ISSN: 1692-7257 - Volumen 1 – Número 47 - 2026

ORIGINAL

RCTA
Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada
UNIPAMPLONA

Sistema robótico didáctico controlado por voz para la representación del lenguaje de señas mexicano

Voice-controlled didactic robotic system for the representation of Mexican Sign Language

Uriel Reyes Fraire[1]
Ángel Gamaliel Lara Gómez[1]
Gerardo Javier Soto Ulloa[1]
María Cristina Guevara Neri[1]

[1] **Universidad Tecnológica Paso del Norte, Área de Ingeniería Mecatrónica, Ciudad Juárez, México.**

Recibido: 18 agosto 2025. Revisado: 18 octubre 2025. Aceptado: 20 diciembre 2025. Publicado: 01 enero 2026.
Autor de correspondencia: María Cristina Guevara Neri

Cómo citar: U. Reyes Fraire, Á. G. Lara Gómez, G. J. Soto Ulloa, and M. C. Guevara Neri, "Sistema robótico didáctico controlado por voz para la representación del lenguaje de señas mexicano", *Revista Colombiana de Tecnologías de Avanzada (RCTA)*, vol. 1, no. 47, ene. 2026, art. no. 4306, doi: 10.24054/rcta.v1i47.4306

Esta obra está bajo una licencia internacional Creative Commons Atribución-NoComercial 4.0.

Resumen:

El presente trabajo describe el desarrollo de un sistema robótico didáctico controlado por voz diseñado para representar letras del Lenguaje de Señas Mexicano (LSM). El prototipo integra ocho servomotores independientes, una arquitectura basada en Raspberry Pi 3 y un módulo PCA9685 para el control simultáneo de movimientos. La aplicación móvil desarrollada en MIT App Inventor permite operar el sistema mediante comandos de voz en español o control manual, facilitando la interacción con el usuario. Los resultados muestran una ejecución correcta del 60 % de las letras, un 33 % con leves dificultades y un 7 % no logradas, validando la estabilidad mecánica, la precisión gestual y el potencial educativo del sistema. Este proyecto promueve la inclusión tecnológica y el aprendizaje de la robótica aplicada a contextos sociales y educativos.

Palabras clave: robótica educativa, lenguaje de señas mexicano, reconocimiento de voz, Raspberry Pi, inclusión tecnológica.

Abstract:

This paper presents the development of a voice-controlled didactic robotic system designed to reproduce letters of the Mexican Sign Language (LSM). The prototype integrates eight independent servomotors, a Raspberry Pi 3-based architecture, and a PCA9685 module for coordinated motion control. A mobile application built in MIT App Inventor enables operation through Spanish voice commands or manual control, enhancing user interaction. The results show that 60% of the letters were correctly executed, 33% with minor mechanical limitations, and 7% not achieved, validating the system's mechanical stability, gesture accuracy, and educational potential. This project fosters technological inclusion and promotes the use of robotics as a tool for social and educational learning.

Keywords: educational robotics, Mexican Sign Language, voice recognition, Raspberry Pi, technological inclusion.

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la robótica educativa se ha consolidado como una herramienta clave para fortalecer la enseñanza de la ingeniería, fomentar el aprendizaje activo y promover la inclusión social. En particular, su aplicación al aprendizaje del Lenguaje de Señas Mexicano (LSM) representa una oportunidad para vincular la tecnología con la accesibilidad comunicativa. En México, la discapacidad auditiva afecta a más de cinco millones de personas, mientras que más de dos millones presentan dificultades para comunicarse oralmente[1], lo que pone de manifiesto la urgencia de incorporar estrategias inclusivas en los procesos educativos.

El desarrollo de sistemas robóticos orientados a la enseñanza y a la inclusión ha cobrado relevancia al permitir la convergencia entre la mecatrónica, la inteligencia artificial y las tecnologías de asistencia. En [2] se propuso una mano robótica de bajo costo orientada a la educación tecnológica, destacando su potencial en entornos con recursos limitados. De manera similar, en [3] se desarrolló un asistente robótico para el aprendizaje de lengua de señas en niños con discapacidad auditiva, subrayando su impacto social. En [4] se demostró la eficacia del uso de Raspberry Pi y Python en la programación de una mano robótica educativa, mientras que en [5] se enfatizó la relevancia del diseño ergonómico en prótesis basadas en soft-robotics, proponiendo un enfoque centrado en la experiencia del usuario.

