

Review paper

Soft robotics: An exploration of inspired technologies by biological organisms for medical applications.

Robótica blanda: Una exploración de tecnologías inspiradas en organismos biológicos para aplicaciones médicas.

Johnny A. Valdés*¹, **Oscar Avilés, Ph.D**²

¹Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. ² Universidad Militar Nueva Granada / Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia,

* Correspondence email: jvaldesc@correo.udistrital.edu.co

Abstract

Context: Soft robotics and especially bio inspired soft robotics is a field that has a great capacity for medical applications, because it focuses on the development of devices that are more human-friendly and that adapt to more biological environments.

Method: For the search of the information that is dealt with in this article, the search of the key words was carried out in databases that contained scientific material and research results, and some of the most relevant information was extracted according to different criteria.

Results: The main result of this article is the exploration of bio inspired robotic technologies used in soft robotics which could be used in the development of medical devices, processes or procedures.

Conclusions: With the information found, it was possible to give an overview of the main bio inspired robotic technologies, those used in the development of soft robots and how they could be integrated and complemented for the solution of problems in the field of medicine and bioengineering.

Keywords: Robot, Bio inspired, Soft robot.

Acknowledgements: To Professor Oscar Avilés Ph.D. for their contributions and patience in the development of this article, which made the work come to fruition.

Language: Spanish.

Resumen

Contexto: La robótica blanda y en especial la robótica blanda bioinspirada es un campo que tiene una gran capacidad para aplicaciones médicas, debido a que se centra en el desarrollo de dispositivos más amigables con el ser humano y que se adapten más a entornos biológicos.

Método: Para la búsqueda de la información que se trata en el presente artículo se realizó la búsqueda de las palabras clave en bases de datos que contenían material científico y de resultados de investigación, y se extrajo alguna de la información más relevante de acuerdo con diferentes criterios de inclusión.

Resultados: El principal resultado de este artículo es la exploración de tecnologías robóticas bioinspiradas y usadas en robótica blanda las cuales pudieran usarse en el desarrollo de dispositivos, procesos o procedimientos médicos.

Conclusiones: Con la información encontrada se logró dar un vistazo general de las principales tecnologías robóticas bioinspiradas, las que se usan en el desarrollo de robots blandos y como pudieran llegar a integrarse y complementarse para la solución de problemas en el campo de la medicina y la bioingeniería.

Palabras clave: Robot, Bioinspirado, Robot blando.

Agradecimientos: Al profesor Oscar Avilés Ph.D por sus aportes y paciencia en el desarrollo del presente artículo los cuales lograron que el trabajo llegara a buen término.

Open access



© The authors; licensee: Revista INGENIERÍA. ISSN 0121-750X, E-ISSN 2344-8393

Cite this paper as: Author, F., Author, J., Author, S.: *The Title of the Paper*. INGENIERÍA, Vol. XX, Num. XX, 2015
pp:pp. doi:10.14483/udistrital.jour.reving.20XX.X.aXX

1. Introducción

Uno de los más grandes desarrollos tecnológicos que ha tenido la humanidad hasta el momento es la robótica, un campo tan amplio y variado que puede ser aplicado casi a cualquier área de la ciencia, desde procesos productivos hasta aplicaciones médicas. Básicamente un mecanismo robótico puede definirse como una máquina capaz de imitar características o funciones para desarrollar determinada tarea[1].

Se pueden diferenciar dos campos principales; la robótica dura y la robótica blanda. Para poder hablar sobre robótica blanda se debe establecer primero cuales son las principales diferencias entre robótica dura y robótica blanda. La robótica dura es aquella que utiliza elementos estructurales sólidos, actuadores como motores, solenoides, etc. [1] mientras que la robótica blanda utiliza elementos que son suaves y flexibles capaces de lograr movimientos más complejos y soportar golpes y deformaciones más fácilmente[2].

El enfoque que se presenta en este trabajo es hacia las aplicaciones médicas que puedan desarrollarse a partir de las tecnologías en robótica blanda, que hasta el momento se ha centrado en campos como la rehabilitación, asistencia y apoyo al movimiento, en aplicaciones clínicas como la endoscopia, el estudio del corazón y el sistema circulatorio, cateterismo en el sistema urinario, en imagenología, y en el desarrollo de manipuladores quirúrgicos[3].

Sin embargo, aún hay aplicaciones médicas en las que se podrían usar tecnologías de robótica blanda, que van desde una escala mínima como la exploración no invasiva de los órganos internos del cuerpo humano con micro y nano robots que puedan ser ingeridos por el paciente, hasta escalas mayores como manipuladores capaces de realizar cirugías causando el menor perjuicio posible al paciente.

Lo que se busca al final de este trabajo es explorar sobre las tecnologías existentes tanto en robótica bioinspirada como en robótica blanda y cómo las mismas puedan llegar a utilizarse en el desarrollo de nuevos procesos, procedimientos y/o dispositivos médicos para aplicaciones clínicas para resolver problemas que se puedan presentar en el ámbito clínico como p.ej. la exploración y tratamiento no invasivo de patologías en el tracto digestivo.

2. Metodología

Para la búsqueda de la información se definieron principalmente dos ecuaciones de búsqueda importantes las cuales fueron *“Bio inspired Robot”* y *“Soft AND robot AND bio*”*. Con ayuda de ellas se consultó información relevante o pertinente al tema en tres bases de datos: *Science Direct*, *IEEE Xplore* y *Springer Link*. Los criterios de selección fueron publicaciones en los últimos 10 años, como primer filtro de selección. Como segundo filtro de selección se tuvo en cuenta que los artículos estuvieran en las áreas de Ingeniería biomédica, Bioingeniería, Ingeniería biónica, Robótica y sistemas autónomos, Locomoción bioinspirada. Finalmente, como último filtro de selección, se tomaron todos los artículos que tuvieran relación o que hablaran o mencionaran Robots blandos bioinspirados. La búsqueda se resume en la tabla I:

TABLA I
MATRIZ DE BÚSQUEDA DE INFORMACIÓN

Fuente	Fecha	Ecuación de búsqueda (palabras clave)	No. de resultados	Criterios de inclusión y exclusión (primer filtro)	Artículos seleccionados	Criterios de inclusión y exclusión (segundo filtro)	Artículos seleccionados	Criterios de inclusión y exclusión (tercer filtro)	Artículos seleccionados (final)
Science Direct	14/03/2020	Bio inspired robot	726	- Publicados en los últimos 10 años.	677	- Ingeniería biónica. - Robótica y sistemas autónomos. - Locomoción bioinspirada.	73	Robots blandos bioinspirados	9
		Soft AND robot AND bio*	4087	- Publicados en los últimos 10 años.	2985	- Robótica y sistemas autónomos.	74		12
IEEE Xplore	21/03/2020	Bio inspired robot	542	- Publicados en los últimos 10 años.	463	- Que tenga relación con Robots móviles, biomimética, robótica médica, actuadores, biomecánica, pinzas, manipuladores diestros. - Solo artículos de revistas.	85	Robots blandos bioinspirados	8
		Soft AND robot AND bio*	1546	- Publicados en los últimos 10 años.	1293	- Solo artículos de revistas. - Robótica y sistemas autónomos.	113		7
Springer Link	28/03/2020	Bio inspired robot	934	- Publicados en los últimos 10 años.	807	- Ingeniería biomédica y Bioingeniería	133	Robots blandos bioinspirados	10
		Soft AND robot AND bio*	14590	- Publicados en los últimos 10 años.	9407	- Ingeniería biomédica y Bioingeniería - Solo artículos	378		5
TOTAL ARTICULOS SELECCIONADOS									51

Fuente: Elaboración propia.

