

Robot humanoide bípedo de bajo costo para educación temprana en áreas rurales de México: proyecto ROBUT-ING

Daniel Alejandro Ramos Valdez¹, Erick Díaz¹, Jesús P. Campa Martínez^{2,*} y Carlos Hernán Cortez López^{2,1}

¹ Universidad Tamaulipeca, Facultad de Ingeniería, Reynosa, Tamaulipas, México
danielramse2006@gmail.com, erickdiaz060977@gmail.com

² Universidad Tamaulipeca, Cuerpo Académico de Robótica Aplicada, Reynosa, Tamaulipas, México.

* pedro.campa@universidadtamaulipeca.edu.mx, hernanc176@gmail.com

Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo y la evaluación funcional de ROBUT-ING, un robot humanoide bípedo de bajo costo diseñado como herramienta introductoria de robótica para estudiantes de secundaria en zonas con infraestructura tecnológica limitada. Se construyeron tres prototipos de aproximadamente 40 cm de altura, cada uno con 19 servomotores, una garra funcional, un sensor ultrasónico, una pantalla LCD, reproducción de audio, control mediante una interfaz web local y transmisión de video con una ESP32-CAM independiente. Dieciséis actuadores son controlados por un PCA9685 y los tres restantes mediante salidas directas del ESP32. El robot genera su propia red inalámbrica, por lo que puede operar sin conexión a internet. La evaluación técnica incluyó veinte ejecuciones de movimientos de alta demanda: doce desplazamientos asistidos y ocho agachamientos. Se completaron satisfactoriamente quince ejecuciones y se registraron cinco interrupciones eléctricas, equivalentes a una tasa inicial de éxito del 75 %. Las interrupciones motivaron la sustitución de baterías de 2000 mAh por dos baterías de 3.7 V y 5000 mAh conectadas en serie, con regulación a 5 V mediante un XL4015. La autonomía funcional observada fue de aproximadamente 90 minutos. En interiores, la red mantuvo comunicación dentro de un intervalo aproximado de 20 a 50 m y permitió conectar seis dispositivos. La aplicación educativa se desarrolló durante cuatro meses con 120 estudiantes de secundaria. En la evaluación posterior, el 85 % alcanzó una calificación igual o superior al 70 %. Debido a la ausencia de una evaluación inicial, este resultado se interpreta como nivel de logro y no como incremento del aprendizaje. Los resultados muestran la viabilidad funcional del prototipo como recurso demostrativo, aunque se identificaron limitaciones eléctricas, mecánicas y metodológicas que deberán atenderse en evaluaciones posteriores.

Palabras clave— Áreas rurales, control local, educación temprana, robot humanoide, robótica educativa.

Low-cost bipedal humanoid robot for early education in rural areas of Mexico: ROBUT-ING project

Abstract

This paper presents the development and functional evaluation of ROBUT-ING, a low-cost bipedal humanoid robot designed as an introductory robotics tool for secondary-school students in areas with limited technological infrastructure. Three prototypes, approximately 40 cm tall, were constructed. Each unit integrates 19 servomotors, a functional gripper, an ultrasonic sensor, an LCD, audio playback, a local web-based control interface, and video transmission through an independent ESP32-CAM. Sixteen actuators are controlled by a PCA9685 module, while the remaining three are connected directly to the ESP32 outputs. The robot generates its own wireless network and can therefore operate without an internet connection. Technical evaluation comprised twenty executions of high-demand movements: twelve assisted displacement tests and eight squatting tests. Fifteen executions were completed, while five electrical interruptions were recorded, resulting in an initial success rate of 75%. These events led to the replacement of the original 2000 mAh batteries with two 3.7 V, 5000 mAh batteries connected in series and regulated to 5 V using an XL4015 converter. The observed functional autonomy was approximately 90 minutes. Indoors, the local network remained operational within an approximate range of 20 to 50 m and supported six connected devices. The educational application lasted four months and involved 120 secondary-school students. In the post-activity assessment, 85% of the participants achieved a score of at least 70%. Since no pre-assessment was conducted, this percentage is interpreted as an achievement level rather than a learning improvement. The results indicate that the platform is functionally viable as a demonstrative educational resource, while also revealing electrical, mechanical, and methodological limitations that should be addressed in future evaluations.

Keywords— Early education, educational robotics, humanoid robot, local control, rural areas.

I. INTRODUCCIÓN

A. Contexto Educativo y Tecnológico

La incorporación de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas en la educación básica permite que los estudiantes desarrollen habilidades relacionadas con el pensamiento lógico, la solución de problemas, la

programación y el análisis de sistemas. La robótica educativa facilita la relación de estos conocimientos con sistemas físicos compuestos por sensores, microcontroladores, actuadores y mecanismos.