Desde la perspectiva educativa y social, en [6] se abordó la integración de asistentes virtuales de voz en entornos académicos, y en [7] se exploró la incorporación de interfaces auditivas para favorecer la atención y la comprensión, mostrando que la interacción entre usuario y tecnología fortalece la inclusión y la interdisciplinariedad. Por su parte, en [8] y [9] se destacaron que los proyectos de robótica educativa promueven la creatividad, el trabajo colaborativo y las competencias de resolución de problemas en estudiantes de ingeniería, sentando un precedente formativo valioso para el desarrollo de este proyecto.

En el ámbito técnico, en [10] se presentó un traductor de lenguaje de señas controlado por computadora, y en [11] se logró una mayor fidelidad gestual mediante quince servomotores, aunque con un costo y complejidad superiores. En [12] y [13] se desarrollaron versiones de bajo costo mediante impresión 3D, aunque con limitaciones en la independencia de los dedos y sin control por voz. En [14] se incorporaron visión artificial para sincronizar sensores y actuadores, mientras que en [15] se aplicaron materiales locales en prototipos accesibles. Finalmente, en [16] se introdujo el uso de PLC basados en Raspberry Pi y Node-RED en sistemas IoT, y en [17] se confirmó la eficiencia de la impresión 3D en la fabricación de mecanismos de precisión.

Por su parte, en[18]se exploró la aplicación de modelos de lenguaje en la manipulación robótica, mostrando el potencial del aprendizaje automático para optimizar la precisión de los movimientos y la adaptabilidad de los sistemas mecatrónicos.

A partir de esta revisión se identificó una brecha tecnológica: la mayoría de los desarrollos previos se enfocan en traducción de señas o rehabilitación, pero no en un enfoque educativo adaptado al contexto mexicano ni con control por voz en español. Ante ello, el presente proyecto propone un sistema robótico didáctico articulado capaz de representar las letras del LSM mediante comandos de voz, integrando subsistemas mecánicos, electrónicos y de programación en una arquitectura accesible y replicable.

El objetivo general del trabajo es diseñar y desarrollar un sistema robótico didáctico controlado por voz que ejecute configuraciones del LSM mediante una arquitectura mecatrónica de ocho servomotores independientes y una interfaz en Raspberry Pi, con el fin de fortalecer la enseñanza del LSM y fomentar la inclusión educativa. Para lograrlo, se plantearon objetivos específicos orientados al análisis de los requerimientos mecánicos, electrónicos y de control; la implementación del reconocimiento de voz local en español; la programación coordinada de los servos; y la evaluación del desempeño y valor didáctico del prototipo.

En síntesis, el proyecto vincula la ingeniería con la inclusión social y la educación a través de una solución tecnológica de bajo costo, modular y replicable. A continuación, se presentan los principales aportes del trabajo:

- Desarrollo de una arquitectura mecatrónica basada en Raspberry Pi 3 y PCA9685, con control independiente de ocho servomotores.
- Implementación de un sistema de reconocimiento de voz en español para la ejecución de gestos del alfabeto manual mexicano.
- Integración de una aplicación móvil en MIT App Inventor que permite el control manual o por voz del brazo robótico.
- Diseño de un prototipo didáctico y replicable, adaptable a contextos escolares y formativos en áreas STEM.
- Contribución al fortalecimiento de las competencias STEM y la sensibilización hacia la comunidad sorda a través de la robótica educativa.

MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo del sistema robótico didáctico controlado por voz se realizó bajo un enfoque mecatrónico integral, en el que confluyeron los componentes mecánico, eléctrico, electrónico y de control. El propósito fue obtener un prototipo funcional,

estable y replicable capaz de representar las configuraciones del Lenguaje de Señas Mexicano (LSM) a partir de comandos de voz.

