



Tendencias en Robótica

Curso 2021-22

Robótica blanda: presente y futuro

Jorge F. García Samartín
16151



Contenido

Introducción	3
Estado del arte.....	3
Definición	3
Materiales.....	5
Actuadores.....	5
Modelado y control.....	6
Análisis del grado de madurez	7
Publicaciones.....	7
Patentes	8
Centros de investigación	9
Conclusiones	10
Referencias	11



Introducción

Desde su indexación en el año 2015 y hasta el año 2017, la revista *Soft Robotics* [1] lideró el ranking JCR en el área de Robótica y desde entonces, cuando fue desbancada por la prestigiosa *Science Robotics*, se ha situado siempre entre las tres primeras revistas del área, alcanzando, en 2020, un **factor de impacto de 8.07**, casi **1.5 veces superior** al de su inmediata sucesora [2].

Parece, por tanto, que el éxito de esa revista a finales de la década pasada no fue el reflejo de una moda pasajera sino el nacimiento de un **nuevo campo de investigación** en Robótica cuyos primeros resultados están, según diversos medios [3] [4] [5], cercanos a llegar a la sociedad o incluso, **«son ya el presente»** [6].

El objetivo de este trabajo es presentar, en primer lugar, una **panorámica** general de la Robótica blanda, abordando sus diferentes **definiciones** –no existe de momento un consenso claro en este punto–, así como los diversos avances y líneas abiertas en **materiales, actuadores y modelado y control**, con el objetivo de presentar una pequeña panorámica de algunas zonas de trabajo de la disciplina. Evidentemente, podrían haberse considerado otras como los sensores o la relación entre la Robótica blanda y la bioinspirada.

Finalmente, con el objetivo de confirmar si la aparente explosión de la disciplina tiene fundamento, se valorará, mediante herramientas como el análisis del número de publicaciones, la cantidad de patentes o los institutos y centros de investigación que participan en el área, el **grado de madurez** de la tendencia y sus posibilidades de futuro.

Estado del arte

Definición

No existe una definición estandarizada que separe claramente qué es y qué no es la Robótica blanda, qué aspectos pueden incluirse en ella y cuáles no. No es tampoco posible, en muchas ocasiones, marcar una frontera clara entre esta y tendencias afines como la Robótica bioinspirada o la hiperredundante. Aunque en algunos casos excepcionales la ausencia de definición se prolonga en el tiempo –no existe definición de «robot» universalmente aceptada–, en muchas ocasiones es un indicio de que se trata de una disciplina en sus primeros instantes de vida.

El primero que trató de dar respuesta a esto fue Deepak Trivedi que, en su artículo *Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research* [7], definió los robots blandos como aquellos con «deformaciones distribuidas e **infinitos grados teóricos de libertad**». Más allá de la misma, el interés del artículo radica en la comparación que hace de estos dispositivos frente a los robots tradicionales, reflejada en el mapa conceptual de la Figura 1.

Un lustro después, tanto Carmel Majidi [8] como Daniela Rus [9] utilizaron como criterio discriminatorio el **módulo de Young**. Mientras que este se ubica en los materiales usados en la construcción de robots «duros» por encima de 1GPa, la piel y los tejidos, referencia en la construcción los robots blandos, tienen apenas 1MPa. Refinando esa línea, Chubb [10]



considera que, además del módulo elástico, hay que estudiar, si el robot comprende materiales anisótropos o no lineales, su **flexibilidad**.

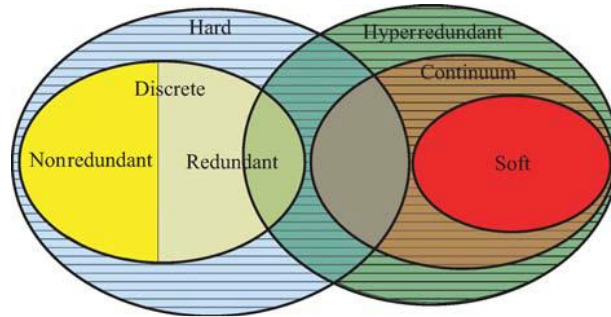


Figura 1: Clasificación de los robots de Trivedi. Fuente:[7]

Otra línea de investigadores [11] [12] prefiere definir la disciplina como aquella en la que los robots están hechos de **materiales blandos** para posteriormente, introducir definiciones de estos últimos, normalmente relacionando su deformación con la del entorno. Sin embargo, esta definición puede ser insuficiente ya que, como apunta Schmitt [13], un robot blando puede contener **partes rígidas**. Como postura conciliadora, Silvia Terrile distingue en su tesis [14] robots blandos de **robots mixtos** (aquellos de coraza blanda, pero armazón rígida) y aporta claridad conceptual al llevar al espacio bidimensional el diagrama introducido por Trivedi.

