

# Diseño Mecatrónico y Análisis Cinemático de un Robot Manipulador Serial 8 GDL para realizar el proceso de pintura electrostática

UNIVERSIDAD RICARDO PALMA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECATRÓNICA  
PROYECTO FINAL DE  
CONTROL DE ROBOTS  
SEMESTRE 2022-I

Huanca Damas, Jhonatan  
Zamora Olazábal, José

**Resumen**—Actualmente se está dando una integración de robótica de baja escala en las industrias en el Perú, se estima una introducción de menos de 100 unidades de robots industriales. En la industria manufacturera, el tratamiento de las superficies metálicas es fundamental. Procesos como la aplicación de pintura en polvo electrostática son muy demandados por las empresas de productos metálicos, que muchas veces recurren a empresas de servicios, generando costos adicionales. Por ello, la innovadora investigación se realizó en el año 2022 bajo la supervisión de la Escuela de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Ricardo Palma, se diseñó un robot manipulador de pintura electrostática con 8 grados de libertad. El sistema robótico incluye una pista lineal de 1,0 m para ampliar el rango de trabajo, y un efector de aspersión electrostática de largo alcance con 1 grado de libertad adicional que permite conexiones de mangueras y envoltorios de diferentes geometrías; como resultado, minimiza el consumo de energía y pintura, así como el riesgo de contaminantes en la superficie metálica. Este estudio presenta el diseño conceptual mecatrónico, la simulación de análisis cinemático y la simulación de pruebas operativas de robots. Se utilizó SolidWorks 2020 para el diseño de la estructura 3D, MATLAB para el análisis cinemático y CoppeliaSim para simular la automatización del proceso. El robot pretende ser aplicado en talleres metalmecánicos de empresas limeñas que trabajan con tableros eléctricos autoportantes. En conclusión, se lograron resultados favorables; como consecuencia, el siguiente paso del proyecto es integrar visión artificial usando cámaras RGB-D para el reconocimiento de pintura en superficies y optimizar el enrutamiento.

*Palabras clave:* robot de pintura por aspersión, impresión 3D, fabricación aditiva, análisis cinemático, simulación MATLAB.

## I. INTRODUCCIÓN

El uso de robots y tecnologías relacionadas es fundamental para la digitalización y el avance continuo de la fabricación. En los últimos años, una variedad de iniciativas estratégicas en todo el mundo, incluida la Industria 4.0, han tenido como objetivo mejorar y conectar las tecnologías de fabricación para optimizar los procesos de producción [1-2], por lo que se ha visto un aumento del 10 % de los robots industriales que operan en las fábricas. en todo el mundo [3].

En Asia se ubica el mercado más fuerte debido a un incremento en China del 20% y, en América, Estados Unidos es el mayor usuario de robo industrial. Las instalaciones de robots en los mercados sudamericanos aún se encuentran en un nivel muy bajo [3]. Cabe señalar que en Latinoamérica una buena parte de los robots trabaja en la industria manufacturera, destacándose la industria automotriz, eléctrica-electrónica y metal-mecánica [4].

Por otro lado, el indicador de automatización del McKinsey Global Institute concluyó que el potencial para el sector manufacturero es algo superior a la media, en torno al 60%, especialmente en actividades físicas más predecibles (como pintura, soldadura, etiquetado) [5]. En relación al proceso de pintado (por pulverización), este se realiza de forma manual o con un robot multi-eje de forma automatizada.

En Perú, la mayoría de los robots se encuentran en grandes industrias metalúrgicas y de alimentos y bebidas. Las siguientes empresas cuentan con manipuladores industriales: Prodac, Alicorp, Backus y Lindley. Sin embargo, se utilizan para diferentes aplicaciones. En cuanto a los robots de pintura industrial, se mencionan los siguientes fabricantes y modelos: Kuka & Dürr - EcoRP 10 R1100 [6], Dürr - EcoRP E043i [7].

El objetivo de este proyecto es promover la automatización robótica aplicando fabricación aditiva mediante impresión 3D, para lo cual se realizó una revisión de filamentos para ingeniería [8-10]. El prototipado rápido nos permite verificar el funcionamiento de mecanismos para piezas con geometrías complejas. El robot se complementará con motores y piezas de acero mecanizadas para garantizar la operatividad.

