



# Brazo de dos grados de libertad de articulaciones flexibles Quanser: Revisión Bibliográfica

1<sup>st</sup> Mariana Toro Ramírez  
Estudiante Ingeniería Mecatrónica  
Universidad EIA  
Envigado, Antioquia  
mariana.toro@eia.edu.co

2<sup>st</sup> Jose Rodrigo Campo Vargas  
Estudiante Ingeniería Mecatrónica  
Universidad EIA  
Envigado, Antioquia  
jose.campo@eia.edu.co

**Abstract**—Este documento presenta una revisión bibliográfica de los trabajos académicos sobre brazos robóticos de dos grados de libertad y articulaciones flexibles, profundizando en sus estrategias de control.

**Index Terms**—component, formatting, style, styling, insert

## I. INTRODUCCIÓN

Entre los robots industriales, el más común es el robot articulado, el cual posee más grados de libertad que otros robots, lo que le da mejor rango de movimiento, razón por la cual son soluciones ideales en la manufactura y las líneas de producción (Robots Done Right, 2021). Las articulaciones de dichos robots pueden ser clasificadas en dos, rígidas y flexibles. Las flexibles se caracterizan por tener bajo costo y bajo peso, pero también por ser menos precisas que las articulaciones rígidas, por lo que requiere leyes de control adaptativas o robustas para llevar a cabo las trayectorias (Aziz & Iqbal, 2016).

En este trabajo, se muestra una revisión bibliográfica de los brazos robóticos de articulaciones flexibles y sus estrategias de control, que incluye un análisis cuantitativo de los artículos realizados en las últimas décadas respecto al tema, y una reseña de algunos artículos que comprenden el estado del arte.



Fig. 1. Brazo Robot de 2 Grados de Libertad y Articulaciones Flexibles Quanser

## II. ECUACIONES DE BÚSQUEDA

Se implementaron dos ecuaciones de búsqueda en Scopus®, y se utilizó la herramienta de análisis de resultados que este programa provee para realizar un estado del arte que caracterice la condición de la temática trabajada. A continuación se presentan las estadísticas y los datos extraídos.

### A. Ecuación de búsqueda 1. Two Degrees of Freedom Arm AND Flexible Joints

El resultado de la búsqueda con la primera ecuación trabajada arrojó 119 documentos, los cuales fueron publicados en un rango de años desde 1979 hasta 2022. A continuación, se muestra un gráfico que permite visualizar el número de publicaciones por año. De este, es posible observar que hubo tres momentos claves en el histórico del tema implicado, los cuales fueron el año 1979, cuando se tiene el registro de la primera publicación en el tópico; el año 1988, el cual marca el inicio de un crecimiento en la investigación; y por último, el año 2014, en el cual el tema se ve nuevamente impulsado por un aumento en la densidad de investigaciones.

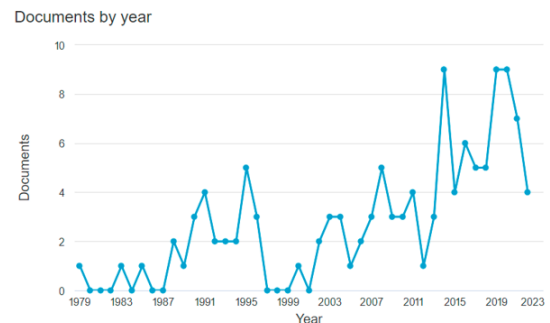


Fig. 2. Documentos por año

Aquellos resultados pueden ser analizados a la luz de las revoluciones industriales. La tercera revolución industrial ocurrió alrededor del año 1969, con la invención de los semiconductores, hecho que impulsó en gran medida el desarrollo de la electrónica como se conoce hoy en día, y junto con ello vino el internet, la fibra óptica, los satélites, las computadoras personales, la robótica, los microprocesadores, los lenguajes de programación, los sistemas de almacenamiento, entre otros.

Con la cuarta revolución, en 2010, aparece la nanofabricación, la impresión 3D, el Big Data, la Inteligencia Artificial (IA), el Machine Learning, el Deep Learning, la nube, etc. Lo cual impulsó la llegada de una nueva etapa en la robótica y la automatización industrial, trayendo interconexión. De esta forma, se puede ver cómo diez años después de la tercera revolución, empiezan a publicarse artículos en materia de los brazos robóticos, y cómo 4 años después de la cuarta revolución, se da un crecimiento elevado del tópico, producto de la nueva oxigenación que otorgó este acontecimiento histórico. En cuanto a el año 1987, se puede teorizar sobre la hipótesis de que algo ocurre en aquella época en la historia de la robótica que influye positivamente para estimular el interés de los investigadores en seguir profundizando y desarrollando esta rama del conocimiento. Podría ser motivo de especial interés para futuras investigaciones establecer un estudio detallado que responda a la pregunta ¿qué ocurre entre 1985 y 1990 que impulsó el desarrollo de la robótica y la automatización; y, en especial, como es visto en este caso, de los brazos robóticos? Para el presente informe, se decide entonces enfocarse específicamente en los resultados de el periodo de tiempo comprendido entre 2010 y 2022 (la actualidad). Al hacer esta restricción de tiempo, el número inicial de artículos obtenidos de la búsqueda (119) se reduce a 69. A continuación se presenta una tabla con el número de publicaciones por año durante este periodo.

