completamente quirúrgicamente. Por lo que es necesario poder integrar músculos artificiales con sistemas biológicos y poder utilizar las señales de las neuronas motoras para activarlas.[47]

Los músculos artificiales representan una innovadora área de investigación y desarrollo que busca replicar las funciones de los músculos biológicos mediante la utilización de materiales avanzados, siendo los polímeros conductores un componente clave en esta exploración. Funcionan mediante un principio fundamental: la respuesta electroactiva. Cuando se aplica un potencial eléctrico al polímero conductor, se induce un cambio reversible en su estructura molecular, permitiendo la contracción o expansión controlada del material. Este fenómeno imita la contracción muscular biológica, proporcionando una base para el diseño de dispositivos biomiméticos.

Músculo artificial es una expresión general para una clase de materiales y dispositivos que tienen la capacidad de contraerse, expandirse o rotar de manera reversible a través de un mecanismo gracias a un estímulo externo (puede ser: voltaje, corriente, presión, temperatura, luz, etc.). Las acciones básicas (contracción, expansión y rotación) es

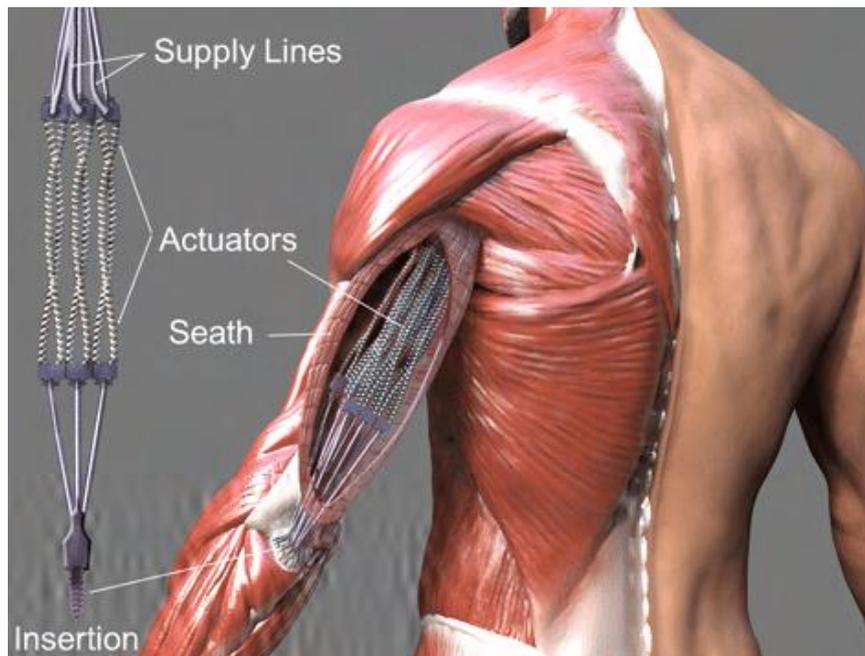
posible combinarlas en un único componente para obtener diferentes de movimientos.[46]

Los músculos artificiales son dispositivos que tratan de imitar a los músculos naturales de los seres humanos y animales ya que tienen la capacidad de contraerse, expandirse o rotar. De esta forma, permiten que diferentes máquinas rígidas posean una mejora de la flexibilidad y la resistencia para poder levantar objetos.

Pueden ser de gran utilidad en la fabricación de dispositivos médicos de pequeño tamaño, robótica y textiles inteligentes que reaccionan a las variaciones de su entorno. Por ejemplo, a estímulos externos como una corriente eléctrica o una variación de la temperatura.[54]

Cómo he mencionado antes, los polímeros conductores son un componente clave para el desarrollo de los músculos artificiales, pero también se pueden emplear otro tipo de materiales que también pueden cumplir los objetivos deseados:

- **Aceros y Aleaciones Metálicas:** Algunos músculos artificiales utilizan aleaciones que cambian de forma al aplicar calor (efecto termomecánico). Estos materiales, como las aleaciones de memoria de forma, son activados térmicamente para lograr la contracción y expansión.
- **Hidrogeles y Materiales Activados Químicamente:** Estos materiales pueden cambiar de volumen en respuesta a cambios químicos, como la absorción de agua. Los hidrogeles son especialmente útiles en aplicaciones biomiméticas debido a su capacidad para imitar la respuesta de los tejidos biológicos.
- **Fibras poliméricas semicristalinas altamente orientadas:** Las fibras de polietileno y nailon, cuando están muy orientadas a lo largo de su longitud, exhiben un comportamiento de expansión térmica anisotrópica. Por ejemplo, el nailon 6,6 (como los utilizados en líneas de pesca e hilos de coser de alto rendimiento) puede contraerse en longitud hasta un 2,5 % mientras se expande en diámetro hasta un 4,5 %. Esta notable propiedad ha permitido la fabricación de actuadores lineales, torsionales, y de flexión a partir de estas fibras poliméricas económicas.[46]



*Figura 20: Integración de actuadores blandos (músculos artificiales cavatappi) en un sistema biológico (cuerpo humano).[51]*

Los músculos artificiales son órganos sensores formados por tejido muscular que cuando son estimulados convierten la energía química en energía mecánica. Entre las características de los músculos naturales predominan las que hablan de su naturaleza fibrilar: flexibilidad y capacidad para adaptar multitud de formas y tamaños según la tarea a cumplir.

Los músculos artificiales que se basan en polímeros conductores se diferencian de los naturales en dos cualidades relacionadas con el tipo de energía utilizada para conseguir energía mecánica y con el tipo de trabajo mecánico obtenido:

- En los músculos artificiales la energía mecánica se obtiene mediante el tratamiento de la energía eléctrica, es decir, la corriente eléctrica provoca la oxidación/reducción de las cadenas de polímero conductor, provocando modificaciones conformacionales que consiguen el movimiento.
- Los músculos artificiales trabajan en expansión y en contracción, al contrario que los naturales, que solo lo hacen cuando se contraen.[48]

#### 4.1.1 Músculos artificiales basados en polímeros conductores

Los polímeros conductores son materiales conductores iónicos y electrónicos que exhiben expansión/contracción volumétrica tras la oxidación/reducción electroquímica en un electrolito. Los polímeros conductores básicos pueden tener monómeros constituyentes de pirrol, tiofeno, anilina, furano, indol, acetileno, azuleno, carbozol, etc., pero sólo unos pocos, como pirrol, anilina y tiofeno y sus derivados, se utilizan a menudo en el diseño de actuadores.[46]

Los polímeros surgieron como una alternativa viable e interesante, y fueron protagonistas en el desarrollo de los músculos artificiales. Entre las características de los polímeros conductores, una de las más estudiadas es el cambio de volumen provocado por las reacciones de oxidación/reducción del material. El cambio reversible de volumen es igual al que ocurre en los músculos naturales en la acción de contracción/relajación. Por lo que se utilizan para el desarrollo de músculos artificiales: motores con capacidad para convertir cambios pequeños en el volumen provocados por la reacción a nivel molecular en movimientos macroscópicos y controlables. Los diseños más típicos son bicapas de polímero conductor junto a cinta adhesiva o tricapas formadas por polímero conductor, cinta y de nuevo polímero conductor. Las variaciones en el volumen que la reacción reversible provoca en el polímero conductor originan un movimiento angular macroscópico y reversible.

Los músculos artificiales fabricados con polímeros conductores se asemejan a los músculos naturales en diversos matices importantes. Un ejemplo de ellos es que trabajan con poco potencial, de 0.1V a 2V, mientras que los músculos naturales lo hacen de 0.06 a 0.15V, que es el potencial del pulso nervioso. Los músculos artificiales trabajan tanto en contracción como en expansión, y los músculos naturales solamente lo hacen en contracción

El primer actuador que recibió el nombre de músculo artificial se basó en un polímero conductor (polipirrol) y fue reportado por Otero y otros colaboradores en 1992, también denominado dispositivo electroquimiomecánico porque implica una reacción electroquímica para la generación de energía mecánica.[52]

Dicho actuador se basó en una bicapa de polipirrol y cinta adhesiva con capacidad para realizar movimientos de hasta 180° en una disolución de LiClO<sub>4</sub>. Otero y sus colaboradores usaron esta bicapa para estudiar el mecanismo de variación del volumen del polipirrol cuando se le estimula electroquímicamente. Las películas de polipirrol fueron electro polimerizadas sobre un electrodo de acero inoxidable en una disolución de acetonitrilo con un 2% de agua, 0,2M de pirrol y 0,1M de LiClO<sub>4</sub>. La

electropolimerización se realizó potencio dinámicamente, es decir, modificando el potencial que actuaba sobre el electrodo de trabajo (-0,32V durante 2s y 0,87V durante 8s frente a un electrodo de referencia Ag/AgCl durante 3600 s) para conseguir películas homogéneas, flexibles y de gran calidad. Se usó una cinta adhesiva comercial para separar la película de polipirrol del electrodo. Estas bicapas tuvieron una longitud de 2 cm por 1,5 cm de ancho, 12 mm de espesor y un peso de 3 mg. Se estudiaron en una disolución acuosa de  $\text{LiClO}_4$ , con un electrodo de acero como contraelectrodo. [48]

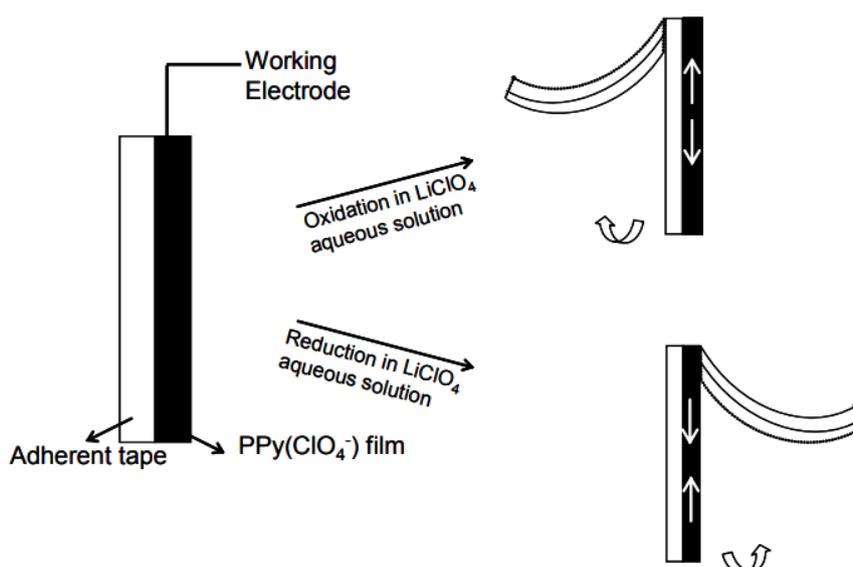


Figura 21: Dispositivo bicapa formado por una película de PPy ( $\text{ClO}_4^-$ ) y una cinta adhesiva. El movimiento se produce por cambios de volumen del PPy durante una reacción redox. Por ejemplo, durante la oxidación de la película de PPy se expande mediante la inserción de aniones de  $\text{ClO}_4^-$  provenientes del electrolito. La película de PPy se expande y la cinta adherente se contrae, por lo que dispositivo se dobla en la cinta adherente. El movimiento opuesto se obtiene cuando la polaridad está cambiada.[51]

#### 4.1.1.1 Mecanismo

Los polímeros conductores exhiben principalmente un comportamiento semiconductor (banda prohibida  $> 2$  eV) cuando no están dopados y un comportamiento conductor cuando están dopados con iones donantes o aceptores. El proceso de dopaje puede realizarse mediante procesos electroquímicos o químicos.

Cuando se someten a potencial en una celda electroquímica, las estructuras poliméricas conductoras pueden donar o aceptar electrones del electrodo metálico (por ejemplo, oro, platino, etc.) en el que están depositadas. Para mantener la neutralidad de la carga en la estructura del polímero conductor, el flujo de iones (aniones o cationes) del electrolito se difunde hacia la estructura del polímero. Esta inserción/desinserción de iones generalmente se correlaciona con la expansión o contracción volumétrica dentro de la estructura. Algunos polímeros conductores (como el polipirrol) pueden estar dopados con p (los electrones abandonan las cadenas del polímero y las cargan positivamente), lo que significa que la intercalación de aniones del electrolito neutraliza la estructura del polímero.