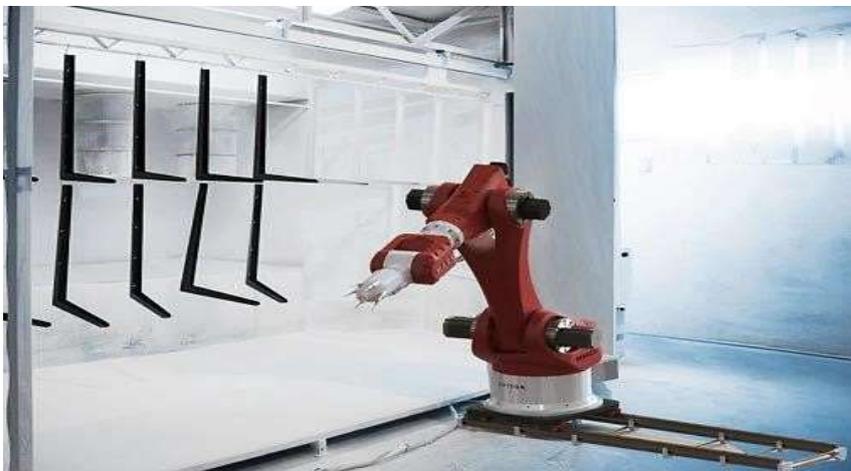


Fig. 1. Manipulador de robot en serie - Diseño

Este proyecto se pretende implementar a futuro como una alternativa parcialmente económica para automatizar el proceso de pintura en tableros eléctricos autoportantes, reduciendo costos de materiales y mano de obra, mejorando el acabado, agilizando la producción y evitando daños a los operarios. Otros elementos importantes del robot son el panel de control y la programación ROS2.

## II. MATERIALES Y MÉTODOS

### A. Diseño Mecánico y Mecatrónico

Para abordar el diseño y estructura del robot se consideraron dimensiones de superficies curvas, evitando esquinas vivas, lo que significa que permite una interacción robot-operador segura y, así mismo, el montaje de un cilindro de doble vástago, como se muestra en la Fig. 2, que funciona como un mecanismo de compensación de gravedad por contrapesos para reducir el esfuerzo de carga de los actuadores [11].

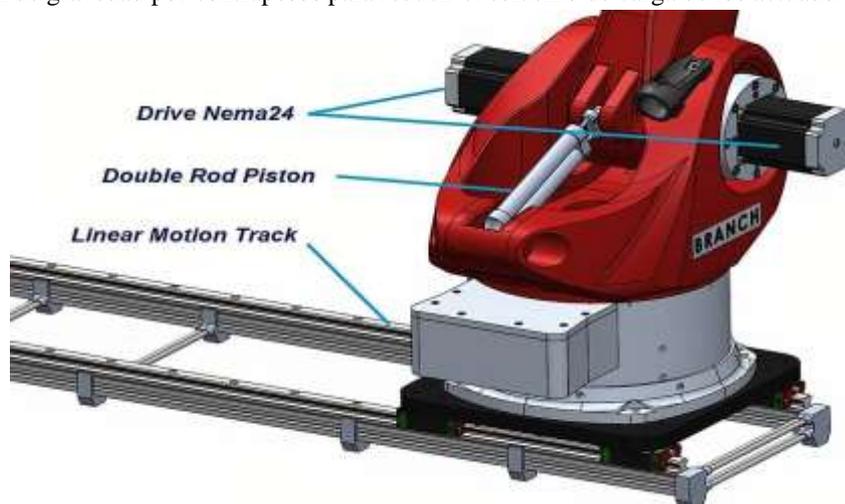


Fig. 2. Pistón de doble vástago ensamblado al cuerpo del robot

Los actuadores del cuerpo están compuestos por motores Nema 24 de 4,2 A con 32,63 Kg-cm y un reductor de doble engranaje helicoidal, como se muestra en la Fig. 3, que aumenta la transmisión de par, reduce el estrés axial, la vibración y el ruido de los engranajes y, así mismo, el desgaste por al rozamiento de los engranajes [12].

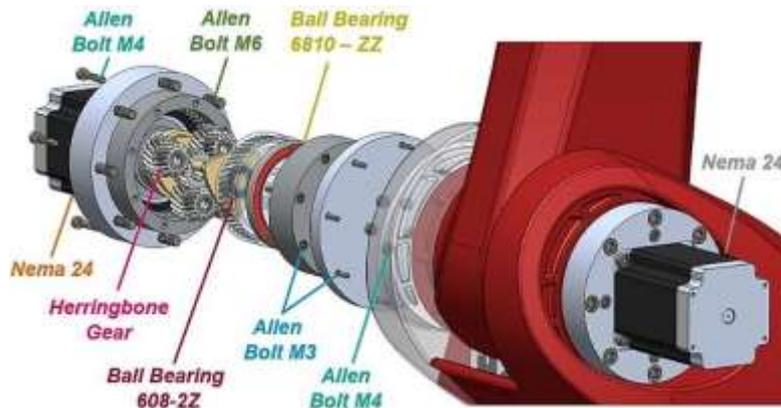


Fig. 3. Vista despiezada de actuadores y montaje en ambos lados del cuerpo

En la base del robot se encuentra un mecanismo de transmisión con tornillo sinfín y corona, compuesto por motores Nema 23 de 3 A con 18,35 Kg-cm para la rotación estable de todo el robot. Además, se agregan dos juegos de rodamientos colocados alrededor del borde superior de la base, como se muestra en la Fig. 4, para soportar y seguir la rotación del cuerpo en la base [13].