TABLE I  
DOCUMENTOS POR AÑO DESDE 2010

YEAR	NUMBER OF PUBLICATIONS
2022	4
2021	7
2020	9
2019	9
2018	5
2017	5
2016	6
2015	4
2014	9
2013	3
2012	1
2011	4
2010	3

Así mismo, se obtienen unas estadísticas presentadas en forma de diagrama de torta, que evidencian cuáles son las principales áreas del conocimiento implicadas en los artículos publicados en este tema, pudiéndose observar que las de mayor relevancia son ingeniería, ciencia computacional y matemáticas.

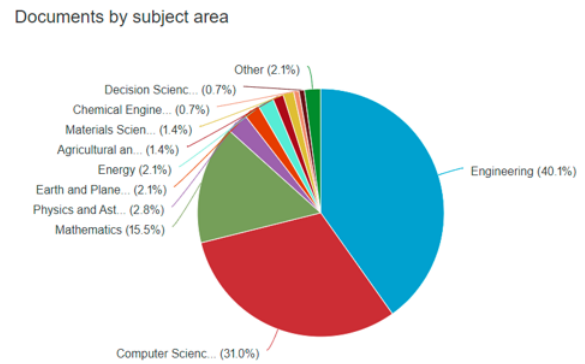


Fig. 3. Documentos por área temática

Posteriormente, se extraen datos presentados en forma de diagrama de barras, relacionados con los países de los cuales provienen dichas publicaciones, mostrando cuáles son aquellos territorios con mayor protagonismo en la investigación del tema. Una observación destacable es que durante el periodo de 2010-2022 ocurre, con respecto al periodo total de publicaciones encontrado, un gran crecimiento del número de publicaciones por parte de China, un decrecimiento de publicaciones por parte de EE.UU., y aparece un nuevo protagonista punteando, el cuál es México.

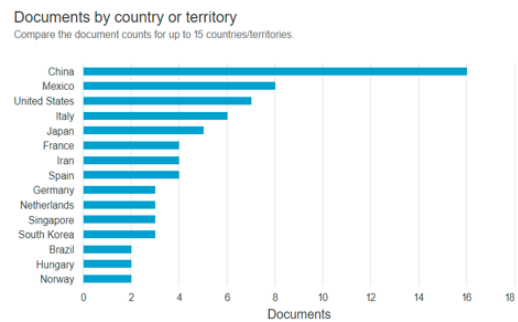


Fig. 4. Documentos por país o territorio desde 2010

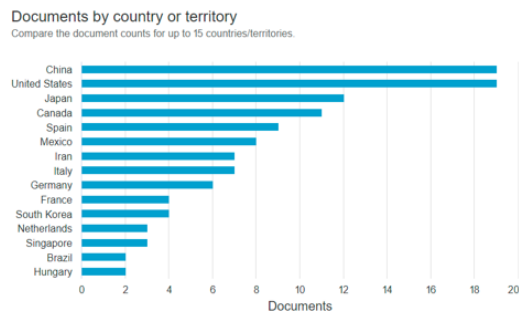


Fig. 5. Documentos por país o territorio desde 1979

**B. Ecuación de búsqueda 2. Two Degrees of Freedom Arm AND "Control Strategy" OR "Control Algorithm"**

De la segunda ecuación de búsqueda, se obtuvieron 219 resultados, esta vez comprendidos entre los años 1977 y 2022.

Un aspecto que surge a la luz para demostrar la correlación que tienen los temas investigados con ambas ecuaciones de búsqueda, es que el comportamiento de la gráfica (mostrada a continuación) del número de publicaciones por año de esta ecuación de búsqueda es muy similar al anterior, donde se pueden ver nuevamente estos tres momentos de acontecimientos, esta vez marcados por los años 1977, 1988 y 2014.