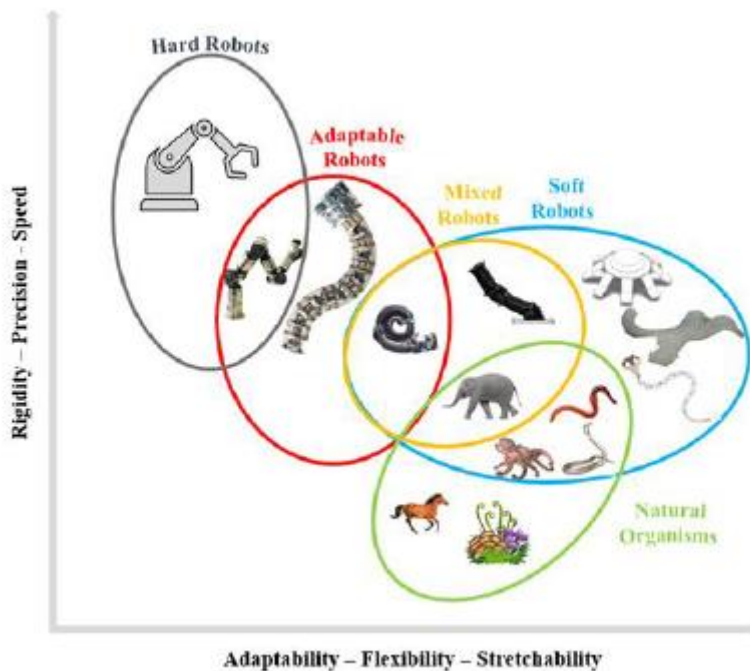


Figura 2: Clasificación de los robots propuesta por S. Terrile. Fuente: [14]

Finalmente, otros autores insisten en la conexión entre **robótica blanda y naturaleza** [15] o la **ausencia de peligro** [16] que estas máquinas suponen para los humanos.



Materiales

Más allá de los matices introducidos por cada definición, queda claro que los materiales tradicionales, como el acero o el aluminio, tienen poca cabida, al menos, en el recubrimiento externo de los robots blandos. En su lugar, y tal y como se presenta en el libro de referencia sobre el tema en la actualidad [17], se ha recurrido desde el inicio al uso de **polímeros y elastómeros** como puede verse en [18] o [19]. Al tratarse de materiales sintetizados por el hombre, es posible dotarles de la capacidad de **conducción** [20] o añadir en ellos **nanopartículas** que faciliten el control [21]. Es posible también crear **materiales multicapa**, con diferentes respuestas en cada una [22].

Menos espectaculares, pero también de gran aplicación, son todos los materiales propios de la **fabricación aditiva**, como pueden ser el **nylon** [23] o la **silicona** [24]. Frente a ellos, algunos materiales más singulares utilizados son los **hidrogeles** [25] o los **elastómeros magnéticos** [26]. En todo caso, esta búsqueda de nuevos materiales va siempre ligada a una apuesta por la **sostenibilidad** y así, es común que las soluciones propuestas vayan asociadas a reflexiones sobre el impacto ambiental o incluso, a acciones como la creación de materiales biodegradables y robots capaces de **autodisolverse** [27].

Actuadores

Si en los materiales asociados a la Robótica blanda hay inevitablemente una ingente innovación, en lo que a actuadores se refieren conviven, debido a la vaguedad de las definiciones, tanto soluciones muy innovadoras como algunas basadas en **motores tradicionales**. En casos como el del OctArm [28], representado en la Figura 3, actuadores y cuerpo del robot son indistinguibles.