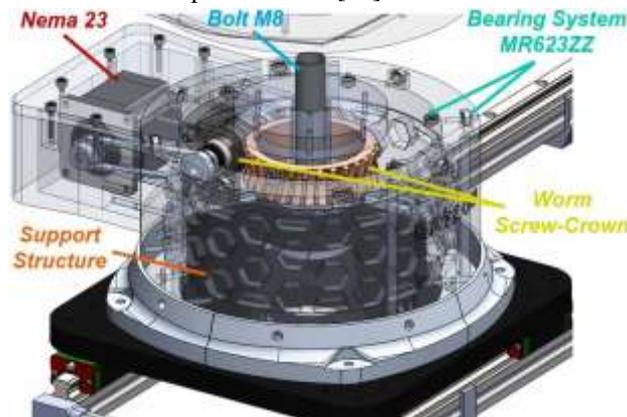


Fig. 4. Mecanismo de transmisión y acoplamiento del cuerpo en la base.

En la sección del codo se encuentran 3 motores Nema 17 de 1.5 A de consumo, cada uno acoplado a un reductor de dientes rectos consecuentemente ligados a cardanes para transmitir el torque a los 3 grados de libertad restantes.[13] En la Fig. 5 se ha implementado una segunda transmisión de engranajes helicoidales para distribuir adecuadamente el par de los reductores entre los grados de libertad, la transmisión de dos de ellos termina en 2 poleas de correa dentada GT2.

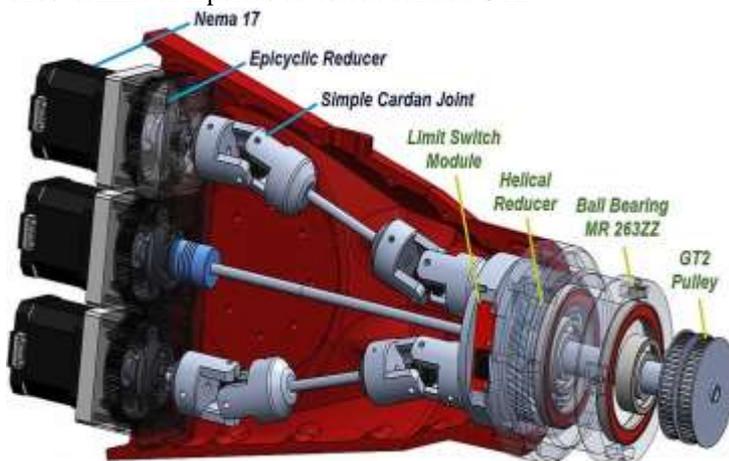


Fig. 5. Actuadores de codo, cardán y reductor de muñeca

En la sección del efector se encuentran 4 micromotores paso a paso de 0.25 A con 0.6 Kg-cm de torque que se utilizan para mover el último grado de libertad que tiene el efector, el cual será alimentado por entradas auxiliares, como se muestra en la Fig. 6. Para el diseño del acoplamiento, se tuvo en cuenta la norma ISO 11593:2022 [14].

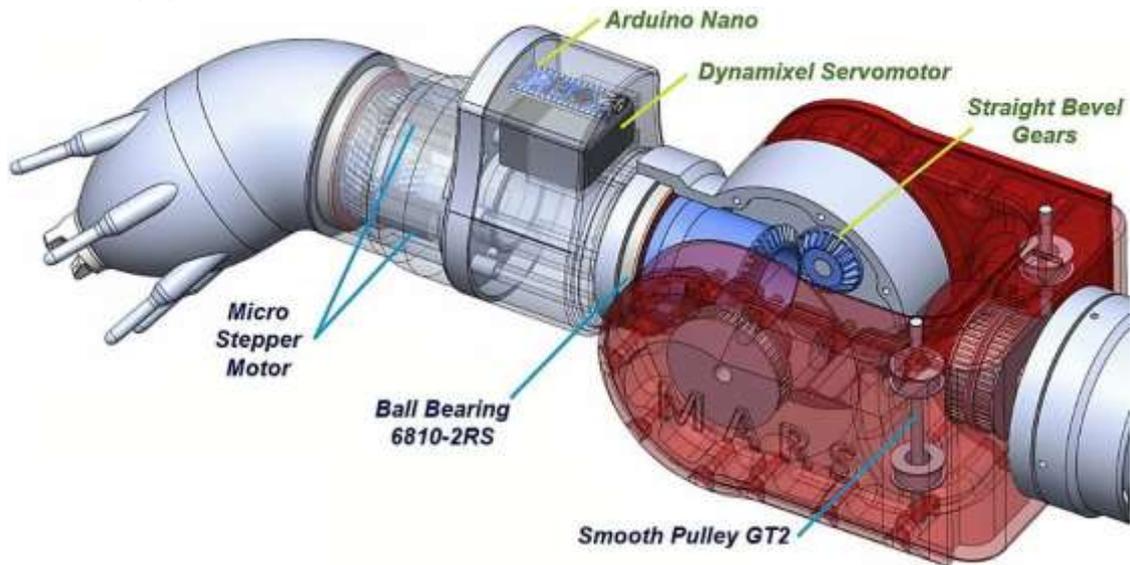


Fig. 6. Efector final de pintura en aerosol

En el panel de control se encuentran los dispositivos y componentes electrónicos que permiten el funcionamiento del robot serial, como se muestra en la Fig. 7. Como controlador se utiliza el Arduino Mega, este nos permite controlar los drivers. Se utilizaron tarjetas de expansión de controlador de motor paso a paso de 42 canales para reducir en gran medida el cableado y facilitar la ubicación de las entradas en el robot. Para los motores Nema se implementaron los drivers DRV8825 y TB 6600, que permiten el control de motores paso a paso bipolares. Finalmente, una fuente conmutada de 24V - 20A que alimenta la placa de control.