La tensión que producen los actuadores de polímero conductor suele ser del orden de un pequeño porcentaje. Para amplificar esta cepa se proponen los siguientes mecanismos de amplificación:

- Los actuadores de flexión bicapa están hechos de una capa activa (es decir, la capa de polímero conductor) y una capa pasiva que está unida a la capa activa y provoca la flexión durante la expansión/contracción volumétrica de la capa activa.
- Los actuadores de flexión de tres capas tienen una capa pasiva intercalada entre dos capas activas. En esta configuración, ambas capas activas contribuyen al movimiento de flexión ya que una capa actúa como electrodo de trabajo (expandiendo/reduciendo en volumen) y la otra como contraelectrodo (reduciendo/expandiendo en volumen).[46]

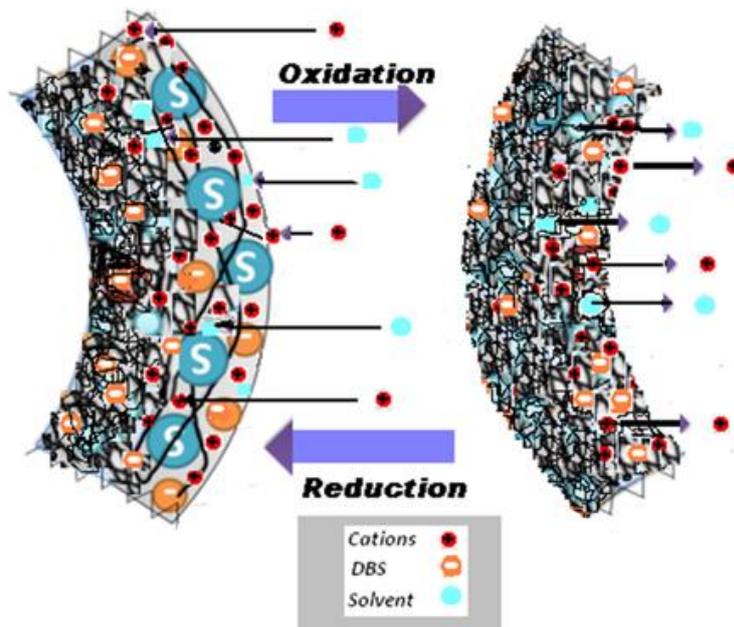


Figura 22: Acciones de oxidación y reducción de un polímero conductor [49]

#### 4.1.1.2 Tipos de polímeros conductores utilizados

Diversos polímeros conductores son empleados en la creación de músculos artificiales. La polianilina, (PANI) reconocida por su fácil síntesis, propiedades eléctricas ajustables y propiedades de cambio de fase ante estímulos eléctricos. El polipirrol (PPy) con su estabilidad electroquímica y la capacidad de experimentar cambios en su estructura molecular en respuesta a la aplicación de un potencial eléctrico. Y el polietileno dioxtiofeno (PEDOT), que destaca por su alta conductividad y flexibilidad. Estos son ejemplos destacados de polímeros conductores comúnmente utilizados en la fabricación de músculos artificiales, debido a que todos ellos cambian su forma ante estímulos eléctricos. La elección del polímero depende de la aplicación específica y las propiedades deseadas.

Los músculos artificiales basados en polímeros conductores exhiben características únicas. Pueden generar fuerzas significativas, adaptarse a diferentes entornos y responder rápidamente a estímulos eléctricos. La optimización de propiedades como la fuerza, la velocidad de respuesta y la durabilidad es fundamental para el rendimiento efectivo de estos dispositivos en diversas aplicaciones.

#### 4.1.1.3 Limitaciones

Los polímeros conductores pueden verse como un elemento de almacenamiento de carga en supercondensadores/baterías que se expanden o encogen durante el proceso de carga/descarga. La inyección de carga en una estructura de polímero conductor es un proceso difuso. Por lo tanto, el espesor de las películas del actuador tiene un gran protagonismo en el tiempo de respuesta de actuación (es decir, velocidad de ciclo o ancho de banda). Reducir el espesor puede mejorar la difusión de iones dentro de la estructura, aumentando así la velocidad del ciclo, pero puede disminuir la fuerza generada. Dado que existe una correlación entre la densidad de carga y la deformación y la tensión, las películas de polímero conductor con mayor capacitancia, que se pueden obtener aumentando la porosidad, pueden producir deformaciones y tensiones mayores. Sin embargo, el potencial de degradación del polímero establece un límite en la concentración máxima de iones en la doble capa.

Además, existen otras limitaciones más comunes relacionadas con los polímeros, en general:

- La degradación con el tiempo debido a la exposición a factores ambientales como la humedad, la luz y la oxidación. Esto puede afectar la durabilidad y estabilidad a largo plazo de los dispositivos basados en estos polímeros.
- La síntesis y procesamiento de polímeros conductores a menudo pueden ser costosos. Esto puede afectar la viabilidad económica de algunos dispositivos, especialmente en aplicaciones de gran escala.
- La biocompatibilidad de algunos polímeros conductores puede ser un problema en aplicaciones biomédicas. Es crucial garantizar que los materiales utilizados sean seguros y no provoquen reacciones adversas en contacto con tejidos biológicos.
- Algunos polímeros conductores pueden tener limitaciones mecánicas, como baja resistencia mecánica o fragilidad, lo que puede afectar su aplicación en dispositivos que requieren una resistencia y flexibilidad significativas.

#### 4.1.1.4 Aplicaciones

Las características únicas del polímero lo hacen perfecto para la formación de dispositivos biomédicos avanzados y precisos. Prevén que puedan ayudar en variedad de áreas en el futuro, con mayor protagonismo en el área de los instrumentos ópticos y en la robótica flexible.

La combinación de una gran capacidad de deformación, un bajo campo de conducción y bajo coste, genera nuevas oportunidades de mejorar. Cuanto más eficientes sean los músculos artificiales, trabajos más precisos se van a poder realizar.[55]

Cuando sale a la luz un descubrimiento tecnológico importante, se le da más importancia cuando tiene aplicaciones directas sobre campos en los que existen pocas ayudas. En el caso de la robótica es importante que se pueda hablar de ayudas en labores de rescate, o en el tratamiento de pacientes.

Las principales utilidades de los músculos artificiales son:

- Creación de máquinas biométricas (robots, actuadores industriales, exoesqueletos con motor...).
- Entretenimiento.
- Medicina.
- Robótica.
- Ropa.
- Industria aeroespacial y automotriz.[54]



*Figura 23: Los músculos artificiales tienen la capacidad de revolucionar la biomecánica y la robótica. Los músculos artificiales conseguirán el desarrollo de robots más flexibles y con capacidad para realizar trabajos más complejos.[63]*

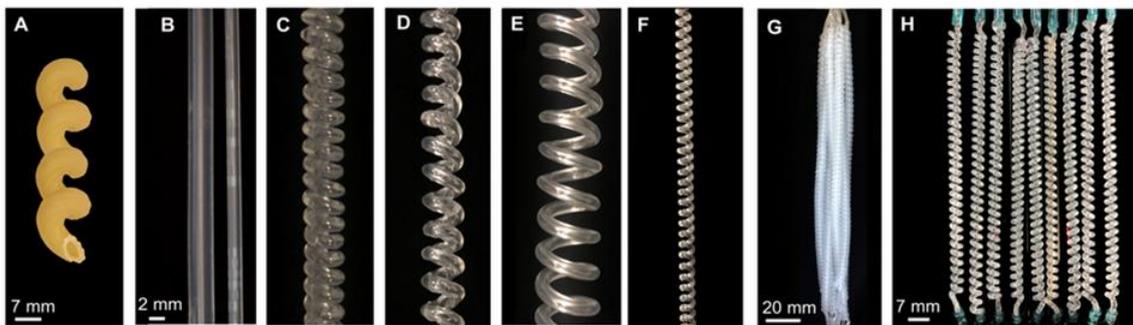
Además, la combinación de dos de ellas, robótica y medicina, nos permite obtener beneficios concretos que se explican a continuación:

- Establecer este tipo de sistemas haría mucho más fácil las labores de atención a personas dependientes. Tener robots de este tipo, con un control total sobre la presión que tienen que ejercer y con la capacidad de toma de decisiones correctas ayudaría bastante en los trabajos con este perfil de pacientes, sobre todo a nivel físico.
- Además, contar con robots con músculos artificiales en quirófano tendría gran protagonismo en las operaciones a distancia, ya que serían más fiables. Este tipo de tecnología consigue movimientos más naturales por parte del brazo robótico. Un médico con unas gafas de realidad virtual y un robot con músculos artificiales que realizase con exactitud sus movimientos tendría la capacidad de realizar cualquier tipo de operación en cualquier parte del mundo, aunque se encuentren en puntos opuestos del mundo.[54]

Estos dos beneficios de los músculos artificiales logrados a partir de polímeros demuestran que los principales beneficios de estos, los podemos encontrar y aprovechar en el campo de la robótica y de la medicina.

#### 4.1.2 Músculos artificiales Cavatappi

Se denominan músculos artificiales "Cavatappi" debido a su parecido con la pasta italiana. Los músculos artificiales de Cavatappi se basan en actuadores de poliamida termoplástica (TPA), que fueron bastante revolucionarios cuando aparecieron por primera vez porque eran potentes, livianos y baratos. Pueden contraerse más del 50% de su longitud inicial y exhiben eficiencias contráctiles mecánicas cercanas al 45%. También se ha demostrado que generan un trabajo y una potencia específicos máximos de 0,38 kilojulios por kilogramo y 1,42 kilovatios por kilogramo, respectivamente. Dada la fuente de activación hidráulica o neumática, estos dispositivos tienen el potencial de superar sustancialmente tecnologías de actuación activadas térmicamente similares en cuanto a ancho de banda de actuación, eficiencia, modelado y controlabilidad, e implementación práctica.[53]



*Figura 24: Pasta Cavatappi (A) y los actuadores desarrollados (C-H) a partir de tubos de polímero estirados rectos (B) [53]*

La desventaja principal es que son muy ineficientes (aproximadamente dos por ciento) y lentos para actuar porque funcionan térmicamente, y la temperatura suele ser un factor lento. Para cavatappi, se han solucionado estas deficiencias girando y enrollando tubos que utilizan fluido presurizado para actuar, lo que hace que sea más probable que estos dispositivos sean adoptados e implementados en aplicaciones bioinspiradas. Estos dispositivos responden tan rápido como el fluido puede ingresar a los actuadores. Sin

embargo, la ventaja significativa es su eficiencia. Se ha demostrado una eficiencia contráctil del actuador de hasta aproximadamente el 45 % y una eficiencia total del sistema del 21 %, que es un número elevado en la actuación suave.[53]

## 4.2 Biosensores

Un biosensor es un dispositivo empleado con el fin de detectar y/o medir una sustancia o parámetro, y presenta la propiedad principal de incorporar un agente biológico que trabaja de agente de reconocimiento del analito, o, lo que es lo mismo, la sustancia que deseamos detectar y/o medir, como en el caso de la glucosa. Los sensores y biosensores están compuestos por dos partes: un detector que es la parte que interactúa con el analito o la variable que se quiere medir y un transductor que convierte la señal del detector en una señal analítica sencilla de comprender, comúnmente se trata de señal eléctrica.[64]

Diversas enfermedades producen variaciones en analitos, en variables físicas (temperatura, pH) o tienen biomarcadores incorporados. Un ejemplo de ello es la diabetes, que genera una variación en el nivel de glucosa, el cáncer de próstata presenta un biomarcador, el PSA, hasta el estrés genera cambios en una hormona. Un biosensor tiene la capacidad de detectar estas variaciones y convertirlas en información, o más bien en señales eléctricas que luego deben medirse, donde los polímeros son un elemento fundamental.[58]

Un biosensor común consta de los siguientes componentes para llevar a cabo su función correctamente:

- **Analito** : Sustancia principal que necesita detección. Por ejemplo, la glucosa es un "analito" en un biosensor diseñado para detectar glucosa.
- **Biorreceptor** : una molécula cuya función es reconocer con precisión el analito. Las enzimas, las células, los aptámeros, el ácido desoxirribonucleico (ADN) y los anticuerpos son ejemplos de biorreceptores. El proceso de producción de señales (de luz, calor, pH, cambio de carga o masa, etc.) tras la interacción del biorreceptor con el analito se conoce como biorreconocimiento.
- **Transductor** : El transductor es la parte cuya misión es transformar un tipo de energía en otra. En un biosensor, el trabajo del transductor es transformar la

sustancia de bioreconocimiento en una señal medible. Dicho trabajo de transformación de energía se define como señalización. Mayormente, los transductores producen señales ópticas o eléctricas que normalmente son proporcionales a la cantidad de interacciones analito-biorreceptor.