Figura 3: Robot blando OctArm. Fuente: [28]

De los actuadores introducidos por esta disciplina, destacan como máximos exponentes los basados en **SMA** o aleaciones con memoria de forma, como el Nitinol. A las varillas o muelles fabricados con estos materiales se les dota de una forma determinada a **altas temperaturas**. Al enfriarse, los cambios en la disposición microscópica de los átomos hacen



que sean **mucho más deformables**. Sin embargo, cuando se les aplica calor, recuperan su **deformación original** [29]. Un ejemplo de comportamiento puede apreciarse en la Figura 4.

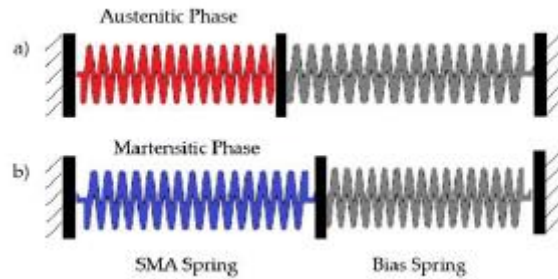


Figura 4: Comportamiento de una SMA. Fuente: [14]

Similares en filosofía, los **SMP** o polímeros con memoria de forma [30] pueden retornar a su estado original por otras vías distintas de la térmica, como pueden ser la **química** o la **luminosa**. En general, permiten mayores deformaciones y suelen ser **biocompatibles** y **biodegradables** [14].

Otras posibilidades actuación son los **hidrogeles**, ya mencionados en la parte de materiales y empleados aquí por la gran **contracción** que pueden tener y los **músculos neumáticos**, de gran uso no solo en aplicaciones médicas [31], sino también en industriales [32].

Modelado y control

No existe, por el momento, una metodología sistemática con la que abordar el modelado y posterior control de estos robots. La única certeza existente en ellos es la **difícultad de aplicar la mayoría de los métodos clásicos** debido a su elevado –teóricamente infinito– número de grados de libertad. Actualmente se plantean dos enfoques diferentes en la literatura: uno basado en la determinación de un modelo –cinemático o dinámico– de suficiente exactitud a la vez que complejidad computacional adecuada, mientras que el otro apuesta por el uso de herramientas de inteligencia artificial para lograr un control de tipo *model-free* [14].

Entre los resultados más destacados de este último enfoque destaca la combinación de preentrenamiento con **redes neuronales** en simulación y **aprendizaje por refuerzo** sobre el robot real [33]. Este método tiene la ventaja de adaptarse a materiales de características difíciles de determinar teóricamente a priori, aunque sin la necesidad de someter al robot real a un elevado número de entrenamientos, con el tiempo que eso supondría. Sin embargo, como se apunta en [34], el gran problema que suelen presentar los enfoques sustentados en *machine learning* es la **incapacidad de aprender soluciones múltiples** lo que, en muchas ocasiones, redundando en una gran **pérdida de espacio de trabajo**.

Los que apuestan por controles basados en modelo pueden ser en bucle abierto [35] o cerrado, aunque este último está tendiendo a convertirse en la opción mayoritaria por su mayor precisión. El modelo puede apoyarse en la teoría de **Cosserat** [36], para robots hiperredundantes, utilizar **parametrizaciones** [15] o basarse, a pesar de sus complicaciones, en las **ecuaciones de Euler-Lagrange** como hizo en 2019 un grupo de investigadores de la



Universidad de Hong-Kong [37]. En esta categoría merece además la pena destacar el empleo del **método de los elementos finitos**. A pesar de su complejidad de modelado y computacional, se han conseguido controles de cierta velocidad tanto con reguladores PID [38] como con planificadores de ganancias [39].

Análisis del grado de madurez

En la segunda parte del trabajo, se va a analizar en qué punto de su ciclo de vida se encuentra la disciplina. Para ello, se va a recurrir a evaluar el número de publicaciones, el número de artículos, así como el número de centros de investigación que existen en los diferentes países, al considerarse también esta última métrica como un buen indicativo del interés que está generando.