Al final de la búsqueda y aplicando los criterios citados se seleccionaron un total de 51 artículos relacionados con el tema que se quiere tratar, sobre los cuales se centrará el desarrollo del tema que se pretende conocer.

3. Robots bioinspirados

En la mayoría de desarrollos en robótica está presente la inspiración orientada en la naturaleza, ya que las criaturas que están presentes en la misma, tienen características, tales como suavidad, flexibilidad, adaptabilidad que son deseables para los robots bioinspirados, sin embargo, para el desarrollo de estos robots se tiene en cuenta que los principales rasgos y características de los organismos biológicos pueden ser imitados en la morfología, control, actuación y sensorica de los robots[4].

Gran parte de los esfuerzos, en la consecución de sistemas bioinspirados, se basan en la idea de construir robots más amigables con el ser humano. Robots que sean capaces de interactuar sin causar ningún tipo de daño[5]. Es por eso que, la biología ha proveído un nuevo enfoque de desarrollo en la robótica tradicional, permitiendo el análisis de sistemas biológicos complejos (como la trompa del elefante, las estrellas de mar, los brazos en cefalópodos, entre otros) para encontrar aplicaciones y usos más allá de lo que ordinariamente se puede encontrar[6].

Se han diseñado robots para diferentes aplicaciones p.ej. exploración submarina, manipulación de objetos, entre otros; sin embargo, muchos se han inspirado en organismos invertebrados como moluscos y artrópodos, que biológicamente tienen características más deseables para robótica, entre ellos se han destacado trabajos como el

de Bell et al quienes diseñaron un mecanismo que usando fuerzas electromagnéticas emula el movimiento que tienen los equinodermos en el mar[7]. También en el campo de la exploración marina grupos como los de Shen et al[8] y Godaba et al[9] que presentaron diseños robóticos bioinspirados en un calamar y una medusa respectivamente con el propósito de emular los movimientos de los mismos y poder usarlos en aplicaciones de exploración y estudio de los lechos submarinos. Finalmente se puede observar que no solo estas aplicaciones se trabajan a nivel macro, de igual manera grupos como el de Guo et al han propuesto y desarrollado prototipos a nivel microscópico[10].

Uno de los enfoques encontrados se observa en la imitación de la locomoción de algunos organismos biológicos. En los cuales se trata de reproducir de la manera más aproximada los patrones de movimiento de algunas especies; como lo muestra Venkiteswaran et al cuyo trabajo consistió en el desarrollo de varios patrones de movimiento de distintas especies mediante actuadores de campo magnético[11]. Así como Lu, Zhang, Yang et al en cuyo trabajo también se evidencia como se modela e imita el patrón de movimiento de un milpiés el cual actúa bajo el principio de campo magnético[12]. Henke et al muestran cómo se desarrolló un robot bioinspirado en una oruga el cual actuaba mediante el uso de elastómeros dieléctricos[13]. Los trabajos antes mencionados se resumen en la Figura 1.

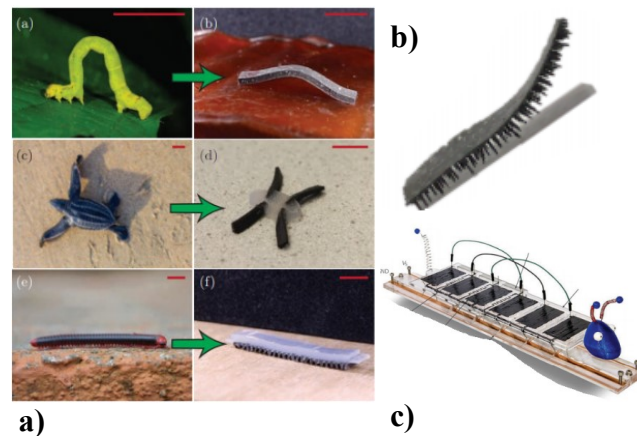


Figura 1. Algunos ejemplos de robots bioinspirados que imitan el movimiento de organismos biológicos. Fuente: [11][8][9]

Sin embargo, en el desarrollo de ésta revisión se pudo encontrar que los campos de investigación y desarrollo de dispositivos bioinspirados también marca una pauta, ya que aunque la finalidad de los robots bioinspirados es imitar características biológicas con posibles aplicaciones en el campo de la ingeniería, se pueden destacar trabajos como el de Paschal et al quienes desarrollaron un robot inspirado en un erizo de mar el cual tiene una locomoción igual a la del organismo biológico[14], lo que puede tener aplicaciones tanto a nivel macro como a nivel micro en el sentido que el sistema puede ser usado en entornos de exploración. No obstante también se encontraron trabajos como el de Godaba et al, en el cual se presenta el desarrollo de un robot inspirado en una medusa de mar[9], lo que tiene posibles aplicaciones también en el entorno de la exploración submarina, el monitoreo de las variables que influyen en los ecosistemas marinos, entre otras.

Otro punto de vista se ha dado en el desarrollo de manipuladores robóticos que tienen como finalidad el manejo de objetos frágiles o de formas geoméricamente no uniformes. Cabe anotar que los manipuladores que se encuentran en desarrollo siguen la línea de robótica bioinspirada ya que son diseñados imitando características y comportamientos de organismos biológicos. Entre ellos se encontraron los trabajos desarrollados por Laschi et al en el cual se desarrolló el prototipo de un manipulador robótico inspirado en un tentáculo de pulpo[15], el cual puede adaptarse e imitar el comportamiento muscular que tiene el este animal para afianzarse a objetos y lograr su manipulación como se muestra en la Figura 2.

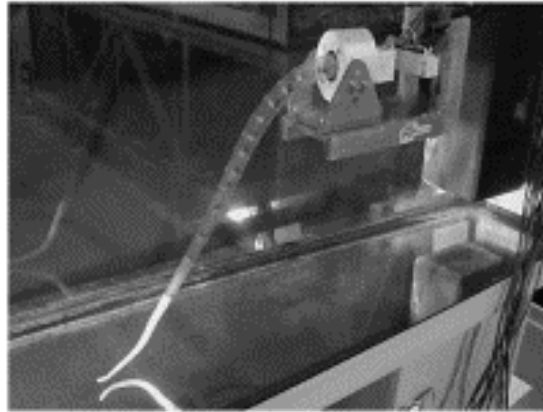


Figura 2. Prototipo de manipulador bioinspirado en un tentáculo de pulpo. Fuente: [15]

Aunque no solo los animales marinos han servido como inspiración para generar desarrollos en el campo de los manipuladores robóticos, especies como el gecko han inspirado trabajos como el de Glick et al en el cual se investigaron las propiedades adhesivas de los compuestos fluidicos del gecko para mejorar las propiedades de adherencia de los actuadores utilizados en manipuladores robóticos[16].