Aunque la robótica educativa puede favorecer el desempeño y las actitudes hacia el aprendizaje STEM, sus resultados

dependen del diseño de las actividades, la duración de la intervención, el contexto educativo y los instrumentos de evaluación [1]. Por ello, su impacto debe analizarse mediante procedimientos claramente definidos y no únicamente a partir de la incorporación de un robot en el aula.

B. Brecha Tecnológica y Contexto Rural

Los planteles ubicados en comunidades con infraestructura tecnológica limitada enfrentan dificultades para implementar plataformas comerciales de robótica debido a restricciones presupuestarias, conectividad inestable, disponibilidad reducida de equipos de cómputo y dependencia de licencias o servicios externos [2], [3].

En zonas rurales del municipio de Río Bravo, Tamaulipas, estas condiciones limitan el contacto de estudiantes de secundaria con la programación, la electrónica y la robótica. En este trabajo, el término educación temprana se refiere a la introducción de estos conceptos antes del ingreso a la educación superior y no a la educación preescolar.

C. Estado del Arte

Las plataformas de robótica educativa presentan distintos niveles de complejidad. Algunas, como Otto DIY [4], están orientadas a la programación introductoria y utilizan una cantidad reducida de actuadores, mientras que plataformas como Poppy Humanoid [5], ROBOTIS OP3 [6] y NAO6 [7] incorporan arquitecturas especializadas, mayor capacidad de procesamiento y múltiples sensores. En la Tabla I se comparan sus principales características con ROBUT-ING.

TABLA I
COMPARACIÓN ENTRE PLATAFORMAS DE ROBÓTICA EDUCATIVA

Plataforma	Arquitectura	GDL / articulación	Funciones principales	Diferencia respecto a ROBUT-ING
Otto DIY [4]	Arduino y diseño abierto	4 actuadores	Caminar, bailar, evitar obstáculos y programación introductoria	Menor complejidad mecánica
Poppy Humanoid [5]	Actuadores inteligentes y estructura modular	25 GDL	Educación, desarrollo e investigación	Mayor especialización de hardware
ROBOTIS OP3 [6]	Intel NUC, OpenCR, cámara e IMU	20 GDL	Marcha, percepción y algoritmos avanzados	Mayor capacidad de cómputo y costo
NAO6 [7]	Computadora, sensores y actuadores integrados	25 GDL	Interacción, educación e investigación	Plataforma comercial avanzada
ROBUT-ING	ESP32, PCA9685 y GPIO	19 GDL actuados	Control web, movimientos, garra, audio y video local	Arquitectura simplificada y sin internet

La comparación muestra una brecha entre los robots educativos básicos, que poseen pocas articulaciones, y los humanoides avanzados, que requieren actuadores, sensores y unidades de procesamiento especializadas. ROBUT-ING busca ocupar una posición intermedia mediante componentes disponibles comercialmente, control web local y funcionamiento sin conexión a internet.

D. Aportación del Proyecto

ROBUT-ING es un robot humanoide bípedo de aproximadamente 40 cm de altura, equipado con 19 GDL

actuados, una garra funcional, control web local y transmisión de video. Su aportación consiste en integrar actuación mecánica, sensores, manipulación y comunicación inalámbrica en una arquitectura basada en componentes disponibles comercialmente y capaz de operar sin conexión a internet.

A diferencia de plataformas humanoides avanzadas como NAO, ROBOTIS OP3 y Poppy, ROBUT-ING está orientado a actividades demostrativas de robótica con estudiantes de secundaria. El prototipo permite observar de manera práctica la relación entre la entrada de un sensor, el procesamiento del microcontrolador, la transmisión de comandos y la respuesta de los actuadores.

E. Objetivo

El objetivo de este trabajo es desarrollar y caracterizar funcionalmente tres prototipos del robot humanoide bípedo ROBUT-ING, cada uno con 19 GDL actuados, control web mediante una red local sin conexión a internet y transmisión de video, así como evaluar la ejecución de sus movimientos, conectividad, autonomía energética y uso exploratorio como herramienta de robótica educativa con estudiantes de secundaria de zonas rurales de Río Bravo, Tamaulipas.

II. MATERIALES Y MÉTODOS

A. Diseño General del Estudio

El estudio se desarrolló en tres etapas: construcción e integración de tres prototipos ROBUT-ING con arquitectura equivalente, evaluación técnica en un ambiente controlado y aplicación educativa exploratoria con estudiantes de secundaria. La evaluación técnica consideró la ejecución de movimientos, el sistema de alimentación, la autonomía, la conectividad, la conexión simultánea de dispositivos, la operación de la garra y la transmisión de video.