Publicaciones

Tal y como se ha mencionado en la introducción, la revista **Soft Robotics** ha permanecido, desde el año 2015, en el trío de cabeza en lo que a índice de impacto en el área de la Robótica se refiere. Esto ya de por sí parece un indicativo claro de que la Robótica blanda es una disciplina que **despierta el interés de la comunidad científica**.

Para confirmar esta hipótesis, se ha analizado el porcentaje de publicaciones de Robótica que contienen el término «soft» en su título o resumen ejecutivo y los resultados pueden verse en la Figura 5. A la vista de la misma, puede verse como la línea de investigación lleva muchos años en continuo desarrollo. Ya a **finales de los 90** el número total de artículos en la disciplina era del 1%, aunque su crecimiento exponencial no ha sucedido hasta 2015.

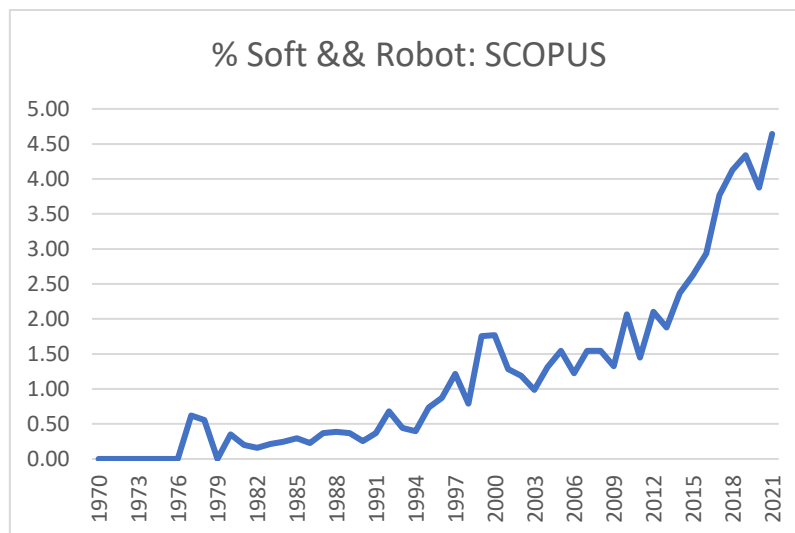


Figura 5: Porcentaje de las publicaciones en el campo de la robótica que incluyen "soft" en título o abstract. Datos extraídos de SCOPUS

Parece probable la causa principal del mismo sea la conjunción del éxito en la síntesis de **nuevos materiales**, el desarrollo de **nuevos métodos de control** y el **aumento de la capacidad computacional** (para poder abordar la formulación de elementos finitos en tiempos razonables, por ejemplo).



Observando la gráfica, parece que la tendencia, lejos de estancarse, continuará en crecimiento en los próximos años. En efecto, aunque no se incluyen en ella los datos del año empezado, puede verse en la sección de referencias de este mismo informe como un número desdeñable de artículos son de 2022. Un repaso al estado del arte deja claro que aún existen **más problemas que soluciones** y son muchos los **frentes abiertos**. Se trata de un tema con **abundante producción científica** que se encuentra lejos todavía de haber alcanzado su madurez.

Patentes

Se ha repetido el mismo ejercicio en bases de datos de patentes. En concreto, la Patentscope de WIPO arroja 2659 patentes en el área de la Robótica blanda, lo que supone un **0.7% del total**, porcentaje nada desdeñable teniendo en cuenta que se refiere no a un año concreto, sino al histórico total. La gráfica de resultados por **año de publicación** (no de petición de patente) puede verse a continuación:

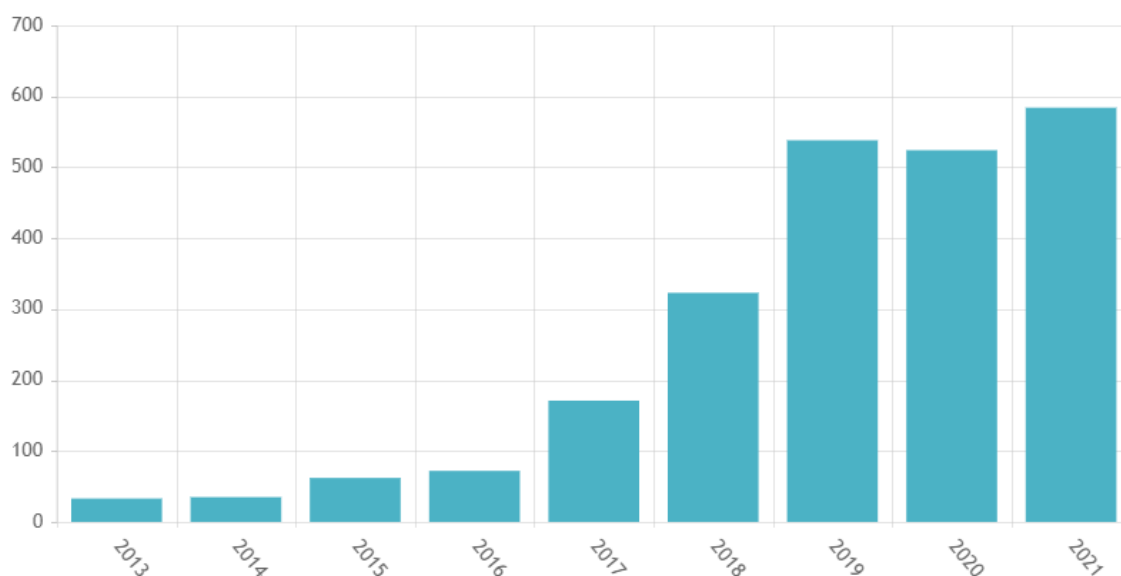


Figura 6: Número absoluto de patentes de robótica blanda registradas en WIPO por año de publicación

Un hecho relevante es que no existen datos anteriores al año 2013. Esto parece concordar con el hecho de que los grandes avances de la Robótica blanda se han dado en esta última década. Antes de 2011 (las patentes tardan unos 18 meses en publicarse, si se admiten) no había tecnología con el grado de madurez suficiente para ser patentada, con un **TRL superior a 3**. El gráfico, además de ser **parejo al de publicaciones** indica que el sorprendentemente alto número total de patentes no parece incluir por error, propiedad intelectual ajena a la Robótica blanda, pues, de hacerlo, tendría entre sus estadísticas registros de años donde la disciplina no había alcanzado cota ninguna de popularidad.

Unos resultados similares se observan en el gráfico de Google Patents. Sí se ve que esta base de datos indexa un mayor número de patentes, lo que permite tener constancia de algunos registros de propiedad intelectual anteriores a 2013.



Así, por ejemplo, se ve el **«pico» de interés que la robótica blanda suscitó en los 2000** y que finalmente la ya citada falta de investigación en computación y materiales. Es también notable **la explosión de la última década**, debiéndose descartar de momento los bajos números de 2019, que pueden estar debidos a la existencia de patentes aún en tramitación.

En la Figura 7 se muestran las patentes aprobadas disponibles en Google Patents. Aunque la herramienta deja también obtener datos de patentes presentadas, pero no aprobadas, estos no aportaban información que pudiese ser considerada de interés.