Estos trabajos se ven complementados por grupos de investigación que buscan llevar la robótica bioinspirada más allá de solo elementos aislados, como lo presentó Cianchetti et al, que continuó con el desarrollo del manipulador inspirado en un pulpo y lo magnificó construyendo un prototipo de pulpo robótico bioinspirado (Fig. 3) en el cual ya se veían involucrados ocho manipuladores, este prototipo no solo podía manipular cosas sino que podía interactuar completamente con su entorno[17], llevando la robótica bioinspirada a un nuevo nivel en el que se puede llegar implementar este tipo de tecnología para estudiar el comportamiento de las especies, o simplemente para realizar múltiples manipulaciones de objetos.

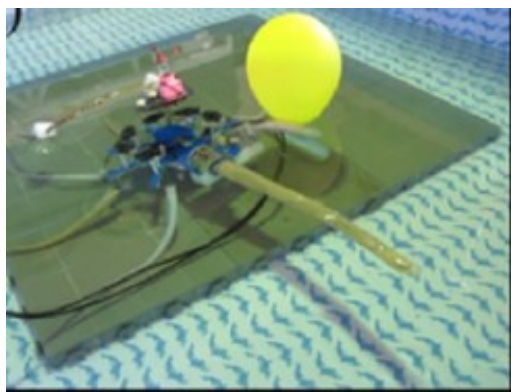


Figura 3. Prototipo del robot OCTOPUS. Fuente: [17]

Dentro de la búsqueda realizada se pudo encontrar una variedad de desarrollos robóticos inspirados también en gusanos, ya que este animal tiene un movimiento y forma característicos los cuales son aptos para aplicaciones robóticas, entre ellos se encontraron los trabajos de Lee et al que propone el prototipo de un micro robot de tan solo 12mm x 11mm x 9mm de dimensiones en forma de gusano con actuadores electromagnéticos[18] que podría ser aplicable en el campo de la exploración interna del cuerpo humano o simplemente como sonda capaz de recolectar datos importantes en p.ej. el tracto digestivo. Dentro de esta misma línea de investigación también se encontraron trabajos como el de Guo et al en el cual se desarrolló el prototipo de un micro robot inspirado en un gusano el cual utilizando actuadores IPMC logran emular varios de los movimientos en varios grados de libertad[10], lo que más llama la atención de estos trabajos es la escala a la cual se desarrollan los prototipos y como se pueden asemejar o incluso fusionar para lograr desarrollos con mejores posibilidades y aplicaciones en el campo de la exploración del cuerpo humano.

Además, dentro de la línea de robots bioinspirados en gusanos, se encontraron trabajos como el de Lin et al

quienes propusieron un robot imitativo de una oruga con el cual se logró que el mismo cambiara de forma y tomara una forma de anillo imitando el movimiento de autodefensa que tiene esta especie de orugas[19], esto lleva a pensar en las aplicaciones posibles que tendrían este tipo de tecnologías para el desarrollo de actuadores bioinspirados y como los mismos pudieran usarse en diferentes campos en la industria.

No obstante como ya se ha mencionado se han realizado desarrollos también a mayores escalas, hablando también de robots inspirados en gusanos, tales como el trabajo realizado por Song et al el cual se inspiró en los movimientos de una lombriz de tierra común para desarrollar un robot multi-seccional impulsado por solenoides que se encargan de posicionar las diferentes secciones del mismo dando múltiples opciones de movimiento[20] con lo cual se pudiera pensar en aplicaciones como la exploración minera. Igualmente se encontraron trabajos como el de Umedaichi et al en el cual se propone el prototipo de un robot que imita el movimiento de una oruga de seda[21].

Adicionalmente a todo lo expuesto, el desarrollo de robots bioinspirados no está limitado a los organismos biológicos antes mencionados, existen otros trabajos en robótica bioinspirada en donde se trata de emular otras formas de movimiento presentes en la naturaleza como lo expuesto en el trabajo de Nguyen et al quienes desarrollaron un robot hexápodo inspirado en un insecto común[22] el cual se movía por medio de elastómeros dieléctricos e imitaba la caminata.

Finalmente cabe destacar que todos los trabajos encontrados y expuestos revelan un enorme potencial de desarrollos que pueden aplicarse en áreas como p.ej. la medicina, química, industria farmacéutica, entre otras. En el caso que compete sería específicamente el uso de esas tecnologías imitativas bioinspiradas para el desarrollo de dispositivos médicos que permitan crear nuevos procesos y/o procedimientos médicos.

4. Robots blandos

Las principales características que identifican a los robots blandos son su flexibilidad y adaptabilidad, lo que los hace candidatos idóneos para trabajos en entornos en los que otros dispositivos no pueden actuar o interactuar[23], estas características los hacen muy deseables en situaciones en donde se deban manipular objetos con suavidad o en situaciones en donde se puedan poner en riesgo la integridad de las personas.

Dentro de la búsqueda realizada se encontró que varios de los robots blandos desarrollados se centraron en mejorar habilidades de manipulación y en como un manipulador blando en sinergia con un robot rígido pueden llegar a suplir la necesidad de manipulación de objetos de formas no comunes o de consistencias suaves.

Fue así como se encontraron trabajos como el de Galloway et al quienes diseñaron y desarrollaron un manipulador blando en forma de pinza cuyo principal propósito es la manipulación de corales en entornos submarinos[24]. Y Hao et al quienes propusieron y desarrollaron un actuador en forma de pinza de cuatro dedos que pueden controlarse de manera independiente mediante el uso de presión neumática[25]. Por esta misma línea también Al Abeach et al quienes diseñaron y construyeron un manipulador blando de tres dedos con rigidez variable y utilizando músculos neumáticos[26]. Estos trabajos demuestran que los manipuladores son una necesidad latente en el mundo de la robótica blanda y que ellos tienen un enorme potencial de aplicaciones en campos diversos de la ingeniería.

Los robots blandos típicamente se pueden clasificar en tres grupos: robots blandos neumáticos tradicionales, robots blandos de materiales hiperelásticos y robots blandos de materiales inteligentes[27], no obstante más que por su clasificación se hablará sobre los principales sistemas que los componen físicamente que son: la estructura, los actuadores y sensores sobre los cuales se mencionarán los desarrollos encontrados.

4.1. Estructura y materiales estructurales

Los elementos que conforman la estructura como característica principal deben ser fabricados en materiales que sean principalmente flexibles y que cuenten con resistencia a los golpes y choques, aunque también se busca que sean materiales livianos y fáciles de sintetizar o fabricar. Entre los materiales que se encontraron se destacan los termoplásticos, cauchos, resinas, siliconas y demás derivados, no obstante no se descartan del todo materiales de naturaleza metálica ya que cuentan con buenas propiedades mecánicas.

Aun así entre los materiales más destacados se encuentran polímeros y geles ya que ofrecen propiedades de biocompatibilidad, biodegradabilidad y son fácilmente manufacturables, p.ej. los polímeros de cristal líquido, polímeros con memoria de forma, elastómeros con memoria de forma, etc.[28]. Sin embargo una característica importante a la hora de seleccionar materiales es su resistencia mecánica y compliancia para soportar cargas, no obstante los materiales más populares son los elastómeros siliconados como el Sylgard™ 184 y 527 fabricado por Dow Chemicals, el Smooth-Sil™ 950 y Ecoflex™ 00-30 fabricados por Smooth-on[5].

Así mismo, pueden encontrarse trabajos como el de Miriyev et al quienes desarrollaron un tipo de material compuesto por una red de fibras de polímero mezclado con etanol que puede imprimirse en 3D[29], cuyas características mecánicas demostraron ser aptas para aplicaciones robóticas en el sentido que tienen flexibilidad y resistencia mecánica, características que son deseables en los materiales estructurales según lo que se ha mencionado.