B. Estructura Mecánica y Grados de Libertad

La estructura principal se basó en un kit metálico para robot humanoide bípedo de 17 grados de libertad, al cual se añadieron mecanismos de orientación y manipulación hasta alcanzar un total de 19 GDL actuados. El prototipo tiene una altura aproximada de 40 cm e integra una garra funcional. La distribución física de las articulaciones y los canales de control se muestra en la Fig. 1.

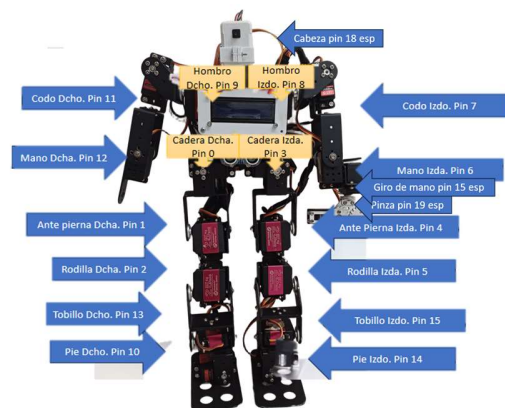


Fig. 1. Distribución física de las articulaciones y canales de control del prototipo ROBUT-ING.

En este trabajo, un grado de libertad (GDL) se define como un eje de rotación actuado capaz de recibir una posición

angular independiente. Los movimientos implementados incluyen saludo, agachamiento, retorno a la posición inicial, orientación de la cabeza, manipulación mediante la garra y desplazamiento asistido.

El desplazamiento se denomina asistido debido a que el prototipo requiere apoyo durante su ejecución y no fue evaluado mediante un modelo de estabilidad dinámica. La distribución de los actuadores, canales de control y articulaciones se presenta en la Tabla II.

TABLA II
DISTRIBUCIÓN DE LOS 19 ACTUADORES Y ARTICULACIONES DE ROBUT-ING

N.º	Controlador	Articulación	Lado	Función principal
1	PCA9685	Cadera	Derecha	Movimiento de la articulación de la cadera
2	PCA9685	Muslo o antepierna	Derecha	Movimiento frontal de la pierna
3	PCA9685	Rodilla	Derecha	Flexión y extensión de la rodilla
4	PCA9685	Cadera	Izquierda	Movimiento de la articulación de la cadera
5	PCA9685	Muslo o antepierna	Izquierda	Movimiento frontal de la pierna
6	PCA9685	Rodilla	Izquierda	Flexión y extensión de la rodilla
7	PCA9685	Mano o muñeca	Izquierda	Orientación del extremo del brazo
8	PCA9685	Codo	Izquierda	Flexión y extensión del brazo
9	PCA9685	Hombro	Izquierda	Elevación y descenso del brazo
10	PCA9685	Hombro	Derecha	Elevación y descenso del brazo
11	PCA9685	Pie	Derecho	Inclinación y apoyo del pie
12	PCA9685	Codo	Derecho	Flexión y extensión del brazo
13	PCA9685	Mano o muñeca	Derecha	Orientación del extremo del brazo
14	PCA9685	Tobillo	Derecho	Ajuste angular y apoyo
15	PCA9685	Pie	Izquierdo	Inclinación y apoyo del pie
16	PCA9685	Tobillo	Izquierdo	Ajuste angular y apoyo
17	ESP32	Cabeza y cámara	Central	Orientación horizontal de la cabeza
18	ESP32	Pinza de la garra	—	Apertura y cierre de la garra
19	ESP32	Giro de la garra	—	Rotación de la garra

C. Arquitectura Electrónica

Cada prototipo utilizó una placa ESP32-DevKitC-32 con módulo ESP-WROOM-32 como controlador principal [8]. El microcontrolador generó la red inalámbrica local, alojó la interfaz web, atendió las solicitudes HTTP, coordinó las secuencias de movimiento y administró la comunicación con los periféricos.

Dieciséis servomotores fueron controlados mediante un módulo PCA9685, conectado al ESP32 mediante el protocolo I²C y configurado a una frecuencia de 50 Hz [9]. Debido al límite de 16 canales del PCA9685, los tres actuadores restantes se conectaron directamente al microcontrolador: el GPIO 18 controló la orientación de la cabeza y la cámara, el GPIO 19 la apertura y cierre de la garra, y el GPIO 15 la rotación de la garra. Esta configuración permitió controlar los 19 actuadores sin utilizar un segundo controlador PWM.

El sensor ultrasónico se conectó a los GPIO 32 y 33 para la emisión y recepción de la señal, respectivamente. La pantalla LCD de 16 × 2 caracteres se comunicó mediante I²C con la dirección 0x27, mientras que el módulo DFPlayer Mini utilizó comunicación serial a través de los GPIO 26 y 27. La ESP32-

CAM operó como un módulo independiente conectado a la misma red local para la transmisión de video.

La arquitectura electrónica, el sistema de alimentación y la comunicación inalámbrica se muestran en la Fig. 2.

