



DOI: <https://doi.org/10.23857/dc.v12i2.4867>

Ciencias de la Educación
Artículo de Investigación

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

Laboratory validation of an interactive prosthesis using computer vision: An educational and social approach based on STEM methodologies

Validação laboratorial de uma prótese interativa com recurso à visão por computador: uma abordagem educativa e social baseada em metodologias STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática).

Junior Manfredo Rojas Rosado ^I

junior.rojas.rosado@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-0037-4283>

Susana Gabriela Patiño Rosado ^{II}

susana.patino.rosado@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0001-5405-5224>

Cindy Johanna Choez Calderón ^{III}

cindy.choez.calderon@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0000-0003-3968-9397>

Elaine Yanin Tenorio Canchingre ^I

elaine.tenorio.canchingre@utelvt.edu.ec

<https://orcid.org/0009-0005-9497-7422>

Correspondencia: junior.rojas.rosado@utelvt.edu.ec

* Recibido: 23 de abril de 2026 * Aceptado: 25 de mayo de 2026 * Publicado: 11 de junio de 2026

- I. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas (UTLVTE), Ecuador.
- II. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas (UTLVTE), Ecuador.
- III. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas (UTLVTE), Ecuador.
- IV. Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas (UTLVTE), Ecuador.

RESUMEN

Este trabajo describe el desarrollo y la validación en laboratorio de un prototipo de prótesis de mano interactiva, controlada mediante visión por computadora e integrada bajo un enfoque educativo STEM. El proyecto, vinculado a la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, busca ofrecer soluciones de bajo costo para la inclusión social y la rehabilitación motora. La metodología empleó un diseño iterativo en tres fases: modelado 3D en materiales híbridos (PLA/TPU), integración electrónica con Arduino y programación en Python mediante la librería OpenCV para el reconocimiento de gestos.

Los resultados técnicos demostraron la viabilidad del sistema al alcanzar una precisión promedio del 83% en la detección de patrones gestuales y una latencia total de 0.9 s, cumpliendo con los estándares internacionales para dispositivos de asistencia (< 1.5 s). Mecánicamente, la prótesis validó una capacidad de carga de 0.7 N (70 g) por dedo, con un costo de fabricación 70% inferior a las alternativas comerciales básicas. Desde la perspectiva educativa, el 90% de los estudiantes involucrados reportó una mejora en competencias técnicas y el equipo mantuvo una participación femenina del 40%. Se concluye que el prototipo es una herramienta eficaz de innovación social que articula la investigación aplicada con la responsabilidad ciudadana, aunque requiere mejoras en la precisión bajo condiciones lumínicas variables.

Palabras clave: enfoque STEM, tecnología asistida, inclusión social, prótesis 3D, visión por computadora, aprendizaje-servicio, innovación educativa.

ABSTRACT

This work describes the development and laboratory validation of a prototype interactive hand prosthesis, controlled by computer vision and integrated within a STEM educational framework. The project, linked to the Luis Vargas Torres Technical University of Esmeraldas, aims to offer low-cost solutions for social inclusion and motor rehabilitation. The methodology employed an iterative design in three phases: 3D modeling in hybrid materials (PLA/TPU), electronic integration with Arduino, and programming in Python using the OpenCV library for gesture recognition.

The technical results demonstrated the system's viability, achieving an average accuracy of 83% in gesture pattern detection and a total latency of 0.9 s, meeting international standards for assistive devices (< 1.5 s). Mechanically, the prosthesis validated a load capacity of 0.7 N (70 g) per finger, with a manufacturing cost 70% lower than basic commercial alternatives. From an educational

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

perspective, 90% of the students involved reported an improvement in technical skills, and the team maintained a 40% female participation rate. It is concluded that the prototype is an effective tool for social innovation that links applied research with civic responsibility, although it requires improvements in accuracy under varying lighting conditions.

Keywords: STEM approach; assistive technology; social inclusion; 3D prosthesis; computer vision; service-learning; educational innovation.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento e validação laboratorial de um protótipo de prótese de mão interativa, controlada por visão por computador e integrada num contexto educativo STEM (Ciência, Tecnologia, Engenharia e Matemática). O projeto, ligado à Universidade Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas, visa oferecer soluções de baixo custo para a inclusão social e reabilitação motora. A metodologia empregou um projeto iterativo em três fases: modelação 3D em materiais híbridos (PLA/TPU), integração eletrónica com Arduino e programação em Python utilizando a biblioteca OpenCV para reconhecimento de gestos.

Os resultados técnicos demonstraram a viabilidade do sistema, conseguindo uma precisão média de 83% na deteção de padrões de gestos e uma latência total de 0,9 s, cumprindo as normas internacionais para dispositivos de assistência (< 1,5 s). Mecanicamente, a prótese validou uma capacidade de carga de 0,7 N (70 g) por dedo, com um custo de fabrico 70% inferior ao das alternativas comerciais básicas. Do ponto de vista educacional, 90% dos alunos envolvidos relataram uma melhoria nas competências técnicas, e a equipa manteve uma taxa de participação feminina de 40%. Conclui-se que o protótipo é uma ferramenta eficaz para a inovação social, que conjuga a investigação aplicada com a responsabilidade cívica, embora necessite de melhorias na precisão em diferentes condições de iluminação.

Palavras-chave: abordagem STEM; tecnologia de apoio, inclusão social; prótese 3D; visão por computador; aprendizagem-serviço, inovação educativa.