También se encontraron otros materiales estructurales como el Veroclear™ que fue implementado por Hamidi et al para el desarrollo de un actuador robótico blando[30] y que además era imprimible en 3D (Fig. 4). Lo que le da mucha más versatilidad ya que no requiere de métodos de fabricación tradicionales como el moldeo por inyección o extrusión y tampoco tiene limitaciones en las formas y configuraciones que se pueden obtener.

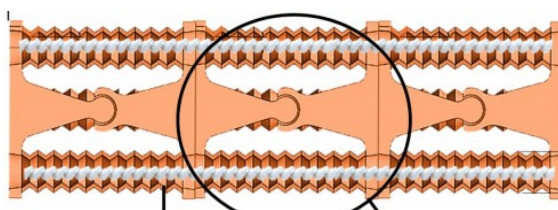


Figura 4. Prototipo del robot OCTOPUS fabricado en Vero Clear.
Fuente: Modificado de [30]

Así mismo, desarrollos como el propuesto por Shian et al quienes plantearon el prototipo de un actuador fabricado con una lámina de polímero elastómero dieléctrico, el cual funciona aplicando un voltaje a la lámina que ocasiona que sufra una deformación en su estructura; dependiendo de dichos voltajes, es posible hacer que la lámina tome determinadas formas y se adapte al objeto que pretende sostener[31]. Como se muestra en la Figura 5, este trabajo tiene aplicaciones en todos los entornos de robótica blanda ya que no solo se limita a actuadores sino que puede aplicarse p. ej., en estructuras que sean adaptativas para lograr mejores resultados en los movimientos del robot o también en la fabricación de sensores.



Figura 5. Lámina de elastómero dieléctrico usada como actuador para tomar un objeto. Fuente: Modificado de [31]

Finalmente se destacan materiales que, según la bibliografía revisada, se utilizan en muchos desarrollos en robótica blanda principalmente en el desarrollo de actuadores. Estos materiales se conocen como Ionic Electroactive Polymer (IEAP) de los cuales se derivan materiales como el Ionic Polymer-Metal Composites (IPMC), Conductive Polymers (CP) y Ionic Gels[32], que tienen capacidades como gran deformación y resistencia mecánica, facilidad de manipulación y mecanizado, flexibilidad para adaptarse a entornos complejos y bajo consumo energético, lo que los hace ideales para aplicaciones en robótica blanda.

4.2 Actuadores

Uno de los elementos fundamentales en cualquier desarrollo robótico son los actuadores ya que se encargan de brindar la capacidad de movimiento a los dispositivos. Estos actuadores pueden tener una amplia variedad de

formas y principios físicos de funcionamiento p.ej. eléctricos, magnéticos, ópticos, entre otros. Dentro de los trabajos encontrados se vieron desarrollos con aplicaciones a escalas macro y micro que pudieran derivar en usos para la medicina, industria farmacéutica, aeroespacial, industria manufacturera, entre otras.

Dentro del área de los actuadores se halló que actualmente para desarrollos robóticos, en general, se pueden encontrar de varios tipos como las Aleaciones de Memoria de Forma (en inglés SMA); que son capaces de generar esfuerzos de hasta 80GPa. También están los Actuadores de Elastómeros Fluídicos (en inglés FEA); con los cuales, se logran esfuerzos de 2.97 MPa dependiendo del fluido y que aunque no generan esfuerzos tan grandes tienen la ventaja de ser más flexibles. Por otro lado también existen los Polímeros con Memoria de Forma (en inglés SMP); que pueden generar esfuerzos de hasta 3GPa, con una flexibilidad media que depende en gran medida del polímero constitutivo. Existen igualmente los Polímeros Dielectricos Actuados Eléctricamente (en inglés DEAP); con los cuales se pueden generar esfuerzos de hasta 3MPa, con la ventaja que son muy flexibles. Finalmente también existen los Actuadores Magnéticos / Electromagnéticos los cuales pueden producir esfuerzos de hasta 0.05GPa; los mismos están compuestos de una mezcla de elastómero, que generalmente son cauchos siliconados unidos con partículas magnéticas y ferromagnéticas[33].

En primera medida cabe destacar trabajos como el de Yang et al quienes desarrollaron un robot cuyo cuerpo estaba constituido por una bicapa de óxido de grafeno reducido (Fig. 6) y óxido de grafeno poli dopamina; el cual cambia de forma al incidir un haz de luz láser sobre él[34]. En este desarrollo se logró que el material tuviera movimientos considerables a pequeña escala lo que puede representar posibles aplicaciones en ámbitos como la nanotecnología y robótica microscópica.

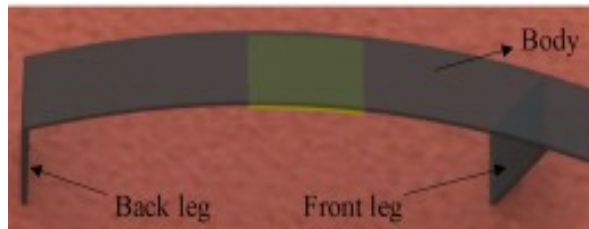


Figura 6. Micro robot fabricado en grafeno reducido. Fuente: Modificado de [34]

A mayor escala se pueden resaltar desarrollos como el de Runge et al quienes desarrollaron el prototipo de un robot llamado SPINEMAN que, inspirado en una estructura parecida a la columna vertebral (Fig. 7 Izq.) puede realizar movimientos de flexo-extensión en múltiples direcciones[35]; los cuales, imitando los segmentos vertebrales y utilizando resortes de SMA lograron obtener fuerzas suficientes para la ejecución de los movimientos proyectados en flexión y extensión; y con un control individual de cada uno de los segmentos. De igual manera trabajos como el de Mazzolai et al en el cual se desarrolló un actuador imitando la morfología muscular de un pulpo[36] (Fig. 7 Der.), allí se usaron también SMA con las cuales se lograba controlar la forma, posición y rigidez del actuador con fuerzas de hasta 40N con la cual podía sujetar objetos.

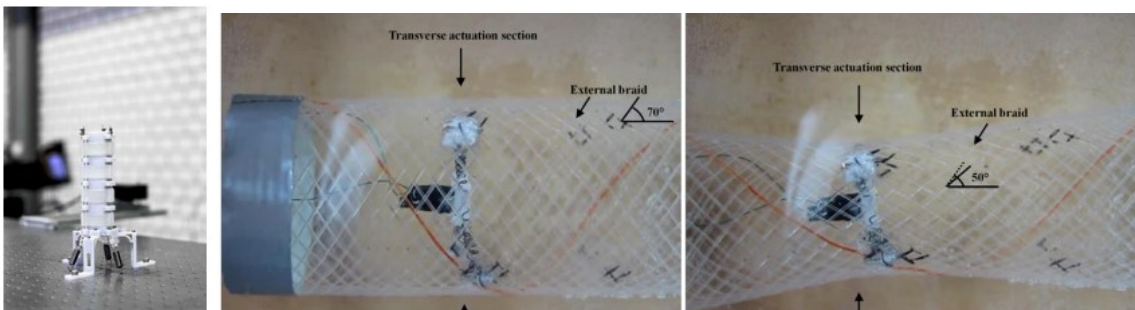


Figura 7. Robot SPINEMAN (izq.) y musculo artificial basado en SMA (der.). Fuente: Modificado de [35] y [36].

