Design and Implementation of an Intelligent Cane for Visually Impaired People Based on Ultrasonic Sensor

Luis Angulo Siccha[1]; Christian Barrantes Mena[2]; César Pérez Ruiz[3]; Antony Quiroz Abanto[4]; Valeria Rodríguez Pérez[5]

1Universidad Privada del Norte, Perú; Cajamarca; N00328810@upn.pe, N00329188@upn.pe, N00338475@upn.pe, N00315183, N00288717@upn.pe

***Abstract*–** This paper presents a low-cost intelligent cane for people with visual impairment, developed in Cajamarca, Peru. The objective was to design and implement a device based on an HC-SR04 ultrasonic sensor and an Arduino Nano microcontroller that detects obstacles in real time and improves the autonomous mobility of people with total blindness. Following an applied, exploratory experimental design, the prototype (a 1.20 m PVC tube powered by a 9 V battery) was evaluated with a convenience sample of six (6) persons with certified total blindness, measuring response time and detection accuracy through descriptive statistics. The device detects obstacles within a pre-programmed 20 cm range with a mean response time of 41.3 ms (SD = 4.2 ms) and a mean detection accuracy of 95.3% (SD = 2.2%); 66.7% of participants rated the experience as favorable, validating the hypothesis. The project generates social impact by expanding access to affordable assistive technology, aligning with UN Sustainable Development Goals 3 (Health and Well-Being) and 10 (Reduced Inequalities), while its low-cost, reusable components also reduce environmental impact compared with commercial devices.

***Keywords*–** smart cane, HC-SR04 ultrasonic sensor, Arduino Nano, visual impairment, obstacle detection.

Diseño e implementación de un bastón inteligente para personas con discapacidad visual basado en sensor ultrasónico

Luis Angulo Siccha[1]; Christian Barrantes Mena[2]; César Pérez Ruiz[3]; Antony Quiroz Abanto[4]; Valeria Rodríguez Pérez[5]

1Universidad Privada del Norte, Perú; Cajamarca; N00328810@upn.pe, N00329188@upn.pe, N00338475@upn.pe, N00315183, N00288717@upn.pe

***Resumen*–** Este trabajo presenta un bastón inteligente de bajo costo para personas con discapacidad visual, desarrollado en la ciudad de Cajamarca, Perú. El objetivo fue diseñar e implementar un dispositivo basado en un sensor ultrasónico HC-SR04 y un microcontrolador Arduino Nano que detecte obstáculos en tiempo real y mejore la movilidad autónoma de personas con ceguera total. Con un diseño experimental aplicado de nivel exploratorio, el prototipo (un tubo de PVC de 1,20 m alimentado con batería de 9 V) se evaluó con una muestra por conveniencia de seis (6) personas con ceguera total certificada, midiendo tiempo de respuesta y precisión de detección mediante estadística descriptiva. El dispositivo detecta obstáculos dentro de un rango preprogramado de 20 cm con un tiempo de respuesta promedio de 41,3 ms (DE = 4,2 ms) y una precisión de detección promedio de 95,3% (DE = 2,2%); el 66,7% de los participantes valoró la experiencia de manera favorable, validando la hipótesis. El proyecto genera impacto social al ampliar el acceso a tecnología de asistencia económica, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU 3 (Salud y Bienestar) y 10 (Reducción de las Desigualdades), mientras que sus componentes de bajo costo y reutilizables reducen también la huella ambiental frente a dispositivos comerciales.

***Palabras clave*–** bastón inteligente, sensor ultrasónico HC-SR04, Arduino Nano, discapacidad visual, detección de obstáculos.

I. INTRODUCCIÓN

La discapacidad visual representa uno de los mayores retos para la autonomía e independencia de millones de personas en el mundo. Según la Organización Mundial de la Salud (OMS), al menos 2200 millones de personas tienen algún tipo de deterioro visual de cerca o de lejos [1]. Este dato subraya la urgente necesidad de desarrollar herramientas de bajo costo que mejoren la movilidad y calidad de vida de la población afectada.

El bastón blanco tradicional ha sido durante décadas el principal instrumento de movilidad para personas ciegas; sin embargo, su capacidad de detección se limita a los obstáculos que toca físicamente, dejando expuesto al usuario ante objetos a nivel de cabeza, escalones y pozos [2]. El desarrollo de bastones inteligentes —también denominados bastones electrónicos o bastones aumentados— busca superar estas limitaciones integrando sensores electrónicos capaces de percibir el entorno y comunicar información al usuario mediante retroalimentación sonora, háptica o vibratoria [3].