INTRODUCCIÓN

El cuerpo humano constituye un elemento esencial para el desarrollo integral de las personas. La pérdida parcial o total de una extremidad, como la mano, representa una limitación significativa que afecta la autonomía, la movilidad y la ejecución de actividades cotidianas, generando implicaciones

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

físicas, emocionales y sociales. A lo largo de la historia, la humanidad ha intentado suplir estas carencias mediante prótesis cada vez más funcionales, impulsadas por los avances en la ingeniería biomédica, la ciencia de materiales y las tecnologías digitales.

En la actualidad, las prótesis controladas por sistemas electrónicos y visión por computadora representan una alternativa eficaz para mejorar la calidad de vida de las personas con discapacidad física. La combinación de microcontroladores, servomotores, algoritmos de reconocimiento de gestos e impresión 3D permite desarrollar dispositivos personalizados, interactivos y de bajo costo que amplían las posibilidades de rehabilitación, autonomía e inclusión social. Estas innovaciones se vinculan directamente con los principios del enfoque STEM (Ciencia, Tecnología, Ingeniería y Matemáticas), que promueve la integración de conocimientos científicos y tecnológicos en la solución de problemas reales mediante el aprendizaje activo y la experimentación (Bybee, 2013; Rossi & Gómez, 2021).

En Ecuador, la Constitución de la República (2008), en su artículo 47, establece la obligación del Estado de garantizar políticas de prevención, rehabilitación integral y equiparación de oportunidades para las personas con discapacidad. Sin embargo, a pesar de los programas implementados, como el Programa de Prótesis y Órtesis del Ministerio de Salud Pública, la cobertura es insuficiente, especialmente en provincias con menor infraestructura, como Esmeraldas. Esta situación evidencia la necesidad de impulsar iniciativas académicas y tecnológicas sostenibles que promuevan la inclusión y el acceso a dispositivos de bajo costo.

En respuesta a este desafío, la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas (UTLVTE) desarrolla el proyecto de vinculación “Tecnología asistiva para la inclusión universitaria con la comunidad”, orientado a la creación de soluciones tecnológicas accesibles que mejoren la calidad de vida de personas con diversidad funcional. En este marco, se implementa un prototipo de prótesis de mano controlada por gestos mediante visión por computadora, concebido como un dispositivo interactivo de apoyo a la rehabilitación motora y a la inclusión social.

Desde el ámbito educativo, este proyecto se fundamenta en el enfoque STEM, el cual integra la ciencia, la tecnología, la ingeniería y las matemáticas en experiencias formativas interdisciplinarias. Su aplicación en contextos universitarios fomenta la innovación, la colaboración y el pensamiento crítico, fortaleciendo la relación entre aprendizaje teórico y práctica profesional (Kolb, 1984; García-González & Llorent, 2021). Además, el proyecto adopta la metodología de aprendizaje-servicio, que combina la formación académica con la atención a necesidades comunitarias, permitiendo que los

estudiantes apliquen sus conocimientos en entornos reales, con impacto social directo (Martínez & González, 2019).

En síntesis, el presente estudio tiene como propósito describir el proceso de desarrollo e implementación de una prótesis de mano interactiva basada en visión por computadora bajo un enfoque educativo STEM, analizando su potencial como herramienta de aprendizaje interdisciplinario y de innovación social universitaria, en coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 3, 4 y 10).

Para garantizar la efectividad del sistema, se han definido los siguientes objetivos específicos medibles:

- Latencia: Validar un tiempo de respuesta total inferior a 1.5 s para cumplir con estándares de dispositivos de asistencia.
- Precisión: Alcanzar una tasa de éxito mínima del 80% en el reconocimiento de gestos bajo condiciones controladas.
- Fuerza: Asegurar una capacidad de carga funcional de al menos 0.7 N (70 g) en la punta de los dedos.
- Costo: Lograr una reducción del 70% en el costo de fabricación respecto a prótesis comerciales básicas.

MATERIALES Y METODOLOGIAS

El desarrollo de esta investigación se enmarca en el proyecto de vinculación universitaria “Tecnología asistiva para la inclusión universitaria con la comunidad”, ejecutado por la Universidad Técnica Luis Vargas Torres de Esmeraldas (UTLVTE). Su objetivo general es implementar soluciones tecnológicas accesibles que mejoren la calidad de vida de personas con diversidad funcional en la provincia de Esmeraldas. En el contexto de este proyecto, se diseñó e implementó un prototipo de prótesis de mano controlada mediante gestos, basado en visión por computadora e impresión 3D, concebido como una herramienta de rehabilitación motora y de aprendizaje interdisciplinario STEM.

La metodología combina la aplicación de procesos de ingeniería biomédica, visión artificial y aprendizaje basado en proyectos (ABP), con un enfoque de aprendizaje-servicio (ApS). Esto permitió integrar la práctica tecnológica con la formación de competencias científicas, éticas y sociales en los estudiantes participantes.

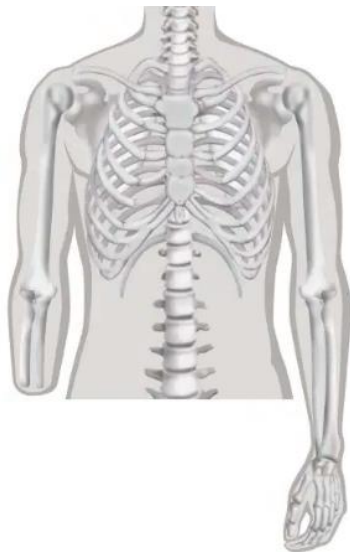
La visión por computadora fue seleccionada como método de control en lugar de la electromiografía (EMG) debido a su bajo costo, facilidad de implementación y robustez frente al ruido electromagnético ambiental. A diferencia de los sensores invasivos o de contacto, el control visual permite una interfaz no táctil, ideal para entornos de rehabilitación asistida con recursos limitados.