Así mismo, se pudieron encontrar trabajos como los de Kim et al quienes utilizando IPMC lograron desarrollar un actuador de múltiples grados de libertad con una estructura en configuración cilíndrica compuesta por varios haces de fibras de IPMC (Fig. 8); las cuales podían moverse independientemente para lograr movimientos poco comunes[37]. En este caso las fibras de IPMC tienen electrodos internos que permiten la flexión de hasta 50°

dependiendo de los parámetros eléctricos de entrada.

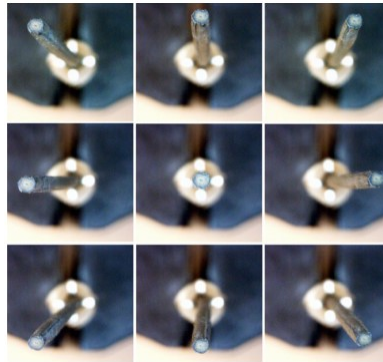


Figura 8. Fibras de IPMC con diferentes posiciones Fuente: Modificado de [37].

Igualmente entre los nuevos desarrollos encontrados el de He et al quienes idearon un adhesivo seco electroactivo accionado por un músculo artificial compuesto por IPMC; que demostró, tener capacidades de carga en tracción de hasta 24.5 MPa[38]. Este actuador fue desarrollado para sostener objetos imitando el sistema de adhesión que tienen los geckos. Así mismo, se encontraron trabajos como el de Sareh et al quienes desarrollaron el prototipo de un actuador en forma de ventosa (Fig. 9 Izq.), inspirado en los pulpos[39], con el fin de que integrados p.ej. en un manipulador robótico, permitan el manejo de objetos frágiles y/o delicados. De igual manera trabajos como los de Tawk et al quienes desarrollaron el prototipo de un actuador de vacío fabricado en poliuretano (Fig. 9 Der.) para integración con manipuladores robóticos, pinzas, o músculos artificiales[40]. Lo anterior da cuenta que varios desarrollos se han visto volcados a realizar mejoras en el proceso de manipulación de objetos frágiles y delicados.

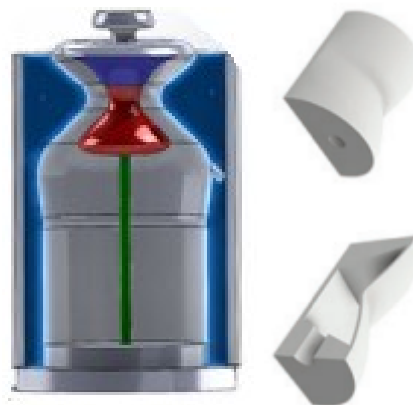


Figura 9. Actuadores tipo ventosa. Fuente: Modificado de [38] y [39].

4.3 Sensores

Los sensores se encargan de retroalimentar al robot de las variables externas con las cuales esta interactuando; no obstante, en el área de robótica blanda se ha centrado su desarrollo en la imitación de diferentes y variadas estructuras presentes en la naturaleza; como p. ej., las vellosidades, la piel, entre otras. En esta sección se destacarán algunos de los desarrollos encontrados en este campo, los cuales sin duda marcaron un camino para nuevos desarrollos de sensores en robótica blanda.

Uno de los sensores más estudiados es el sensor táctil, que busca dotar al robot con el sentido del tacto. Diferentes tipos de sensores táctiles se han desarrollado especialmente en aplicaciones en las que se ven involucrados manipuladores robóticos como lo mencionan Kappasov et al quienes hicieron una revisión de los diferentes tipos de sensores táctiles encontrando de tipo piezoresistivos, capacitivos, piezoeléctricos, de efecto de túnel cuántico, ópticos, entre otros[41].

Dentro de los trabajos encontrados cabe resaltar desarrollos como el de Boutry et al quienes crearon el prototipo de una piel electrónica blanda (Fig. 10), capaz de medir y reconocer fuerzas normales y tangenciales[42]. Esta piel biomimética está construida a partir de sensores capacitivos; este prototipo de piel fue usado en un brazo robótico de tipo industrial y demostró altas capacidades de sensibilidad con posibles aplicaciones en la industria.

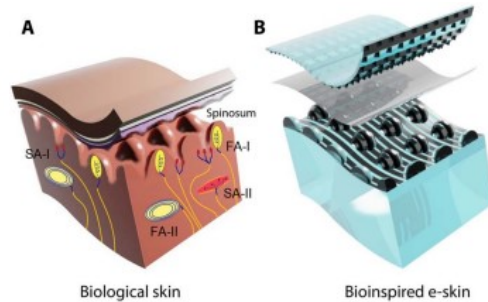


Figura 10. Comparación Piel biológica vs. Piel electrónica. Fuente: [42]

Así mismo se han desarrollado sensores buscando imitar las vellosidades que tienen diferentes organismos biológicos. Tales como el desarrollado por Ribeiro et al quienes crearon un sensor consistente en un arreglo de cilindros que están permanentemente magnetizados (Fig. 11 izq.); montados sobre un sensor magneto resistente más grande[43]. Cuando los cilindros son deformados generan un cambio en el campo magnético el cual es detectado por el sensor más grande dependiendo de la fuerza magnética ejercida sobre los mismos. Siguiendo por la misma línea de desarrollo, Liu et al propusieron el desarrollo de un sensor piezoeléctrico (Fig. 11 der.) fabricado con un compuesto de micro partículas sobre una matriz de silicona[44]. El sensor está compuesto de una matriz de cilios de aproximadamente 400 μm de diámetro y 8 mm de longitud, y fue diseñada inicialmente para medir flujos de líquidos; sin embargo, podría tener potencial de desarrollo en aplicaciones donde se requiera medir flujo sanguíneo, medicamentos, entre otros.

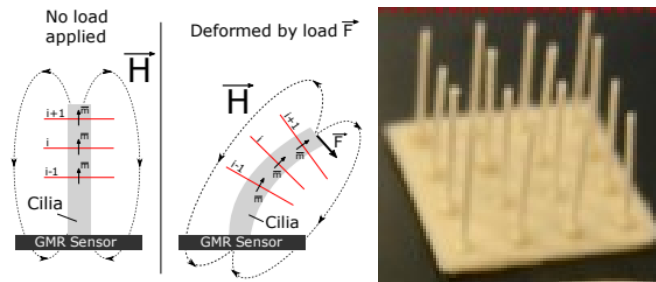


Figura 11. Sensores inspirados en vellosidades y estructuras ciliares. Fuente: [43][44]

Finalmente cabe resaltar que dentro de la bibliografía encontrada se encontraron un tipo de sensores conocidos como AHL (Artificial Hair Like). Son sensores inspirados en los receptores sensoriales que tienen los capilares de algunos insectos y peces. De este tipo de sensores existen piezoresistivos, piezoeléctricos, capacitivos, y magnéticos; sin embargo, una de sus características más interesantes es su tamaño ya que oscila entre los 25 y 100 μm de diámetro y tienen tasas de consumo de alrededor de los 80 nW[45] y además tienen múltiples aplicaciones ya que pueden ser usados integrados en sensores de fuerza, de flujo, aceleración entre otros.