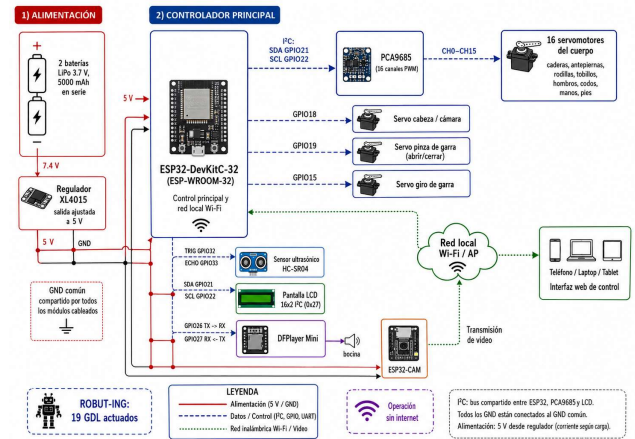


Fig. 2. Arquitectura electrónica, alimentación y comunicación inalámbrica del prototipo ROBUT-ING.

D. Sistema de Alimentación

La configuración inicial empleó baterías de 2000 mAh. Posteriormente se instalaron dos baterías de 3.7 V y 5000 mAh conectadas en serie, obteniéndose un voltaje nominal de 7.4 V y una capacidad de 5000 mAh.

La tensión se redujo a 5 V mediante un regulador XL4015 [10]. La salida regulada alimentó los servomotores y la placa de expansión, mientras que el ESP32 utilizó su regulador interno para obtener la tensión lógica de 3.3 V.

La autonomía se estimó mediante el cronometraje de una sesión funcional desde la carga completa de las baterías, combinando conexión inalámbrica, transmisión de video y ejecución intermitente de movimientos.

E. Desarrollo del software

El software se desarrolló en Arduino IDE mediante bibliotecas para comunicación Wi-Fi, servidor web, protocolo I²C, control PWM de servomotores, pantalla LCD y reproducción de audio [11]-[13].

El programa se estructuró mediante secuencias de estados para ejecutar el saludo, el desplazamiento asistido, el agachamiento y el retorno a la posición inicial. También incorporó el control manual de la cabeza y la garra.

Las posiciones angulares se determinaron mediante calibración experimental. No se implementó un modelo de cinemática inversa ni un análisis matemático del centro de masa.

Para reducir movimientos bruscos, los servomotores avanzaron progresivamente desde su posición actual hasta el ángulo objetivo mediante incrementos temporizados. La función millis() permitió actualizar los movimientos sin detener la atención de las solicitudes recibidas por el servidor web [14].

F. Interfaz Web y Red Local

El ESP32 se configuró en modo punto de acceso [15] y generó una red inalámbrica local con la dirección 192.168.4.1. Los usuarios se conectaron directamente desde un teléfono,

tableta o computadora, sin requerir acceso a internet, router externo ni instalación de software adicional.

La interfaz web, mostrada en la Fig. 3, permitió ejecutar las secuencias de saludo, desplazamiento asistido y agachamiento, detener o reiniciar el sistema y controlar manualmente la orientación de la cabeza y los movimientos de la garra. Las instrucciones se enviaron mediante solicitudes HTTP a las rutas /comando, /camera y /garra, utilizando la función fetch() de JavaScript.

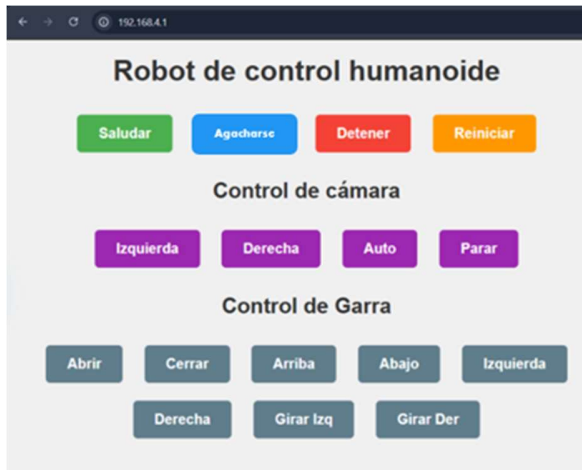


Fig. 3. Interfaz web local para el control de los movimientos, la cabeza y la garra del prototipo ROBUT-ING.

G. Sistema de Transmisión de Video

La ESP32-CAM funcionó como un módulo independiente conectado como estación a la red inalámbrica generada por el ESP32 principal. El módulo transmitió el flujo de video al dispositivo del usuario mientras la interfaz web permanecía disponible dentro del mismo segmento de red [16].