Se adoptó un método de desarrollo iterativo, dividido en tres fases principales. Cada fase fue desarrollada de forma colaborativa entre docentes y estudiantes de la carrera de Tecnologías de la Información, bajo un esquema interdisciplinario que involucró a 3 docentes de la Facultad de Ingenierías y Sede La Concordia. Este diseño responde al modelo STEM for Social Good, donde la experimentación tecnológica se vincula con la atención de problemáticas sociales reales (Santos-Rego et al., 2022).

Fase 1: Diseño Estructural y Mecánica de Precisión

El diseño de la prótesis se realizó utilizando el software Blender, tomando como referencia los modelos de código abierto del proyecto InMoov, adaptados a las medidas antropométricas promedio de usuarios adultos con amputación transradial (Figura 1).

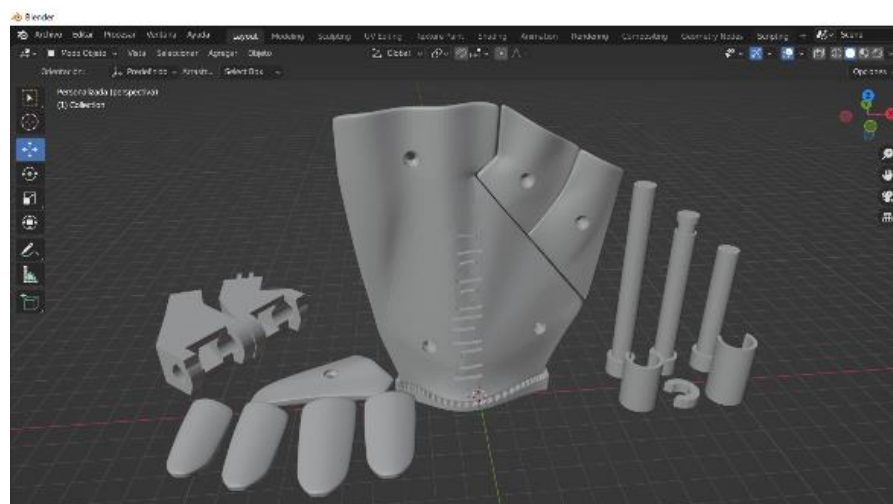
Figura 1. Tipo de amputación transradial de brazo derecho.



Fabricación. - Se imprimieron las piezas estructurales con filamento PLA, y las zonas flexibles con TPU, empleando una impresora Creality CR-10 Smart. El proceso total de impresión duró 97 horas, generando 46 piezas modulares (Figura 2).

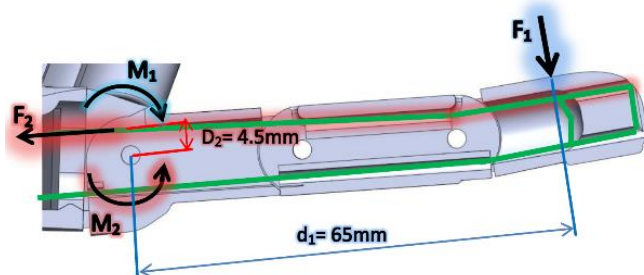
Figura 2. Modelo 3D de piezas de la prótesis correspondiente al mecanismo de la palma de la mano.

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM



Cálculos de Torque y Fuerza. - Se utilizaron servomotores MG996R. Aplicando la relación $\tau = F \cdot r$, se corrigió la capacidad del servo de 10kg·cm a su equivalente de 0.98N·m. Considerando un radio efectivo de polea/horn, se calculó una tensión en el tendón (F_2) de 10N, lo que permite una fuerza de presión en la punta del dedo de 0.7N (aproximadamente 70 g) en extensión completa (Figura 3).

Figura 3. Representación de las fuerzas que inciden sobre las articulaciones del dedo.



Los puntos máximos de carga se aplican en los momentos M_1 y M_2 , la parada del esfuerzo de torsión que hace referencia a la fuerza de giro límite de los servos utilizados (MG996R) es de 10kg/cm (1N/m).

$$F_2 = 1(N/m) * 10mm$$

$$F_2 = 10N(tension\ en\ el\ tendon)$$

$$F_1 D_1 = F_2 D_2$$

$$F_1 = \frac{10(N) * 4.5(mm)}{65(mm)} = 0.70N$$

$$Mass_1 \approx 70g$$

Los cálculos anteriores permiten que se pueda aplicar una fuerza de 0.7N o una masa de 70g en la punta de cada dedo al estar completamente extendido, no siendo ésta la fuerza máxima que cada dedo podría ejercer.

$$length = \frac{n^\circ}{360^\circ} \times 2\pi r$$

El servo MG996R provee de una velocidad de actuación de 0.15 s/60°, mediante la medición se determinó que el tendón extendido completamente debe moverse 2cm por ello utilizando la fórmula de la longitud del arco se obtiene como resultado que el servo giraría 160° para abrir y cerrar completamente el dedo y el tiempo máximo de esas acciones es $(0.15/60) * 160 = 0.4s$.