5. Aplicaciones médicas

Después de interpretar toda la información encontrada, es importante encaminar las tecnologías encontradas hacia un objetivo común. En este caso la pregunta es, ¿Qué aplicaciones pueden tener los trabajos encontrados?, la respuesta puede ser muy amplia ya que pueden tener muchos campos de aplicación; no obstante, en este trabajo se quiere hacer un énfasis en las aplicaciones enfocadas hacia el desarrollo de nuevos dispositivos, procesos o procedimientos médicos. Es importante resaltar que los desarrollos robóticos médicos deben garantizar ser

flexibles, para mejorar la destreza y desempeño de los mismos y así lograr abrir la tecnología a nuevas aplicaciones y nuevos procedimientos[46]. Así que cuando se piensa en la implementación de nuevos dispositivos es importante que esta característica esté presente.

Los principales campos en los que centra el desarrollo de tecnologías médicas, especialmente en robótica; son la rehabilitación de miembros perdidos (prótesis) o incapacitados para moverse (órtesis); no obstante, también existen aplicaciones clínicas como el desarrollo de dispositivos para endoscopia, cateterismo, cirugía, entre otros[3]. En este último se encontraron trabajos que pudieran tener potenciales clínicos, especialmente en la exploración y revisión interna de los órganos del cuerpo; como p. ej. el trabajo realizado por Hawkes et al en donde desarrollaron un robot blando neumático extensible (Fig. 12); que, a través de presión neumática permite que el mismo se pueda maniobrar en diferentes direcciones[47] y por entornos difíciles. Además que su estructura consta un material polimérico que puede ser PTFE o caucho; para dar soporte y dirección al efector final utiliza alambres enrollados que se van desplegando de acuerdo a la longitud requerida. En su efector final, puede instalarse una cámara o un instrumento quirúrgico lo que le da posibles aplicaciones en cirugía endoscópica solo por nombrar una.



Figura 12. Funcionamiento del robot blando extensible (izq.), pruebas de desempeño (cen. y der.). Fuente: [47]

Dentro de esta misma línea de desarrollo también se encontraron trabajos como el de Chikhaoui et al, quienes estudiaron las propiedades de los polímeros electroactivos (PEA) para crear el prototipo de un robot continuo en forma de tubo (Fig. 13) el cual con voltajes de activación de hasta 1V lograba movimientos de hasta 45° y fuerzas de activación de alrededor de 180 μ N[48] lo que representa un consumo de energía bastante bajo, el robot fue ideado para exploración intracorporal y consta de varios tubos en los cuales están incorporados las láminas de PEA para controlar la dirección del mismo.

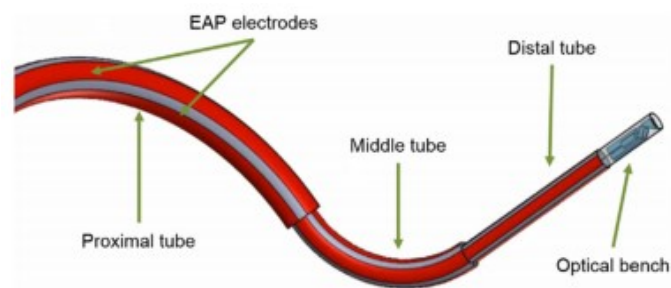


Figura 13. Robot tubular para exploración intracorporal. Fuente: [48]

Así mismo existen avances en materiales, específicamente en el área de ingeniería de tejidos y en este trabajo se quiere resaltar uno principalmente el cual se denomina scaffold basados en biomateriales, los scaffolds con estructuras creadas a nivel micro y nanoscópico en donde se destacan principalmente geles, esponjas, nano fibras, entre otros, aunque también existen desarrollos en materiales no biológicos como los polímeros sintéticos, nanotubos de carbón, hidroxiapatita y algunos materiales cerámicos como los silicatos[49].

No obstante, también se han desarrollado dispositivos robóticos de exploración con la finalidad de que sean ingeridos por el paciente y permitan una exploración constante sin invadir de manera permanente el cuerpo. Fu et al quienes crearon un micro robot accionado magnéticamente (Fig. 14) el cual tiene apenas 5 cm de longitud y 14

mm de diámetro, el cual utiliza el principio de impulsión a chorro, y de esta forma logra desplazarse por los fluidos corporales[50], establece un precedente guía con el cual se permitiría realizar más desarrollos y apoyar el diagnóstico de enfermedades p.ej. gástricas sin necesidad de utilizar aparatos endoscópicos.

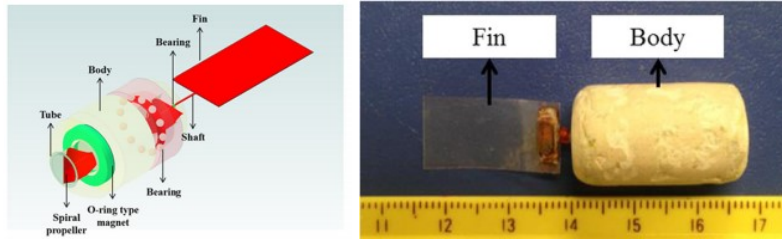


Figura 14. Micro robot para exploración intracorporal. Fuente: [50]

Finalmente, también existen desarrollos robóticos orientados a la cirugía. Hablando de aplicaciones clínicas, dichos desarrollos buscan en su mayoría dar apoyo al cirujano en la manipulación tanto de instrumentos quirúrgicos como también de los mismos órganos en cirugías de mayor complejidad. Dentro de los trabajos encontrados se destaca el de Gong et al quienes propusieron y desarrollaron un brazo robótico blando (Fig. 15); que si bien no estaba dirigido específicamente para aplicaciones de este tipo, puede llegar a utilizarse en entornos de cirugía robótica y tele cirugía, este brazo robótico blando el cual es actuado mediante tendones de caucho y con varias secciones indeformables que dan estabilidad al mismo; en su extremo distal se equipaba con un manipulador de tres dedos[51], el cual era capaz de tomar objetos y desplazarlos por su entorno.

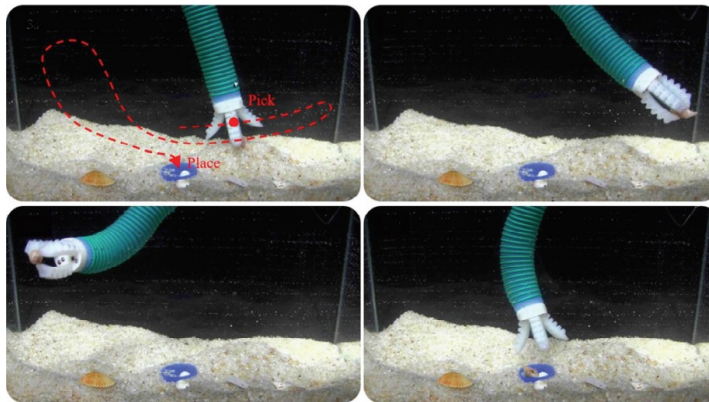


Figura 15. Brazo robótico blando desarrollado para exploración submarina. Fuente: [51]

6. Conclusiones

La mayoría de desarrollos robóticos bioinspirados aplicados en robótica se basan en artrópodos y cefalópodos, esto debido a que biológicamente estos organismos tienen muchas de las capacidades y características que son deseables como la flexibilidad, suavidad y adaptabilidad a entornos estrechos y de difícil acceso.