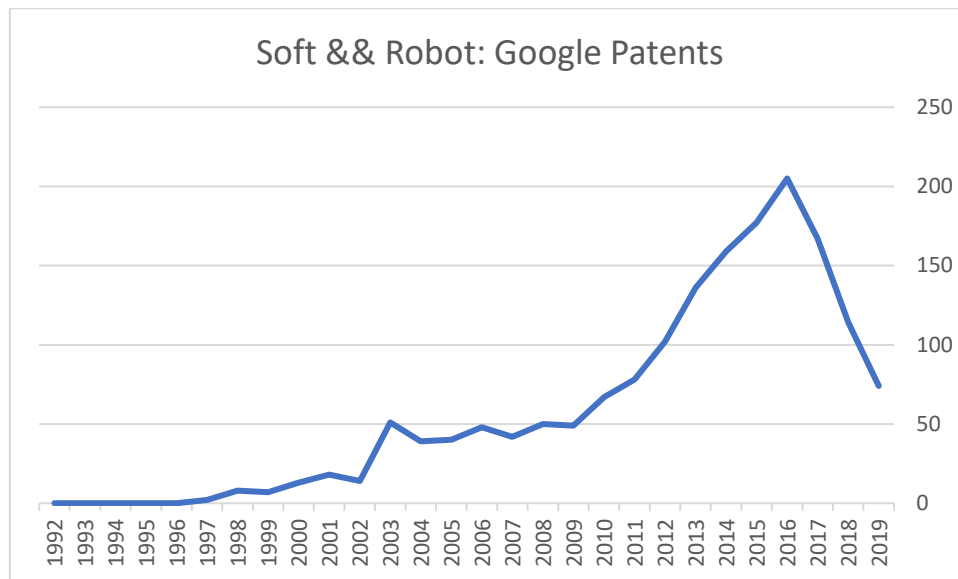


Figura 7: Número absoluto de patentes de robótica blanda registradas en Google Index por año de publicación

Centros de investigación

Un último análisis sobre el interés que la disciplina suscita en la comunidad es la medición del **número de centros de investigación** en Robótica blanda que existen en los 10 países con más producción científica en el área. Los datos se han tomado de [14] y, junto al nombre del centro, se indican el número de publicaciones que este ha realizado.

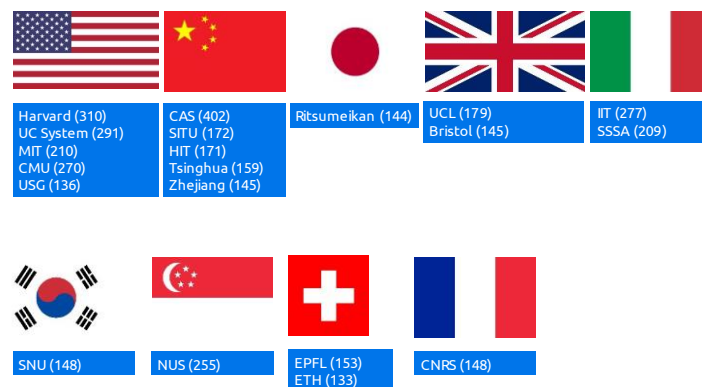


Figura 8: Centros de investigación y número de publicaciones en los 10 países con más publicaciones de Robótica blanda han realizado. Fuente [14]



El **número de centros es muy elevado** y algunos, como el IIT italiano no investigan más que en Robótica blanda. Es además muy alentador para el futuro de la disciplina el ímpetu que tanto las grandes potencias mundiales –China y Estados Unidos– como las naciones de referencia en el mundo de la Robótica –Singapur, Japón o Corea del Sur, que lideran las listas de robots per cápita–, están demostrando.

Conclusiones

Aunque no existe aún una definición unánime de Robótica blanda, puede decirse que la línea abarca aquellos robots con un **elevado número de grados de libertad** y a la vez, contruidos –al menos en lo que a su coraza externa se refiere– con materiales **plásticos o de bajo número de Young**.

En el presente informe se han abordado, en primer lugar, los distintos **materiales** asociados a la disciplina, como pueden ser los hidrogeles, los polímeros multicapa o con propiedades eléctricas, ópticas y/o magnéticos o la silicona. Todos ellos materiales que se sintetizan buscando a la vez **conseguir ciertas propiedades** como garantizar cierta sostenibilidad a lo largo del proceso.

Posteriormente, se han presentado los diversos **actuadores** no convencionales, entre los que destaca, por encima de todos, el SMA. Finalmente, se ha completado el estado del arte con unas breves pinceladas sobre las técnicas existentes de **modelado y control de estos robots**. Estas se pueden apoyar tanto en herramientas tradicionales –como los elementos finitos, muy asentados en las áreas Mecánica y de Fluidos– como en Inteligencia Artificial, donde se apuesta, ante todo, por el aprendizaje por refuerzo.

El estado del arte se ha completado con un análisis sobre el **grado de madurez** de la Robótica blanda basándose en el número de publicaciones, patentes y centros de investigación en los últimos años. El estudio realizado permite concluir que se trata de una tendencia **aún en desarrollo y que no ha alcanzado su pico de madurez**. Aunque comenzó a investigarse a finales del siglo pasado y generó cierto impacto en la comunidad robótica, con un despliegue abortado en torno al 2003, no acabó llegando a resultados concretos por la carencia de los materiales, las técnicas y la capacidad computacional adecuadas.