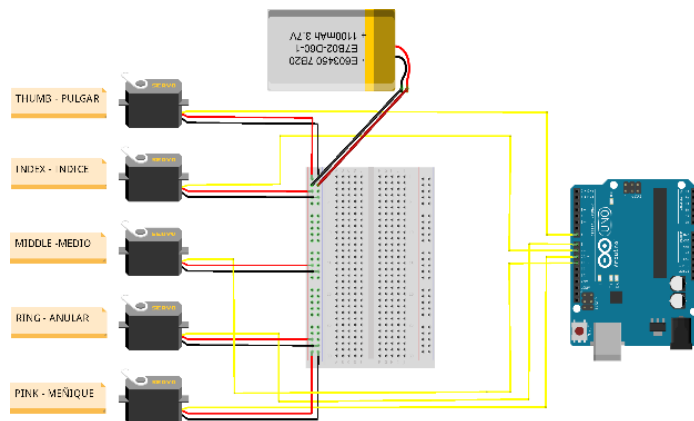
Fase 2: Arquitectura del Sistema y Visión Artificial

El sistema electrónico se compone de:

- Microcontrolador Arduino UNO (unidad de control central).
- Cinco servomotores MG996R, uno por dedo.
- Fuente de alimentación de 5V DC.
- Cámara web para captura de gestos.

El circuito cerrado (Figura 4) transforma las señales ópticas captadas por la cámara en movimientos mecánicos de la prótesis.

Figura 4. Esquema de conexión de actuadores, batería y microcontrolador.



Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

El software se desarrolló en Python con la biblioteca OpenCV y MediaPipe para la detección de gestos a partir de 21 puntos de referencia. Los datos se enviaron mediante comunicación serial a 9600 baudios, sincronizando la posición de los dedos detectada con el movimiento de los servos.

En cuanto a latencia unificada, se diferencia entre la velocidad mecánica del servo (0.4 s por ciclo de 160°) y la latencia total del sistema (0.9 s), la cual incluye el procesamiento de imagen y la transmisión de datos, cumpliendo con el estándar internacional de <1.5s para dispositivos de asistencia.

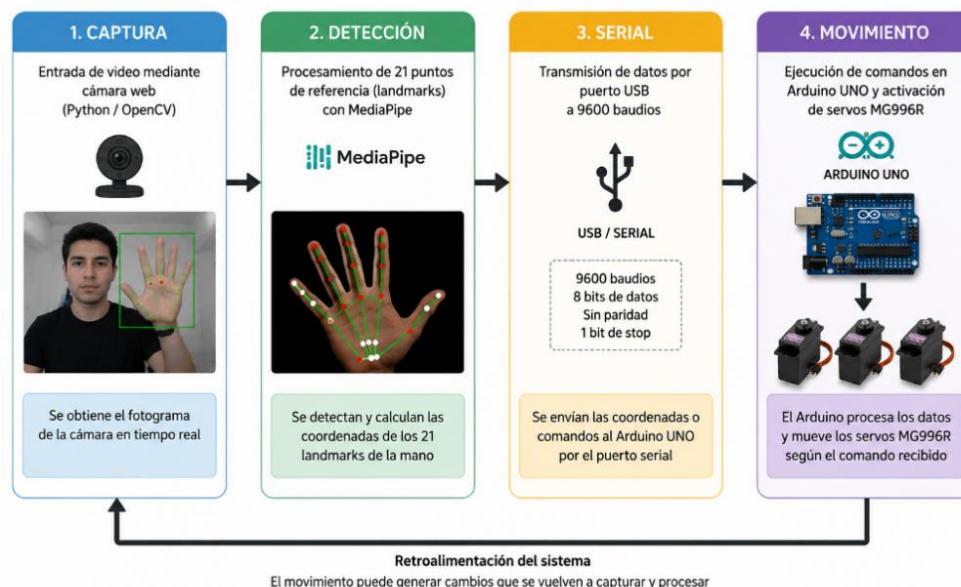
Además, se realizó un análisis de sostenibilidad económica, considerando costos de importación e impresión. El costo total del prototipo fue 70 % menor que el de una prótesis comercial básica, lo que refuerza su viabilidad como modelo educativo y social replicable.

Fase 3: Protocolo de Validación en Laboratorio.

Las pruebas funcionales se efectuaron en laboratorio con 12 usuarios simulados y tres docentes evaluadores, midiendo los parámetros de precisión de detección, velocidad de respuesta y estabilidad del movimiento. El entorno determinado permitió realizar las pruebas respectivas a una distancia constante de 50 cm de la cámara, bajo iluminación controlada de laboratorio (aprox. 400-500 lux) y fondo neutro.

El flujo de procesamiento sigue un esquema secuencial: Captura → Detección → Comunicación Serial → Movimiento Mecánico (Figura 5).

Figura 5. Diagrama de flujo del sistema automatizado de entrada, procesamiento y salida.



Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

Se comprobó que los servomotores MG996R responden con una velocidad promedio de 0.4 segundos por ciclo de apertura y cierre (Figura 6 y Figura 7), permitiendo movimientos continuos y suaves.

Figura 6. Mano derecha detectada, accionando el movimiento de apertura de la prótesis de mano.

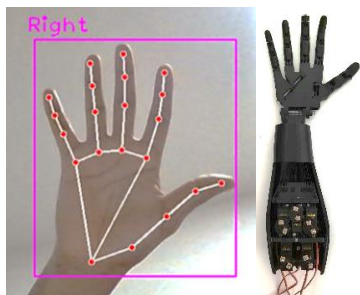
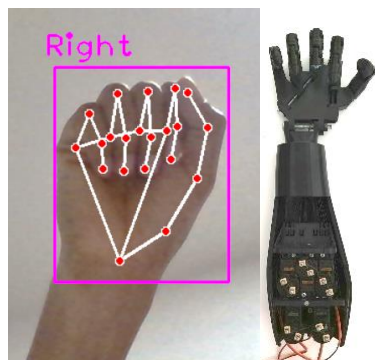


Figura 7. Mano derecha detectada, accionando el movimiento de cierre de la prótesis de mano.