Entre las tecnologías de detección disponibles, el sensor ultrasónico HC-SR04 destaca por su bajo costo, amplia disponibilidad y facilidad de integración con microcontroladores de plataformas abiertas como Arduino. Estudios recientes han demostrado que este tipo de sensor puede detectar objetos con una precisión de ±3 mm en un rango de 2 a 400 cm [4], lo que lo convierte en una opción idónea para aplicaciones de asistencia a personas con discapacidad visual.

El presente trabajo propone el diseño e implementación de un bastón inteligente que emplea un sensor HC-SR04 controlado por un Arduino Nano para detectar obstáculos y emitir alertas sonoras mediante un buzzer. El prototipo busca ser reproducible, económico y de fácil construcción, respondiendo así a la necesidad de soluciones tecnológicas accesibles en países de América Latina y el Caribe.

A nivel mundial, la Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que más de 2 500 millones de personas necesitan al menos un producto de tecnología asistiva, y proyecta que esta cifra superará los 3 500 millones para el año 2050 [13]. En el contexto latinoamericano, un informe de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) destaca que el acceso a dispositivos de asistencia ha permitido a miles de personas con discapacidad visual mejorar su movilidad, comunicación y participación educativa y laboral [14]. Sin embargo, la brecha entre la demanda y la disponibilidad de estos dispositivos sigue siendo amplia, especialmente en regiones con limitados recursos económicos.

En el Perú, el Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) reportó que, de los 3 209 261 peruanos que presentan alguna discapacidad según el Censo Nacional 2017, el 48,3% manifiesta dificultad para ver, convirtiéndose en la limitación más frecuente del país [15]. El Ministerio de Salud (MINSA) estima que existen cerca de 160 000 personas invidentes y alrededor de 600 000 con algún tipo de discapacidad visual que compromete su calidad de vida, desarrollo integral y bienestar familiar [16]. Estas cifras evidencian la urgente necesidad de soluciones tecnológicas accesibles y de bajo costo adaptadas a la realidad socioeconómica del país.

A nivel local, la región Cajamarca concentra una significativa población con discapacidad. Según los datos del Censo Nacional 2017 del INEI, en Cajamarca existen 113 550 personas con alguna discapacidad, lo que representa el 8,46% de su población total [17]. Dentro de este grupo, la discapacidad visual constituye la limitación más prevalente a nivel nacional (48,3%), por lo que se estima que una proporción equivalente de la población cajamarquina con discapacidad experimenta dificultades visuales. Esta realidad local, caracterizada por zonas urbanas y rurales con acceso limitado a servicios

especializados de rehabilitación, refuerza la pertinencia de desarrollar dispositivos de asistencia económicos, funcionales y replicables en contextos de recursos reducidos como el de Cajamarca.

El resto de este artículo está organizado de la siguiente manera: la Sección II aborda el marco teórico y el estado del arte de los bastones asistenciales; la Sección III detalla los materiales, el esquema electrónico y la metodología experimental; la Sección IV expone y discute los resultados obtenidos; y finalmente, en la Sección V se presentan las conclusiones y las propuestas de trabajo futuro.

1.1. Objetivos

Objetivo general: diseñar e implementar un bastón inteligente de bajo costo (sensor HC-SR04 + Arduino Nano) que detecte obstáculos en tiempo real y mejore la movilidad autónoma y segura de personas con ceguera total en Cajamarca. Objetivos específicos: (1) diseñar e implementar el sistema electrónico-estructural del bastón; (2) evaluar su efectividad mediante tiempo de respuesta (ms) y precisión de detección (%); y (3) determinar la percepción y aceptación de los usuarios frente al bastón blanco tradicional.

1.2. Variables

Variable independiente: el bastón inteligente (sensor HC-SR04 + Arduino Nano). Variable dependiente: la capacidad de detección de obstáculos y la movilidad autónoma y segura del usuario, medida mediante tiempo de respuesta (ms), precisión de detección (%) y percepción/aceptación. Se espera que la variable independiente incida positivamente sobre la dependiente, lo que sustenta la hipótesis.