El sistema se utilizó únicamente para captura y transmisión de video, tal como se muestra en la Fig. 4; no se implementaron algoritmos de procesamiento, reconocimiento de imágenes o navegación visual. Por esta razón, se emplea la denominación sistema de transmisión de video en lugar de visión artificial.

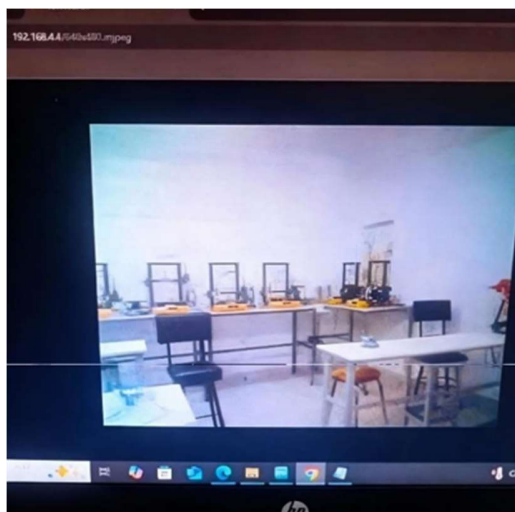


Fig. 4. Transmisión de video del prototipo ROBUT-ING mediante la ESP32-CAM dentro de la red inalámbrica local.

H. Evaluación Técnica

Las pruebas se realizaron en un espacio interior, sobre una superficie plana y bajo condiciones controladas. Antes de cada ejecución se verificaron la posición inicial de los actuadores, la alimentación, la conexión inalámbrica, el acceso a la interfaz y el funcionamiento de los periféricos.

Una ejecución se consideró satisfactoria cuando el robot completó la secuencia sin apagados, reinicios, interrupciones eléctricas, pérdida de conexión o necesidad de intervención manual. Se realizaron veinte ejecuciones de movimientos de alta demanda: doce desplazamientos asistidos y ocho agachamientos.

La tasa de ejecuciones satisfactorias se calculó mediante (1):

$$T_e = \frac{N_e}{N_t} \times 100 \quad (1)$$

donde T_e es la tasa de éxito, N_e es el número de ejecuciones completadas satisfactoriamente y N_t es el número total de intentos. La tasa de interrupción se obtuvo mediante $T_i = 100 - T_e$.

La autonomía se evaluó mediante el cronometraje de una sesión funcional desde la carga completa de las baterías, combinando conexión inalámbrica, transmisión de video y ejecución intermitente de movimientos.

El alcance de la red se evaluó en interiores, alejando progresivamente el dispositivo de control y verificando la permanencia de la conexión y la respuesta a los comandos. Para evaluar la conexión simultánea se incorporaron progresivamente dispositivos a la red local. También se verificaron la operación de la garra y el funcionamiento simultáneo de la interfaz web y la transmisión de video.

I. Aplicación Educativa

La aplicación educativa se realizó durante cuatro meses con 120 estudiantes de secundaria, distribuidos en tres grupos de aproximadamente 40 participantes. Las actividades se desarrollaron en planteles ubicados en zonas rurales de Río Bravo, Tamaulipas, con disponibilidad limitada de infraestructura y recursos tecnológicos.

Durante las sesiones se abordaron conceptos de microcontroladores, servomotores, grados de libertad, sensores, comunicación inalámbrica, control web, alimentación y la relación sensor–procesamiento–actuador. Los estudiantes observaron las secuencias de movimiento del robot y utilizaron la interfaz mediante dispositivos conectados a la red local.

Al finalizar la intervención se aplicó una evaluación de conocimientos. Se estableció como criterio de logro una calificación igual o superior al 70 %. El porcentaje de estudiantes que alcanzó dicho criterio se calculó mediante (2):

$$P_L = \frac{N_L}{N_T} \times 100 \quad (2)$$

donde P_L es el porcentaje de logro, N_L es el número de estudiantes con una calificación igual o superior al 70 % y N_T es el número total de estudiantes evaluados.

No se aplicó una evaluación diagnóstica previa ni se utilizó un grupo de comparación; por ello, el resultado se interpretó

como nivel de logro posterior a la intervención y no como incremento del aprendizaje.

Los resultados técnicos y educativos se analizaron de manera descriptiva mediante frecuencias y porcentajes. No se realizaron pruebas estadísticas inferenciales debido al carácter exploratorio del estudio y a la falta de registros individuales.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A. Funcionamiento General

Se construyeron tres prototipos ROBUT-ING de aproximadamente 40 cm de altura. Los sistemas ejecutaron las secuencias programadas de saludo, agachamiento, retorno a la posición inicial, orientación de la cabeza, manipulación mediante la garra y desplazamiento asistido.