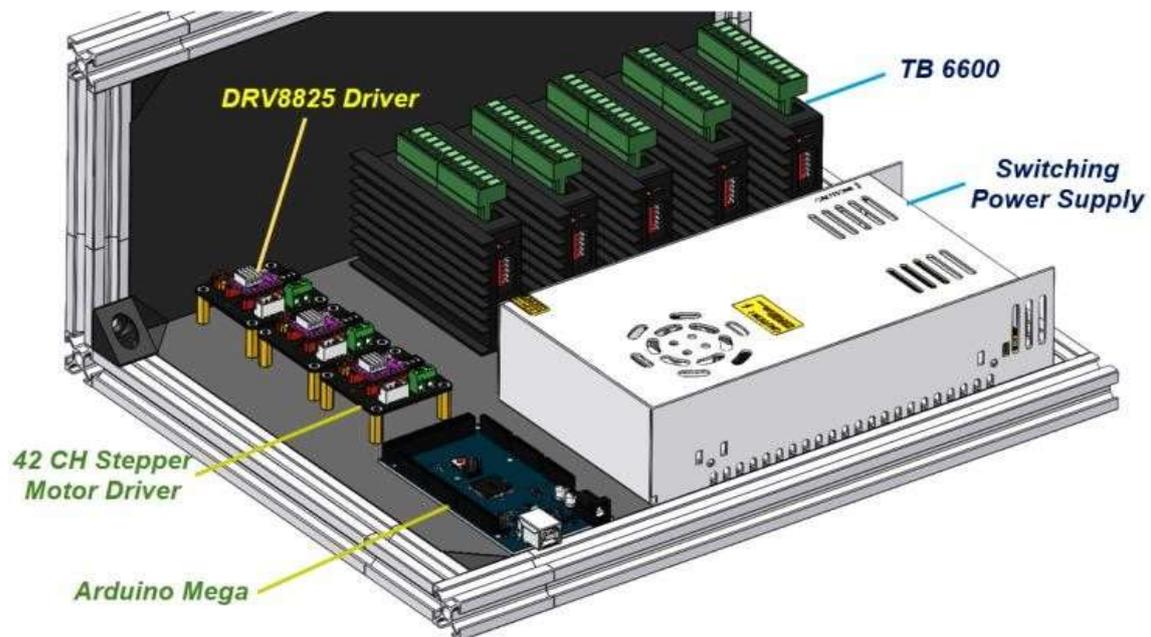


Figura 7. Panel de control

A pesar de ser un proyecto experimental y de investigación, los autores pretenden que el robot cumpla con los siguientes estándares: ISO 9283, criterios de desempeño y métodos de prueba relacionados [15], e ISO 9946, presentación de características para tipos de robots [16].

## II. ANÁLISIS CINEMÁTICO Y SIMULACIÓN

La descripción matemática del robot serial de 8 DoF está representada por un modelo cinemático que considera los grados de libertad del efector y la pista lineal. La siguiente tabla I. se basa en la cinemática directa del algoritmo Denavit-Hartenberg [17-21].