El campo de los manipuladores robóticos blandos está ampliamente desarrollado, no obstante, muchos desarrollos se parecen entre sí, por lo que convendría que se implementaran manipuladores robóticos con variaciones basadas en las tecnologías aquí tratadas y con esto llegar a mejorar las capacidades de los mismos.

Los materiales poliméricos electroactivos son un material de desarrollo muy interesante en el sentido que pueden aplicarse a muchos desarrollos robóticos, tanto en estructuras adaptativas, actuadores más versátiles y sensores más completos que puedan llegar a integrarse en algún momento incluso en organismos biológicos para potenciar sus capacidades.

Los desarrollos robóticos en la actualidad centran sus esfuerzos en el área de la rehabilitación, sin embargo, los procedimientos clínicos tienen un gran potencial de desarrollo sobre todo cuando se habla de micro y nano robótica que es un campo de la robótica poco implementado aún en el ámbito médico.

Referencias

- [1] G. M. Whitesides, "Soft Robotics", *Angewandte Chemie - International Edition*. 2018, doi: 10.1002/anie.201800907.
- [2] D. Rus y M. T. Tolley, "Design, fabrication and control of soft robots", *Nature*, 2015, doi: 10.1038/nature14543.
- [3] Z. T. H. Tse *et al.*, "Soft Robotics in Medical Applications", *J. Med. Robot. Res.*, 2018, doi: 10.1142/s2424905x18410064.
- [4] K. N. Kaipa *et al.*, *Bioinspired Robotics*. 2019.
- [5] S. Coyle, C. Majidi, P. LeDuc, y K. J. Hsia, *Bio-inspired soft robotics: Material selection, actuation, and design*. 2018.
- [6] A. W. Feinberg, "Biological Soft Robotics", *Annu. Rev. Biomed. Eng.*, 2015, doi: 10.1146/annurev-bioeng-071114-040632.
- [7] M. A. Bell *et al.*, "Echinoderm-Inspired Tube Feet for Robust Robot Locomotion and Adhesion", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, núm. 3, pp. 2222–2228, 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2810949.
- [8] Z. Shen, J. Na, y Z. Wang, "A Biomimetic Underwater Soft Robot Inspired by Cephalopod Mollusc", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 2, núm. 4, pp. 2217–2223, 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2724760.
- [9] H. Godaba, J. Li, Y. Wang, y J. Zhu, "A Soft Jellyfish Robot Driven by a Dielectric Elastomer Actuator", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 1, núm. 2, pp. 624–631, 2016, doi: 10.1109/LRA.2016.2522498.
- [10] S. Guo, L. Shi, N. Xiao, y K. Asaka, "A biomimetic underwater microrobot with multifunctional locomotion", *Rob. Auton. Syst.*, vol. 60, núm. 12, pp. 1472–1483, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2012.07.013>.
- [11] V. K. Venkiteswaran, L. F. P. Samaniego, J. Sikorski, y S. Misra, "Bio-Inspired Terrestrial Motion of Magnetic Soft Millirobots", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 4, núm. 2, pp. 1753–1759, 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2898040.
- [12] H. Lu *et al.*, "A bioinspired multilegged soft millirobot that functions in both dry and wet conditions", *Nat. Commun.*, 2018, doi: 10.1038/s41467-018-06491-9.
- [13] E. F. M. Henke, S. Schlatter, y I. A. Anderson, "Soft Dielectric Elastomer Oscillators Driving Bioinspired Robots", *Soft Robot.*, 2017, doi: 10.1089/soro.2017.0022.
- [14] T. Paschal, M. A. Bell, J. Sperry, S. Sieniewicz, R. J. Wood, y J. C. Weaver, "Design, Fabrication, and Characterization of an Untethered Amphibious Sea Urchin-Inspired Robot", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 4, núm. 4, pp. 3348–3354, 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2926683.
- [15] C. Laschi, M. Cianchetti, B. Mazzolai, L. Margheri, M. Follador, y P. Dario, "Soft robot arm inspired by the octopus", *Adv. Robot.*, 2012, doi: 10.1163/156855312X626343.
- [16] P. Glick, S. A. Suresh, D. Ruffatto, M. Cutkosky, M. T. Tolley, y A. Parness, "A Soft Robotic Gripper With Gecko-Inspired Adhesive", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 3, núm. 2, pp. 903–910, 2018, doi: 10.1109/LRA.2018.2792688.
- [17] M. Cianchetti, M. Calisti, L. Margheri, M. Kuba, y C. Laschi, "Bioinspired locomotion and grasping in water: The soft eight-arm OCTOPUS robot", *Bioinspiration and Biomimetics*, 2015, doi: 10.1088/1748-3190/10/3/035003.
- [18] K. Lee, Y. Kim, J. K. Paik, y B. Shin, "Clawed Miniature Inchworm Robot Driven by Electromagnetic Oscillatory Actuator", *J. Bionic Eng.*, vol. 12, núm. 4, pp. 519–526, 2015, doi: 10.1016/S1672-6529(14)60142-6.
- [19] H. T. Lin, G. G. Leisk, y B. Trimmer, "GoQBot: A caterpillar-inspired soft-bodied rolling robot", *Bioinspiration and Biomimetics*, 2011, doi: 10.1088/1748-3182/6/2/026007.
- [20] C.-W. Song, D.-J. Lee, y S.-Y. Lee, "Bioinspired Segment Robot with Earthworm-like Plane Locomotion", *J. Bionic Eng.*, vol. 13, núm. 2, pp. 292–302, 2016, doi: [https://doi.org/10.1016/S1672-6529\(16\)60302-5](https://doi.org/10.1016/S1672-6529(16)60302-5).
- [21] T. Umedachi, M. Shimizu, y Y. Kawahara, "Caterpillar-Inspired Crawling Robot Using Both Compression and Bending Deformations", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 4, núm. 2, pp. 670–676, 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2893438.
- [22] C. T. Nguyen *et al.*, "A novel bioinspired hexapod robot developed by soft dielectric elastomer actuators", en *IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems*, 2017, doi: 10.1109/IROS.2017.8206526.
- [23] Z. Wang, M. Z. Q. Chen, y J. Yi, "Soft robotics for engineers", *HKIE Trans. Hong Kong Inst. Eng.*, 2015, doi: 10.1080/1023697X.2015.1038321.
- [24] K. C. Galloway *et al.*, "Soft Robotic Grippers for Biological Sampling on Deep Reefs", *Soft Robot.*, 2016, doi: 10.1089/soro.2015.0019.
- [25] Y. Hao *et al.*, "A Soft Bionic Gripper with Variable Effective Length", *J. Bionic Eng.*, vol. 15, núm. 2, pp. 220–235, 2018, doi: 10.1007/s42235-018-0017-9.
- [26] L. Al Abeach, S. Nefti-Meziani, T. Theodoridis, y S. Davis, "A Variable Stiffness Soft Gripper Using Granular Jamming and Biologically Inspired Pneumatic Muscles", *J. Bionic Eng.*, vol. 15, núm. 2, pp. 236–246, 2018, doi: 10.1007/s42235-018-0018-8.
- [27] T. Wang, Y. Hao, X. Yang, y L. Wen, "Soft Robotics: Structure, Actuation, Sensing and Control", *Jixie Gongcheng Xuebao/Journal Mech. Eng.*, 2017, doi: 10.3901/JME.2017.13.001.
- [28] L. Hines, K. Petersen, G. Z. Lum, y M. Sitti, "Soft Actuators for Small-Scale Robotics", *Advanced Materials*. 2017, doi: 10.1002/adma.201603483.
- [29] A. Miriyev, K. Stack, y H. Lipson, "Soft material for soft actuators", *Nat. Commun.*, 2017, doi: 10.1038/s41467-017-00685-3.
- [30] A. Hamidi, Y. Almubarak, y Y. Tadesse, "Multidirectional 3D-printed functionally graded modular joint actuated by TCPFL muscles for soft robots", *Bio-Design Manuf.*, vol. 2, núm. 4, pp. 256–268, 2019, doi: 10.1007/s42242-019-00055-6.
- [31] S. Shian, K. Bertoldi, y D. R. Clarke, "Dielectric Elastomer Based 'grippers' for Soft Robotics", *Adv. Mater.*, 2015, doi: 10.1002/adma.201503078.
- [32] L. Chang *et al.*, "Ionic Electroactive Polymers Used in Bionic Robots: A Review", *J. Bionic Eng.*, vol. 15, núm. 5, pp. 765–782, 2018, doi: 10.1007/s42235-018-0065-1.
- [33] P. Boyraz, G. Runge, y A. Raatz, "An overview of novel actuators for soft robotics", *High-Throughput*. 2018, doi: 10.3390/act7030048.
- [34] Y. Yang, D. Li, y Y. Shen, "Inchworm-Inspired Soft Robot With Light-Actuated Locomotion", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, vol. 4, núm. 2, pp. 1647–1652, 2019, doi: 10.1109/LRA.2019.2896917.
- [35] G. Runge, S. Zellmer, T. Preller, G. Garnweitner, y A. Raatz, "Actuation principles for the bioinspired soft robotic manipulator spineman", *2015 IEEE Int. Conf. Robot. Biomimetics, IEEE-ROBIO 2015*, 2015, doi: 10.1109/ROBIO.2015.7418955.
- [36] B. Mazzolai, L. Margheri, M. Cianchetti, P. Dario, y C. Laschi, "Soft-robotic arm inspired by the octopus: II. from artificial requirements to innovative technological solutions", *Bioinspiration and Biomimetics*, 2012, doi: 10.1088/1748-3182/7/2/025005.
- [37] S. J. Kim, D. Pugal, J. Wong, K. J. Kim, y W. Yim, "A bio-inspired multi degree of freedom actuator based on a novel cylindrical ionic polymer-metal composite material", *Rob. Auton. Syst.*, vol. 62, núm. 1, pp. 53–60, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2012.07.015>.