Hace diez años, sin embargo, patentes y publicaciones sobre robótica blanda **empezaron a ver la luz de forma exponencial**, iniciando una tendencia que se ha mantenido hasta nuestros días y en la que participan **países de gran importancia global** o en el mundo de la Robótica. Parece por tanto un tema aún en auge, en el que puede ser interesante la realización de una tesis doctoral o la creación y fomento de grupos de investigación afines.



Referencias

- [1] Liebertpub, «Soft Robotics,» [En línea]. Available: <https://home.liebertpub.com/publications/soft-robotics/616/overview#indexed>. [Último acceso: 9 mayo 2022].
- [2] Clarivate, «Browse Journals – Robotics,» Journal Citation Reports, [En línea]. Available: <https://jcr.clarivate.com/jcr/browse-journals>. [Último acceso: 9 mayo 2022].
- [3] A. Barrientos Cruz y S. Terrile, «¿Cómo ablandar a un robot?,» The Conversation, 4 mayo 2022. [En línea]. Available: <https://theconversation.com/como-ablandar-a-un-robot-181838>. [Último acceso: 9 mayo 2022].
- [4] M. León, «La robótica blanda permite examinar a los pacientes desde dentro,» Cambio16, 21 mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.cambio16.com/la-robotica-blanda-permite-examinar-a-los-pacientes-desde-dentro/>. [Último acceso: 9 mayo 2022].
- [5] Editorial Nobbobot, «Los robots blandos inspirados en la naturaleza que revolucionarán nuestras vidas,» Nobbobot, 15 marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.nobbobot.com/firmas/robotica-blanda-robots-tecnologia/>. [Último acceso: 9 mayo 2022].
- [6] Agencia EFE, «Robótica blanda, solucionar problemas emulando a la naturaleza,» 9 mayo 2021. [En línea]. Available: <https://www.efe.com/efe/espana/economia/robotica-blanda-solucionar-problemas-emulando-a-la-naturaleza/10003-4531943>. [Último acceso: 9 mayo 2022].
- [7] D. Trivedi, «Soft robotics: Biological inspiration, state of the art, and future research,» *Applied Bionics and Biomechanics*, vol. 5, nº 3, pp. 99-117, 2008.
- [8] C. Majidi, «Soft Robotics: A Perspective—Current Trends and Prospects for the Future,» *Soft Robotics*, vol. 1, nº 1, 2013.
- [9] D. Rus y M. T. Tolley, «Design, fabrication and control of soft robots,» *Nature*, vol. 521, p. 467–475, 2015.
- [10] K. Chubb, «Towards an ontology for soft robots: what is soft?,» *Bioinspiration & Biomimetics*, vol. 14, nº 6, 2019.
- [11] N. Kastor, V. Vikas, E. Cohen y R. D. White, «A Definition of Soft Materials for Use in the Design of Robots,» *Soft Robotics*, vol. 4, nº 3, 2017.
- [12] B. Trimmer, «Soft Robots – Quick guide,» *Current Biology*, vol. 23, nº 15, 2013.