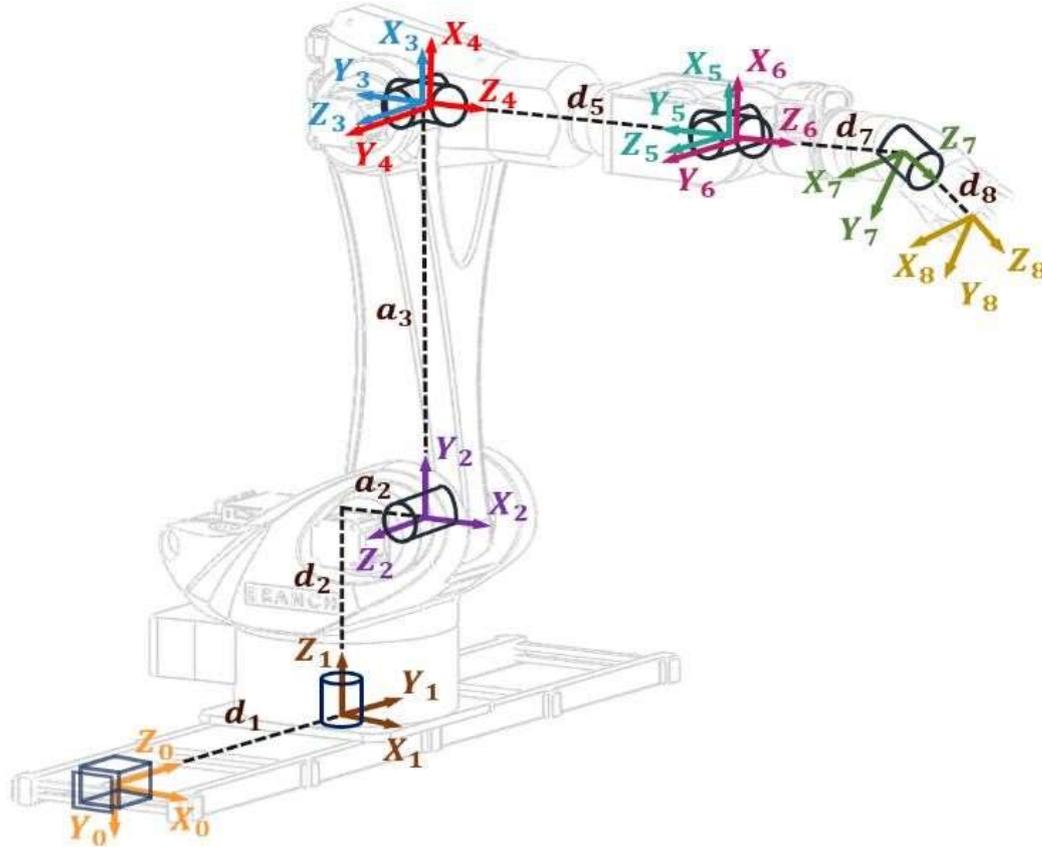


Fig. 8. Análisis Denavit-Hartenberg

TABLA I. DENAVIT-HARTENBERG

Enlace (i)	Parámetros cinemáticos			
	$\theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	0	d1*	0	90°
2	q2*	d2	a2	90°
3	q3*+90°	0	a3	0
4	q4*	0	0	90°
5	q5*	d5	0	- 90°
6	q6*	0	0	90°
7	q7*+90°	d7	0	45°
8	q8*	d8	0	0

La implementación de los parámetros da como resultado una matriz de transformación final que es el producto de todas las matrices. Considerando los 9 grados de libertad, la matriz resultante es:

$${}^0T = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} & t_{13} & P_x \\ t_{21} & t_{22} & t_{23} & P_y \\ t_{31} & t_{32} & t_{33} & P_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

La posición del efector está descrita por: (P<sub>x</sub>, P<sub>y</sub>, P<sub>z</sub>)

$$P_x = d_9 \left( \frac{\sqrt{2} (\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_3)}{2} + \frac{\sqrt{2} S_8 \sigma_4}{2} + \right.$$

$$\frac{\sqrt{2} C_8(\sigma_2 + \sigma_1 - \sigma_3)}{2}) + d_7\sigma_5 + C_2(a_2 + a_3C_3) +$$

$$d_8(\sigma_2 - \sigma_1 + \sigma_3) + d_5S_{34}C_2 \quad \dots (1)$$

$$\begin{aligned} P_y = & f_5 - d_2 - a_3S_3 + f_7C_6 - g_7C_5S_6 + \frac{\sqrt{2}f_8}{2}(C_6 + S_6S_7) + \\ & \frac{\sqrt{2}g_8}{2}(C_7S_5 - C_5S_6 + C_5C_6S_7) + \frac{f_9}{2}(C_6 + C_6C_8 + S_6S_7 - C_8S_6S_7 - \\ & \sqrt{2}C_7S_6S_8) + \frac{g_9C_5}{2}(C_6S_7 - S_6 - C_8S_6 - C_6C_8S_7 - \sqrt{2}C_6C_7S_8) + \\ & \frac{g_9}{2}(C_7S_5 - C_7C_8S_5 + \sqrt{2}S_5S_7S_8) \quad \dots (2) \\ P_z = & d_1 + a_2S_2 + g_5S_2 + a_3C_3S_2 + g_7C_6S_2 - d_7C_2S_5S_6 + f_7C_5S_2S_6 \\ & - \frac{\sqrt{2}}{2}(d_8C_2(C_5C_7 + S_5S_6 - C_6S_5S_7) - f_8S_2(C_5S_6 - C_7S_5 - C_5C_6S_7) \\ & + g_8S_2(C_6 + S_6S_7) - f_9S_2(S_5S_7S_8 - C_5C_6C_7C_8)) + \frac{g_9S_2}{2}(C_6 + S_6S_7 \\ & + C_6C_8 - C_8S_6S_7 - \sqrt{2}C_7S_6S_8) - \frac{d_9C_2}{2}(C_5C_7 + S_5S_6 - C_5C_7C_8 - \\ & C_6S_5S_7 + C_8S_5S_6 + C_6C_8S_5S_7 + \sqrt{2}(C_5S_7S_8 + C_6C_8S_5S_8)) + \\ & \frac{f_9S_2}{2}(C_5S_6 - C_7S_5 - C_5C_6S_7 + C_5C_8S_6 + C_7C_8S_5 + C_5C_6C_8S_7) \quad \dots (3) \end{aligned}$$

La siguiente simulación se realizó por medio de Simulink, en la Fig. 8 se muestra el diagrama de bloques de función que representa las articulaciones del robot y obtiene el control de trayectoria como se muestra en la Fig.9.