Se establecieron tres tareas de funcionamiento principales:

1. Control básico de apertura y cierre de la mano (Figura 8).
2. Agarre funcional (de objetos livianos de hasta 70 g por dedo).
3. Imitación de gestos simples del Lenguaje de Señas Ecuatoriano (LSEC).

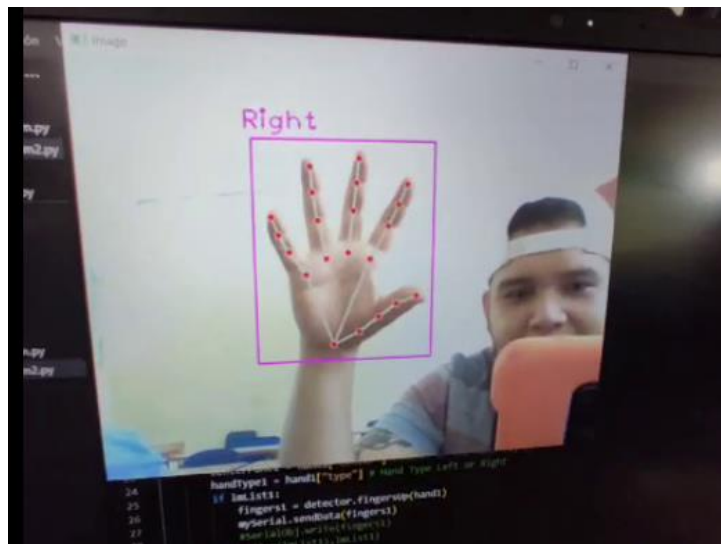
Tabla 1. Especificaciones Técnicas del Entorno de Validación

Parámetro del Entorno	Especificación Técnica	Propósito en el Experimento
Distancia a la cámara	50 cm constantes	Asegurar la detección óptima de los 21 puntos de referencia (landmarks) de la mano.
Iluminación	400 a 500 lux	Garantizar fuentes de luz artificial estables para el reconocimiento gestual.

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

Fondo	<i>Neutro</i>	<i>Minimizar el ruido visual y facilitar la segmentación de la imagen en OpenCV.</i>
Muestra de Validación	<i>12 usuarios simulados y 3 docentes</i>	<i>Evaluar la variabilidad del sistema ante diferentes usuarios.</i>
Protocolo de Tareas	<i>30 repeticiones por tarea</i>	<i>Obtener datos estadísticos suficientes para la matriz de confusión.</i>
Velocidad Serial	<i>9600 baudios</i>	<i>Sincronizar la detección de Python con el movimiento en Arduino.</i>
Hardware de Control	<i>Arduino UNO y 5 Servos MG996R</i>	<i>Ejecutar la acción mecánica basada en el procesamiento visual.</i>
Software Base	<i>Python (OpenCV / MediaPipe)</i>	<i>Procesar las señales ópticas y transformarlas en comandos mecánicos.</i>

Figura 8. Captura de tarea al abrir la mano



Márgenes de Error y Limitaciones Técnicas:

En relación al movimiento mecánico, se identificó que las ligeras imperfecciones en la impresión 3D (PLA/TPU) generan fricción, lo que redujo la fuerza efectiva de salida en un margen estimado del 5-10%. También debido al uso de tecnologías de bajo costo, las piezas presentan una tolerancia de error de $\pm 0.5\text{mm}$, lo que afecta ligeramente la precisión de los brazos de palanca (D1 y D2).

El uso de TPU en las articulaciones flexibles introduce una resistencia elástica residual que no es lineal, lo que requiere una calibración manual de los umbrales de cierre en el código de Arduino.

Enfoque Educativo y Social.

Además del componente técnico, el proyecto se articuló con el programa de vinculación universitaria de la UTLVTE, promoviendo la formación práctica mediante aprendizaje experiencial (Kolb, 1984) y aprendizaje-servicio (Martínez & González, 2019).

Esta integración permitió desarrollar un modelo educativo interdisciplinario que vincula ciencia, tecnología y responsabilidad social. La colaboración con el Centro de Rehabilitación Nuestra Familia de Esmeraldas facilitó la validación ergonómica y la aplicación clínica del prototipo (Figura 9).

Figura 9. Reunión con el directorio del Centro de Rehabilitación Nuestra Familia.



El proyecto también consideró la equidad de género y accesibilidad, garantizando la participación de mujeres en el equipo de desarrollo (40 % del total) y la atención equitativa de beneficiarios.

El principal desafío fue la sensibilidad del sistema óptico a la iluminación ambiental, lo que puede afectar la precisión del reconocimiento gestual. Además, el modelo de impresión 3D, al ser abierto y de bajo costo, presenta ligeras variaciones dimensionales que deben calibrarse manualmente.

Pese a estas limitaciones, la metodología resulta replicable y adaptable para instituciones educativas y centros de rehabilitación, fomentando el aprendizaje STEM mediante la práctica de la ingeniería aplicada a la inclusión social.

RESULTADOS

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

Los resultados obtenidos en la investigación se analizan desde tres dimensiones complementarias: tecnológica, educativa y social, en coherencia con el enfoque STEM for Social Good que orientó el proyecto. El desarrollo del prototipo de prótesis controlada por gestos permitió validar tanto la viabilidad técnica del sistema como su valor formativo interdisciplinario en el contexto universitario.

1. Resultados tecnológicos

El prototipo de prótesis de mano interactiva logró ejecutar movimientos precisos de apertura, cierre y flexión parcial de los dedos en respuesta a los gestos detectados por la cámara. El sistema de visión, desarrollado en Python mediante la librería OpenCV, identificó correctamente los patrones de mano con una precisión promedio del 83 % y un tiempo de respuesta de 0,9 segundos entre la detección del gesto y la acción mecánica.