- [13] F. Schmitt, O. Piccin, L. Barbé y B. Bayle, «Soft Robots Manufacturing: A Review,» *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 5, nº 84, 2018.
- [14] S. Terrile, «Soft Robotics: Applications, Design and Control,» Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2022.
- [15] C. D. Santina, C. Duriez y D. Rus, «Model Based Control of Soft Robots: A Survey of the State of the Art and Open Challenges,» *arXiv*, 2021.
- [16] A. Chen, R. Yin, L. Cao, C. Yuan, H. Ding y W. Zhang, «Soft Robotics: Definition and Research Issues,» de *Mechatronics and Machine Vision in Practice*,, 2017.
- [17] H. Koshima, *Mechanically Responsive Materials for Soft Robotics*, Wiley, 2020.
- [18] J. Paek, I. Cho y J. Kim, «Microrobotic tentacles with spiral bending capability based on shape-engineered elastomeric,» *Nature*, vol. 5, nº 1, 2015.
- [19] Y. Ling, W. Pang y J. L. e. al, «Bioinspired elastomer composites with programmed mechanical and electrical anisotropies,» *Nature Communications*, vol. 13, nº 1, 2022.
- [20] J. Lin, P. Zhou, Q. Chen y e. al, «Reprogrammable, light-driven and sensing actuators based on Chinese ink composite: A synergetic use of shape-memory and self-healing strategies,» *Sensors and actuators B: Chemical*, vol. 362, 2022.
- [21] S. M. Mirvakili, A. Leroy, D. Sim y E. N. Wang, «Solar-Driven Soft Robots,» *Advanced Science*, vol. 8, 2021.
- [22] S. Taccola, F. Greco y E. S. e. al, «Toward a New Generation of Electrically Controllable Hygromorphic Soft Actuators,» *Advanced Materials*, vol. 27, pp. 1668-1675, 2015.
- [23] J. Stightam y V. Gervasi, «Novel integrated fluid-power actuators for functional end-use components and systems via selective laser sintering nylon 12,» de *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2012.
- [24] O. D. Yirmibesoglu, J. Morrow, S. Walker y e. al, «Direct 3D printing of silicone elastomer soft robots and their performance comparison with molded counterparts,» de *IEEE International Conference on Soft Robotics (RoboSoft)*, Livorno, Italia, 2018.
- [25] Y. Takishima, K. Yoshida, A. Khosa y e. al, «Fully 3D-Printed Hydrogel Actuator for Jellyfish Soft Robots,» *Journal of Solid State Science Technology*, vol. 10, nº 3, 2021.
- [26] N. Bira, P. Dhagat y J. R. Davidson, «A Review of Magnetic Elastomers and Their Role in Soft Robotics,» *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 7, nº 1, 2020.
- [27] M. Sitti, «Miniature soft robots – road to the clinic,» *Nature Reviews Materials*, vol. 3, nº 6, 2018.



- [28] W. McMahan, V. K. Chitrakaran, M. A. Csencsits y a. et, «Field trials and testing of the OctArm continuum manipulator,» de *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2006.
- [29] G. López López, «Aleaciones con memoria de forma,» *Academica de Ciencias de la Región de Murcia*, 14 diciembre 2013.
- [30] R. Aruninma, K. P. Jibin, A. V. Kaliyathan y a. et, «Shape memory materials from rubbers,» *Materials*, vol. 14, nº 23, 2021.
- [31] L. Wang, G. Peng, W. Yao y a. et, «Soft robotics for hand rehabilitation,» de *Intelligent Biomechatronics in Neurorehabilitation*, Elsevier, 2020, pp. 167-176.
- [32] A. Bartow, A. Kapadia y I. Walker, «A novel continuum trunk robot based on contractor muscles,» de *WSEAS International Conference in Signal Processing for Robotics and Automation*, 2013.
- [33] A. Centurelli, L. Arleo, A. Rizzo y a. et, «Closed-Loop Dynamic Control of a Soft Manipulator Using Deep Reinforcement Learning,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, nº 2, 2022.
- [34] X. Wang, Y. Li y K.-W. Kwok, «A Survey for Machine Learning-Based Control of Continuum Robots,» *Frontiers in Robotics and AI*, vol. 8, nº 1, 2021.
- [35] T. Thruthel, E. Falotico, M. Manti y L. C, «Stable open loop control of soft robotic manipulators,» *IEEE Letters on Robotics and Automation*, vol. 3, pp. 1292-1296, 2018.
- [36] D. Trivedi, A. Lotfi y C. Rahn, «Geometrically exact models for soft robotic manipulators,» *IEEE Transactions in Robotics*, vol. 24, nº 4, pp. 773-780, 2008.
- [37] Z. Q. Tang, H. L. Heung, K. Y. Tong y a. et, «Model-based online learning and adaptive control for a “human-wearable soft robot” integrated system,» *The International Journal of Robotics Research*, vol. 40, nº 1, pp. 256-276, 2019.
- [38] K. Wu y G. Zhen, «FEM-Based Nonlinear Controller for a Soft Trunk Robot,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 7, nº 2, 2022.
- [39] K. Wu y G. Zheng, «FEM-based gain-scheduling control of a soft trunk robot,» *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 6, nº 2, pp. 3081-3088, 2021.