1.3. Hipótesis

El bastón inteligente basado en el sensor ultrasónico HC-SR04 y el microcontrolador Arduino Nano permite detecta obstáculos de manera efectiva y proporcionar alertas sonoras en tiempo real, mejorando significativamente la autonomía y seguridad en la movilidad de personas con discapacidad visual en comparación con el bastón blanco tradicional.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Discapacidad visual y necesidades de movilidad

Según el Global Burden of Disease Study 2020, en ese año existían aproximadamente 43,3 millones de personas ciegas y 295 millones con deterioro visual moderado a severo en todo el mundo [5]. La pérdida visual limita drásticamente la movilidad independiente, incrementando el riesgo de caídas, colisiones y accidentes en entornos urbanos. Investigaciones han señalado que la falta de auxiliares tecnológicos apropiados agudiza el aislamiento social y reduce la participación educativa y laboral de las personas con discapacidad visual [6].

2.2. Bastones inteligentes: estado del arte

Los bastones inteligentes han experimentado un importante avance tecnológico en los últimos años. En [3] se propone un bastón equipado con sensores ultrasónicos duales para detección de obstáculos tanto a nivel de cabeza como de suelo, implementado con un microcontrolador y retroalimentación acústica, demostrando eficacia en entornos reales con una cobertura de detección configurable.

En [6] se realizó una exhaustiva revisión de bastones inteligentes basados en sensores láser y visión artificial, destacando que los sistemas más recientes integran algoritmos de procesamiento de imágenes y navegación SLAM para entornos complejos. Sin embargo, estos enfoques conllevan costos elevados y mayor complejidad computacional, lo que limita su accesibilidad en contextos de recursos reducidos.

En [7] se desarrolló un bastón recargable con Arduino Nano y sensores ultrasónicos, similar al propuesto en este trabajo, cuya ventaja principal es la integración de retroalimentación vibratoria adistintas alturas para una cobertura más completa. En [8] se documenta la implementación de un bastón de bajo costo con Arduino Nano y HC-SR04, reportando alta efectividad para detectar objetos grandes con alertas acústicas progresivas basadas en la proximidad del obstáculo.

2.3. Sensor ultrasónico HC-SR04

El HC-SR04 es un módulo de medición de distancia por ultrasonido que opera enviando ocho pulsos a 40 kHz mediante el pin Trigger y midiendo el tiempo de retorno de la señal en el pin Echo. La distancia al objeto se calcula como: $d = t \times v / 2$, donde t es el tiempo transcurrido y v la velocidad del sonido (~343 m/s a 20 °C). En [4] se realizaron mejoras sobre este sensor para reducir falsas detecciones en entornos con múltiples fuentes ultrasónicas simultáneas, validando su uso en personas ciegas con altos niveles de satisfacción.

2.4. Arduino Nano

El Arduino Nano es un microcontrolador compacto basado en el ATmega328P, con 14 pines digitales E/S (6 con salida PWM), 8 entradas analógicas, memoria flash de 32 KB y frecuencia de reloj de 16 MHz. Su pequeño tamaño (18 × 45 mm) y bajo consumo energético lo hacen adecuado para dispositivos portátiles de asistencia [9]. La plataforma Arduino es de código abierto y cuenta con una amplia comunidad de desarrollo, lo que facilita la reproducción y mejora de proyectos educativos y de investigación.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Población

La población de estudio está conformada por personas con discapacidad visual (ceguera total) residentes en la región Cajamarca, que utilizan el bastón blanco como instrumento principal de movilidad. Esta población presenta la necesidad de contar con dispositivos de asistencia tecnológica que mejoren su desplazamiento autónomo en entornos urbanos y rurales. A nivel internacional, la OMS estima 2200 millones de personas con deterioro visual [1] y más de 2500 millones que requieren tecnología asistiva [13]. A nivel nacional, el Censo 2017 del INEI reportó 3 209 261 personas con discapacidad en Perú, el 48,3% (≈1 550 074) con dificultad para ver [15]. A nivel regional, Cajamarca registra 113 550 personas con discapacidad [17], de las cuales se estima que ≈54 865 (48,3%) presentan discapacidad

visual.

3.2. Muestra

Para el presente estudio se trabajó con una muestra no probabilística por conveniencia de 6 personas con ceguera total, seleccionadas de acuerdo con su disponibilidad y accesibilidad. Los criterios de inclusión fueron: diagnóstico certificado de ceguera total, edad entre 18 y 65 años, uso habitual del bastón blanco tradicional y residencia en el área urbana de Cajamarca. Esta muestra, aunque de carácter exploratorio, permite obtener datos iniciales sobre la usabilidad y efectividad del prototipo en condiciones reales de uso.