El proceso metodológico se estructuró en fases consecutivas que permitieron avanzar desde el diseño conceptual hasta la validación experimental del sistema, priorizando la accesibilidad, el bajo costo y la facilidad de implementación en contextos educativos. Las etapas se desarrollaron siguiendo principios de iteración y mejora continua, garantizando la coherencia entre el modelado, la fabricación y el control.

Arquitectura general del sistema

El proceso de desarrollo siguió una metodología iterativa compuesta por cuatro fases principales: diseño, impresión y ensamblaje, integración electrónica y validación funcional.

- Diseño y simulación: adaptación del modelo 3D y planificación del cableado interno.
- Fabricación: impresión de las piezas, pruebas de montaje y ajuste de los tendones.
- Integración de hardware y software: conexión de servomotores, instalación del sistema operativo en la Raspberry Pi 3 y configuración del control por voz mediante el módulo PCA9685.
- Pruebas funcionales: verificación de la respuesta mecánica y calibración de los motores.

Estas etapas permitieron consolidar un flujo de trabajo modular, en el que cada fase aportó información para optimizar el rendimiento del prototipo y garantizar su replicabilidad en futuros entornos académicos o de investigación.

Diseño mecánico

El diseño mecánico del brazo robótico se basó en el modelo tridimensional de[19], seleccionado por su estructura modular y su adaptabilidad a entornos educativos (ver Fig. 1).

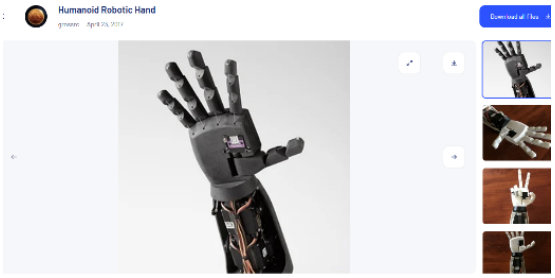

Fig. 1. *Captura de la página oficial del proyecto de GrossRC.*
Fuente: [19].

En la captura se muestra el diseño original utilizado como base, el cual fue modificado para mejorar la estabilidad, el acoplamiento de servomotores y el enrutamiento interno del cableado. Cada componente fue impreso en filamento PLA con un espesor de capa de 0.2 mm y un 25 % de relleno, optimizando la resistencia y reduciendo el peso total.

Para el diseño de la mano se tomó como referencia la anatomía humana, a fin de preservar la proporcionalidad y la movilidad de las articulaciones, tal como se observa en la (ver Fig. 2), que ilustra la disposición de falanges y ejes de rotación. La estructura final integra seis servomotores SG90 para los dedos, un servo adicional para el cruce del índice y un MG995 para la muñeca, otorgando ocho grados de libertad. Esta configuración permitió reproducir correctamente letras complejas del LSM, como la “R”, manteniendo una estructura ligera, estable y fácilmente replicable.



Fig. 2 Imagen de anatomía de la mano.
Fuente: [20].

Durante la etapa de construcción se realizaron modificaciones al diseño base, incorporando una nueva estructura de soporte y discos tensores impresos en 3D para mejorar la tensión de los cables y la estabilidad del sistema (ver Fig. 3). Estos ajustes fueron necesarios para permitir la integración efectiva de los ocho servomotores y garantizar un funcionamiento coordinado de los actuadores.

El sistema eléctrico se diseñó inicialmente con una configuración basada en un Arduino Nano y una placa PCA9685, encargada de distribuir las señales PWM hacia los servomotores. Este montaje permitió realizar las primeras pruebas de movimiento y calibración de los dedos, verificando la estabilidad del suministro de 5 V.

Diseño eléctrico y electrónico

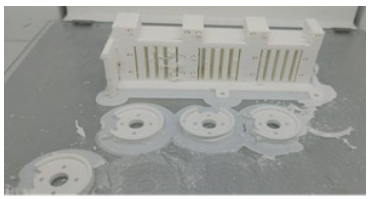

Fig. 3. *Impresión de discos tensores y base modificada.*
Fuente: elaboración propia.