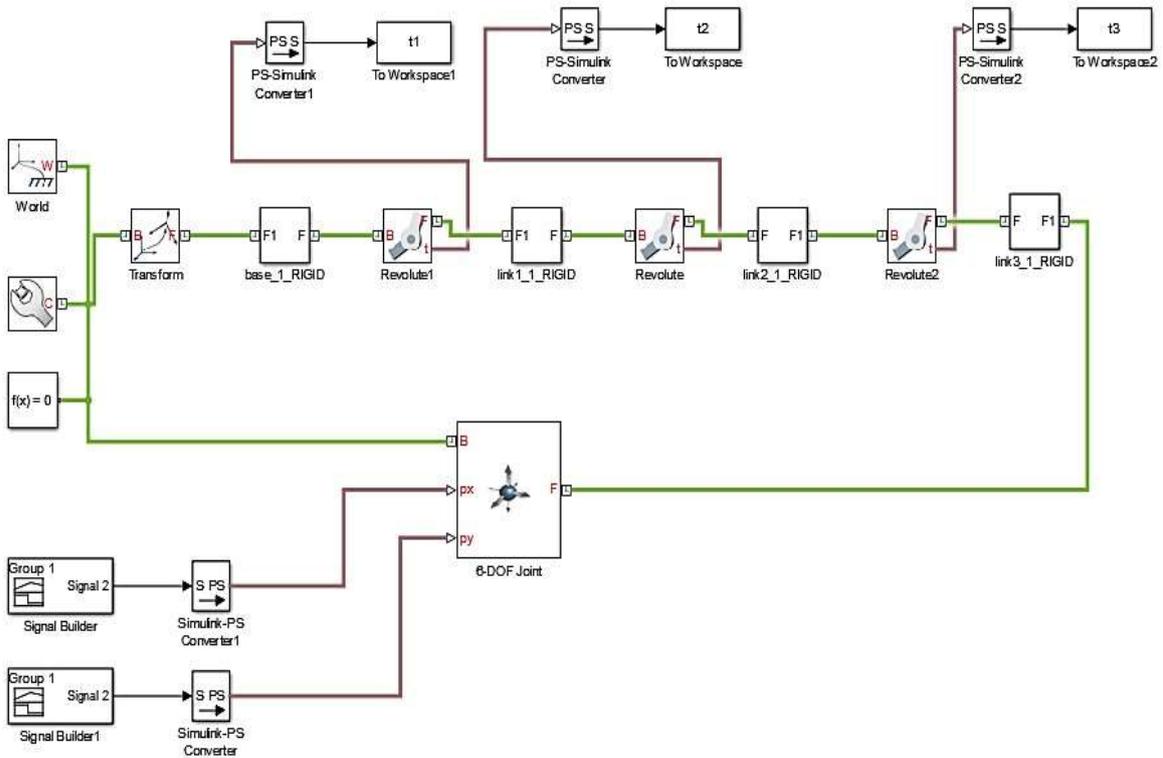


Fig. 9. Modelo de control en Simulink

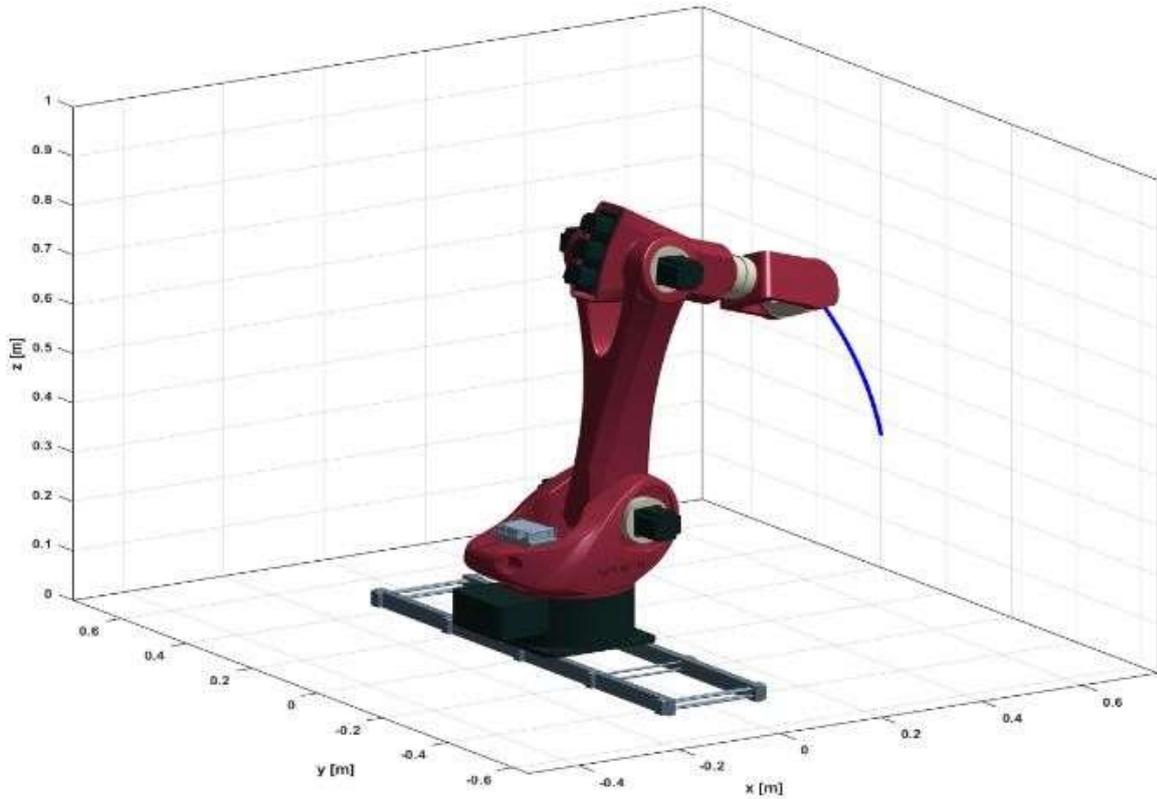


Fig. 10. Simulación de seguimiento de trayectoria en MATLAB

A continuación, se realizaron las simulaciones del ambiente de trabajo y del proceso automatizado utilizando CoppeliaSim. Se tienen en cuenta todos los factores que intervienen, como el área de trabajo, la pieza, la introducción del robot y el rendimiento del proceso. En la Fig. 10 se recrean las instalaciones de una empresa que trabaja con cuadros eléctricos donde está instalado el robot manipulador.



Fig. 10. Simulación de una empresa de cuadros eléctricos en CoppeliaSim

En la Fig. 11 se centra el proceso de pintado de los cuadros eléctricos que realiza el robot manipulador una vez instalado.

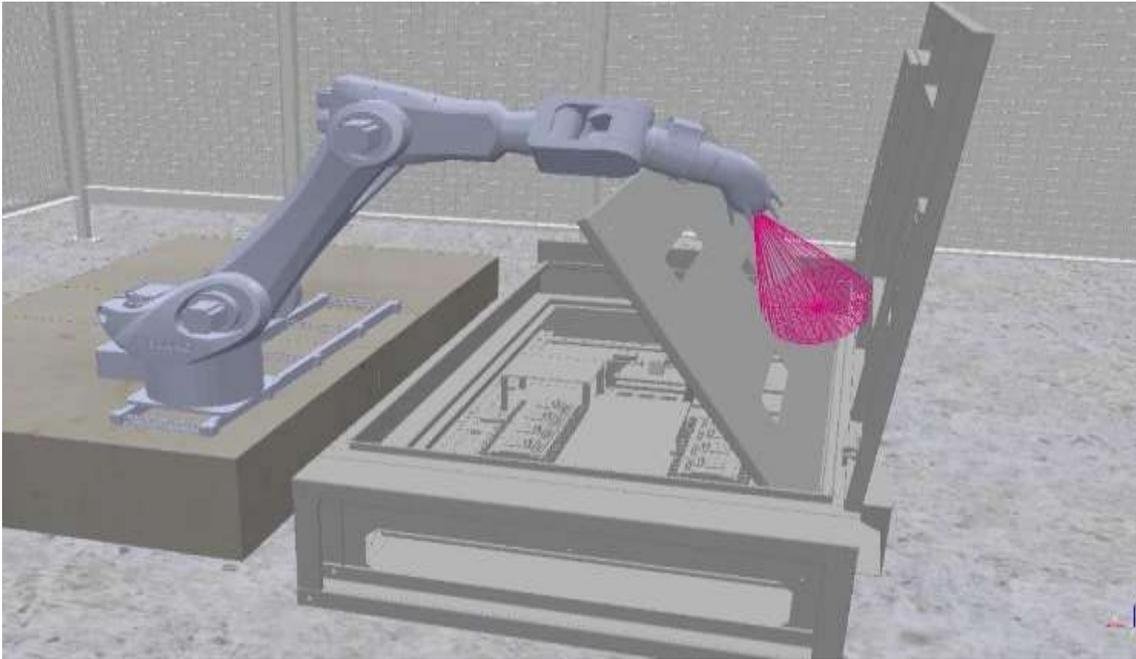


Fig. 11. Simulación en CoppeliaSim

#### IV. RESULTADOS, CONCLUSIÓN Y FUTURO

El brazo robótico propuesto, basado en la fabricación híbrida, permite la automatización parcialmente económica de actividades físicas predecibles, puede integrarse en entornos establecidos sin requerir una amplia capacitación del personal para su funcionamiento. El sistema robótico une una estructura cartesiana y un manipulador serial que permiten variar los ángulos de posición del efector final y aumentar la capacidad de esquivar obstáculos.

El manipulador de 8 dof fue diseñado teniendo en cuenta el proceso de pintado en tableros eléctricos cuyos espacios cerrados pueden dificultar el funcionamiento del efector final. Posee una estructura que soporta todo el peso del robot con mecanismo de compensación de contrapeso y motores Nema 23 de 150 N.cm ubicados en el cuerpo. Además, las dimensiones de las últimas transmisiones se han reducido para equilibrar correctamente el peso y el par requerido en cada articulación hasta el efector final.

Actualmente ya se implementó parte del brazo robótico mediante impresión 3D, las pruebas de desempeño se realizaron a través de un programa de prueba realizado en python utilizando controladores drv8825 y una fuente de alimentación de 24v 20 A, los resultados fueron satisfactorios.