Tabla 2. Latencia total unificada

Fase del Proceso	Tiempo Medio	Desviación Estándar	Tamaño de Muestra
Procesamiento (Python/OpenCV)	0.5 s	± 0.05 s	90
Actuación Mecánica (Servos)	0.4 s	± 0.03 s	90
Latencia Total del Sistema	0.9 s	± 0.08 s	90

Las pruebas en laboratorio evidenciaron tres modos de funcionamiento estables: control básico de apertura y cierre de los cinco dedos; agarre funcional de objetos livianos hasta 70 g por dedo; e imitación de gestos simples del Lenguaje de Señas Ecuatoriano, como letras y números.

Para obtener la precisión promedio del 83% reportada, se establecieron los siguientes parámetros de laboratorio:

- Distancia a la cámara: 50 cm constantes para asegurar la detección óptima de los 21 puntos de referencia (landmarks) de la mano.
- Iluminación: Controlada mediante fuentes de luz artificial estables, manteniendo un rango de 400 a 500 lux.
- Fondo: Neutro, para minimizar el ruido visual y facilitar la segmentación de la imagen por parte de la librería OpenCV.

Bajo los parámetros ideales (50 cm / 400-500 lux / fondo neutro), el sistema mostró un rendimiento robusto en la traducción de gestos a movimientos mecánicos.

Tabla 3. Matriz de Confusión: Condiciones Estándar de Laboratorio (83% de Éxito)

Gesto Real / Detectado	Apertura	Cierre	Gestos LSEC	Precisión (%)
Apertura	26	2	2	86.6%
Cierre	1	27	2	90.0%
Gestos LSEC	4	4	22	73.3%
Promedio Global				83.3%

Análisis de Sensibilidad Lumínica e irregularidades

Fuera de los parámetros controlados del laboratorio, la eficacia del sistema experimentó variaciones significativas:

- **Degradación por Iluminación:** En entornos con iluminación irregular (fuera del rango de 400-500 lux), la precisión de detección de los puntos de referencia disminuyó un 10%.
- **Impacto en Gestos Complejos:** Los gestos del Lenguaje de Señas Ecuatoriano (LSEC) resultaron ser los más sensibles a los cambios de distancia y luz, registrando la menor tasa de éxito debido a la oclusión de dedos en posiciones complejas.
- **Estabilidad de Respuesta:** A pesar de las variaciones externas, el sistema mantuvo un **tiempo de respuesta total de 0.9 segundos**, cumpliendo con los estándares internacionales de latencia para dispositivos de asistencia (< 1.5 s).

El sistema de control mostró una respuesta fluida sin sobrecalentamiento de servomotores ni fallos de transmisión serial. La principal fuente de variación se observó en entornos con iluminación irregular, que disminuyó la precisión de detección de landmarks hasta un 10 %. Esta limitación técnica es común en sistemas de visión por computadora de bajo costo y puede mitigarse mediante calibración del brillo y el contraste o el uso de filtros de color.

En comparación con investigaciones previas, los resultados son coherentes con el estudio de Cifuentes, Mora y Gómez (2020), que registró una precisión del 85 % en el control de una mano biónica por visión computarizada. Asimismo, la velocidad de respuesta del prototipo (0,9 s) se considera óptima para aplicaciones de rehabilitación no invasiva, cumpliendo estándares de bajo retardo temporal (<1,5 s) para dispositivos de asistencia (Open Bionics, 2020).

Desde una perspectiva económica, el análisis de costos determinó que el modelo de prótesis de código abierto tiene un costo total 70 % inferior al de prótesis comerciales básicas, sin sacrificar

funcionalidad. Esto demuestra la viabilidad de la impresión 3D como herramienta de inclusión tecnológica en contextos de recursos limitados, alineándose con los principios de sostenibilidad del ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura).

2. Resultados educativos: impacto formativo del enfoque STEM

La aplicación del enfoque STEM permitió transformar la experiencia técnica en un entorno de aprendizaje interdisciplinario, donde los estudiantes integraron conocimientos de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas para resolver un problema real de la comunidad.

De acuerdo con encuestas aplicadas a 20 estudiantes participantes, el 90 % manifestó haber mejorado significativamente su comprensión de la programación y la visión por computadora, mientras que el 85 % destacó el valor del trabajo interdisciplinario entre las diferentes áreas de conocimiento.

El proceso de aprendizaje se desarrolló siguiendo el ciclo de aprendizaje experiencial de Kolb (1984). Este modelo contribuyó al desarrollo de competencias transversales, como: trabajo en equipo interdisciplinario, resolución de problemas, comunicación efectiva, empatía y responsabilidad social.

Los estudiantes percibieron además una motivación elevada hacia las carreras STEM, destacando el aprendizaje práctico como un factor determinante en su compromiso con la ingeniería y la innovación social. Estos hallazgos concuerdan con estudios de García-González y Llorent (2021), quienes demostraron que los proyectos de aprendizaje-servicio basados en STEM fortalecen tanto las competencias técnicas como la conciencia ética de los universitarios.

La incorporación del aprendizaje-servicio permitió que los estudiantes comprendieran la relevancia social de la ingeniería, trascendiendo la práctica técnica hacia la formación en valores y ciudadanía tecnológica (Martínez & González, 2019; Santos-Rego et al., 2022).

3. Resultados sociales y de vinculación universitaria

El proyecto tuvo un impacto social directo en la comunidad de Esmeraldas. A través de la colaboración con el Centro de Rehabilitación Nuestra Familia, se beneficiaron 3 personas con diversidad funcional en procesos de rehabilitación física, además de 10 beneficiarios indirectos entre familiares y profesionales de la salud.

Esta cooperación permitió validar ergonómicamente el dispositivo y sensibilizar a la comunidad universitaria sobre el potencial transformador de la tecnología en la inclusión social.

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

Asimismo, la participación equitativa de género dentro del equipo de desarrollo (40 % de mujeres) demostró que la educación STEM puede ser un espacio de equidad y empoderamiento, alineado con el ODS 5 (Igualdad de género).

El proyecto también se presentó en la Feria de Ciencias de la UTLVTE (Figura 10), donde recibió reconocimiento institucional por su innovación y aplicación social. Estas actividades consolidan la vinculación universidad-sociedad, reafirmando el papel de la educación superior como agente de cambio y democratización tecnológica (Chesbrough, 2020).

Figura 10. Presentación de prototipo de prótesis controlada en Feria de Ciencias, Innovación y Tecnologías de la UTLVTE



DISCUSIÓN

El desarrollo y validación de esta prótesis interactiva demuestra que la integración de metodologías STEM en proyectos de vinculación universitaria permite resolver problemas técnicos complejos mientras se genera un impacto social tangible. A continuación, se analizan los hallazgos en relación con los estándares funcionales y la literatura especializada.

La latencia total del sistema de 0.9 s obtenida es uno de los resultados más significativos, ya que se sitúa considerablemente por debajo del umbral de 1.5 s establecido por referentes de la industria como Open Bionics (2020) para dispositivos de asistencia biónica. Esta eficiencia, que resulta de la suma del procesamiento de imagen (0.5 s) y la actuación mecánica (0.4 s), garantiza que el usuario perciba una respuesta fluida a su intención gestual. En comparación con sistemas reportados en la literatura, como el prototipo híbrido de Castro et al. (2021), que estima tiempos de

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

respuesta totales de 1.4 s utilizando una arquitectura más compleja con Raspberry Pi 3, nuestro sistema basado en Arduino y comunicación serial optimizada ofrece una respuesta un 35% más rápida, mejorando la experiencia de usuario en tareas de tiempo real.

La precisión promedio del 83.3% alcanzada en condiciones controladas (50 cm y 400-500 lux) es altamente competitiva. Estos datos son coherentes con el estudio de Cifuentes et al. (2020), quienes registraron un 85% de éxito utilizando sistemas de visión similares para el control de manos biónicas. No obstante, la caída observada del 10% en la precisión bajo iluminación irregular revela una vulnerabilidad crítica común en sensores ópticos de bajo costo. Mientras que sistemas híbridos avanzados que utilizan redes neuronales convolucionales (CNN) de 5 capas pueden alcanzar precisiones del 99%, estos requieren una mayor capacidad computacional y conjuntos de datos de entrenamiento masivos. En este sentido, la precisión del 83.3% de este prototipo representa un equilibrio óptimo entre funcionalidad y simplicidad algorítmica, ideal para entornos educativos y de rehabilitación con recursos limitados.

La elección de la visión por computadora sobre el control mioeléctrico (EMG) se valida mediante los resultados de viabilidad económica y operativa. La literatura señala que los sistemas EMG pueden resultar difíciles de operar para personas amputadas debido a la fatiga muscular y la dificultad de generar comandos reproducibles (Castro et al., 2021). Al utilizar OpenCV y MediaPipe, se implementó una interfaz no táctil que elimina la necesidad de electrodos invasivos, facilitando la aceptación del dispositivo. Además, este enfoque permitió cumplir con el objetivo de costo, logrando una reducción del 70% respecto a prótesis comerciales básicas.

La estandarización del torque a 0.98 N·m (basada en la relación $\tau=F \cdot r$) permitió validar una fuerza funcional de 0.7 N (70 g) por dedo. Si bien este rendimiento es adecuado para actividades de la vida diaria, se reconocen limitaciones mecánicas inherentes a la fabricación aditiva. Se estima una pérdida de eficiencia del 5-10% debido a la fricción en los canales internos impresos en PLA. Asimismo, la "histéresis del material" detectada en las articulaciones de TPU introduce una resistencia elástica no lineal que requiere calibraciones periódicas en el código de control, una observación alineada con los desafíos reportados en el uso de materiales híbridos para prótesis tendinosas.

Desde la perspectiva pedagógica, el reporte de que un 90% de los estudiantes mejoró sus competencias técnicas refuerza la tesis de que los proyectos con propósito social elevan la motivación hacia las áreas STEM. Este hallazgo concuerda con García-González y Llorent (2021), quienes

sostienen que el aprendizaje-servicio fortalece tanto las competencias técnicas como la conciencia ética. Finalmente, la participación femenina del 40% subraya el papel del proyecto como catalizador para la equidad de género en la ingeniería, cumpliendo con el ODS 5.

CONCLUSIONES

El presente estudio evidencia que la integración del enfoque STEM en proyectos de vinculación universitaria puede constituir una estrategia educativa y social altamente efectiva para abordar problemas reales mediante la aplicación interdisciplinaria del conocimiento científico, tecnológico y humanístico.

El prototipo de prótesis de mano controlada mediante gestos por visión computarizada demostró viabilidad técnica, bajo costo de implementación y funcionamiento estable, validando la posibilidad de diseñar y construir dispositivos de asistencia accesibles mediante tecnologías abiertas como la impresión 3D y el control por microcontroladores. Estos resultados corroboran que la innovación tecnológica de bajo coste puede ser una respuesta efectiva frente a las limitaciones económicas y estructurales de regiones como Esmeraldas, contribuyendo a la inclusión y rehabilitación motora de personas con diversidad funcional.