Posteriormente, se sustituyó el Arduino por una Raspberry Pi 3, que integra las funciones de control, reconocimiento de voz en español y comunicación con la interfaz de usuario. Esta migración permitió un sistema más estable, escalable y autónomo, al eliminar la dependencia del microcontrolador y centralizar el procesamiento en una sola plataforma.

Las conexiones se realizaron mediante cables Dupont tipo macho-hembra y una fuente de 5 V a 3 A, suficiente para alimentar los ocho servomotores controlados desde la PCA9685. La Tabla 1 resume los movimientos asignados a cada canal y su rango angular de operación, mientras que la Fig. 4 muestra el diagrama eléctrico final con la comunicación I²C entre la Raspberry Pi 3 y la PCA9685.

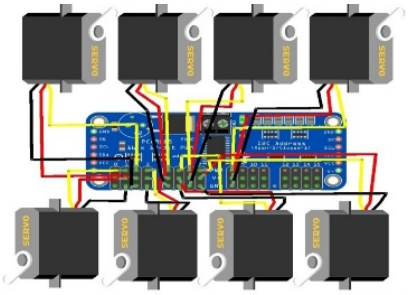

Fig. 4. *Diagrama eléctrico del sistema final basado en Raspberry Pi.*
Fuente: elaboración propia.

Tabla 1: Servomotores. Movimientos y rangos de calibración

Canal (PCA9685)	Movimiento controlado	Rango aproximado
1	Giro de pulgar (SG90)	120° a 0°
2	Flexión de pulgar	0° a 180°
3	Índice	180° a 0°
4	Medio	0° a 180°
5	Anular	0° a 180°
6	Meñique	0° a 180°
7	Cruce de dedo (índice)	180° a 0°
8	Giro de brazo (MG995)	180° a 0°

Fuente: elaboración propia

Diseño del sistema de control

El sistema de control se desarrolló en la plataforma Raspberry Pi 3 utilizando el lenguaje Python para la gestión de señales PWM enviadas al módulo PCA9685. Este módulo permitió coordinar el movimiento de los ocho servomotores, asignando a cada uno un canal independiente para garantizar precisión en la ejecución de las letras del LSM.

El flujo de control inicia con la recepción de comandos de voz en español a través de la aplicación móvil desarrollada en MIT App Inventor. Dichos comandos son transmitidos mediante conexión Bluetooth hacia la Raspberry Pi, donde un script local procesa las órdenes y ejecuta las secuencias predefinidas de movimiento.

El algoritmo principal implementa rutinas de calibración y sincronización para evitar interferencias entre los servos contiguos,

además de incluir parámetros de seguridad que limitan los ángulos máximos de desplazamiento. De esta manera, se logró una respuesta estable y fluida en los movimientos, con una latencia promedio imperceptible para el usuario.

RESULTADOS

Los resultados obtenidos demuestran la funcionalidad integral del sistema robótico didáctico controlado por voz, validando tanto su desempeño mecánico y electrónico como su utilidad pedagógica. El prototipo logró ejecutar de forma estable las configuraciones del alfabeto manual del LSM, evidenciando la correcta integración entre los subsistemas de control, mecánica y aplicación móvil.

Desempeño del sistema robótico

El ensamblaje final del brazo robótico mostró una adecuada estabilidad estructural y respuesta fluida en la articulación de los dedos (como se observa en la Fig. 5) donde se presenta la ejecución de la letra “R” del Lenguaje de Señas Mexicano.

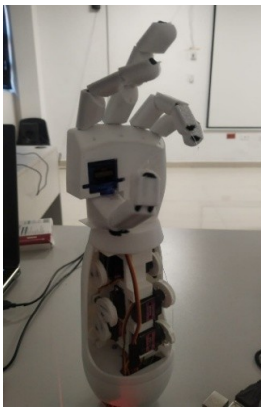

Fig. 5. *Ejecución de la letra “R” en el Lenguaje de Señas Mexicano.*
Fuente: elaboración propia.