La arquitectura combinada del PCA9685 y las salidas directas del ESP32 permitió operar los 19 actuadores. La garra respondió a los comandos de apertura, cierre, rotación y orientación; el sensor ultrasónico generó lecturas de distancia mostradas en la pantalla LCD, y el módulo DFPlayer reprodujo los mensajes asociados con las rutinas programadas.

El desplazamiento no se clasificó como marcha bípeda autónoma, debido a que el prototipo requirió apoyo y no se evaluó mediante un modelo de estabilidad dinámica.

B. Confiabilidad de los Movimientos

Se realizaron veinte ejecuciones de movimientos de alta demanda: doce correspondientes al desplazamiento asistido y ocho al agachamiento. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla III.

De las veinte ejecuciones realizadas, quince concluyeron satisfactoriamente, lo que representa una tasa global de éxito del 75 %. Se registraron cinco interrupciones eléctricas, equivalentes al 25 % de los intentos: tres durante el desplazamiento asistido y dos durante el agachamiento.

Las interrupciones ocurrieron durante movimientos que requerían una mayor demanda simultánea de corriente y se manifestaron como apagados o reinicios del sistema. Estos resultados indican que las secuencias programadas eran funcionales, aunque la configuración inicial de alimentación no garantizaba una operación repetitiva

TABLA III
RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DE MOVIMIENTO

Movimiento	Intentos	Ejecuciones satisfactorias	Interrupciones
Desplazamiento asistido	12	9	3
Agachamiento	8	6	2
Total	20	15	5

C. Alimentación y Autonomía

Tras las interrupciones registradas con la configuración inicial de 2000 mAh, se instalaron dos baterías de 3.7 V y 5000 mAh conectadas en serie. El sistema alcanzó un voltaje nominal de 7.4 V, reducido a 5 V mediante un regulador XL4015. Las características de la configuración modificada se resumen en la Tabla IV.

TABLA IV
CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN MODIFICADO

Parámetro	Valor
Número de baterías	2
Voltaje individual	3.7 V
Capacidad individual	5000 mAh
Configuración	Serie
Voltaje nominal conjunto	7.4 V
Regulador	XL4015
Salida regulada	5 V
Corriente aproximada	3 A
Picos observados	Hasta 4 A
Autonomía aproximada	90 min

Con la configuración modificada se observó una autonomía funcional aproximada de 90 minutos durante una sesión que combinó conexión inalámbrica, transmisión de video y ejecución intermitente de movimientos. Este valor corresponde a una única prueba funcional y no al promedio de múltiples ciclos de descarga.

La estabilidad eléctrica no depende únicamente de la capacidad de las baterías, sino también de su corriente máxima de descarga, la capacidad del regulador, el calibre de los conductores y las caídas de voltaje producidas durante la operación simultánea de los servomotores.

Después de modificar la alimentación, no se repitió una serie equivalente de doce desplazamientos y ocho agachamientos. Por ello, no fue posible cuantificar la reducción de interrupciones asociada con la nueva configuración.

D. Conectividad y Red Local

Durante las pruebas realizadas en interiores, la comunicación entre el robot y el dispositivo de control se mantuvo dentro de un intervalo aproximado de 20 a 50 m. El alcance varió según la presencia de muros, obstáculos y condiciones del entorno.

La red local permitió mantener hasta seis dispositivos conectados simultáneamente al punto de acceso generado por el ESP32. Esta prueba verificó la permanencia de los dispositivos en la red, pero no evaluó formalmente el envío concurrente de comandos desde todos ellos.

E. Transmisión de Video

La ESP32-CAM se conectó como estación a la red local generada por el ESP32 principal y transmitió video mientras la interfaz web de control permanecía disponible. Durante las pruebas se verificó cualitativamente la operación simultánea del flujo visual y del envío de comandos dentro de la misma red.

No se midieron instrumentalmente los cuadros por segundo, la latencia, la pérdida de cuadros, el desempeño con múltiples usuarios ni el retraso extremo a extremo. Por esta razón, los valores nominales de 15 a 30 FPS no se presentan como resultados experimentales.

F. Aplicación Educativa

La intervención educativa se desarrolló durante cuatro meses con 120 estudiantes de secundaria, distribuidos en tres grupos. Al finalizar las actividades, el 85 % de los participantes alcanzó una calificación igual o superior al 70 %, establecida como criterio de logro.

El resultado representa el porcentaje de estudiantes que alcanzaron el criterio establecido después de la intervención. No debe interpretarse como un incremento del 85 % en el aprendizaje, debido a que no se aplicó una evaluación diagnóstica ni se utilizó un grupo de comparación.

G. Análisis Económico Preliminar

El costo documentado de los componentes, el servomotor de reserva y los envíos fue de aproximadamente \$3,776 MXN por prototipo. Adicionalmente, se contempló una reserva de contingencia de \$1,200 MXN para sustituciones, ajustes y variaciones no previstas. En consecuencia, el presupuesto total estimado fue de \$4,976 MXN. El monto no incluye mano de obra ni herramientas.