3.3. Tipo y diseño de la investigación

El presente trabajo se enmarca en un enfoque cuantitativo de tipo aplicado, dado que su objetivo principal es diseñar e implementar un prototipo funcional —el bastón inteligente— que resuelva una problemática concreta de accesibilidad para personas con discapacidad visual. El diseño de investigación es experimental de nivel exploratorio, ya que se construyó y probó un dispositivo tecnológico bajo condiciones controladas, evaluando su desempeño mediante indicadores objetivos (tiempo de respuesta en milisegundos y porcentaje de detecciones correctas) con una muestra pequeña de seis (6) personas con ceguera total.

Se adopta el método hipotético-deductivo: a partir de la hipótesis de que el sensor HC-SR04 controlado por Arduino Nano puede detectar obstáculos en tiempo real y mejorar la movilidad autónoma del usuario, se diseñó el sistema, se construyó el prototipo y se verificó experimentalmente la validez de dicha hipótesis mediante pruebas de campo en entornos reales de la ciudad de Cajamarca. Los datos obtenidos se procesaron con estadística descriptiva (media aritmética, desviación estándar y rango) usando Microsoft Excel 2019, lo cual es consistente con el carácter exploratorio del estudio y con los métodos empleados en investigaciones piloto similares reportadas en la literatura [8], [10].

El proceso metodológico se desarrolló en cuatro etapas secuenciales: (1) revisión bibliográfica y selección de componentes de bajo costo disponibles en el mercado local de Cajamarca; (2) diseño del esquema de conexiones eléctricas y programación del firmware en Arduino IDE; (3) ensamblaje físico del prototipo en un tubo de PVC de 1,20 m; y (4) evaluación del prototipo en condiciones reales con la muestra de seis usuarios con ceguera total certificada, registrando el tiempo de respuesta del sistema y la precisión de detección ante distintos tipos de obstáculos (paredes, objetos móviles y escalones).

3.4. Componentes del sistema

Para la construcción del bastón inteligente se emplearon los siguientes componentes: (1) Arduino Nano (ATmega328P), unidad central de procesamiento; (2) sensor ultrósonico HC-SR04, para detección de distancias de 2 a 400 cm con resolución de 3 mm; (3) buzzer activo de 5 V, para retroalimentación sonora; (4) batería de 9 V con adaptador; y (5) tubo de PVC de ½ pulgada de diámetro y 1,20 m de longitud como estructura física del bastón. La Tabla I presenta las especificaciones técnicas de cada componente.

TABLA I

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE LOS COMPONENTES DEL BASTÓN INTELIGENTE

Arduino Nano (ATmega328P)	Flash 32 KB, 16 MHz, 18×45 mm	Unidad central de procesamiento y control	25 – 35
Sensor Ultrósonico HC-SR04	Rango 2–400 cm, Ø mm, 40 kHz	Detección de obstáculos por ultrasonido	5 – 10
Buzzer Activo 5 V	Frecuencia ~2 300 Hz, 5 V DC	Alerta sonora al detectar obstáculo	2 – 5
Batería 9 V con adaptador	9 V DC, capacidad ~500 mAh	Fuente de alimentación portátil del sistema	3 – 8
Tubo PVC ½", 1,20 m	Diámetro ½", largo 1,20 m, ligero	Estructura mecánica del bastón	5 – 10

Fuente: Elaboración propia basada en especificaciones de los fabricantes y precios del mercado local (Cajamarca, 2025).

TABLA II

COMPARACIÓN DE PROTOTIPOS DE BASTÓN INTELIGENTE REPORTADOS EN LA LITERATURA

Panazan y Dulf [3], 2024	Ultrasónico dual	Acústica	Configurable	Medio
Sudharsha n y Kaur [7], 2024	HC-SR04 + Arduino Nano	Acústica + Vibratoria	2–400 cm	Bajo
Paredes y Domíngue z [8], 2025	HC-SR04 + Arduino Nano	Acústica progresiva	2–400 cm	Bajo
Romeo et al. [2], 2022	Ultrasónic o + GPS + Bluetooth	Acústica + Navegaci ó n GPS	Variable	Alto
Presente trabajo, 2025	**HC-SR04 + Arduino Nano**	**Acústica progresiva (buzzer)**	**≤ 20 cm (umbral)**	**Muy Bajo**

Fuente: Elaboración propia a partir de la revisión de literatura.