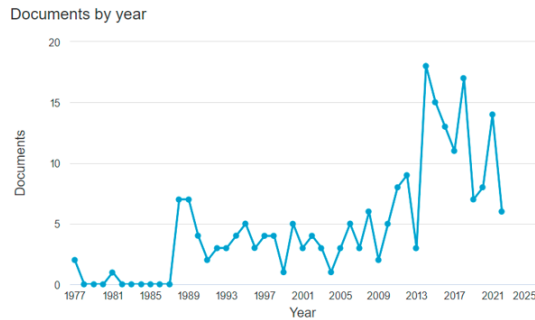


Fig. 6. Documentos por año

Al igual que con la anterior ecuación de búsqueda, se decide reducir el rango de años entre el 2010 y el 2022. Con esta limitación temporal, el número de artículos encontrados se reduce a 134.

TABLE II  
DOCUMENTOS POR AÑO DESDE 2010

YEAR	NUMBER OF PUBLICATIONS
2022	6
2021	14
2020	8
2019	7
2018	17
2017	11
2016	13
2015	15
2014	18
2013	3
2012	9
2011	8
2010	5

Es posible nuevamente observar que entre las áreas del conocimiento más relacionadas con esta temática están la ingeniería, la ciencia computacional y las matemáticas; no obstante, en este caso surge también medicina como una de las más relevantes, con un porcentaje del 6,4%. Esto demuestra que existen importantes aplicaciones de los brazos robóticos en la medicina, donde sus propiedades de exactitud y esterilidad pueden proveer grandes ventajas en las cirugías.

Documents by subject area

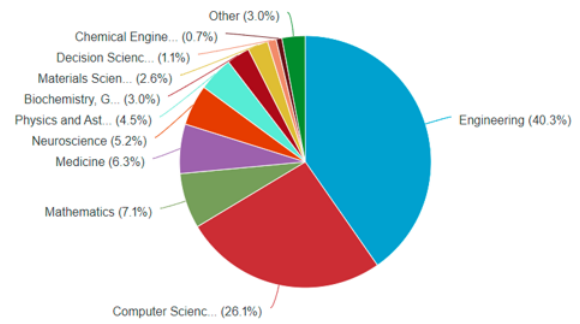


Fig. 7. Documentos por año

Respecto a los países con mayor protagonismo en las publicaciones encontradas, se realiza de nuevo la comparación de la evolución de estos, observando el periodo completo (1977-2022) en contraste con el periodo reducido (2010-2022). De este se puede destacar el cambio drástico de China en su volumen de publicaciones.

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

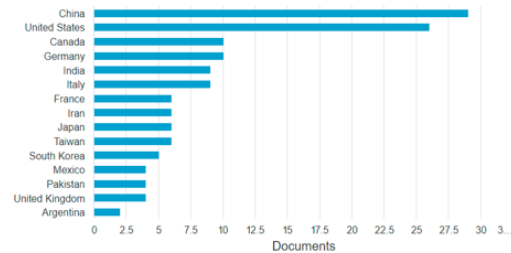


Fig. 8. Documentos por año

Documents by country or territory

Compare the document counts for up to 15 countries/territories.

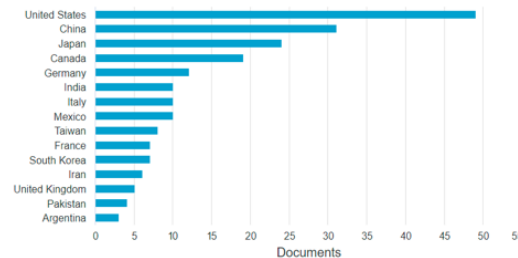


Fig. 9. Documentos por año

### III. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

#### A. Artículos obtenidos de la búsqueda en Scopus®

A continuación, se presentan 4 artículos seleccionados de la búsqueda en Scopus®, hecha con la segunda ecuación. Esto, porque el interés de este ejercicio es encontrar un modelo matemático e información sobre la técnica de control que normalmente usa para este tipo de sistemas. Así, de los 213



## B. Artículos de recopilación de otras fuentes

Zaare (2019) propone un Sliding Mode Control basado en voltaje, en este enfoque se descomponen las ecuaciones dinámicas del sistemas en una capa por cada subsistema del robot manipulador. Este proceso simplifica el diseño, reduce la complejidad del método y permite a los diseñadores considerar las incertidumbres mecánicas y eléctricas del sistema.

Kong (2022) plantea un Control de Retroalimentación de Estados Parciales (PSFC) con estados del sistema inconmensurables basados en el Método de Superficies Dinámicas y un Observador de Alta Ganancia (HGO). Este acercamiento contribuye en que: solo necesita los estados de un robot rígido convencional, el problema del pico del HGO se resuelve con una Función Supresora de Pico, y puede suprimir las incertidumbres sin adicionar metodos robustos complejos adicionales como se hace convencionalmente con los PSFC.

Lei (2021) diseña un controlador Sliding Mode terminal rápido no singular, con el propósito de atenuar las vibraciones de los enlaces flexibles, y construye una trayectoria híbrida basada en el concepto de fuerza de control virtual, la cual puede reflejar los modos de vibración flexibles y el error de trayectoria rígida.

Ibrahim (2018) propone un algoritmo de control PID híbrido adaptativo que es robusto contra incertidumbres de parámetros. El control solo necesita las medidas de posición y velocidad. En la literatura, señales diferenciales de mayor orden pueden ser requeridas para algunos algoritmos de control.

Zhong (2022) presenta una estrategia de control Sliding Mode, en un observador de perturbaciones no lineal, para el problema de seguimiento de trayectoria de sistemas de tele rehabilitación. El diseño del observación de perturbaciones evita el termino de medición de realimentación de la aceleración del manipulador flexible, logra una estimación precisa de la incertidumbre compuesta, y compensa la entrada de control. Chattering en Sliding Mode Control es efectivamente reducido usando la ley de alcance.

## IV. CONCLUSIONES

Según las áreas de investigación de donde vienen los artículos estudiados, el robot de articulaciones flexibles tiene aplicaciones en diversos campos, como lo es la medicina, la aeroespacial, la manufactura, entre otros.

El controlador de modo deslizante aparece en múltiples artículos revisados. Lo cual indica que, actualmente, se puede considerar como la estrategia de control mas recomendada para el sistema estudiado.

Se considera relevante, para futuras investigaciones, la relación de las publicaciones con los acontecimientos históricos mundiales que influyan sobre la robótica y la automatización, que causaron que el comportamiento de las gráficas temporales sea así

## REFERENCES

- [1] Ibrahim, K., & Sharkawy, A. B. (2018). A hybrid PID control scheme for flexible joint manipulators and a comparison with sliding mode control. *Ain Shams Engineering Journal*, 9(4), 3451–3457. <https://doi.org/10.1016/J.ASEJ.2018.01.004>
- [2] KONG, D., WANG, W., WANG, Y., ZHANG, J., SHI, Y., & KONG, L. (2022). Spiking-free HGO-based DSC for flexible joint manipulator. *Chinese Journal of Aeronautics*, 35(3), 419–431. <https://doi.org/10.1016/J.CJA.2021.05.023>
- [3] Lei, R. H., & Chen, L. (2021). Finite-time tracking control and vibration suppression based on the concept of virtual control force for flexible two-link space robot. *Defence Technology*, 17(3), 874–883. <https://doi.org/10.1016/J.DT.2020.04.013>
- [4] zaare, S., Soltanpour, M. R., & Moattari, M. (2019). Voltage based sliding mode control of flexible joint robot manipulators in presence of uncertainties. *Robotics and Autonomous Systems*, 118, 204–219. <https://doi.org/10.1016/J.ROBOT.2019.05.014>
- [5] Zhong, Y., Pu, Y., & Wang, T. (2022). A sliding mode and non-linear disturbance observer based bilateral control for tele-rehabilitation systems with flexible manipulators. *Cognitive Robotics*, 2, 39–49. <https://doi.org/10.1016/J.COGR.2022.01.002>
- [6] Robots Done Right. (2021). What is an Articulated Robot? Robots Done Right. <https://robotsdoneright.com/Articles/what-is-an-articulated-robot.html>
- [7] Aziz, H. M. W., & Iqbal, J. (2016). Flexible joint robotic manipulator: Modeling and design of robust control law. 2016 2nd International Conference on Robotics and Artificial Intelligence, ICRAI 2016, 63–68. <https://doi.org/10.1109/ICRAI.2016.7791230>
- [8] Gao, G., Ou, C., Shi, L. (2021). Multi-degree-of-freedom manipulator joint trajectory tracking control method based on decision tree. Paper presented at the *Journal of Physics: Conference Series*, , 2066(1) [doi:10.1088/1742-6596/2066/1/012026](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2066/1/012026)
- [9] Bi, M. (2020). Control of robot arm motion using trapezoid fuzzy two-degree-of-freedom PID algorithm. *Symmetry*, 12(4) [doi:10.3390/SYM12040665](https://doi.org/10.3390/SYM12040665)
- [10] Chu, M., Wu, X. (2017). Modeling and self-learning soft-grasp control for free-floating space manipulator during target capturing using variable stiffness method. *IEEE Access*, 6, 7044–7054. [doi:10.1109/ACCESS.2017.2788400](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2017.2788400)
- [11] Schmalfuss, L., Hahne, J., Farina, D., Hewitt, M., Kogut, A., Doneit, W., . . . Liebetanz, D. (2018). A hybrid auricular control system: Direct, simultaneous, and proportional myoelectric control of two degrees of freedom in prosthetic hands. *Journal of Neural Engineering*, 15(5) [doi:10.1088/1741-2552/aad727](https://doi.org/10.1088/1741-2552/aad727)