Las cantidades, costos unitarios, subtotales y proveedores se presentan en la Tabla V. Los precios corresponden al valor de compra o cotización disponible durante el desarrollo del prototipo.

Además de los actuadores instalados en el prototipo, se adquirió un servomotor digital DS3225 de alto torque como unidad de reserva. Este componente se destinó a sustituir alguno de los actuadores en caso de falla o a reforzar una articulación de las extremidades inferiores sometida a una mayor carga mecánica. Debido a que no permanece instalado de manera adicional, no se contabilizó como un grado de libertad extra ni modifica el total de 19 GDL actuados.

Se consideró una reserva de contingencia de \$1,200 MXN para cubrir posibles sustituciones de conectores, conductores, tornillería, adaptadores, componentes dañados durante el montaje, ajustes mecánicos, materiales de soldadura y variaciones de precio o envío. Este monto no corresponde a un componente específico y se presenta por separado del costo directo de materiales.

H. Discusión

Los resultados indican que una arquitectura basada en ESP32 puede integrar el control de múltiples actuadores, sensores, reproducción de audio, manipulación mediante una garra, una interfaz web local y transmisión de video. La operación sin conexión a internet resulta pertinente para planteles con conectividad limitada, mientras que el acceso mediante navegador evita la instalación de software específico en los dispositivos de los usuarios.

Sin embargo, el control simultáneo de 19 actuadores incrementó la demanda eléctrica. Las cinco interrupciones registradas durante las pruebas se manifestaron como apagados o reinicios, lo que evidencia la importancia del dimensionamiento de las baterías, el regulador, los conductores y las conexiones eléctricas. Debido a que las pruebas de movimiento no se repitieron después de modificar la alimentación, no puede atribuirse cuantitativamente una mejora en la confiabilidad a la nueva configuración.

Las posiciones de los servomotores y las secuencias de movimiento se determinaron mediante calibración experimental. No se desarrollaron modelos de cinemática inversa, centro de masa, polígono de soporte, trayectoria del pie, momento de vuelco o estabilidad dinámica. Por ello, el desplazamiento se considera asistido y no constituye una marcha bípeda autónoma validada.

IV. CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron tres prototipos ROBUT-ING de aproximadamente 40 cm de altura, cada uno equipado con 19 GDL actuados, una garra funcional, sensores, reproducción de audio, control web local y transmisión de video. La arquitectura basada en ESP32 permitió integrar estos elementos y operar mediante una red inalámbrica propia, sin requerir conexión a internet ni la instalación de software adicional en los dispositivos de control.

En las pruebas apagados o reinicios durante movimientos de mayor demanda iniciales de movimiento, 15 de las 20 ejecuciones concluyeron satisfactoriamente, lo que

TABLA V
LISTA DE MATERIALES Y COSTOS DE UN PROTOTIPO ROBUT-ING

Componente	Modelo	Cantidad	Precio unitario	Subtotal	Proveedor
ESP32	ESP32-DevKitC con ext.	1	\$179	\$179	Mercado Libre
PCA9685	16 canales	1	\$95	\$95	Unit Electronics
ESP32-CAM	ESP32-CAM	1	\$197	\$197	Mercado Libre
Baterías	3.7 V, 5000 mAh	2	\$295	\$590	Unit Electronics
Regulador	XL4015	1	\$180	\$180	Unit Electronics
Sensor ultrasónico	HC-SR04	1	\$20	\$20	Unit Electronics
LCD	16 × 2 PC	1	\$81	\$81	Unit Electronics
DFPlayer	Mini	1	\$41	\$41	Unit Electronics
Estructura	Kit humanoide 17 GDL con garra	1	\$980	\$980	AliExpress
Servomotor de reserva	DS3225 25 kg·cm Full Metal	1	\$913	\$913	AliExpress
Envíos de material	Costo total de envíos	—	—	\$500	—
Reserva de contingencia	—	—	—	\$1,200	—
Total	—	—	—	\$4,976	—

corresponde a una tasa de éxito del 75 %. Las cinco interrupciones se manifestaron como eléctrica. Después de sustituir la configuración inicial de alimentación por dos baterías de 3.7 V y 5000 mAh conectadas en serie, se observó una autonomía funcional aproximada de 90 minutos. Sin embargo, no se repitió una serie equivalente de pruebas, por lo que no fue posible cuantificar el efecto de esta modificación sobre la confiabilidad.

La red inalámbrica mantuvo una comunicación funcional en interiores dentro de un intervalo aproximado de 20 a 50 m y permitió conservar hasta seis dispositivos conectados. También se verificó cualitativamente la operación simultánea de la interfaz de control y la transmisión de video. No se realizaron mediciones instrumentales de latencia, cuadros por segundo ni desempeño bajo el envío concurrente de comandos.