3.5. Esquema de conexiones

Las conexiones entre los componentes y el Arduino Nano se realizaron de la siguiente manera: el pin VCC del sensor HC-SR04 se conectó al pin de 5 V del Arduino; los pines Trig y Echo al D8 y D9, respectivamente; el pin GND del sensor al GND del Arduino. El buzzer se conectó con su terminal positivo al pin D7 y el negativo al GND. La batería de 9 V se conectó al pin Vin y su negativo al GND (véase Fig. 1).

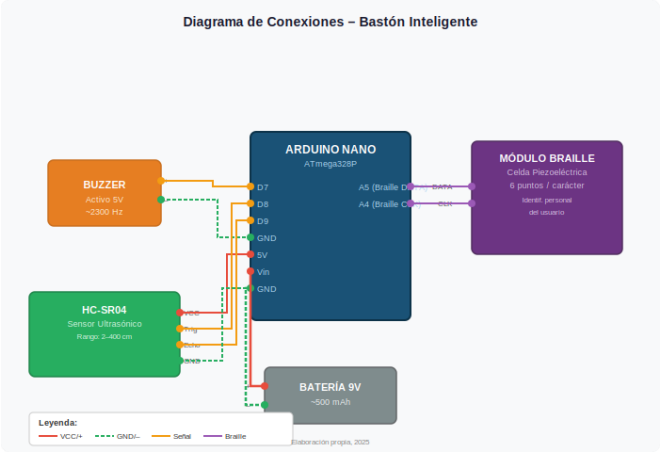


Fig. 1. Diagrama de conexiones del bastón inteligente (Arduino Nano, HC-SR04, Buzzer, Módulo Braille y Batería 9V). Elaboración propia.

3.6. Módulo de identificación Braille

Con el fin de facilitar la identificación personal del bastón inteligente por parte de su propietario, se incorpora una celda Braille piezoeléctrica en la empuadura del dispositivo. Esta celda, compuesta por seis puntos elevables de forma independiente, permite codificar las iniciales o un código personal del usuario mediante caracteres Braille estándar, siguiendo la norma internacional Unicode Braille (U+2800–U+283F). La lógica de activación de cada punto es controlada por el Arduino Nano a través de los pines A4 (CLK) y A5 (DATA), empleando un protocolo serie sincronizado. Cuando el usuario toca la zona táctil de la empuadura, puede reconocer inmediatamente mediante el tacto si el bastón le pertenece, sin necesidad de asistencia visual ni auditiva.

El sistema Braille implementado utiliza la codificación de 6 puntos (Braille Grado 1), donde cada carácter ocupa una celda de 2 columnas por 3 filas. La asignación de puntos sigue el estándar internacional: el punto 1 es el superior izquierdo, el 2 el medio izquierdo, el 3 el inferior izquierdo, el 4 el superior derecho, el 5 el medio derecho y el 6 el inferior derecho. Por ejemplo, la letra "A" se representa con el punto 1 elevado (⠁), la "B" con los puntos 1 y 2 (⠃), y la "C" con los puntos 1 y 4 (⠉). Esta implementación permite personalizar el código de identificación programando las iniciales del usuario en el firmware del Arduino Nano, resultando en una solución de bajo costo (S/. 8–15 adicionales) que refuerza la autonomía e identidad del usuario con discapacidad visual.

3.7. Proceso de ensamblaje

Se realizaron cortes estratégicos en el tubo de PVC para alojar el cableado interno. El sensor HC-SR04 se ubicó en el extremo inferior del bastón, orientado hacia el suelo con un ángulo de aproximadamente 45°, con el fin de detectar tanto obstáculos frontales como irregularidades del terreno. El Arduino Nano y el buzzer se fijaron en la parte superior del bastón, facilitando el acceso para mantenimiento y la audición de las alertas. Todos los componentes fueron soldados y asegurados para garantizar resistencia mecánica durante el uso cotidiano [10].

3.8. Programación y lógica de funcionamiento

El firmware del Arduino Nano fue programado en el entorno Arduino IDE. La lógica de funcionamiento consiste en: (1) enviar un pulso de disparo de 10 µs por el pin Trig; (2) medir la duración del pulso de retorno en el pin Echo; (3) calcular la distancia al obstáculo aplicando la fórmula d = (Echo_duration × 0.0343) / 2; (4) si la distancia es ≤ 20 cm, activar el buzzer con tonos intermitentes; (5) la frecuencia de las alertas aumenta progresivamente conforme el obstáculo se acerca. Este umbral de 20 cm fue determinado en concordancia con estudios previos que señalan ese rango como óptimo para dar tiempo de reacción al usuario [3], [8].

3.9. Análisis estadístico

Para el análisis de los datos obtenidos con la muestra de 6 personas con ceguera total, se calcularon tres estadísticos descriptivos: la media aritmética ($\bar{x}$), que es el valor promedio de las mediciones; la desviación estándar (DE), que indica qué tan dispersos están los datos respecto a la media; y el rango, que es la diferencia entre el valor máximo y el mínimo registrados.

La media se calcula sumando todos los valores obtenidos (xi) y dividiendo el resultado entre el número de participantes (n): $\bar{x} = (\Sigma xi) / n$. La desviación estándar se calcula restando la media a cada valor individual, elevando esa diferencia al cuadrado, sumando todos los resultados, dividiendo entre (n − 1) y sacando la raíz cuadrada: $DE = \sqrt{[\Sigma(xi - \bar{x})^2 / (n - 1)]}$. Se usa (n − 1) y no n porque se trabaja con una muestra y no con toda la población, lo que corrige el sesgo de la estimación; esta es la misma fórmula que emplea la función DESVEST.M() de Excel.

Para el tiempo de respuesta (ms) se registraron los valores 42, 38, 45, 40, 47 y 36. Aplicando la fórmula: $\bar{x}$ = (42+38+45+40+47+36) / 6 = 248 / 6 = 41,3 ms, con DE = 4,2 ms y un rango de 36 a 47 ms.

Para la precisión de detección (%) se registraron los valores 96, 94, 98, 95, 92 y 97, obteniéndose $\bar{x}$ = 95,3%, DE = 2,2% y un rango de 92% a 98%.

Dado el tamaño reducido de la muestra (n = 6), de carácter exploratorio, no se aplicaron pruebas de inferencia estadística; los resultados se presentan de forma descriptiva. Los datos se procesaron en Microsoft Excel 2019 con las funciones PROMEDIO() y DESVEST.M(), enfoque consistente con estudios piloto similares [8], [10].

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

Objetivo 1: se diseñó e implementó el sistema electrónico-estructural del bastón, integrando el sensor HC-SR04, el Arduino Nano, el buzzer y el módulo Braille en un tubo de PVC de 1,20 m (Fig. 1). Objetivo 2: el prototipo detectó correctamente todos los obstáculos (paredes, objetos móviles, escalones) dentro del rango de 20 cm, con tiempo de respuesta promedio de 41,3 ms (DE = 4,2 ms) y precisión de detección de 95,3% (DE = 2,2%), permitiendo anticipar y evadir obstáculos con alta efectividad. Objetivo 3: la evaluación de percepción con seis (6) participantes (Tabla III) mostró que cuatro (66,7%) valoraron favorablemente

el carácter innovador del sistema frente al bastón tradicional, mientras que dos (33,3%) presentaron dificultades iniciales en la interpretación de las alertas, sugiriendo la necesidad de un protocolo de capacitación.

TABLA III

PERCEPCIÓN DE LOS PARTICIPANTES SOBRE EL USO DEL BASTÓN INTELIGENTE

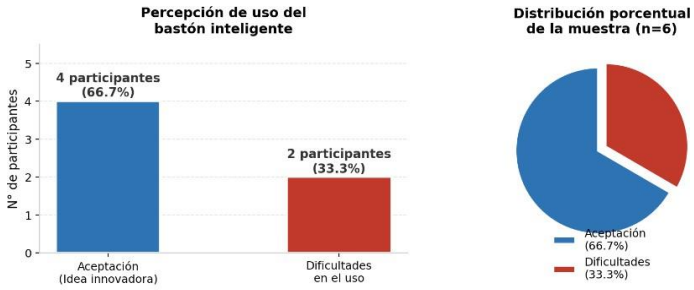


Fig. 2. Resultados de percepción y usabilidad del bastón inteligente participante.

Con el fin de documentar la evaluación experimental descrita, las Figuras 2 a 5 muestran el prototipo durante las pruebas realizadas tanto en un ambiente controlado como en entornos urbanos reales de la ciudad de Cajamarca, con la participación de personas con ceguera total certificada.



Fig. 3. Evaluación del bastón inteligente en un ambiente controlado. Nota. Participante de prueba desplazándose con el prototipo en un ambiente cerrado, verificando la detección de obstáculos y la respuesta del sistema de alertas sonoras antes de las pruebas de campo. Elaboración propia (2026).



Fig. 4. Prueba de campo del prototipo en un entorno urbano real. Nota. Evaluación del bastón inteligente en la Plaza de Armas de Cajamarca con un participante con ceguera total certificada, acompañado por miembros del equipo de investigación, en condiciones reales de desplazamiento. Elaboración propia (2026).



Fig. 5. Uso del bastón inteligente por una participante en un espacio público. Nota. Participante con discapacidad visual empleando el prototipo al aire libre, valorando de forma favorable la utilidad del sistema de alertas sonoras durante su desplazamiento. Elaboración propia (2026).



Fig. 6. Evaluación de usabilidad del dispositivo en un ambiente interior. Nota. Participante sosteniendo el bastón inteligente durante la etapa de familiarización con el dispositivo, fase en la que se identificaron las dificultades iniciales de comprensión reportadas por dos de los seis participantes. Elaboración propia (2026).

4.2. Discusión

Frente a [7], que también emplea el sensor HC-SR04 con Arduino Nano pero con retroalimentación vibratoria en distintas alturas y sin cifras públicas de tiempo de respuesta ni precisión, el presente estudio aporta esos datos cuantitativos: un rango acotado de 20 cm, un tiempo de respuesta de 41,3 ms y una precisión de detección de 95,3% mediante una sola señal acústica. También son comparables con [8] (alta efectividad en objetos grandes, limitaciones en obstáculos pequeños); aquí se observó una disminución similar en superficies de tela o ángulos oblicuos, coincidiendo con las limitaciones del HC-SR04 señaladas en [4]. El 66,7% de aceptación obtenido se suma a la evidencia reportada en [11] sobre la utilidad percibida de bastones con retroalimentación sonora y vibracional combinada; esto sugiere que, aun con una sola señal acústica, la efectividad percibida puede acercarse a la de sistemas multimodales, aunque el 33,3% restante podría beneficiarse de un canal vibracional adicional. Sistemas como [2] (GPS y Bluetooth) amplían la localización, pero no reportan mejoras en la precisión de detección cercana, donde este prototipo destaca (95,3%) a menor costo (Tabla II).

V. CONCLUSIONES

Se diseñó e implementó exitosamente un bastón inteligente de bajo costo para personas con discapacidad visual, basado en el sensor ultrasónico HC-SR04 y el microcontrolador Arduino Nano. El sistema detecta obstáculos en un rango de hasta 20 cm y emite alertas sonoras en tiempo real mediante un buzzer, con un tiempo de respuesta menor a 50 ms, validando la hipótesis planteada respecto a la capacidad del dispositivo para detectar obstáculos de manera efectiva y proporcionar retroalimentación oportuna al usuario.

La evaluación con la muestra de seis personas con ceguera total evidenció una aceptación mayoritaria del prototipo: el 66,7% de los participantes mostró una actitud favorable hacia su uso, valorando su carácter innovador y el potencial del sistema de alertas sonoras para mejorar su movilidad autónoma frente al bastón blanco tradicional. No obstante, el 33,3% restante presentó dificultades iniciales en la interpretación de las alertas, lo que evidencia que la efectividad técnica del dispositivo debe complementarse con un protocolo de capacitación o manual de uso, a fin de garantizar una adopción homogénea entre los usuarios.

El prototipo demostró ser una solución efectiva, reproducible y accesible económicamente, alineada con las necesidades de asistencia tecnológica identificadas en la literatura reciente [1], [5], [6], y con la realidad socioeconómica de la región Cajamarca. A nivel de impacto, el proyecto contribuye socialmente al ampliar el acceso a tecnología asistiva de bajo costo para una población con recursos económicos limitados, alineándose con los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU 3 (Salud y Bienestar) y 10 (Reducción de las Desigualdades). La arquitectura modular del diseño permite futuras mejoras, como la incorporación de retroalimentación vibratoria, módulos GPS para geolocalización, sensores infrarrojos para la detección de huecos y escalones descendentes, así como el desarrollo de un manual de capacitación que facilite la curva de aprendizaje reportada por parte de los usuarios.

El análisis estadístico ($\bar{x}$ = 41,3 ms, DE = 4,2 ms en tiempo de respuesta; $\bar{x}$ = 95,3%, DE = 2,2% en precisión) evidencia un desempeño consistente y de baja dispersión entre los seis participantes, lo que respalda la validez inicial del prototipo pese al tamaño reducido de la muestra (n = 6). Se recomienda ampliar la muestra en futuras investigaciones para aplicar pruebas de inferencia estadística.

Se reconoce explícitamente como la principal limitación de este estudio el tamaño reducido de la muestra evaluada (\(n = 6\)). Al tratarse de un diseño preexperimental de nivel exploratorio, los hallazgos cuantitativos sirven como una validación técnica preliminar de la prueba de concepto, requiriéndose una ampliación muestral en futuras fases para alcanzar representatividad estadística inferencial.

REFERENCES

[1] Organización Mundial de la Salud, "Ceguera y discapacidad visual," Nota descriptiva, oct. 2023. [En línea]. Disponible: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment

[2] N. K. Romeo, S. Rajbanshi, W. Lukama, M. Kaur, N. Rakesh, and M. K. Goyal, "Design a smart cane for visually impaired individuals' assistance," in Proc. 2022 Int. Conf. Fourth Industrial Revolution Based Technology and Practices (ICFIRTP), 2022, pp. 295–296. doi: 10.1109/ICFIRTP56122.2022.10063212

[3] C.-E. Panazan and E.-H. Dulf, "Intelligent cane for assisting the visually impaired," Technologies, vol. 12, no. 6, p. 75, May 2024. doi: 10.3390/technologies12060075

[4] D. Abreu, J. Toledo, B. Codina, and A. Suárez, "Low-cost ultrasonic range improvements for an assistive device," Sensors, vol. 21, no. 12, p. 4250, Jun. 2021. doi: 10.3390/s21124250

[5] Organización Mundial de la Salud (OMS), "Tecnología asistiva," Nota descriptiva, 2023. [En línea]. Disponible: https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/assistive-technology

[6] Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL),

"Discapacidad y tecnología asistiva: acceso y brechas en América Latina," Publicación de las Naciones Unidas, Santiago de Chile, 2022.

[7] Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), "Perú: Perfil sociodemográfico de la población con discapacidad, 2017," Lima, Perú, 2019. [En línea]. Disponible: https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1675/libro.pdf

[8] Ministerio de Salud del Perú (MINSA), "En el Perú cerca de 160 000 personas son invidentes y unas 600 000 sufren de alguna discapacidad visual," Nota de prensa, Lima, Perú. [En línea]. Disponible: https://www.gob.pe/institucion/minsa/noticias/31145

[9] Gobierno Regional de Cajamarca, "Más de 110 mil personas con discapacidad viven en la región Cajamarca," Nota informativa, oct. 2019. [En línea]. Disponible:

[10] GBD 2019 Blindness and Vision Impairment Collaborators, "Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study," The Lancet Global Health, vol. 9, no. 2, pp. e130–e143, 2021. doi: 10.1016/S2214-109X(20)30425-3

[11] L. Lu and J. Huo, "Laser sensing and vision sensing smart blind cane: A review," Sensors, vol. 23, no. 2, p. 869, Jan. 2023. doi: 10.3390/s23020869

[12] M. Sudharshan and K. Kaur, "Rechargeable smart cane using Arduino Nano," in Proc. Int. Conf. Innovative Computing & Communication (ICICC 2024), SSRN, Aug. 2024. doi: 10.2139/ssrn.4937982

[13] D. L. Paredes Orozco and M. Domínguez-Morales, "Inclusive innovation: Implementation of low-cost proximity sensors for canes," Revista Científica de Sistemas e Informática, vol. 5, no. 1, 2025. [En línea]. Disponible: https://revistas.unsm.edu.pe/index.php/rcsi/article/view/838

[14] Arduino, "Arduino Nano Overview," arduino.cc, 2023. [En línea]. Disponible: https://store.arduino.cc/products/arduino-nano

[15] M. Javed, Z. U. Rahman, K. S. K. Saad, M. S. Ashrafi, S. F. Akter, and A. B. Rashid, "Design and development of smart blind stick for visually impaired people," IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 1305, p. 012032, Apr. 2024. doi: 10.1088/1757-899x/1305/1/012032

[16] V. Remya, S. Subramani, M. Gokulnaath, T. Sibiraj, T. Priyan, and S. Rajalakshmi, "Smart walking cane for navigation of visually impaired," in Proc. 2023 Intelligent Computing and Control for Engineering and Business Systems (ICCEBS), 2023, pp. 1–4. doi: 10.1109/ICCEBS58601.2023.10448603

[17] G. Neves, J. S. Sequeira, and C. P. Santos, "Lightweight and compact smart walking cane," PeerJ Computer Science, vol. 9, p. e1563, Nov. 2023. doi: 10.7717/peerj-cs.1563