Las piezas impresas en PLA mantuvieron su rigidez tras múltiples ciclos de operación, y el diseño optimizado permitió alojar los ocho servomotores sin interferencias entre ejes contiguos. Una de las principales mejoras implementadas respecto al modelo base consistió en la incorporación de un servo adicional para el cruce del dedo índice, el cual posibilita el movimiento diagonal característico de la letra “R” en el LSM. Esta modificación representa un avance significativo en términos de realismo gestual y precisión cinemática, al reproducir un gesto que no era alcanzable con configuraciones convencionales de seis servos.

La ejecución de la letra “R” constituye uno de los resultados más representativos del proyecto, al evidenciar la correcta sincronización entre los ocho servos y la mejora cinemática alcanzada mediante el nuevo acoplamiento diagonal del índice. Esta configuración demostró ser reproducible, estable y precisa, consolidando la aportación técnica del prototipo en el contexto del LSM.

Validación de configuraciones del LSM

Para validar el desempeño del sistema, se realizaron pruebas de ejecución de las letras del alfabeto manual del Lenguaje de Señas Mexicano (LSM). El procedimiento consistió en ingresar comandos de voz correspondientes a cada letra y registrar la precisión del gesto resultante, considerando su estabilidad, forma y sincronización.

Durante las pruebas se observó que la mayoría de las letras fueron correctamente reproducidas, entre ellas A, B, C, D, E, F, I, J, K, L, O, R, U, V, W y Y, que mostraron gestos estables y completamente logrados. Otras letras, como G, H, M, N, P, Q, S, X y Z, se ejecutaron con ligera dificultad debido a las limitaciones mecánicas en la flexión y cruce de algunos dedos. Finalmente, las letras Ñ y T no pudieron representarse adecuadamente por restricciones geométricas en la estructura impresa.

Los resultados se clasificaron en tres categorías: correctamente ejecutadas, ejecutadas con dificultad y no ejecutadas. La Tabla 2 muestra la síntesis de las configuraciones evaluadas, junto con el porcentaje de efectividad obtenido en cada caso.

Tabla 2: Resultados de validación de letras del LSM mediante comandos de voz

Categoría	Porcentaje (%)	Descripción breve
Correctamente ejecutadas	60	Letras reproducidas de manera completa y estable.
Ejecutadas con dificultad	33	Letras con gestos correctos, pero con leves limitaciones mecánicas.
No ejecutadas	7	Letras cuya forma no pudo reproducirse de manera adecuada.

Fuente: elaboración propia

El análisis mostró que el 93 % de las letras fueron ejecutadas correctamente o con ligeras limitaciones, lo que demuestra la estabilidad y precisión del sistema. Las variaciones se asociaron principalmente a la tensión de los cables y a las diferencias geométricas entre los dedos impresos.

El sistema mantuvo una alta repetibilidad durante las pruebas, con una respuesta de control fluida y un tiempo promedio de ejecución por gesto inferior a dos segundos. Estas características evidencian la fiabilidad del diseño y su potencial para su uso como recurso didáctico en la enseñanza del LSM.

Evaluación funcional e integración del sistema

La integración de los subsistemas mecánico, eléctrico y de control permitió validar el funcionamiento completo del prototipo. Durante las pruebas finales, el sistema respondió correctamente a los comandos de voz emitidos en español, ejecutando de manera precisa los gestos asociados a cada letra del Lenguaje de Señas Mexicano (LSM). La comunicación entre la aplicación móvil y la Raspberry Pi se estableció mediante Bluetooth, garantizando una conexión estable y de baja latencia.

La Fig. 6 muestra la versión final de la aplicación desarrollada en MIT App Inventor, que permite al usuario seleccionar entre control manual o por voz. Cada comando activa una rutina preprogramada que envía señales PWM al módulo PCA9685, generando el movimiento correspondiente en los servomotores. El diseño de la interfaz prioriza la simplicidad visual, de modo que los estudiantes puedan interactuar fácilmente con el sistema durante actividades didácticas o demostraciones.