La aplicación educativa se desarrolló durante cuatro meses con 120 estudiantes de secundaria. El 85 % de los participantes alcanzó una calificación igual o superior al 70 % en la evaluación posterior. Este resultado representa el cumplimiento de un criterio de logro y no un incremento del 85 % en el aprendizaje, debido a la ausencia de una evaluación diagnóstica, un grupo de comparación y registros individuales.

Los resultados permiten considerar a ROBUT-ING como un recurso demostrativo para introducir conceptos de actuación, sensores, comunicación inalámbrica, control web, manipulación y transmisión de video en estudiantes de secundaria de zonas con infraestructura tecnológica limitada. No obstante, la evidencia obtenida es exploratoria. Como trabajo futuro, se requiere repetir las pruebas con la alimentación modificada, instrumentar las mediciones eléctricas y de comunicación, desarrollar modelos de estabilidad para el desplazamiento bípedo y aplicar un diseño educativo con evaluaciones previas y posteriores.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Tamaulipeca por su incesante apoyo a la investigación y a los 120 estudiantes que participaron, cuyo entusiasmo fue la mejor validación del proyecto.

REFERENCIAS

- [1] F. Ouyang and W. Xu, "The effects of educational robotics in STEM education: A multilevel meta-analysis," *International Journal of STEM Education*, vol. 11, art. no. 7, 2024, doi: 10.1186/s40594-024-00469-4.
- [2] UNESCO, *Technology in Education: A Tool on Whose Terms? Global Education Monitoring Report 2023*. Paris, France: UNESCO, 2023, doi: 10.54676/UZQV8501.
- [3] Instituto Nacional de Estadística y Geografía, "Encuesta Nacional sobre Disponibilidad y Uso de Tecnologías de la Información en los Hogares 2024," INEGI, México. [En línea]. Disponible: <https://www.inegi.org.mx/programas/endutih/2024/>
- [4] Otto DIY, "Otto DIY: 3D printable open-source robot." [En línea]. Disponible: <https://www.ottodiy.com/> [Consultado: 23-jul-2026].
- [5] Poppy Project, "Poppy Humanoid," Documentation of the Poppy Platform. [En línea]. Disponible: <https://docs.poppy-project.org/en/getting-started/> [Consultado: 23-jul-2026].
- [6] ROBOTIS, "ROBOTIS OP3: Introduction and specifications," ROBOTIS e-Manual. [En línea]. Disponible: <https://emanual.robotis.com/docs/en/platform/op3/introduction/> [Consultado: 23-jul-2026].
- [7] Maxtronics Robotics, "NAO6." [En línea]. Disponible: <https://maxtronics.com/en/nao6/> [Consultado: 23-jul-2026].
- [8] Espressif Systems, ESP32 Series Datasheet, ver. 5.2, 2025. [En línea]. Disponible: https://documentation.espressif.com/esp32_datasheet_en.pdf
- [9] NXP Semiconductors, PCA9685: 16-Channel, 12-Bit PWM Fm+ I²C-Bus LED Controller, rev. 4.0, Apr. 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/PCA9685.pdf>
- [10] XLSEMI, XL4015: 5 A, 180 kHz, 36 V Buck DC/DC Converter, hoja de datos. [En línea]. Disponible: <https://www.xlsemi.com/datasheet/XL4015-EN.pdf>
- [11] Espressif Systems, "Arduino core for the ESP32 family of SoCs," GitHub. [En línea]. Disponible: <https://github.com/espressif/arduino-esp32> [Consultado: 23-jul-2026].
- [12] Adafruit Industries, "Adafruit PCA9685 PWM Servo Driver Library," GitHub. [En línea]. Disponible: <https://github.com/adafruit/Adafruit-PWM-Servo-Driver-Library> [Consultado: 23-jul-2026].
- [13] J. Rickman, "LiquidCrystal_I2C: LiquidCrystal Arduino library for I²C LCD displays," GitHub. [En línea]. Disponible: https://github.com/johnrickman/LiquidCrystal_I2C [Consultado: 23-jul-2026].
- [14] Arduino, "Language Reference: millis()." [En línea]. Disponible: <https://docs.arduino.cc/language-reference/> [Consultado: 23-jul-2026].
- [15] Espressif Systems, "Wi-Fi API—Arduino ESP32." [En línea]. Disponible: <https://docs.espressif.com/projects/arduino-esp32/en/latest/api/wifi.html> [Consultado: 23-jul-2026].
- [16] Espressif Systems, "ESP32 Camera Driver," GitHub. [En línea]. Disponible: <https://github.com/espressif/esp32-camera> [Consultado: 23-jul-2026].