- **Electrónica** : Es la parte de un biosensor que trabaja con la señal transducida y la muestra de una forma entendible. Se trata de un complejo circuito electrónico que realiza el acondicionamiento de señales, como la amplificación y conversión de señales de forma analógica a digital. Después de esto, las señales procesadas se cuentan según la unidad de medida del biosensor.
- **Pantalla** : La pantalla consta de un sistema de interpretación del usuario como la pantalla de cristal líquido de un ordenador o un teléfono móvil que muestra valores o formas comprensibles por cualquier persona. Esta parte normalmente consiste en una mezcla de hardware y software que produce los resultados del biosensor de una forma sencilla de utilizar. La señal de salida en la pantalla puede ser numérica, gráfica o una simple imagen, según los requiera la persona que lo debe interpretar.[82]

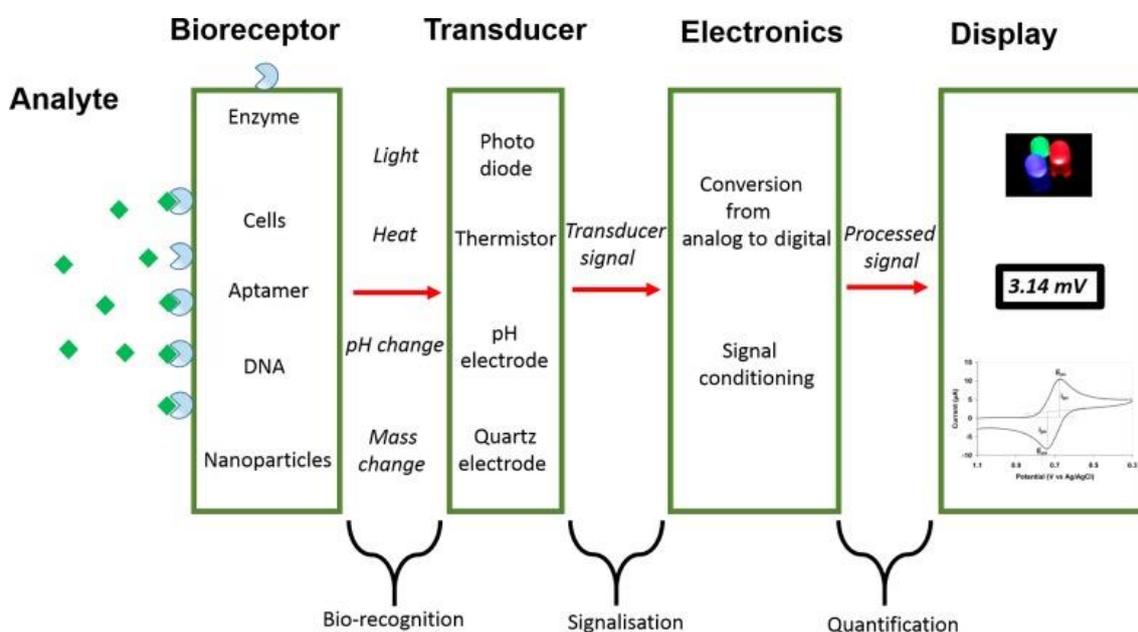


Figura 25: Esquema típico de un biosensor [70].

Los biosensores adolecen de diversos inconvenientes:

- Compatibilidad del biosensor con el entorno donde se quiere trabajar, comúnmente en aplicaciones en vivo.
- Desarrollo de la técnica de inmovilización del componente biológico correcta que permita lograr una superficie estable y bien sujeta al transductor de manera que su actividad no se vea perjudicada por la técnica utilizada o el modo de transducción.
- Regeneración y recalibración de la superficie sensora, que permita un empleo de forma repetitiva.
- Encapsulación del sensor que evite que sufra alteraciones y le permita estar intacto, activo y selectivo en ambientes complicados.

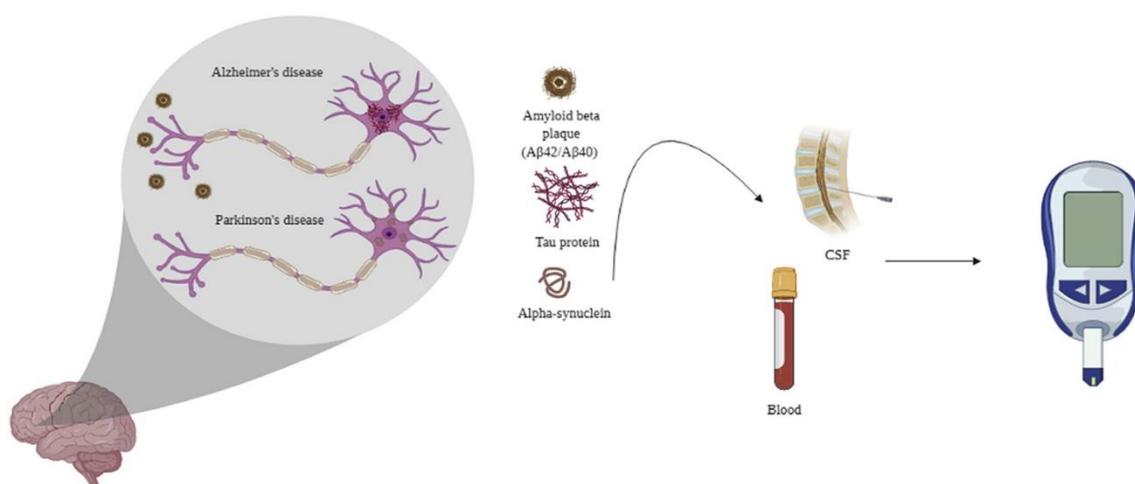
Todos estos problemas que presentan los biosensores pueden encontrar una fácil solución acudiendo a la tecnología de polímeros. Así, los avances en tecnología de membranas han permitido y seguirán haciendo una gran mejora de estos dispositivos a pesar de la complejidad y limitaciones que pueden presentar estos polímeros en una interfase. Estos polímeros deben cumplir algunas normas muy estrictas, como son:

- El polímero debe poseer la permeabilidad y la selectividad deseadas, características que no deben variar con el tiempo.
- La forma de aplicar el polímero en el transductor debe ser reproducible.
- La membrana debe permanecer adherida a la superficie para aumentar la vida útil del sensor.
- El polímero debe ser compatible con el elemento biológico que se pretenda incorporar,
- En el caso de sensores en contacto con sangre, la membrana no sólo debe permanecer limpia en la compleja matriz de proteínas y lípidos, sino que también debe proteger al transductor.

Uno de los desarrollos fundamentales de la química electro analítica trata de la creación de sensores y biosensores compuestos por biomateriales novedosos y los polímeros conductores; tratándose de uno de los materiales más estudiados los últimos años que pueden funcionar para esta fabricación. Esto es viable debido a que los polímeros conductores tienen la capacidad de poseer al mismo tiempo las cualidades de los plásticos (poco peso, resistentes a la corrosión, flexibles, versatilidad de formación), la conductividad metálica y su facilidad para su propia variación (variando las condiciones de la síntesis es posible cambiar las cualidades del polímero, bien como poniéndolo en reacción con otras sustancias). También, los sensores y biosensores electroquímicos,

formados por los polímeros conductores, producen la señal electroquímica, de fácil interpretación. Y en la mayoría de veces, se pueden recuperar estos sensores.[59]

Los polímeros conductores son una clase importante de materiales funcionales que se ha aplicado ampliamente para fabricar biosensores electroquímicos, debido a sus propiedades químicas, eléctricas y estructurales interesantes y ajustables. Los polímeros conductores también pueden diseñarse mediante injertos químicos de grupos funcionales, nanoestructurados o asociados con otros materiales funcionales como nanopartículas para proporcionar enormes mejoras en la sensibilidad, selectividad, estabilidad y reproducibilidad de la respuesta del biosensor a una variedad de bioanalitos. Se espera que estos biosensores desempeñen un papel cada vez más importante en la entrega de información de diagnóstico y seguimiento de la terapia, ya que tienen ventajas que incluyen su bajo costo y bajo límite de detección.[57]



*Figura 26: Biosensores en el camino hacia el diagnóstico precoz y la vigilancia de la enfermedad de Alzheimer.[65]*

Se han estudiado biosensores a partir de polímeros conductores, como puede ser el biosensor basado en el polipirrol junto con el receptor del biomarcador del Alzheimer, que es la forma celular de la proteína priónica (PRPc). Normalmente, para inmovilizar la PRPc es necesario apelar a moléculas de gran tamaño para que actúen como una resistencia, esto actúa negativamente y significativamente al índice de detección del biosensor. En este caso, el polipirrol, que puede de “transportar” cargas eléctricas, ayuda a provocar un aumento en la sensibilidad del biosensor, teniendo la posibilidad de detectar un biomarcador hasta límites extremadamente bajos.

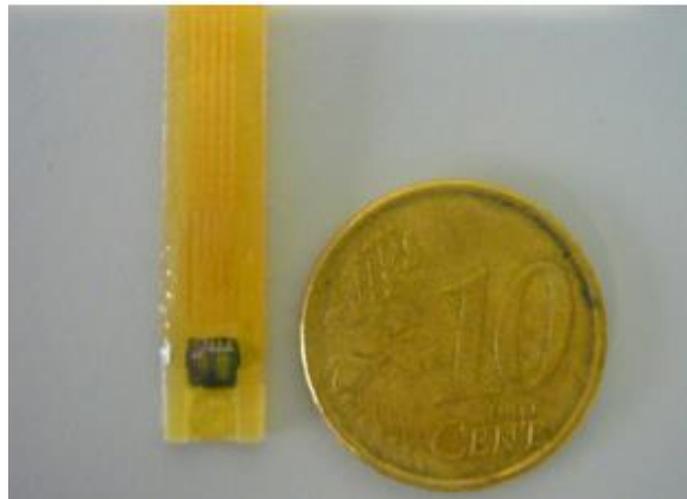
Otros polímeros activos que están teniendo gran protagonismo en el área de los biosensores son los polímeros piezoeléctricos. Hace poco, Dong y otros colaboradores desarrollaron un biosensor a partir en PVDF capaz de representar arritmias e incluso de acumular energía para emplearla en un marcapasos sin batería. [58]

#### 4.2.1 Características de los biosensores

Las cualidades a destacar en estos instrumentos de medida, que los llevan a ser alternativas muy interesantes como herramientas analíticas, son: su especificidad, sensibilidad, capacidad de respuesta que conlleva a un breve tiempo de análisis, su capacidad de inclusión en sistemas integrados, sencilla automatización, capacidad de trabajo en tiempo real, su versatilidad y bajo precio, junto a otras.[66]

- **Alta sensibilidad.** Es la cantidad mínima de analito que puede estudiar un biosensor y establece su límite de detección (LOD) o sensibilidad. En una serie de aplicaciones de monitoreo médico y ambiental, se requiere un biosensor para detectar concentraciones de analitos tan bajas como ng/ml o incluso fg/ml para detectar la presencia de analitos en una muestra.[82]
- **Alta selectividad** para que el dispositivo estudie solamente el compuesto que nos interesa y no otros de cualidades parecidas. Se logra utilizando elementos de reconocimiento bastante precisos. La selectividad es quizás la cualidad más importante de un biosensor.[82]
- **Alta fiabilidad.** Los sistemas de transducción se diseñan de forma que no sean alterados (o lo menos posible) por la muestra y no den problemas de ruidos.
- **Reproducibilidad.** Es la capacidad del biosensor de crear la misma respuesta para una configuración experimental repetida. La reproducibilidad se basa en la precisión y exactitud del transductor y la electrónica de un biosensor. La precisión es la capacidad del sensor para generar resultados parecidos si se mide la misma muestra y la precisión indica la capacidad del sensor para dar un valor medio similar al valor real cuando una muestra se mide repetidas veces.[82]

- **Tiempo de vida largo** que no provoque el cambio del dispositivo tras un breve período de tiempo de uso ni a variaciones constantes del mismo si se encuentra dentro de una línea de producción de una industria.
- **Bajo coste de producción.** Comúnmente, estos sistemas se pueden elaborar a nivel industrial, esto provoca una considerable reducción de los costes de producción.
- **Miniaturizables.** Debido a los avances en microelectrónica y nanotecnología se ha conseguido disminuir el tamaño de estos dispositivos. Para poder trabajar algunos de ellos en el mismo sistema que realiza diversas labores al mismo tiempo y son aplicables a trabajos donde el tamaño del dispositivo, el volumen de la muestra o el lugar de la medida son factores importantes.



*Figura 27: Un biosensor permite diagnosticar la infección por VIH en menos de una hora. El chip tiene un tamaño de 3 por 3 milímetros. [74]*

- **Tiempo de análisis corto** que genere una reacción rápida, un ejemplo de esto podría ser la eliminación de materias primas o productos perjudiciales antes de su uso o venta o la intervención para corregir parámetros en un proceso industrial.

- **Pretratamiento** de la muestra **innecesario** lo que provoca un ahorro de tiempo, materiales y reactivos.
- **Manejo sencillo.** No se necesitan trabajadores cualificados .
- Capacidad para realizar **análisis en tiempo real.** Esta propiedad es muy importante para controlar procesos, ya que admite controlar los parámetros de interés de manera inmediata y automática.
- **Portátiles** para poder realizar los análisis al momento.
- **Automatizables.** No necesitar el control manual ayuda a su adaptación dentro de los sistemas que monitorizan los procesos industriales.
- Capacidad de **multi-análisis.** Algunos biosensores trabajan en la determinación de varios analitos al mismo tiempo.[71]

#### 4.2.2 Clasificación de los biosensores

Los biosensores se pueden clasificar según distintos criterios, por ejemplo, la forma en la que interaccionan la sustancia de identificación y el analito, el procedimiento para detectar utilizado para precisar esa interacción y la naturaleza del elemento de identificación o del sistema de transducción.[66]

Tabla 3: Criterios para clasificar un biosensor.[66]

Criterios de clasificación de los biosensores	
Mecanismo de interacción	Metodología de la detección
Catalítico	Directa.
Afinidad	Indirecta
Sistema de reconocimiento	Sistema de transducción
Enzima.	Electroquímico.
Orgánulo, tejido o célula.	Óptico
Receptor biológico.	Piezoeléctrico.
Anticuerpo	Termométrico
Ácidos nucleicos.	Magnético
PIM, PNA, aptámero	Nanomecánico.

Los biosensores se pueden clasificar dependiendo del transductor utilizado (piezoeléctrico, electro químico, termo eléctrico u óptico), el procedimiento de detección (directa o indirecta), el agente de identificación (orgánulo, enzima, célula) y el tipo de interacción (biocatalíticos o de bioafinidad). [64]

- **Interacción biosensor-analito.** La identificación molecular puede implicar sencillamente la interacción entre el receptor y la molécula reconocida (antígenoanticuerpo) o bien el enlace puede ser de naturaleza catalítica (enzima-sustrato-producto). Esta es la cualidad primordial a estudiar que se emplea para la clasificación del biosensor como biocatalítico o de bioafinidad.[66]
- **Biocatalíticos.** Son sistemas que trabajan de forma directa en la zona de medición, formado por tejidos, células, orgánulos, sistemas enzimáticos de procedencia animal o vegetal, con capacidad de detección de sustratos a través de la conducta estequiométrica de reactivos y productos, o a través de mecanismos de inhibición enzimática que participen en el proceso.
- **Bioafinidad.** Su característica principal es generar complejos entre el analito de interés y el receptor, sin provocar conversiones químicas, pero produciendo

mecanismos de respuesta precisos, pero con altas exigencias analíticas para detectar su magnitud. Estas interacciones producen respuestas que requieren sistemas de gran sensibilidad y precisión, cuantificándose mediante el seguimiento cinético del proceso mediante inhibidores competitivos, marcaje isotópico, comportamiento óptico del proceso o modificaciones gravimétricas.[64]

1. **Transductor.** Los transductores son dispositivos que convierten la información correspondiente a las variaciones de las propiedades fisicoquímicas, inducidas como consecuencia de la interacción entre el elemento de reconocimiento y el analito, en magnitudes eléctricas cuantificables. Esta transformación permite que las señales puedan ser amplificadas, almacenadas y registradas.[66]
  - Ópticos. Basados en las modificaciones que se llevan a cabo en las características de la radiación electromagnética (REM) a raíz de la interacción física o química entre el analito y el elemento biológico. Los principios físicos de este grupo de sensores son las variaciones que se generan en la absorción de REM, luminiscencia, dispersión de REM o índice de refracción, cuando la radiación actúa sobre las superficies de identificación. El sistema está compuesto por una fuente de radiación electromagnética, del agente biológico que posee las moléculas receptoras y del detector.

Se emplean métodos de detección directa e indirecta, y es indispensable usar marcadores, que se adapten de la misma manera a sistemas biocatalíticos o de bioafinidad.

Entre los transductores que emplean propiedades ópticas se tienen en cuenta los sensores de fibra óptica (optrodos) y los sensores de onda evanescente.

- Piezoeléctricos. También se conocen como sistemas de transducción másicos, gravimétricos o acústicos.[64] Son sistemas de transducción que detectan cambios mínimos de masa que se producen sobre la superficie sensora, provocados por la interacción analito-sistema de reconocimiento.[66] Constituyen un material piezoeléctrico (cristales), que se caracterizan por entrar en resonancia ante la explosión de un campo electromagnético y aguantar el elemento de reconocimiento (proteínas). Son versátiles y su aplicación en el sector de la alimentación ha permitido hacer un seguimiento de las cualidades reológicas, un ejemplo, de la textura a través la detección de vibraciones por

fractura de las muestras de interés. Su funcionamiento está basado en que la frecuencia de vibración de un cristal disminuye debido a la adsorción de un material extraño en su superficie. El cristal está sensibilizado por una cobertura del material de unión o reaccionando con el analito.[64]

- Termométricos. Debido a que la mayoría de las reacciones bioquímicas son de naturaleza exotérmica en mayor o menor grado, la calorimetría presenta un sistema para detectar multitud de analitos, en especial aquellos en que interviene una catálisis enzimática.[66] Estas modificaciones de temperatura se miden a través de termistores al entrar y salir del dispositivo en el que se están las enzimas inmovilizadas.[64]
  
- Electroquímico. Los transductores electroquímicos emplean cualidades electroanalíticas que se generan o varían por la relación entre el analito y el sistema de reconocimiento, generando información analítica cuantitativa o semicuantitativa. Para el correcto funcionamiento del biosensor, el elemento de reconocimiento y el sistema de transducción tienen que estar en contacto directo.[66] Se clasifican en cuatro grupos: conductimétricos, potenciométricos, amperométricos e impedimétricos, estos tienen la capacidad de detectar variaciones en la conductividad, potencial, intensidad de corriente o en la impedancia, respectivamente.[64]

Se emplean normalmente mediante elementos de reconocimiento biocatalíticos como enzimas, debido a que tienen la capacidad de producir o consumir sustancias electroactivas que provoquen modificaciones en el pH, en el potencial, resistencia eléctrica, etc. [66]

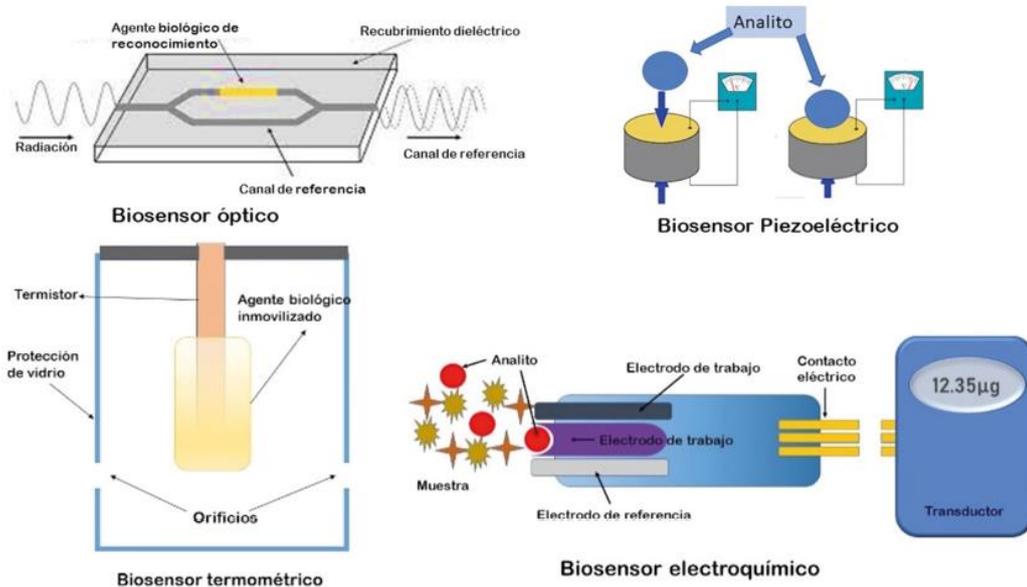


Figura 28: Imágenes de ejemplo de los biosensores: óptico, piezoeléctrico, termométrico y electroquímico.[64]

- Nanomecánicos. Son estructuras fabricadas gracias a la nanotecnología, a partir de silicio o de nitruro de silicio y pueden tener forma triangular o rectangular, simulando ménsulas o trampolines de pequeño tamaño.[66] El elemento biológico de reconocimiento se encuentra inmovilizado en la superficie de una micro palanca de silicio que se sumerge en una muestra líquida. Comúnmente, se emplean anticuerpos como elemento de reconocimiento. La interacción entre el analito y el elemento de reconocimiento provoca una variación en la tensión superficial del líquido, mientras que la micro palanca sufre una respuesta de carácter nano mecánico que se trata de en una variación de la deflexión y/o de la frecuencia de resonancia, la magnitud de esta variación tiene relación con la concentración del analito.[64]

Los biosensores presentan múltiples beneficios, uno de ellos es proporcionar respuestas precisas, reproducibles, rápidas, de bajo coste y no requieren la preparación de la muestra o un blanco estándar. A día de hoy, existen cientos de biosensores que controlan diferentes sustancias y variables (glucosa, embarazo, virus como el SARs-CoV-2, etc), pero la mayoría siguen la línea de ser cada vez de menos tamaño, menor coste, con mayor sensibilidad y más confiables. Tenemos el ejemplo de los biosensores de glucosa, que a día de hoy son desechables y de tamaño similar a una lámina de laboratorio, gracias al

impulso de nuevos materiales y a la nanotecnología que da la posibilidad de formar electrodos con serigrafía de grafito o nanotubos de carbón.[64]

### 4.2.3 Aplicaciones de los biosensores

Los biosensores tienen una gama muy amplia de aplicaciones que tienen como objetivo mejorar la calidad de vida. Esta gama cubre su uso para monitoreo ambiental, detección de enfermedades, seguridad alimentaria, defensa, descubrimiento de fármacos y mucho más. Una de las principales aplicaciones de los biosensores es la detección de biomoléculas que son indicadores de una enfermedad u objetivos de un fármaco.[82]

- **Aplicaciones clínicas**

Pero el área de los **análisis clínicos** es donde los biosensores han presentado un mayor progreso y en especial en lo que se refiere a análisis de glucosa y ácidos nucleicos.[66]

Los biosensores ya se emplean para múltiples problemas de salud. Pueden llevar a cabo las siguientes acciones:

- Detectar constantemente la presión arterial sin necesidad de utilizar un manguito de presión arterial.
- Ayudar a una persona diabética a establecer los niveles estables de azúcar en sangre sin necesidad de pincharse.
- Ayudar a un médico para empezar o no un tratamiento con antibióticos en un paciente con el objetivo de tratar la faringitis estreptocócica.
- Hallar si una paciente está embarazada.
- Guardar los niveles de oxígeno en la sangre de un paciente sin tener de realizar una prueba de laboratorio.
- Conocer la cantidad de alcohol en el sistema de una persona a través de la piel.
- Diagnosticar pacientes en campos con pocos recursos que no disponen de instalaciones de laboratorio.[69]

Un ejemplo, que la mayoría de gente conoce, de biosensor aplicado clínicamente es el monitor de glucosa, que los individuos diabéticos utilizan de forma rutinaria para comprobar su nivel de azúcar en sangre. Estos dispositivos detectan la cantidad de glucosa en sangre en muestras de sangre sin diluir, lo que permite realizar una autoevaluación y un seguimiento sencillos que han revolucionado el control de la diabetes.[67]



*Figura 29: Medidor de glucosa en sangre. Este equipo de medición es un biosensor específico para medir el nivel de glucosa en sangre y es muy útil para los enfermos diabéticos, quienes, al conocer sus valores de glucosa, pueden establecer un control seguro de la enfermedad.[64]*

La medida de glucosa en sangre es uno de los parámetros médicos fundamentales en el seguimiento de la diabetes. En el año 1962 un médico americano, que conocía la incomodidad y sufrimiento que suponía para los enfermos de diabetes tener que realizarse

constantemente análisis de sangre, se le ocurrió la idea de emplear un dispositivo que permitiera realizar estos análisis solamente echando alguna gota de sangre y que mostrara los resultados en escasos minutos. Así se creó el primer ejemplo útil de dispositivo biosensor.[66]

La demanda de estos dispositivos está creciendo rápidamente en los últimos años, en gran medida debido al aumento de la prevalencia de enfermedades tales como diabetes y a la necesidad de tener dispositivos que monitoreen los niveles de glucosa en la sangre.[68]

- **Aplicaciones medioambientales**

Su empleo en **medioambiente** abarca desde el análisis de la necesidad bioquímica de oxígeno (DBO) hasta el control de detergentes, pesticidas y otros elementos tóxicos.

La demanda bioquímica de oxígeno se considera el parámetro analítico de por excelencia para estudiar la calidad de las aguas de desecho.[66] No obstante, el método oficial para su análisis es muy pesado porque se necesitan varios días para obtener los resultados, pero mediante el empleo de biosensores los resultados se consiguen en unos minutos. [72]

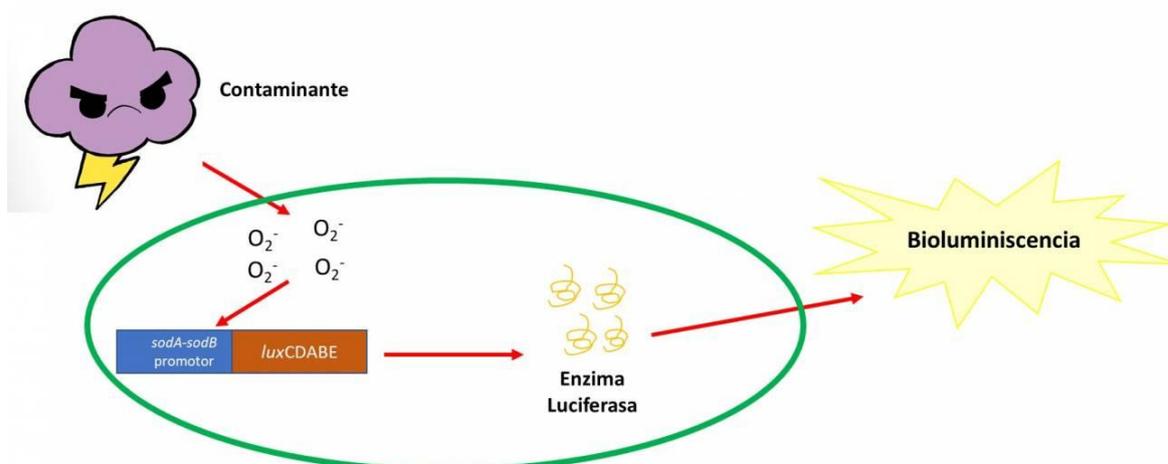


Figura 30: Mecanismo de inducción de la bioluminiscencia de los biosensores que detectan el estrés oxidativo en el medio acuático.[73]

De igual forma, el empleo masivo de pesticidas, como insecticidas y herbicidas, junto a su fuerte impacto medioambiental, ha supuesto un gran progreso de los procedimientos para su análisis, incluyendo los que emplean biosensores, debido su velocidad y poca complejidad.[66]

Existe la posibilidad de usar biosensores ambientales que trabajen junto a sistemas de alarma, que avisen, de forma inmediata, el exceso de contaminantes emitidos por una determinada fábrica, permitiendo la rápida toma de decisiones para solucionarlo. Existen más utilidades como detectar en suelos y aguas la aparición de contaminantes y compuestos orgánicos, metales pesados, compuestos genotóxicos y disruptores endocrinos.

En relación al coste de los biosensores, lo que es el dispositivo, no es caro, ya que se han conseguido incorporar al mercado de forma competitiva, fundamentalmente los relacionados con la medicina, lo que es costoso es la investigación para desarrollarlos, además de su mejora, ya que esto supone la participación de multitud de científicos.[72]

- **Aplicaciones agroalimentarias**

Diferentes **componentes de los alimentos** pueden medirse a través de biosensores. Por ejemplo, el caso del ácido láctico, el acetaldehído, azúcares, compuesto fenólicos y especialmente los aditivos.

Los aditivos alimentarios, siguiendo un estricto control de la UE, tienen un protagonismo importante ya que pueden ser objeto de engaño, y pueden provocar problemas de intolerancia en algunas personas. Existen diversos dispositivos que pueden detectar la presencia de los aditivos más empleados, como son el aspartamo, el sorbitol y el ácido benzoico.

No es de menos importancia es la detección de fármacos residuales en los productos alimenticios, existiendo también multitud dispositivos de medición que utilizan biosensores.

### 4.3 Paneles solares orgánicos

Los paneles solares fotovoltaicos que conocemos presentan células fabricadas a partir de silicio o arseniuro de galio, con dichas células son con las que convierten la radiación solar en energía eléctrica de manera eficiente. Aunque estos paneles presentan gran eficiencia y eficacia, también tienen ciertos inconvenientes, como, por ejemplo, su peso y rigidez, lo que no permite adaptarse a algunas superficies. Además, debido a los materiales de los que están compuestos los paneles fotovoltaicos, su impacto medioambiental puede ser negativo.

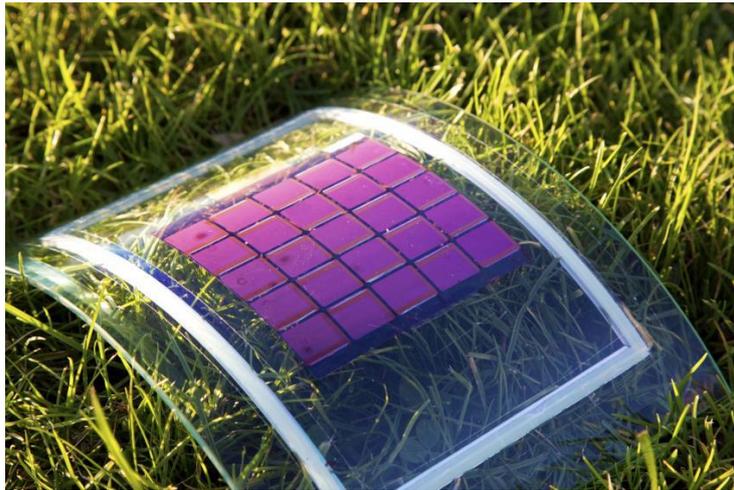
Pero a día de hoy existen multitud de nuevas opciones, un ejemplo de ellos son los paneles solares orgánicos.[75] Las células solares orgánicas podrán llegar en un futuro donde no lleguen las células solares de silicio.[76]

El objetivo de un mundo más sostenible necesita de la creación de nuevas placas solares. La meta es lograr modelos mucho más eficientes, menos contaminantes y fácilmente reciclables una vez terminada su vida útil.[75]

La industria fotovoltaica está en constante desarrollo, buscando la manera de que la energía solar sea lo más eficiente, accesible y estéticamente agradable posible. Y una de las líneas de investigación más interesantes que se están desarrollando hoy en día tiene que ver con la construcción de opciones solares más delgadas y flexibles. Y aquí es donde encuentran su lugar la tercera generación de dispositivos fotovoltaicos: las células solares orgánicas (OSC).

Al igual que la tecnología solar de silicio tradicional, las OSC convierten la energía del sol en electricidad utilizable. Pero son mucho más versátiles que la energía solar fotovoltaica convencional. Los OSC son livianos y flexibles y se pueden hacer semitransparentes o en varios colores. Estas cualidades les otorgan aplicaciones potenciales para células solares integradas en textiles, vehículos y edificios, y para crear energía en áreas donde no existe. Utilizan materiales orgánicos, como polímeros conductores o moléculas orgánicas pequeñas, en lugar de materiales inorgánicos como el silicio.[76]

La fabricación de OSC puede ser más económica en comparación con las celdas solares tradicionales. La producción de películas delgadas mediante técnicas de impresión y recubrimiento contribuye a la reducción de costos, ya que estos procesos pueden llevarse a cabo a gran escala y en sustratos flexibles.[79]



*Figura 31: Célula solar de polímeros orgánicos.[77]*

Estas células orgánicas son increíblemente poderosas cuando se trata de absorber la luz del sol; son capaces de recoger más cantidad de luz solar que cualquier otra célula solar. Esto es porque, a diferencia de las células solares cristalinas tradicionales que usan silicio como absorbente, las células solares orgánicas usan un polímero o una célula de molécula pequeña hecha de materiales a base de carbono y electrónica orgánica.

Los polímeros orgánicos son capaces de absorber la luz y transformarla en electricidad al mismo tiempo que superan las líneas de transmisión de alto voltaje, por esta razón, pueden suministrar electricidad a dispositivos, los cuales, mediante otros métodos, necesitarían baterías tóxicas.

Un ejemplo de esto serían los polímeros orgánicos, que podrían utilizarse en envoltorios de alimentos para mantener la temperatura utilizando la luz de sus lugares de venta. A su vez, se podrían utilizar en “cocinas inteligentes” para disminuir el desperdicio de alimentos y automatizar las listas de compras.

Los polímeros logran disolverse en disolventes e imprimirse en un soporte flexible empleando una producción mediante rollos, y esto supone que esta tecnología presente un alto atractivo.[77]

### 4.3.1 Funcionamiento de los paneles solares orgánicos

Los paneles solares orgánicos siguen el mismo procedimiento que los paneles solares fabricados de silicio para transformar la luz solar en corriente eléctrica para diferentes propósitos. Los pasos a seguir son los siguientes:

1. **Absorción de luz:** La clave para el funcionamiento de las células solares orgánicas es la absorción de la luz. Los materiales orgánicos utilizados en estas células tienen propiedades únicas que les permiten absorber fotones de luz solar.
2. **Generación de pares de electrones-huecos:** Cuando los fotones de luz son absorbidos por los materiales orgánicos, generan pares electrón-hueco. Esto significa que un electrón se libera de su átomo, creando un hueco (una carga positiva) en el lugar de ese electrón.
3. **Movimiento de electrones y huecos:** Los electrones liberados y los huecos creados tienen polaridades opuestas. Bajo la influencia de un campo eléctrico interno dentro del material, los electrones tienden a moverse hacia una dirección, mientras que los huecos se desplazan en la dirección opuesta.
4. **Generación de corriente eléctrica:** El movimiento de electrones y huecos crea una corriente eléctrica en el circuito conectado a la célula solar. Esta corriente eléctrica puede ser aprovechada para alimentar dispositivos eléctricos o almacenada en baterías para su uso posterior.

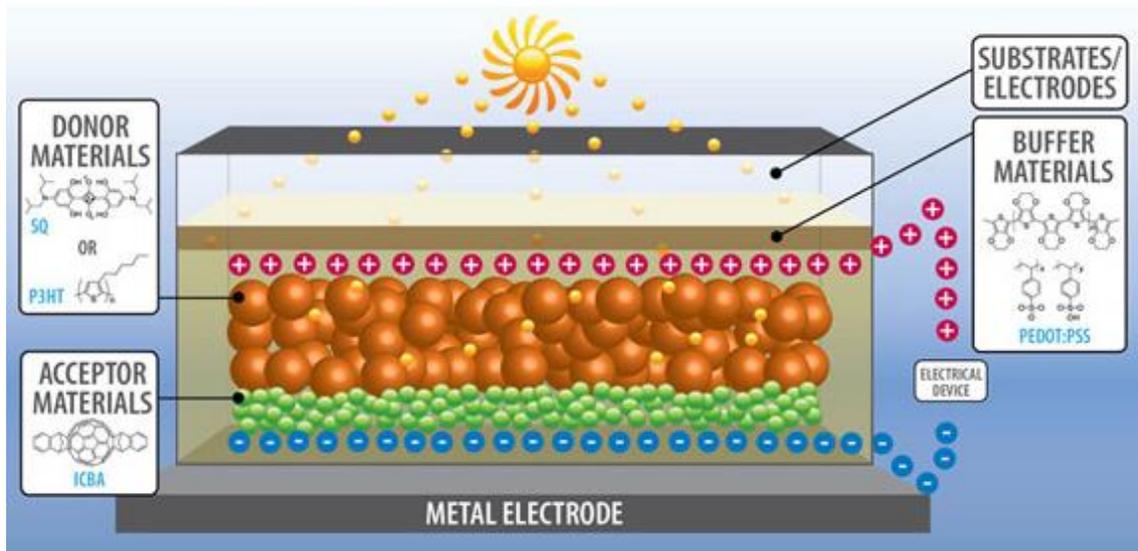


Figura 32: Funcionamiento paneles solares orgánicos.[78]

Es importante tener en cuenta que, a pesar de sus ventajas potenciales, las células solares orgánicas también presentan desafíos, como conseguir una eficiente conversión de energía generalmente más baja si la comparamos con los paneles solares de silicio y una menor durabilidad. Sin embargo, la investigación en este campo continúa para mejorar estas tecnologías y aprovechar sus beneficios, como su flexibilidad y su capacidad para ser fabricadas en superficies más grandes y diversas.

#### 4.3.2 Ventajas y desventajas de los paneles solares orgánicos

Los paneles solares orgánicos representan una fascinante evolución en la tecnología fotovoltaica al emplear materiales orgánicos para convertir la luz solar en electricidad. Aunque estas innovadoras células ofrecen diversas ventajas, también presentan desafíos particulares.

### **Ventajas de los paneles solares orgánicos:**

- Costes de producción más baratos si los comparamos con los paneles solares tradicionales.
- Más flexibles y ligeros, lo que los hace perfectos para su empleo en trabajos portátiles y en superficies que no sean del todo rectas.
- Al ser semi transparentes es posible usarlas en superficies traslucidas como cristales en ventanas.
- Se pueden fabricar en grandes cantidades con mayor facilidad a través de procesos de impresión.
- Presentan menor impacto sobre el medio ambiente si los comparamos con los paneles solares tradicionales.
- Buenos resistentes a las radiaciones solar y al envejecimiento.

### **Desventajas de los paneles solares orgánicas:**

- Limitados en de eficiencia energética si los comparamos con los paneles solares tradicionales.
- Menos estables térmica y químicamente, lo que disminuye su capacidad para aguantar condiciones extremas de temperatura y humedad.
- Muy sensibles a la luz, lo que supone que son menos eficientes cuando se exponen a condiciones de baja luminosidad.
- Menos disponibles en el mercado si los comparamos con los paneles solares tradicionales, ya que son menos eficientes y que su desarrollo tecnológico es muy reciente.[79]



*Figura 33: Instalación de paneles solares orgánicos.[80]*

## 5. Conclusiones

Este trabajo presenta un estudio profundo sobre los biomateriales conductores. Adquiere una relevancia excepcional tanto en el presente como en el horizonte futuro de la investigación científica y la aplicación tecnológica. En el contexto actual, donde la innovación es el motor del progreso, los biomateriales conductores desempeñan un papel crucial en el desarrollo de tecnologías vanguardistas.

En el presente, la aplicación de estos materiales en músculos artificiales, biosensores y paneles solares orgánicos, entre otras aplicaciones no mencionadas en el trabajo, ha comenzado a transformar sectores clave. Los músculos artificiales, basados en polímeros conductores, están mostrando promesas en campos de la medicina y la ingeniería biomédica, donde la necesidad de soluciones avanzadas para la terapia y la rehabilitación

es necesaria. A su vez, los biosensores han demostrado ser herramientas esenciales para la detección precisa y la observación en áreas tan diversas como la medicina y la industria alimentaria. La contribución de los paneles solares orgánicos a la energía renovable es un paso significativo hacia un futuro más sostenible.

No obstante, la importancia del tema no se limita a los logros actuales; se proyecta hacia el futuro con grandes expectativas. La continuidad en la investigación y desarrollo de biomateriales conductores es esencial para aprovechar plenamente su potencial en las muchas áreas donde ya se ha demostrado que pueden ser de ayuda. La expansión de aplicaciones, la mejora de propiedades y la superación de limitaciones identificadas en este trabajo serán cruciales para su adopción generalizada.

En un contexto más amplio, la relevancia futura de los biomateriales conductores se alinea con desafíos globales, es decir, se encuentra en ellos una solución o ayuda a muchos problemas de la actualidad. La búsqueda de alternativas sostenibles en la fabricación de estos materiales se vuelve imperativa en la era actual, donde la sostenibilidad ambiental es una preocupación global. La intersección de este tipo de materiales y la colaboración de los investigadores podrían conducir no solo a avances técnicos, sino también a soluciones beneficiosas con el medio ambiente.

En conclusión, este trabajo no solo resalta la importancia actual de los biomateriales conductores en la transformación de diversas industrias, sino que también subraya su papel fundamental en la construcción de un futuro más innovador y sostenible. La inversión continua en investigación y desarrollo en este campo no solo abrirá nuevas fronteras científicas, sino que también allanará el camino hacia soluciones tecnológicas que moldeen positivamente nuestro mundo en constante evolución.

## 6. Líneas futuras

Tal y cómo se ha comentado, los biomateriales conductores están en pleno desarrollo. A día de hoy, ya existen muchas aplicaciones muy interesantes y que presentan muchas ventajas, las cuales, ya se llevan a cabo en diferentes áreas, sobre todo en el campo de la medicina, pero otras muchas aplicaciones están aún por desarrollar o mejorar. Queda un

largo camino de investigación para este tipo de materiales, con el fin de mejorar aún más sus propiedades, o adaptarlas a nuevas aplicaciones en las que aún se confía más en los materiales tradicionales.

Algunas tendencias futuras que se pretenden desarrollar en un futuro cercano son:

1. **Desarrollo de nuevos biomateriales conductores:** Se espera que los investigadores continúen desarrollando nuevos biomateriales conductores con propiedades mejoradas, como la biocompatibilidad, biodegradabilidad, flexibilidad o capacidad de conducción eléctrica. Esto podría implicar la incorporación de nanotecnología y técnicas de fabricación avanzadas. Investigadores del ‘Consejo Superior de Investigadores’ (CSIC), desarrollaron un biomaterial híbrido basado en polímeros conductores y grafeno, y es capaz de convertir la luz en electricidad, y viceversa. Dicho hallazgo tendría una gran repercusión en muchas aplicaciones tecnológicas, como la elaboración de pantallas flexibles, dispositivos electrónicos portátiles y papel electrónico de alta eficiencia. [86]
2. **Aplicaciones en dispositivos médicos implantables:** Los biomateriales conductores pueden desempeñar un papel muy importante en el desarrollo de dispositivos médicos implantables. A día de hoy, se desarrolla una cantidad enorme de tipos de dispositivos médicos basados en biomateriales y se implantan anualmente otra gran cantidad de prótesis o implantes, y se espera que aumente. Ya existen avances apreciables en el desarrollo de nuevas prótesis o implantes, pero siguen investigando y probando nuevos biomateriales con el fin de mejorar las propiedades de dichos dispositivos, ya que en la actualidad existe un alto porcentaje de fracasos en determinados implantes.[84]
3. **Ingeniería de tejidos y regeneración:** Los biomateriales conductores también pueden ser utilizados en la ingeniería de tejidos para mejorar la comunicación celular y la integración con los tejidos de su alrededor. Esto podría ser especialmente relevante en la regeneración de tejidos nerviosos y musculares.

Actualmente, la cirugía de reanimación facial emplea implantes de biomateriales estático para aguantar el tejido caído o transferencias micro quirúrgicas de músculo para dar movimiento al lado paralizado. Un implante regenerativo estaría compuesto de células autólogas que tienen la capacidad de responder a estímulos

neuronales para conseguir control. Estos implantes controlados por tejido serían útiles para el aumento de tejido blando facial con objetivos cosméticos.

Además de los implantes regenerativos o de control de tejidos, los avances en los campos de la robótica electromecánica y la nanotecnología, junto con la biología regenerativa, agregarán nuevas dimensiones a la medicina. [85]

4. **Biomateriales conductores flexibles y biodegradables:** Se espera que los avances en la fabricación de biomateriales conductores permitan la creación de materiales más flexibles y biodegradables, lo que sería beneficioso para aplicaciones en dispositivos temporales o para evitar la necesidad de extracción de dispositivos implantados. Por ejemplo, ya se está desarrollando un nuevo material biodegradable y flexible, el bioplástico, los cuales son fabricados mediante recursos renovables, este nuevo material presenta ventajas fundamentalmente medioambientales y sostenibles, pero, sea como sea, ya es una aplicación más que habla de la capacidad de desarrollo de los biomateriales.
  
5. **Cableado de polímeros conductor en dispositivos IoT:** Sería una innovadora y prometedora solución ya que los polímeros conductores tienen propiedades conductoras de electricidad y, a su vez, mantienen sus propiedades flexibles. Este avance abre una gran posibilidad de nuevas aplicaciones, en especial, en el área del cableado y la electrónica. Presenta ventajas como: flexibilidad y ligero peso, consumo reducido de energía, más duradero y longevo, menor coste en comparación con el cableado tradicional y una integración más sencilla en sistemas y procesos ya existentes. Puede desarrollarse en aplicaciones dentro de los campos de: la industria automotriz, energía solar, dispositivos médicos y en infraestructuras de energías renovables, entre otras.[90]
  
6. **Bioelectrónica y neurotecnología:** Los biomateriales conductores pueden desempeñar un papel crucial en el desarrollo de interfaces cerebro-máquina y en la neurotecnología en general. Se espera que estos avances permitan el desarrollo de prótesis más avanzadas y sistemas de comunicación directa con el cerebro. Es un duro trabajo para los científicos e investigadores, ya que es un órgano muy complejo y fundamental para el ser humano, además de su curioso tejido, ya que es de los órganos más blandos del cuerpo, pero, a su vez, es rígido y elástico, lo que dificulta mucho su diseño. Por eso, es necesario el trabajo conjunto de científicos de diferentes áreas de la ciencia, con el fin de combinar las diversas tecnologías disponibles a día de hoy.[88][89]

Una vez mencionados estos posibles avances de los biomateriales en un futuro cercano, quiero hacer especial mención en este último, que es el que me parece más interesante e importante, el desarrollo de estos materiales en el campo de la neurotecnología.

La revista ‘*Nature Communications*’ publicó en julio de 2020 el estudio de un investigador de la Universidad de Stanford y de un profesor de la Universidad del País Vasco (‘*Towards brain-tissue-like biomaterials*’), donde repasaron los avances de estos materiales y definieron las propiedades principales en las que deben basarse los biomateriales para parecerse al cerebro humano, estas propiedades son: la elasticidad, resistencia máxima, resistencia a la tracción, porosidad, capacidad para disipar la energía y la conductividad, entre otras.

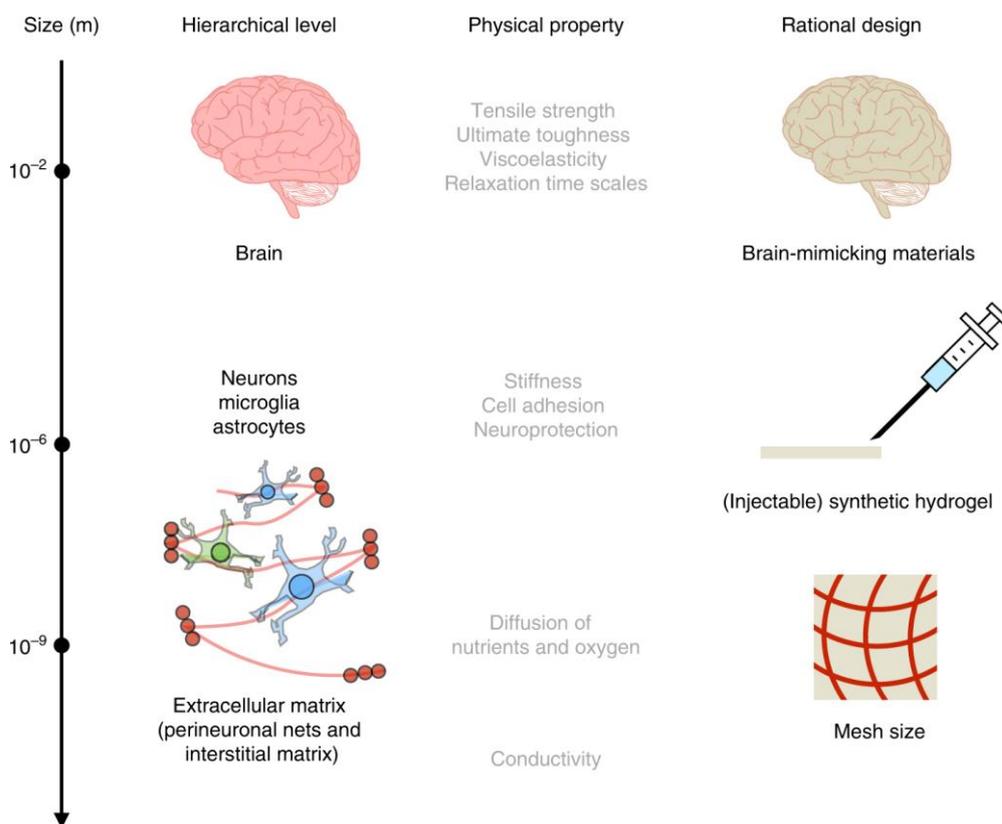


Figura 34: Características físicas del tejido cerebral que deben parecerse en diferentes escalas.[88]

Además, en este artículo, explican que “muchas tecnologías emergentes requieren la creación de biomateriales que se asemejen al tejido cerebral. Sondas neuronales en interfaces cerebro-máquina, modelos micro fisiológicos de enfermedades neurológicas, andamios para ingeniería de tejido neuronal, organoides cerebrales y proxis cerebrales (p. ej., para estudiar lesiones cerebrales traumáticas y al mismo tiempo reducir la necesidad de pruebas con animales ) necesitan imitar las propiedades físicas del tejido cerebral para poder aplicarse con éxito”.

Aún queda mucho desarrollo e investigación por delante, pero en este artículo (*‘Towards brain-tissue-like biomaterials’*) los investigadores son optimistas. Aunque aún no hayan encontrado el biomaterial óptimo para simular este órgano, se han ido desarrollando alternativas de biomateriales conductores muy interesantes que tratan tumores cerebrales o son usados como interfaces cerebrales.

Para finalizar este artículo, los autores comentaron sus expectativas futuras, y entre ellas, mencionaron que esperan ser inspiración para otros investigadores para lograr esta hazaña. [88][89]

## 7. Bibliografía

- [1] Lifeder. (16 de diciembre de 2020). Biomateriales. Recuperado de: <https://www.lifeder.com/biomateriales/>
- [2] Botella, Josefa (2021). Introducción de los biomateriales. Guía de estudio de la unidad I, Implantes mecánicos. DocPlayer. <https://docplayer.es/204598903-Introduccion-a-los-biomateriales-guia-de-estudio-de-la-unidad-i-implantes-ceramicos.html>
- [3] Biomaterials. National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering. <https://www.nibib.nih.gov/espanol/temas-cientificos/biomateriales>
- [4] Ratner, Buddy D. ; Zhang Guigen (2020). Biomaterials Science (Fourth edition). An introduction to materials in medicine, pages 21-34, 1.1.2 - A History of Biomaterials. Academic press. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128161371000027>
- [5] Vallet-Regí, María (18 de marzo de 2022). Evolution of Biomaterials. Frontiers. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmats.2022.864016/full>
- [6] Rober Benson and Wei H, “Polymeric Biomaterials” Applied Plastics Engineering Handbook. Pages 145-164, 2017, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-39040-8.00008-0>
- [7] Aseguramiento de calidad en biomateriales para implantes médicos. <https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/aseguramiento-de-calidad-en-biomateriales-para-implantes>
- [8] Biomateriales - US. Available at: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/5275/fichero/04+BIOMATERIALES.pdf> (Accessed: 11 January 2024).
- [9] Rodríguez, Liliana. Historia de los biomateriales. Timetoast. <https://www.timetoast.com/timelines/historia-de-los-biomateriales-db61f4ea-68ae-4741-becf-feb4c7c1c1f7>

- [10] Sabadell, Miguel Ángel (17 de noviembre de 2022). El hombre de Kennewick o la historia más absurda de la paleontología moderna. Muy Interesante. <https://www.muyinteresante.es/ciencia/46643.html>
- [11] Chen, Q., & Thouas, G. (2014). Biomaterials: a basic introduction. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b17553>
- [12] Perfiles de aluminio. Aplicaciones de los metales en la vida cotidiana. Perfiles de aluminio.net. <https://perfilesdealuminio.net/articulo/aplicaciones-de-los-metales-en-la-vida-cotidiana/97>
- [13] Polímeros, 1.9 Aplicaciones de los polímeros. Ecupei. <https://ecupei.com/polimeros/introduccion/1-9-aplicaciones-de-los-polimeros/>
- [14] (2021). Biomateriales metálicos. Mindomo. <https://www.mindomo.com/es/mindmap/biomateriales-metalicos-92e573578efd40e2a319a1546c336636>
- [15] Bachiller, Joaquín. Polímeros – nanotecnología – biomateriales y materias tóxicas. Timetoast. <https://www.timetoast.com/timelines/polimeros-nanotecnologia-biomateriales-y-materias-toxicas>
- [16] Díez Vicente (21 de junio de 2021). Distintos usos de los materiales cerámicos. BLOG. Díez Ceramic. <https://diezceramic.com/distintos-usos-de-los-materiales-ceramicos/>
- [17] Pellicer Rosell, Beatriz; Carbonell Pascual, Beatriz; Alacreu Samper, Elena; Giménez Colás Sonia. Los biomateriales y sus aplicaciones. Universidad de Valencia. <https://www.uv.es/materomo/resources/g11.pdf>
- [18] Introducción a los biomateriales. Guía de estudio de la unidad V. Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Zacatecas. [https://enlinea.zacatecas.tecnm.mx/pluginfile.php/28953/mod\\_resource/content/5/GUIA%20DE%20ESTUDIO%20DE%20LA%20MATERIA%20DE%20INTRO%20A%20LOS%20BIOMATERIALES%20UNIDAD%20V.pdf](https://enlinea.zacatecas.tecnm.mx/pluginfile.php/28953/mod_resource/content/5/GUIA%20DE%20ESTUDIO%20DE%20LA%20MATERIA%20DE%20INTRO%20A%20LOS%20BIOMATERIALES%20UNIDAD%20V.pdf)
- [19] Carranza, Ricardo M; Duffo, Gustavo; Farina, Silvia (2009). : Ministerio de Educación de la Nación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Nada es para siempre: química de la degradación de los materiales. <http://www.bnm.me.gov.ar/giga1/documentos/EL001847.pdf>

- [20] Duffo, Gustavo (2011). Ministerio de Educación. Instituto Nacional de Educación Tecnológica. Materiales y materias primas, DVD 3, capítulo 8: Biomateriales.  
<https://www.inet.edu.ar/wp-content/uploads/2012/11/biometales.pdf>
- [21] (2015). Cursos achegados polo profesorado de Galicia, TEC2, tema 5, 5.6.1.- Propiedades químicas. CAFI.  
<https://www.edu.xunta.gal/centros/cafi/aulavirtual/mod/page/view.php?id=25042#:~:text=Estabilidad%20qu%C3%ADmica%3A%20con%20esta%20propiedad,acci%C3%B3n%20exterior%20para%20que%20reaccione.>
- [22] Pérez, Enrique. (5 de julio de 2021). Crean el primer marcapasos biodegradable que se disuelve en el cuerpo una vez el corazón ya late correctamente. Xataka  
<https://www.xataka.com/medicina-y-salud/crean-primer-marcapasos-biodegradable-que-se-disuelve-cuerpo-vez-corazon-late-correctamente>
- [23] Higgins, Michael & Molino, Paul & Yue, Zhilian & Wallace, Gordon. (2012). Organic Conducting Polymer–Protein Interactions. Chemistry of Materials. 24. 828–839. 10.1021/cm203138j.
- [24] De Oliveira Andrade, Rodrigo. (agosto de 2017). Biosensores en medicina. Pesquisa FAPSEP. <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/biosensores-en-medicina/>
- [25] Doctor Álvarez. Tipos de prótesis mamarias para el aumento de pecho. Doctor Álvarez cirujano plástico. <https://cirugiaesteticaplastica.es/tipos-de-protesis-mamarias-para-el-aumento-de-pecho/>
- [26] (15 de octubre de 2021). Principales características y aplicaciones de los polímeros conductores. CienciAcierta. Revista científica, tecnológica y humanística. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2021/10/15/principales-caracteristicas-y-aplicaciones-de-los-polimeros-conductores/>
- [27] Hermes (30 de enero de 2018). Polímeros conductores; sus diferentes aplicaciones en medicina. Tecnología Alemania Hoy.  
<https://tecnologia.alemaniahoy.com/ciencia/polimeros-conductores/>
- [28] Nathalie K. Guimard, Natalia Gomez, Christine E. Schmidt, Conducting polymers in biomedical engineering, Progress in Polymer Science, Volume 32,

Issues 8–9, 2007, Pages 876-921, ISSN 0079-6700,  
<https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2007.05.012>

- [29] Ghasemi-Mobarakeh, L., Prabhakaran, M.P., Morshed, M., Nasr-Esfahani, M.H., Baharvand, H., Kiani, S., Al-Deyab, S.S. and Ramakrishna, S. (2011), Application of conductive polymers, scaffolds and electrical stimulation for nerve tissue engineering. *J Tissue Eng Regen Med*, 5: e17-e35.  
<https://doi.org/10.1002/term.383>
- [30] Joy, N., Gopalan, G.P., Eldho, J. and Francis, R. (2016). Conducting Polymers: Biomedical Applications. In *Biomedical Applications of Polymeric Materials and Composites* (eds R. Francis and D. Sakthi Kumar).  
<https://doi.org/10.1002/9783527690916.ch3>
- [31] Polímeros conductores: aplicaciones en celdas fotovoltaicas y dispositivos electrónicos.  
<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cienciaytecnologia/article/download/36405/37077/119191>
- [32] Ruiz Iglesias, Rafael (10 de abril de 2015). Los polipirroles. *Materiales al día – Novedades en Ingeniería de Materiales*.  
<https://www.madrimasd.org/blogs/ingenieriamateriales/2015/04/10/1024/#:~:text=Hoy%20en%20d%C3%ADa%20este%20material,caefactoras%20o%20emisoras%20de%20luz>.
- [33] Poliacetileno. Wiki. <https://hmn.wiki/es/Polyacetylene>
- [34] (18 de mayo de 2021). Politiofenos. *Química fácil*.  
<https://quimicafacil.net/compuesto-de-la-semana/politiofenos/>
- [35] Politiofeno. Wiki. <https://hmn.wiki/es/Polythiophene>
- [36] Martínez Olmedo, J.; Farías Mancilla, B.; Hernández Escobar, C.; Pérez, F.; Vega, A.; Zaragoza, A. (2013). Síntesis y propiedades eléctricas de biocompositos de polianilina – carragina. *Congreso Internacional de Investigación Científica Multidisciplinaria*.  
<https://cimav.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1004/1406/1/MAT11.pdf>
- [37] Espinoza, César; Apesteguy, Juan Carlos; Rukavina Mikusic, Juan; Di Stefano, María C. ; Moschovich, Nicole (28 de junio de 2018). Preparación y caracterización de un polímero conductor: Polianilina (PANI). *Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires, Departamento de*

Ingeniería Química, Investigación y Desarrollo en Tecnologías Químicas Aplicadas, IDETQA, Medrano 951, (C1179AAQ), Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.  
<https://ria.utn.edu.ar/bitstream/handle/20.500.12272/5492/Proyecciones%20Octubre%202018%20Espinoza.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [38] Bhadra, S., Khastgir, D., Singha, N. K., & Lee, J. H. (2009). Progress in preparation, processing and applications of polyaniline. *Progress in Polymer Science*, 34(8), 783–810. DOI: 10.1016/j.progpolymsci.2009.04.003
- [39] Polianilina. Wikipedia. <https://es.wikipedia.org/wiki/Polianilina>
- [40] Poly(p-phenylene\_vinylene). Wiki. [https://hmn.wiki/es/Poly\(p-phenylene\\_vinylene\)](https://hmn.wiki/es/Poly(p-phenylene_vinylene))
- [41] Polyphenylene. Wiki. <https://hmong.es/wiki/Polyphenylene>
- [42] Óxido de polifenileno. Wikipedia.  
[https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido\\_de\\_polifenileno#:~:text=E1%20poli%20\(%C3%B3xido%20de%20p,de%20alto%20impacto%20o%20poliamida.](https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_de_polifenileno#:~:text=E1%20poli%20(%C3%B3xido%20de%20p,de%20alto%20impacto%20o%20poliamida.)
- [43] (2016). Apuntes tema 1 asignatura Biomateriales de Biotecnología de la UMH. Universidad Miguel Hernández de Elche. STUDOCU.  
<https://www.studocu.com/es/document/universidad-miguel-hernandez-de-elche/biomateriales/tema-1-apuntes-1/10155728>
- [44] “Polímeros conductores con aplicaciones biomédicas y biotecnológicas”. E. Armelin, J.I. Iribarren, J. Casanovas, F.Liesa y C. Alemán. *Química e Industria*. Julio-agosto 2004.
- [45] Valero Conzuelo, Laura Luz (2016). "Caracterización de músculos artificiales con capacidades sensores/actuadores e intercambio mayoritario de cationes". Universidad Politécnica de Cartagena.  
[https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5468/llvc\\_C.pdf?sequence=5&isAllowed=y](https://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5468/llvc_C.pdf?sequence=5&isAllowed=y)
- [46] S. M. Mirvakili, I. W. Hunter, *Adv. Mater.* 2018, 30, 1704407.  
<https://doi.org/10.1002/adma.201704407>

- [47] Artificial muscle e.g. ionic polymeric metal composite electro-active artificial muscle, bio-potential activation method, involves generating action potential to stimulate and activate non-biological muscle by mammalian nerve. [https://www.webofscience.com/wos/alldb/full-record/DIIDW:2005331580\(overlay:export/exp\)](https://www.webofscience.com/wos/alldb/full-record/DIIDW:2005331580(overlay:export/exp))
- [48] Construcción de un sistema de movimiento biomimético empleando polímeros conductores. Universidad Politécnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/3129/41352-1.pdf?sequence=1>
- [49] T. F. Otero, L. Valero, ChemElectroChem 2017, 4, 3276. Bending Monolayer Artificial Muscle. <https://chemistry-europe.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/celec.201700713>
- [50] Higuera-Ruiz, Diego. ResearchGate. [https://www.researchgate.net/figure/Integration-concept-of-soft-actuators-cavatappi-artificial-muscles-in-a-biological\\_fig1\\_356359230](https://www.researchgate.net/figure/Integration-concept-of-soft-actuators-cavatappi-artificial-muscles-in-a-biological_fig1_356359230)
- [51] Review: Artificial muscles based on conducting polymers María Teresa Cortés, Juan Carlos Moreno Department of Chemistry, Universidad de los Andes. <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/epoly.2003.3.1.523/pdf>
- [52] A Sandeep Kranthi Kiran & Seeram Ramakrishna. An Introduction to Biomaterials Science and Engineering, chapter 4: Biomaterials: Basic principles. May 2021. <https://doi.org/10.1142/12038>
- [53] Ruiz, Diego (10 de septiembre de 2021). Cavatappi artificial muscles could allow robots to move like human. Wevolver. <https://www.wevolver.com/article/cavatappi-artificial-muscles-could-allow-robots-to-move-like-human>
- [54] (4 de marzo de 2021). Músculos artificiales para robots. DoctorGo. <https://doctorgo.es/blog/musculos-artificiales-para-robots/>
- [55] Terol, Moncho (julio de 2023). Músculos artificiales cambiarían el futuro de las prótesis médicas. ThinkBig. <https://blogthinkbig.com/musculos-artificiales-futuro-robotica>

- [56] Boris Lakard Electrochemical Biosensors Based on Conducting Polymers: A Review, 2020, <https://doi.org/10.3390/app10186614>
- [57] Echeverría, Coro. Impacto de los polímeros en la salud y el bienestar: Desarrollo de polímeros activos para aplicaciones en biomedicina. Grupo de Ingeniería Macromolecular, Departamento de Química y Propiedades de los Polímeros. Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros; ICTP-CSIC. Plataforma Interdisciplinaria de Plásticos Sostenibles para una Economía Circular (SusPlast). <https://digital.csic.es/bitstream/10261/243920/1/837089.pdf>
- [58] Valentynovych Tkach, V, Vasylyovych Nechyporuk, V y Ivanonych Yagodynets', P. (2013). Stability study in the performance of sensors and biosensors based on conductor polymers in strong acidic media. Revista Colombiana de Ciencias Químico Farmacéuticas. <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/50536/45101-216306-1-SM.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [59] Electroforesis de proteínas y de ácidos nucleicos. Biomodel. <https://biomodel.uah.es/tecnicas/elfo/inicio.htm>
- [60] María Gabriela De Souza, Yelitza Figueroa de Gil , Arnaldo L. Ramírez , José L. Prin , Pablo J. Guzmán , Blanca Otero, Carlos Rodríguez , Issa Katime y Blanca Rojas de Gáscue. Hidrogeles de poli(acrilamida): Evaluación de su comportamiento en fluido fisiológico simulado (SBF), volumen 15, 2014. <https://www.observatorioplastico.com/ficheros/articulos/83391421413232608.pdf>
- [61] Lose, G., Sørensen, H.C., Axelsen, S.M. et al. An open multicenter study of polyacrylamide hydrogel (Bulkamid) for female stress and mixed urinary incontinence. *Int Urogynecol J* 21, 1471–1477 (2010). <https://doi.org/10.1007/s00192-010-1214-1>
- [62] Terol, Moncho (julio de 2023). Músculos artificiales cambiarían el futuro de las prótesis médicas. ThinkBig. <https://blogthinkbig.com/musculos-artificiales-futuro-robotica>
- [63] Herrera García, David & Garnica Romo Ma. Guadalupe. ¿Qué son los biosensores? Saber más. <https://www.sabermas.umich.mx/archivo/tecnologia/593-numero-66/1184-queson-los-biosensores.html>

- [64] Pedro Carneiro, Simone Morais, Maria do Carmo Pereira, Biosensors on the road to early diagnostic and surveillance of Alzheimer's disease, *Talanta*, Volume 211, 2020, 120700, ISSN 0039-9140, <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2019.120700>.
- [65] Ortega Ortiz de Apodaca, Fidel; Vilas Sánchez, Vicente (11 de mayo de 2006). Biosensores y biochips: Herramientas para el diagnóstico y la terapéutica. <https://www.ranf.com/wp-content/uploads/academicos/discursos/numero/fidel.pdf>
- [66] Mandal, Ananya (16 de junio de 2023). Aplicaciones de biosensores. *News Medical Life Sciences*. <https://www.news-medical.net/health/Biosensor-Applications.aspx#:~:text=Biosensors%20are%20used%20to%20check,levels%20of%20wastewater%2C%20for%20example>.
- [67] De Oliveira Andrade, Rodrigo. (agosto de 2017). Biosensores en medicina. *Pequisa FAPSEP*. <https://revistapesquisa.fapesp.br/es/biosensores-en-medicina/>
- [68] Wein Harrison (julio de 2017). Biosensors and Your Health, What's Your Body Trying to Tell You? <https://salud.nih.gov/recursos-de-salud/nih-noticias-de-salud/biosensores-y-su-salud#:~:text=Los%20biosensores%20ya%20se%20usan,sin%20necesidad%20de%20un%20pinchazo>.
- [69] Luis Eduardo Ceballos-Camargo, Rosa Idalia Narro Céspedes, José Sandoval Cortés (julio de 2014). Biosensores electroquímicos de glucosa. *CienciAcierta*. *Revista científica, tecnológica y humanística*. <http://www.cienciacierta.uadec.mx/2014/09/06/biosensores-electroquimicos-de-glucosa/>
- [70] Víctor González Rumayor Esther García Iglesias Olga Ruiz Galán Lara Gago Cabezas. Aplicaciones de biosensores en la industria agroalimentaria. Informe de vigilancia tecnológica. [https://www.ugr.es/~cjl/VT1\\_Aplicaciones\\_de\\_biosensores\\_en\\_la\\_industria\\_agroalimentaria.pdf](https://www.ugr.es/~cjl/VT1_Aplicaciones_de_biosensores_en_la_industria_agroalimentaria.pdf)
- [71] Castro-Ortiz, Lourdes Patricia, Luna Pabello, Víctor Manuel, Villalobos Pietrini, Rafael (2007). Estado del arte y perspectivas del uso de biosensores ambientales en México. *Revista internacional de contaminación ambiental*,

- 23(1), 35-45. Recuperado en 14 de enero de 2024, de [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0188-49992007000100004&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0188-49992007000100004&lng=es&tlng=es).
- [72] UAM (22 de junio de 2018). Nuevos biosensores detectan estrés oxidativo en el medio acuático UAM. SINC. Ciencia contada en español. <https://www.agenciasinc.es/Noticias/Nuevos-biosensores-detectan-estres-oxidativo-en-el-medio-acuatico>
- [73] (02 de junio de 2009). Un biosensor permite diagnosticar la infección por VIH en menos de una hora. RDCSIC. <https://rdcsic.dicat.csic.es/biologia-y-biomedicina-2/92-ofertas-tecnologicas/222-un-biosensor-permite-diagnosticar-la-infeccion-por-vih-en-menos-de-una-hora>
- [74] Paneles Solares Orgánicos: Qué Son, Ventajas y Precios. Inarquia. <https://inarquia.es/paneles-solares-organicos-que-son-ventajas-precios/>
- [75] (29 de diciembre de 2022). Todo lo que necesitas saber sobre células solares orgánicas. Cambio energético. <https://www.cambioenergetico.com/blog/celulas-solares-organicas/>
- [76] Maisch, Marija (26 de febrero de 2018). Propiedades únicas de las células solares de polímeros orgánicos podrían abrir nuevos nichos de mercado. Pv magazine. <https://www.pv-magazine-latam.com/2018/02/26/propiedades-unicas-de-las-celulas-solares-de-polimeros-organicos-podrian-abrir-nuevos-nichos-de-mercado/>
- [77] Montufar, Roberto (6 de noviembre de 2020). Celdas fotovoltaicas orgánicas. KeeUI Solar. <https://keeui.com/2020/11/06/celdas-fotovoltaicas-organicas/>
- [78] Caballero, Ana (21 de abril de 2023). Células solares orgánicas: energía sostenible y flexible. Climate Consulting. <https://climate.selectra.com/es/que-es/celulas-solares-organicas>
- [79] (5 de agosto de 2014). Paneles solares orgánicos más baratos y flexibles. El periódico de la energía. <https://elperiodicodelaenergia.com/paneles-solares-organicos-mas-baratos-y-flexibles/>
- [80] Mandal, Ananya (16 de junio de 2023). Biosensor Principles. News medical life sciences. <https://www.news-medical.net/health/Biosensor-Principles.aspx>

- [81] Bhalla N, Jolly P, Formisano N, Estrela P. Introduction to biosensors. *Essays Biochem.* 2016 jun 30;60(1):1-8. doi: 10.1042/EBC20150001. PMID: 27365030; PMCID: PMC4986445.
- [82] Hoppe, H., Sariciftci, N.S. Organic solar cells: An overview. *Journal of Materials Research* 19, 1924–1945 (2004).  
<https://doi.org/10.1557/JMR.2004.0252>
- [83] Christoph J. Brabec, N. Serdar Sariciftci and Jan C. Hummelen, Plastic solar cells, *Adv. Funct. Mater.* 2001, 11, No. 1, February.  
<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/1616-3028%28200102%2911%3A1%3C15%3A%3AAID-ADFM15%3E3.0.CO%3B2-A>
- [84] Morato, Ana (OPTI); Narváez, Isabel (OPTI); Toribio, Concha (FENIN). *Ciencias de la salud. El futuro de los biomateriales. Tendencias tecnológicas a medio y largo plazo. Panel Fenin.*  
[http://panelfenin.es/uploads/fenin/documento\\_estudios/pdf\\_documento\\_19.pdf](http://panelfenin.es/uploads/fenin/documento_estudios/pdf_documento_19.pdf)
- [85] Craig D. Friedman, Future directions in biomaterial implants and tissue engineering, *archives of facial plastic surgery* 2001 3:2, 136-137.  
<https://doi.org/10.1001/archfaci.3.2.136>
- [86] Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) (27 de julio de 2023). *Desarrollan un nuevo material polimérico para dispositivos electrónicos.* *MundoPlast.* <https://mundoplast.com/csic-material-dispositivos-electronicos/>
- [87] Kaihara S, Vacanti JP. Tissue Engineering: Toward New Solutions for Transplantation and Reconstructive Surgery. *Arch Surg.* 1999;134(11):1184–1188. doi:10.1001/archsurg.134.11.1184
- [88] Axpe, E., Orive, G., Franze, K. et al. Towards brain-tissue-like biomaterials. *Nat Commun* 11, 3423 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17245-x>
- [89] (17 de julio de 2020). *El futuro de los biomateriales: suaves y resistentes como el cerebro. El Español. Invertia.*  
[https://www.elspanol.com/invertia/disruptores-innovadores/innovadores/investigacion/20200717/futuro-biomateriales-suaves-resistentes-cerebro/505700818\\_0.html](https://www.elspanol.com/invertia/disruptores-innovadores/innovadores/investigacion/20200717/futuro-biomateriales-suaves-resistentes-cerebro/505700818_0.html)

- [90] (10 de enero 2024). El futuro de las soluciones de cableado de polímero conductor. Energy5. <https://energy5.com/es/el-futuro-de-las-soluciones-de-cableado-de-pol237mero-conductor#anchor-0>
- [91] (4 de julio de 2022). El envase del futuro: con bioplásticos y biodegradable. OsonaSealPack. <https://www.ostonasealpack.com/envase-del-futuro/>
- [92] Richard Balint, Nigel J. Cassidy, Sarah H. Cartmell, Conductive polymers: Towards a smart biomaterial for tissue engineering, Acta Biomaterialia, Volume 10, Issue 6, 2014, Pages 2341-2353, ISSN 1742-7061, <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2014.02.015>.