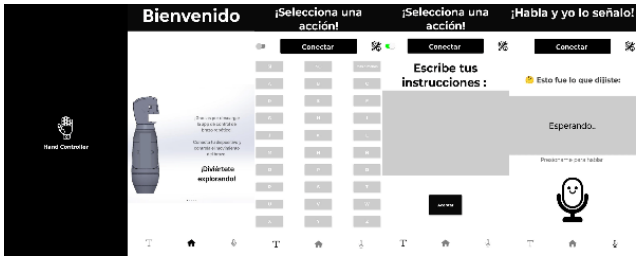

Fig. 6. *Versión final de la aplicación desarrollada en MIT App Inventor. Fuente: elaboración propia.*

El desempeño global del sistema confirmó su fiabilidad en entornos educativos. Las letras ejecutadas mostraron estabilidad mecánica, respuesta inmediata al reconocimiento de voz y coherencia gestual con el alfabeto manual mexicano. Este resultado evidencia que la arquitectura propuesta, basada en control local, modularidad y materiales de bajo costo, puede replicarse en contextos académicos como herramienta para la enseñanza de la robótica y la sensibilización hacia la comunidad sorda.

CONCLUSIONES

El desarrollo del sistema robótico didáctico controlado por voz permitió integrar de manera efectiva los principios de la ingeniería mecatrónica con un propósito social y educativo. La arquitectura basada en Raspberry Pi 3 y el módulo PCA9685 demostró ser una plataforma funcional y adaptable para el control independiente de ocho servomotores, logrando movimientos precisos y reproducibles de las letras del alfabeto manual del Lenguaje de Señas Mexicano (LSM).

La implementación del reconocimiento de voz en español facilitó la interacción natural entre el usuario y el sistema, eliminando barreras lingüísticas y reforzando la accesibilidad tecnológica. De igual manera, la aplicación móvil desarrollada en MIT App Inventor permitió una operación sencilla y flexible, tanto en modo manual como por comandos de voz, promoviendo el aprendizaje interactivo.

El prototipo obtenido representa una herramienta didáctica replicable y de fácil integración en contextos escolares, favoreciendo la enseñanza de la robótica y las competencias STEM mediante un enfoque inclusivo. Además, el proyecto contribuye a la sensibilización hacia la comunidad sorda y al fomento de una cultura tecnológica con sentido humano.

En conjunto, los resultados alcanzados validan la viabilidad técnica y educativa de la propuesta, consolidándola como una base sólida para el desarrollo de nuevas soluciones en robótica inclusiva.

Como parte de los próximos avances del proyecto, se contempla fortalecer el diseño mecánico del brazo robótico para incorporar movimientos que permitan representar las letras que aún no se han logrado con precisión y mejorar aquellas que se ejecutaron con dificultad. Asimismo, se plantea actualizar la aplicación móvil que funciona como interfaz de control, con el objetivo de hacerla pública y disponible para descarga, de manera que otros usuarios puedan manejar el sistema robótico y replicar su funcionamiento. Finalmente, se planea compartir el repositorio del proyecto con los archivos de diseño y control, junto con las mejoras realizadas, a fin de fomentar su adopción en entornos educativos, promover la colaboración académica y contribuir al desarrollo de tecnologías inclusivas con impacto social.

REFERENCIAS

[1] A. Ramírez-Noriega, J. F. Figueroa-Pérez, J. Mendivil-Torres, G. Ayala-Zúñiga y Y. Martínez-Ramírez, «Una propuesta para un sistema web colaborativo para el Lenguaje de Señas Mexicano,» Revista Aristas: Investigación Básica y Aplicada, vol. 9, nº 17, pp. 261-267, 2022.

[2] L. E. Alarcón Yánez, «Diseño y construcción de una mano robótica de bajo costo para aplicaciones educativas,» Revista Honoris Causa, vol. 17, nº 1, pp. 42-58, 2025.

[3] E. O. Vasquez Bueno, «Asistente robótico como soporte para el aprendizaje de lengua de señas para niños con discapacidad auditiva,» Universidad del Azuay, Cuenca, Ecuador, 2025.

[4] C. N. León Sánchez, C. Benavides Álvarez, C. Avilés Cruz, A. Zúñiga López y G. d. J. Celis Escudero, «Sistema de control de mano robótica por medio de una Raspberry Pi y una interfaz en Python,» Pistas Educativas, vol. 45, nº 147, pp. 681-696, 2024.

[5] M. Suárez García, «Adaptación de la prótesis de mano basada en Soft-Robotics PrExHand para la evaluación con usuarios no patológicos en pruebas funcionales,» Universidad del Rosario / Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., Colombia, 2021.

[6] L. Castañeda Izquierdo, «Diseño de modelo de asistente virtual de voz mediante la API (Interfaz de Programación de Aplicaciones) de Google,» Universidad del Istmo, Guatemala, 2022.

[7] A. Gómez Noé, «Al Loro: Lector de feeds RSS para asistente de voz,» Universitat Politècnica de València, Valencia, España, 2021.

[8] A. F. Rozo Mosquera y D. A. Castañeda Herrera, «Diseño optimizado de un brazo robótico antropomórfico validado por señales biomecánicas,» Fundación Universidad de América, Bogotá, Colombia, 2024.

[9] J. Reynoso Villaverde, «Diseño y control de una mano robótica para función motora de personas discapacitadas,» Universidad Continental, Huancayo, Perú, 2021.

[10] M. P. España Cajiao, «Diseño y construcción de un traductor de lenguaje de señas, para facilitar la comunicación entre personas mediante una computadora y una mano robótica,» Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Guayaquil, Ecuador, 2020.

[11] J. C. Garrido Macías y P. F. Uvillus Tayupanta, «Interpretación bidireccional del alfabeto dactilológico mediante una mano robótica y una aplicación móvil para la interacción con personas sordomudas,» Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador, 2020.

[12] J. A. Zambrano Zambrano, «Diseño y construcción de un brazo robótico mediante impresión 3D y Arduino,» Universidad Técnica de Machala, Machala, Ecuador, 2021.

[13] F. Morillas Espejo, «Robótica asistencial en lengua de signos,» Universidad de Alicante, Alicante, España, 2021.

[14] F. L. Fiestas Cobeñas y C. A. Tesén Bardales, «Desarrollo y control de una mano robótica con visión artificial para la emulación de movimientos del ser humano,» Universidad de Piura, Piura, Perú, 2024.

[15] I. A. Adeyanju, S. O. Alabi, A. O. Esan, B. A. Omodunbi, O. Bello y S. Fanjio, «Design and prototyping of a robotic hand for sign language using locally-sourced materials,» Scientiic African, vol. 19, pp. 1-15, 2023.

[16] J. D. León Callupe, «Diseño e implementación de un PLC basado en Raspberry Pi & Nodered para aplicaciones industriales IoT,» Universidad Ricardo Palma, Lima, Perú, 2021.

[17] C. Calle del Río, «Diseño, prototipado y programación de una prótesis de mano mediante impresión 3D,» Universidad de Valladolid, Valladolid, España, 2023.

[18] M. Fernández Herrero, «Diseño de recompensas mediante LLMs para tareas de manipulación robótica,» Universidad de Alicante, Escuela Politécnica Superior, Alicante, España, 2025.

[19] GrossRC, «Humanoid Robotic Hand [modelo 3D],» 2017. [En línea]. Available: https://www.thingiverse.com/thing:2269115.

[20] Stanford Health Care, «Hand pain and problems,» 2025. [En línea]. Available: https://stanfordhealthcare.org/medical-conditions/bones-joints-and-muscles/hand-pain-problems.html.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la Universidad Tecnológica Paso del Norte por el apoyo brindado en el desarrollo del presente trabajo, así como por la facilitación de los recursos materiales y espacios de laboratorio necesarios para la validación experimental del sistema. Este proyecto refleja el compromiso institucional con la innovación tecnológica, la formación integral en ingeniería mecatrónica y la promoción de entornos educativos inclusivos.

FINANCIACIÓN

Ninguna

CONFLICTOS DE INTERÉS

No existen

CONTRIBUCIÓN DE AUTORÍA

Redacción - borrador original: Uriel Reyes Fraire, Ángel Gamaliel Lara Gómez, Gerardo Javier Soto Ulloa, María Cristina

Guevara Neri.

Redacción - revisión y edición: Uriel Reyes Fraire, Ángel Gamaliel Lara Gómez, Gerardo Javier Soto Ulloa, María Cristina Guevara Neri.