- [38] Q. He *et al.*, "Advanced electro-active dry adhesive actuated by an artificial muscle constructed from an ionic polymer metal composite reinforced with nitrogen-doped carbon nanocages", *J. Bionic Eng.*, vol. 14, núm. 3, pp. 567–578, 2017, doi: 10.1016/S1672-6529(16)60422-5.
- [39] S. Sareh *et al.*, "Anchoring like octopus: Biologically inspired soft artificial sucker", *J. R. Soc. Interface*, 2017, doi: 10.1098/rsif.2017.0395.
- [40] C. Tawk, M. In Het Panhuis, G. M. Spinks, y G. Alici, "Bioinspired 3d printable soft vacuum actuators for locomotion robots, grippers and artificial muscles", *Soft Robot.*, 2018, doi: 10.1089/soro.2018.0021.
- [41] Z. Kappassov, J.-A. Corrales, y V. Perdereau, "Tactile sensing in dexterous robot hands — Review", *Rob. Auton. Syst.*, vol. 74, pp. 195–220, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2015.07.015>.
- [42] C. M. Boutry *et al.*, "A hierarchically patterned, bioinspired e-skin able to detect the direction of applied pressure for robotics", *Sci. Robot.*, 2018, doi: 10.1126/scirobotics.aau6914.
- [43] P. Ribeiro *et al.*, "Bioinspired Ciliary Force Sensor for Robotic Platforms", *IEEE Robot. Autom. Lett.*, 2017, doi: 10.1109/LRA.2017.2656249.
- [44] W. Liu, F. Li, C. Stefanini, D. Chen, y P. Dario, "Biomimetic flexible/compliant sensors for a soft-body lamprey-like robot", *Rob. Auton. Syst.*, vol. 58, núm. 10, pp. 1138–1148, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.robot.2010.06.006>.
- [45] Z. Han *et al.*, "Artificial Hair-Like Sensors Inspired from Nature: A Review", *J. Bionic Eng.*, vol. 15, núm. 3, pp. 409–434, 2018, doi: 10.1007/s42235-018-0033-9.
- [46] D. S. Elson, K. Cleary, P. Dupont, R. Merrifield, y C. Riviere, "Medical Robotics", *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 46, núm. 10, pp. 1433–1436, 2018, doi: 10.1007/s10439-018-02127-7.
- [47] E. W. Hawkes, L. H. Blumenschein, J. D. Greer, y A. M. Okamura, "A soft robot that navigates its environment through growth", *Sci. Robot.*, 2017, doi: 10.1126/scirobotics.aan3028.
- [48] M. T. Chikhaoui, A. Benouhiba, P. Rougeot, K. Rabenoroso, M. Ouisse, y N. Andreff, "Developments and Control of Biocompatible Conducting Polymer for Intracorporeal Continuum Robots", *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 46, núm. 10, pp. 1511–1521, 2018, doi: 10.1007/s10439-018-2038-2.
- [49] A. Elbaz *et al.*, "Recent biomedical applications of bio-sourced materials", *Bio-Design Manuf.*, vol. 1, núm. 1, pp. 26–44, 2018, doi: 10.1007/s42242-018-0002-5.
- [50] Q. Fu, S. Guo, Y. Yamauchi, H. Hirata, y H. Ishihara, "A novel hybrid microrobot using rotational magnetic field for medical applications", *Biomed. Microdevices*, vol. 17, núm. 2, p. 31, 2015, doi: 10.1007/s10544-015-9942-0.
- [51] Z. Gong *et al.*, "A Bio-inspired Soft Robotic Arm: Kinematic Modeling and Hydrodynamic Experiments", *J. Bionic Eng.*, vol. 15, núm. 2, pp. 204–219, 2018, doi: 10.1007/s42235-018-0016-x.

Johnny Alexander Valdés Correa

Ingeniero en Mecatrónica de la ETITC, estudiante de especialización en Bioingeniería de la Universidad Francisco José de Caldas.
Correo electrónico: javaldesc@correo.udistrital.edu.co

Óscar Avilés, Ph. D

Posdoctorado en Laboratorio de Mecatrónica, Programa de Doctorado en Sistemas Mecatrónicos y Robóticos Instituto Politécnico Nacional de México, Posdoctorado en DPM-FEM Facultad de Ingeniería Mecánica- Universidad Estatal de Campinas, Brasil, Doctorado en Ingeniería Mecánica, Área de Concentración en Mecánica de Sólidos, Universidad Estatal de Campinas, Brasil, Magister en Sistemas Automáticos de Producción, Universidad Tecnológica de Pereira, Especialización en Instrumentación Electrónica, Universidad Antonio Nariño, Ingeniero Electrónico, Universidad Antonio Nariño.

Correo electrónico: oscar.aviles@unimilitar.edu.co