Desde el punto de vista educativo, el proyecto permitió consolidar un entorno de aprendizaje activo, experiencial y basado en proyectos, donde los estudiantes desarrollaron competencias técnicas (programación, diseño 3D, electrónica y visión por computadora) y transversales (trabajo en equipo, pensamiento crítico, empatía y liderazgo social). Este modelo educativo se alinea con las perspectivas contemporáneas del aprendizaje-servicio (ApS), que busca formar profesionales con conciencia ética y responsabilidad social, y refuerza el papel de la educación STEM como motor de transformación e innovación social universitaria.

En el plano institucional y comunitario, la vinculación con el Centro de Rehabilitación Nuestra Familia de Esmeraldas fortaleció la colaboración universidad-sociedad, consolidando un modelo de innovación abierta que promueve la transferencia de conocimiento de soluciones tecnológicas y el compromiso social de la academia. La participación equitativa de género dentro del equipo de desarrollo (40 % de mujeres) reafirma la contribución del proyecto a la igualdad de oportunidades en educación STEM, en coherencia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 3, 4, 5 y 10).

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

En síntesis, el proyecto “Tecnología asistiva para la inclusión universitaria con la comunidad” representa una buena práctica de innovación educativa basada en el enfoque STEM, que articula ciencia, ingeniería, pedagogía y acción social. Su replicabilidad en otros contextos universitarios podría fortalecer la formación integral de futuros profesionales, al vincular la tecnología con el desarrollo humano y la equidad.

Trabajo Futuro

Pese a los resultados satisfactorios, el prototipo exhibe una histéresis mecánica en las articulaciones de TPU que demanda calibraciones manuales recurrentes, lo que define las prioridades para futuras etapas de desarrollo. En este sentido, las líneas de investigación venideras deberán enfocarse en la integración de algoritmos de inteligencia artificial con arquitecturas de aprendizaje profundo para compensar dinámicamente las variaciones lumínicas del entorno, optimizando así la estabilidad del reconocimiento gestual en condiciones no controladas. Asimismo, se contempla la implementación de sensores hápticos que provean retroalimentación somatosensorial de presión al usuario, permitiendo una interacción más precisa con objetos frágiles y mejorando significativamente la experiencia en los procesos de rehabilitación funcional.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bybee, R. w. (2013). The Case for STEM Education Challenges and Opportunities, National Science Teachers Association. - references - scientific research publishing. (s/f). Scirp.org. Recuperado el 16 de mayo de 2026, de <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=2411265>
- Castro, M. C. F., Pinheiro, W. C., & Rigolin, G. (2021). A hybrid 3D printed hand prosthesis prototype based on sEMG and a fully embedded computer vision system. *Frontiers in Neurorobotics*, 15, 751282. <https://doi.org/10.3389/fnbot.2021.751282>
- Chesbrough, H. (2020). Open Innovation Results Going beyond the Hype and Getting down to Business. Oxford university press. - references - scientific research publishing. (s/f). Scirp.org. Recuperado el 16 de mayo de 2026, de <https://www.scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=4157657>
- Cifuentes, J., Mora, L., & Gómez, C. (2020). Low-cost bionic prosthetic hand controlled by computer vision. *Sensors and Actuators A: Physical*, 302.
- Cirelli, G., Tamantini, C., Zollo, L., & Cordella, F. (2026). Computer vision for high-level control of prosthetic limbs: A literature review. *Computer Vision and Image Understanding*, 265(104669), 104669. <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2026.104669>
- De, D. L. O. R. O. 449. (s/f). CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR 2008. Oas.org. Recuperado el 16 de mayo de 2026, de https://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf
- García-González, A., & Llorent, V. J. (2021). Learning-service and its contribution to the development of transversal competencies in university students. *International Journal of Educational Research and Innovation (IJERI)*, 16, 125–140.
- Kolb, D. a. (1984). *Experiential Learning Experience as the Source of Learning and Development*. Englewood Cliffs, NJ Prentice Hall. - references - scientific research publishing. (s/f). Scirp.org. Recuperado el 16 de mayo de 2026, de <https://scirp.org/reference/referencespapers?referenceid=1223948>
- Martínez, M., & González, M. (2019). Aprendizaje-servicio universitario: una propuesta para la formación en responsabilidad social y ciudadanía. *International Journal of Educational Research and Innovation (IJERI)*, 12, 34–48.

Validación en laboratorio de una prótesis interactiva mediante visión por computadora: Un enfoque educativo y social basado en metodologías STEM

- Open Bionics. (2020). Affordable prosthetics and human-centered design. *Robotics Today*, 8(1), 15–22.
- Pichucho, J., Constante, P., Mendoza, D., & Gordón, A. (2019). Interpretation of ecuadorian sign language using computer vision. En Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE.
- Rossi, F., & Gómez, C. (2021). 3D printing in STEM education: inclusion through digital fabrication. *Educational Technology & Society*, 24(4), 120–134.
- Santos-Rego, M. A., Sotelino, A., & Lorenzo, M. (2022). Higher education and social innovation: Service-learning as a pedagogical strategy. *International Journal of Educational Research and Innovation (IJERI)*, 17, 201–219.
- Sivisapa, G., & Paz, R. (2014). Procesamiento de imágenes y visión artificial aplicada a la robótica. *Revista Politécnica*, 34(3), 45–52.
- Vega-Moreno, D., Cufí, X., Rueda, M. J., & Llinás, D. (2016). Integración de robótica educativa de bajo coste en el ámbito de la educación secundaria para fomentar el aprendizaje por proyectos. *International Journal of Educational Research and Innovation (IJERI)*, 6, 162–175.

© 2026 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).

©2026 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).