Dado que el robot cuyos miembros pueden personalizarse e imprimirse en 3D, y su montaje puede realizarse mediante componentes mecánicos, eléctricos y electrónicos estándar, se presenta como una solución flexible y de bajo coste. El desarrollo de este proyecto continuará junto con el concepto de Industria 4.0.

## Reconocimiento

Agradecimiento al Departamento de Ingeniería Robótica de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecatrónica de la Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú. También, gracias por la supervisión al Departamento de Física e Ingeniería del Grupo de Investigación en Bioastronáutica y Mecatrónica Espacial (<https://sites.google.com/view/bio-sm>).

## Referencias

- [1] M. A. K. Bahrin, M. F. Othman, N. N. Azli, and M. F. Talib, "Industry 4.0: A review on industrial automation and robotic," J. Teknologi, vol. 78, nos. 6–13, pp. 137–143, 2016. doi:10.11113/jt.v78.9285
- [2] L. Sanneman, C. Fourie, and J. A. Shah, "The state of industrial robotics: Emerging technologies, challenges, and key research directions," Found. Trend Robotics, 2020. doi: 10.1561/23000000065
- [3] IFR International Federation of Robotics., 2022, "IFR presents World Robotics 2021 reports". [Online] Available at: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/robot-sales-rise-again> [Accessed: 28-Jun-2022].
- [4] World Economic Forum, "Readiness for the Future of Production Report 2018". [Online]. Available: <https://www.weforum.org/reports/readiness-for-the-future-of-production-report-2018>. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [5] McKinsey Global Institute, "A future that works full report". [Online]. Available: [https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Featured%20Insights/Digital%20Disruption/Harnessing%20automation%20for%20a%20future%20that%20works/MGI-A-future-that-works\\_Full-report.ashx](https://www.mckinsey.com/~media/McKinsey/Featured%20Insights/Digital%20Disruption/Harnessing%20automation%20for%20a%20future%20that%20works/MGI-A-future-that-works_Full-report.ashx). [Accessed: 01-Jul-2022].
- [6] IPCM n. 50, vol. IX, 2018, IPCM. [Online]. Available: <https://www.ipcm.it/es/open/ipcm/2018/50/16-17.aspx>. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [7] IPCM n. 46, vol. VIII, 2017, IPCM. [Online]. Available: <https://www.ipcm.it/es/open/ipcm/2017/46/16-17.aspx>. [Accessed: 28-Jun-2022].
- [8] T. D. Ngo, A. Kashani, G. Imbalzano, K. T. Q. Nguyen, and D. Hui, "Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges," Compos. B, Eng., vol. 143, pp. 172–196, Jun. 2018. doi:10.1016/j.compositesb.2018.02.012
- [9] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, Additive Manufacturing Technologies. New York, NY, USA: Springer, 2010, doi: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
- [10] Y. Zhang, K. Mao, S. Leigh, A. Shah, Z. Chao, & G. Ma, "A parametric study of 3D printed polymer gears," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, March 2020. doi:10.1007/s00170-020-05270-5
- [11] V. Arakelian, "Gravity compensation in robotics," Advanced Robotics, vol. 30, pp. 79–96, 2016. doi:10.1080/01691864.2015.1090334
- [12] M. Kang and A. Kahraman, "An experimental and theoretical study of the dynamic behavior of doublehelical gear sets," Journal of Sound & Vibration, vol. 350, pp. 11–29, 2015. doi:10.1016/j.jsv.2015.04.008
- [13] J. Shigley and C. Mischke, Standard handbook of machine design. McGraw-Hill, New York, 1986.
- [14] Robots for industrial environments — Automatic end effector exchange systems — Vocabulary ISO 11593, 2022.
- [15] Manipulating industrial robots — Performance criteria and related test methods ISO 9283, 1998.
- [16] Manipulating industrial robots — Presentation of characteristics ISO 9946, 1999.
- [17] M. W. Spong, S. Hutchinson, and M. Vidyasagar, Robot modeling and control. Wiley New York, 2006. doi:10.1108/ir.2006.33.5.403.1
- [18] P. M. Kebria, S. Al-Wais, H. Abdi, and S. Nahavandi, "Kinematic and dynamic modelling of UR5 manipulator," in Proc. IEEE Int. Conf. Syst., Man, Cybern. (SMC), Oct. 2016, pp. 4229–4234. doi:10.1109/smc.2016.7844896
- [19] S. Kolathaya and A. D. Ames, "Parameter to state stability of control Lyapunov functions for hybrid system models of robots," Nonlinear Anal., Hybrid Syst., vol. 25, pp. 174–191, 2016. doi:10.1016/j.nahs.2016.09.003
- [20] Z. Ju, C. Yang, and H. Ma, "Kinematics modeling and experimental verification of Baxter robot," in Proc. 33rd Chin. Control Conf. (CCC), Nanjing, China, 2014, pp. 8518–8523. doi:10.1109/chicc.2014.6896430
- [21] F. Chinello, S. Scheggi, F. Morbidi, D. Prattichizzo, "KCT: a MATLAB toolbox for motion control of KUKA robot manipulators", 2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Anchorage Convention District, Anchorage, Alaska, USA, May 3-8, 2010. doi:10.1109/robot.2010.5509415

Link: