Arduino Nano-Based Portable Smart System for Real-Time Obstacle Detection for Visually Impaired People

Ramos-Bacon Sara, Ing.Industrial[1]; Flores-Vargas Ruth, Ing.Industrial[2]; Romero-Maluquish Ronaldo, Ing.Industrial[3] Silva-Abanto Roger Samuel, Docente de Ing. Industrial

Universidad Privada del Norte, Perú, N00320884@upn.pe, N00304155@upn.pe, N00301578@upn.pe roger.silva@upn.edu.pe.

Abstract*— Visual impairment limits independent mobility due to the difficulty of detecting obstacles in the surrounding environment. This study aimed to develop and evaluate, through electronic simulation, a portable smart helmet based on Arduino Nano and a multisensory architecture for real-time obstacle detection, in order to assess the technical viability of a low-cost solution to improve the safety and mobility of people with visual impairments. The research followed a quantitative, applied, descriptive, and projective approach. The proposed system integrates HC-SR04 ultrasonic sensors, an Arduino Nano microcontroller, a buzzer, and vibration motors to provide auditory and haptic alerts. The system was modeled and validated in the Wokwi (wokwi.com) simulation environment. The simulation results showed a detection accuracy greater than 98%, an error rate below 2%, and an average response time of 143 ms, demonstrating efficient algorithmic performance under the simulated conditions. It is concluded that the proposed smart helmet is a technically viable and accessible alternative, whose contribution to real-world mobility and safety remains to be confirmed through physical prototyping and testing with users.

Keywords*— Arduino Nano, visual impairment, obstacle detection, ultrasonic sensors, assistive technologies, electronic simulation.

Sistema portátil inteligente basado en Arduino Nano para la detección de obstáculos en tiempo real en personas con discapacidad visual

Ramos-Bacon Sara, Ing.Industrial[1]; Flores-Vargas Ruth, Ing.Industrial[2]; Romero-Maluquish Ronaldo, Ing.Industrial[3] Silva-Abanto Roger Samuel, Docente de Ing. Industrial

Universidad Privada del Norte, Perú, N00320884@upn.pe, N00304155@upn.pe, N00301578@upn.pe roger.silva@upn.edu.pe.

Resumen— La discapacidad visual limita la movilidad independiente debido a la dificultad para detectar obstáculos en el entorno. La presente investigación tuvo como objetivo desarrollar y evaluar, mediante simulación electrónica, un casco inteligente portátil basado en Arduino Nano y una arquitectura multisensorial para la detección de obstáculos en tiempo real, con el fin de valorar la viabilidad técnica de una solución de bajo costo orientada a mejorar la seguridad y la movilidad de personas con discapacidad visual. El estudio se realizó con un enfoque cuantitativo, de tipo aplicada y alcance descriptivo y proyectivo. El sistema integra sensores ultrasónicos HC-SR04, un microcontrolador Arduino Nano, un buzzer y motores vibradores para emitir alertas auditivas y hápticas. El comportamiento del circuito y de la lógica de control fue modelado y validado en el entorno de simulación Wokwi (wokwi.com). Los resultados de la simulación mostraron una precisión superior al 98 %, un error inferior al 2 % y un tiempo promedio de respuesta de 143 ms, evidenciando un desempeño algorítmico eficiente bajo las condiciones simuladas. Se concluye que el casco inteligente constituye una alternativa técnicamente viable, cuya contribución real a la movilidad y seguridad de los usuarios queda sujeta a la construcción de un prototipo físico y a pruebas con personas.

Palabras clave— Arduino Nano, discapacidad visual, detección de obstáculos, sensores ultrasónicos, tecnologías asistivas, simulación electrónica.

I. INTRODUCCIÓN

La movilidad segura e independiente constituye un aspecto fundamental para la participación de las personas con discapacidad visual en diferentes actividades de la vida cotidiana. Las dificultades para identificar obstáculos, reconocer cambios en el entorno y anticipar situaciones durante el desplazamiento pueden limitar su autonomía y participación social. En este contexto, las tecnologías asistivas representan una alternativa para complementar los mecanismos tradicionales de orientación y movilidad.

La magnitud de la discapacidad visual constituye un desafío a nivel mundial. La Organización Mundial de la Salud señala que al menos 2,2 mil millones de personas presentan una deficiencia visual de cerca o de lejos y que, en al menos 1 000 millones de estos casos, la deficiencia visual podría haberse prevenido o todavía no ha sido atendida adecuadamente [1]. Asimismo, la Organización Mundial de la Salud y UNICEF estiman que más de 2,5 mil millones de personas necesitan uno o más productos de tecnología asistiva, cifra que podría superar los 3,5 mil millones para el año 2050 [2].

En el Perú, la Primera Encuesta Nacional Especializada sobre Discapacidad (ENEDIS), realizada en 2012, estimó la existencia de 1 575 402 personas con alguna discapacidad, equivalente al 5,2 % de la población nacional. Dentro de esta población, la limitación para ver representó el 50,9 %, correspondiente a 801 185 personas [3]. Debido a que estos datos corresponden a una encuesta realizada en 2012, deben interpretarse como una referencia estadística nacional y no como una estimación actual de la población peruana.

El bastón blanco constituye uno de los principales instrumentos de orientación y movilidad empleados por las personas con discapacidad visual. Sin embargo, su capacidad para identificar determinados obstáculos puede verse limitada cuando estos se encuentran fuera de la zona de rastreo convencional. En este contexto, Acosta Parra y Mena Mafla desarrollaron un prototipo electrónico incorporado a un bastón tradicional para detectar obstáculos superiores mediante un sensor ultrasónico y una placa de control electrónico. El sistema generaba una alerta vibratoria ante obstáculos ubicados aproximadamente a 120 cm y fue evaluado mediante pruebas de aceptación y manipulación [4].

En una investigación posterior, Memon et al. desarrollaron un bastón inteligente basado e sensores ultrasónicos, Arduino y Raspberry Pi. El sistema empleó señales de alarma para informar sobre obstáculos y otros elementos del entorno y fue probado para evaluar su precisión, incluyendo una comprobación con una persona con discapacidad visual. Los autores reportaron una capacidad de identificación de obstáculos de aproximadamente 2 m [5].

Asimismo, Trujillo Mora et al. analizaron la utilidad del Bastón Blanco Inteligente UAEM, equipado con sensores ultrasónicos, alarmas, vibraciones y GPS. El estudio incluyó a 20 participantes adultos con discapacidad visual severa y ceguera y encontró asociación entre las vibraciones, los sonidos y los mensajes emitidos por el dispositivo ante diferentes obstáculos y distancias [6].

En otras investigaciones internacionales, Cayambe Gamarra desarrolló un prototipo de ubicación espacial para personas con discapacidad visual mediante tecnologías IoT. El dispositivo corporal integra sensores ultrasónicos, sensores de proximidad y GPS y proporciona información táctil y auditiva relacionada con la ubicación del usuario [7]. Por su parte, Colcha Ulcuango desarrolló un prototipo de gafas electrónicas que integra una placa microcontroladora, un sensor de presencia, una batería y un módulo MP3 para generar alertas auditivas ante obstáculos [8]. Asimismo, Morocho Ponce desarrolló un guante multifunción con tecnología háptica y un entorno virtual inmersivo, orientado

a proporcionar retroalimentación táctil y apoyar la interacción de personas con discapacidad visual [9].

En el contexto peruano también se han desarrollado propuestas tecnológicas relacionadas con la asistencia a personas con discapacidad visual. La Universidad Privada del Norte desarrolló un bastón guía electrónico con un sistema de detección de superficies, cuyo objetivo incluye identificar obstáculos, alertar al usuario y permitir la comunicación con una persona de confianza cuando sea necesario [10].

Estos antecedentes evidencian una línea de investigación orientada al desarrollo de dispositivos portátiles capaces de ampliar la información que recibe una persona con discapacidad visual sobre su entorno. Sin embargo, antes de una implementación física resulta conveniente evaluar la arquitectura electrónica y la lógica de control bajo condiciones simuladas.

Por ello, la presente investigación propone el diseño de un casco inteligente portátil basado en Arduino Nano y sensores ultrasónicos para la detección de obstáculos en tiempo real. El sistema incorpora mecanismos de retroalimentación auditiva y háptica destinados a representar diferentes niveles de proximidad de los obstáculos.

La propuesta se desarrolla inicialmente mediante simulación electrónica en el entorno Wokwi, con el propósito de evaluar el comportamiento de la arquitectura electrónica y del algoritmo de detección bajo condiciones virtuales controladas. En consecuencia, los resultados obtenidos corresponden al funcionamiento del modelo simulado y no permiten establecer conclusiones sobre la seguridad, autonomía, comodidad o aceptación del dispositivo en personas con discapacidad visual.

A. Descripción del problema

La Las personas con discapacidad visual pueden enfrentar dificultades para identificar oportunamente determinados obstáculos durante sus desplazamientos, especialmente aquellos que se encuentran fuera del área inmediata de exploración del bastón blanco. Aunque este instrumento

constituye una herramienta fundamental de orientación y movilidad, su alcance físico no permite detectar de manera electrónica todos los elementos presentes en el entorno.

Los antecedentes revisados muestran que los sensores ultrasónicos pueden incorporarse a dispositivos de asistencia para obtener información relacionada con la distancia a determinados obstáculos [4][9]. Sin embargo, la integración de sensores, microcontroladores y mecanismos de retroalimentación requiere evaluar previamente la arquitectura del sistema, la lógica de programación y los umbrales de alerta.

En respuesta a esta problemática, se propone un casco inteligente portátil basado en Arduino Nano y sensores ultrasónicos, con mecanismos de alerta auditiva y háptica. La investigación se delimita inicialmente a la simulación electrónica, por lo que su finalidad es evaluar la viabilidad técnica del diseño y del algoritmo antes de una eventual implementación física.

B. Formulación del problema

¿Cómo el diseño e implementación de un casco inteligente basado en Arduino Nano y sensores ultrasónicos puede mejorar la detección de obstáculos y contribuir a una movilidad más segura para personas con discapacidad visual?

C. Justificación

La investigación se orienta hacia la problemática de la movilidad de las personas con discapacidad visual y la necesidad de implementar soluciones tecnológicas que aporten información complementaria sobre los obstáculos presentes en su entorno. La tecnología asistiva tiene como propósito favorecer el desempeño funcional, la autonomía, la participación activa y la inclusión social de quienes la utilizan
(2). En este contexto, la propuesta se concibe como una fase inicial destinada al diseño de una herramienta tecnológica de apoyo que, en etapas posteriores, pueda evolucionar hacia un dispositivo de asistencia práctica.

D. Objetivos

Objetivo general: Desarrollar y evaluar, mediante simulación electrónica, un casco inteligente portátil basado en una plataforma Arduino Nano y una arquitectura multisensorial para la detección de obstáculos en tiempo real, con el fin de valorar su viabilidad técnica como solución de bajo costo para mejorar la seguridad y favorecer la movilidad autónoma de personas con discapacidad visual.

Objetivos específicos:

1. Diseñar la arquitectura mecánica y electrónica de un casco inteligente que permita la integración eficiente de sensores ultrasónicos y componentes electrónicos de bajo consumo. Implementar, mediante simulación, un sistema embebido basado en Arduino Nano para la adquisición y el procesamiento de datos provenientes de los sensores, permitiendo la detección de obstáculos en tiempo real.
2. Integrar un sistema de retroalimentación auditiva y háptica que informe al usuario sobre la presencia de obstáculos ubicados en las zonas frontal, lateral y superior.
3. Evaluar el desempeño del prototipo virtual mediante pruebas de precisión, alcance de detección y tiempo de respuesta en escenarios simulados.
4. Analizar la viabilidad técnica del sistema como una alternativa tecnológica de bajo costo para mejorar la orientación y la movilidad de personas con

discapacidad visual.

E. Hipótesis

Hipótesis general. La implementación de un casco inteligente basado en Arduino Nano y sensores ultrasónicos contribuirá de manera significativa a mejorar la detección de obstáculos durante el desplazamiento de personas con discapacidad visual, ofreciendo un potencial incremento en su seguridad y autonomía.

Hipótesis específica. La integración de sensores ultrasónicos con mecanismos de alerta auditiva y háptica permitirá identificar obstáculos en múltiples direcciones con mayor anticipación que el uso exclusivo del bastón blanco, reduciendo así el riesgo de colisiones durante el desplazamiento.

II. MARCO TEÓRICO

A. Antecedentes Internacionales

En el ámbito internacional se han desarrollado diversos dispositivos tecnológicos orientados a complementar los mecanismos convencionales de orientación y movilidad de las personas con discapacidad visual. Estas propuestas integran sensores ultrasónicos, microcontroladores, sistemas de posicionamiento y mecanismos de retroalimentación auditiva o háptica, con el objetivo de proporcionar información adicional sobre el entorno.

Entre los antecedentes, se destacan iniciativas como el desarrollo de bastones inteligentes que emplean sensores ultrasónicos y microcontroladores para identificar obstáculos y alertar al usuario mediante alarmas (2). También se han diseñado prototipos orientados a la detección de obstáculos situados fuera de la zona de exploración convencional del bastón, ampliando así la cobertura de movilidad (3). Asimismo, se han evaluado dispositivos como el Bastón Blanco Inteligente UAEM, que incorpora sensores ultrasónicos, alarmas, vibraciones y GPS, y cuya utilidad fue comprobada con la participación de personas con discapacidad visual severa y ceguera, resaltando la importancia de la retroalimentación auditiva y háptica (4).

Otros trabajos han explorado la integración de tecnologías IoT en dispositivos corporales, combinando sensores ultrasónicos, de proximidad y GPS conectados a plataformas digitales para ofrecer información táctil y auditiva en tiempo real (5). También se han desarrollado gafas electrónicas que generan alertas auditivas ante la presencia de obstáculos, planteándose como una alternativa portátil para complementar la percepción del entorno (6). Finalmente, se han propuesto guantes multifunción con tecnología háptica y entornos virtuales inmersivos, capaces de proporcionar retroalimentación táctil en tiempo real y evaluados en diferentes etapas de diseño e implementación (7).

B. Antecedentes Nacionales

A En el ámbito nacional peruano se han desarrollado proyectos que incorporan tecnología electrónica en dispositivos de asistencia para personas con discapacidad visual. Entre ellos se encuentra el "Bastón guía electrónico con sistema de detección de superficies", que integra módulos de identificación y alerta de obstáculos, con capacidad para emitir señales al usuario e informar a una persona de confianza cuando sea necesario. Este proyecto se ejecutó entre 2023 y 2025 con financiamiento institucional de S/ 2 500 (8). Asimismo, se registra el "Bastón inteligente multisensorial", orientado al diseño de un bastón con múltiples sensores, con un periodo de ejecución entre 2025 y 2027 y reconocido como proyecto de investigación institucional (9).

Estos antecedentes muestran que en el Perú existe interés por el desarrollo de dispositivos electrónicos de asistencia, aunque las propuestas se centran principalmente en bastones. En contraste, la presente investigación plantea una arquitectura portátil montada sobre un casco, con sensores ultrasónicos distribuidos estratégicamente para ampliar la zona de detección de obstáculos y ofrecer una alternativa distinta al bastón convencional.

C. Antecedentes Locales

En el ámbito local, correspondiente específicamente a la ciudad de Cajamarca, no se incorporará en esta versión una investigación externa como antecedente local sin contar con evidencia documental que confirme su ejecución en dicho contexto y su relación directa con la problemática estudiada.

Por ello, los antecedentes previamente identificados de la Universidad Privada del Norte se mantienen dentro de la categoría de antecedentes nacionales y no se presentan como antecedentes locales. Esta delimitación evita atribuir carácter local a investigaciones desarrolladas en otras ciudades del Perú. En consecuencia, el aporte específico de la presente investigación se plantea en el desarrollo y simulación de un sistema portátil basado en Arduino Nano y sensores ultrasónicos, considerando las condiciones de diseño establecidas para el prototipo propuesto.

D. Bases Teóricas

1. Discapacidad visual y movilidad.

La discapacidad visual limita la capacidad de una persona para percibir su entorno, lo que afecta directamente su movilidad y seguridad. En el desplazamiento cotidiano, las personas con esta condición enfrentan dificultades para detectar obstáculos, especialmente aquellos que no están al nivel del suelo o que se encuentran en movimiento.

El bastón blanco es la herramienta más utilizada para la orientación, pero su alcance es limitado, ya que depende del contacto físico directo con el entorno. Esto reduce el tiempo de reacción ante posibles peligros, lo que justifica el desarrollo de tecnologías complementarias.

2. Arduino Nano.

El Arduino Nano es una placa de desarrollo de reducidas dimensiones construida alrededor del microcontrolador

ATmega328P. Su popularidad en proyectos de electrónica embebida responde a tres factores principales: el tamaño compacto que facilita su integración en dispositivos portátiles, la curva de aprendizaje relativamente baja de su entorno de programación, y la amplia disponibilidad de librerías que simplifican la conexión con sensores y actuadores de distinto tipo.

TABLA I
COMPONENTES DE HARDWARE

N.°	Componente	Descripción	Cantidad
1	Arduino Nano	Microcontrolador principal del sistema	1
2	Sensor ultrasónico HC-SR04	Sensor para medición de distancia y detección de obstáculos	3–4
3	Motor de vibración	Sistema de alerta háptica para el usuario	2
4	Buzzer	Sistema de alerta auditiva	1
5	Casco	Estructura física para montaje del sistema	1
6	Cables jumper	Conexión entre componentes electrónicos	Según necesidad
7	Protoboard (opcional)	Montaje de prototipo electrónico	1

3. Sensor ultrasónico HC-SR04.

El principio de funcionamiento del HC-SR04 se basa en la emisión de un pulso ultrasónico que viaja por el aire hasta chocar con una superficie y regresar como eco; midiendo el intervalo transcurrido entre la emisión y la recepción, y conociendo la velocidad del sonido en el aire, es posible calcular con buena aproximación la distancia hasta el objeto que produjo el reflejo.

Su rango efectivo, de entre 2 y 400 cm aproximadamente, resulta apropiado para escenarios de proximidad como el que aquí se plantea. Por ello, el casco inteligente no incorpora un único sensor, sino varias unidades distribuidas en distintos puntos de la estructura, de manera que en conjunto cubran las zonas frontal, lateral y superior del usuario.

4. Motor de vibración (retroalimentación háptica).

El componente encargado de la retroalimentación táctil es un pequeño motor vibrador que se activa cada vez que el algoritmo determina la presencia de un obstáculo dentro de un rango de riesgo. La ventaja de este canal de aviso es que no compite con el sentido del oído del usuario: al variar la intensidad o el patrón de la vibración según la cercanía del objeto, es posible transmitir una noción de proximidad de forma intuitiva y sin depender en absoluto de la visión.

5. Buzzer (alerta auditiva).

Como refuerzo del canal háptico, el sistema incorpora un buzzer que emite señales sonoras cuando la distancia al obstáculo desciende por debajo de un umbral considerado crítico. Este segundo canal de aviso busca reducir la probabilidad de que una alerta pase inadvertida, sobre todo en los rangos de mayor cercanía, donde el tiempo de reacción disponible es menor.

6. Casco como estructura del sistema.

La elección de un casco como soporte físico no es incidental: al ubicar los sensores a la altura de la cabeza, el sistema gana acceso a un campo de detección que el bastón blanco, restringido al nivel del suelo, no puede cubrir. Obstáculos colgantes, salientes o ubicados a media altura típicamente invisibles para un bastón quedan así dentro del alcance del dispositivo propuesto.

7. Cables de conexión y prototipado.

Los cables jumper permiten la conexión entre sensores, actuadores y el microcontrolador. El uso de protoboard facilita el desarrollo del prototipo, permitiendo realizar pruebas y modificaciones antes de la implementación final.

III. METODOLOGÍA

A. Enfoque y tipo de investigación

La presente investigación se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, debido a que el desempeño del sistema propuesto fue evaluado mediante indicadores técnicos obtenidos a partir de simulaciones electrónicas y del análisis de su funcionamiento. Asimismo, corresponde a una investigación de tipo aplicada, debido a que busca desarrollar una solución tecnológica orientada a complementar la detección de obstáculos durante el desplazamiento de personas con discapacidad visual mediante el diseño de un casco inteligente de bajo costo.

El estudio presenta un alcance descriptivo y proyectivo. Es descriptivo porque caracteriza el funcionamiento de los componentes electrónicos que conforman el sistema y analiza su interacción dentro de la arquitectura propuesta. Es proyectivo porque desarrolla una solución tecnológica mediante un prototipo virtual y evalúa preliminarmente su comportamiento mediante simulación, sin considerar en esta etapa la construcción física del dispositivo ni pruebas con usuarios.

B. Diseño metodológico

La investigación se desarrolló mediante una metodología de diseño de sistemas embebidos compuesta por cinco etapas consecutivas:

1. Análisis del problema y definición de los requerimientos funcionales.
2. Selección de los componentes electrónicos considerando criterios de disponibilidad, costo, consumo energético y compatibilidad.
3. Diseño de la arquitectura electrónica y estructural del casco inteligente.
4. Desarrollo del algoritmo de funcionamiento para la detección de obstáculos y generación de alertas.

5. Simulación del comportamiento del sistema en el entorno Wokwi (wokwi.com), para verificar su funcionamiento bajo diferentes escenarios.

Esta metodología permitió validar el diseño propuesto antes de una posible implementación física.

C. Diseño del sistema propuesto

El sistema fue concebido siguiendo una arquitectura modular, permitiendo que cada componente cumpla una función específica dentro del proceso de detección de obstáculos. La arquitectura está conformada por cuatro módulos principales:

• Módulo de adquisición de datos: integrado por sensores ultrasónicos HC-SR04 encargados de medir continuamente la distancia entre el usuario y los obstáculos presentes en el entorno.

• Módulo de procesamiento: conformado por una placa Arduino Nano, responsable de recibir las señales provenientes de los sensores, procesarlas mediante un algoritmo de decisión y determinar el nivel de riesgo correspondiente.

• Módulo de retroalimentación: compuesto por un buzzer y un motor vibrador, encargados de emitir alertas auditivas y hápticas cuya intensidad depende de la proximidad del obstáculo detectado.

• Módulo de alimentación: constituido por una batería recargable que suministra energía a todos los componentes electrónicos del sistema.

La distribución de los sensores fue diseñada para ampliar el campo de percepción del usuario, permitiendo detectar obstáculos frontales, laterales y superiores que normalmente no son identificados por un bastón convencional.

D. Modelado y simulación del sistema

El comportamiento del circuito electrónico y la lógica de control del casco inteligente fueron validados digitalmente en el entorno de simulación Wokwi, modelando escenarios de aproximación de obstáculos sin necesidad de un prototipo físico. La simulación reprodujo el flujo completo de operación: emisión y recepción de pulsos ultrasónicos, cálculo de distancias por el Arduino Nano, comparación con umbrales definidos y activación automática de alertas auditivas y hápticas ante riesgos potenciales, garantizando un monitoreo continuo en tiempo real. La arquitectura del sistema integra un microcontrolador, sensores ultrasónicos, mecanismos de retroalimentación sonora y vibratoria, y una fuente recargable.

Para ampliar el campo de detección, se propone la disposición de tres sensores: uno frontal para obstáculos al frente, uno lateral izquierdo y otro lateral derecho para objetos próximos en cada costado, logrando cubrir zonas que el bastón blanco convencional no detecta. Durante el desplazamiento, los sensores registran el tiempo de retorno del eco y el microcontrolador calcula la distancia; cuando esta se encuentra dentro del rango establecido, se activan las alertas auditivas y/o vibraciones cuya intensidad varía según la proximidad del obstáculo.

E. Materiales y equipos utilizados

Los componentes fueron seleccionados considerando criterios de disponibilidad comercial, facilidad de integración, bajo consumo energético y costo accesible.

TABLA II

MATERIALES, ESPECIFICACIONES TÉCNICAS Y COSTO DEL PROTOTIPO

Componente	**Cant.**	**Especificación técnica**	**Función**	**Costo unit. (S/.)**
Arduino Nano	1	ATmega328P, 5 V	Procesamiento y control	22
Sensor ultrasónico HC-SR04	3	Alcance: 2–400 cm	Detección de obstáculos	8 c/u
Motor vibrador tipo moneda	2	3–5 V	Alertas hápticas	9.5 c/u
Buzzer activo	1	5 V	Alertas auditivas	3
Batería recargable	1	5 V	Alimentación del sistema	12
Interruptor	1	ON/OFF	Encendido y apagado	1.5
Protoboard/ cables jumper	1-Set	Conexión rápida	Integración electrónica	—
Casco de seguridad adaptado	1	Material plástico ligero	Soporte físico	8
Arduino IDE	1	Software libre	Programación	0

Balance financiero. El costo total proyectado del prototipo asciende a S/. 89,50, incluyendo el Arduino Nano, tres sensores HC-SR04, dos motores vibradores, buzzer, batería recargable, interruptor y casco adaptado. Si se consideran únicamente los componentes electrónicos, el valor es de S/. 81,50, y al excluir además la batería, el costo de los elementos principales de detección, procesamiento y alerta se reduce a S/. 69,50. El protoboard y los cables jumper no fueron contabilizados por corresponder a elementos de simulación.

La estimación económica refleja únicamente el costo de los con dispositivos comerciales que integran tecnologías y procesos distintos. La elección de los componentes se fundamenta en criterios de disponibilidad, bajo costo y funcionalidad: el Arduino Nano por su tamaño compacto y facilidad de programación, los sensores HC-SR04 por su precisión y accesibilidad, los motores vibradores para retroalimentación háptica y el buzzer como complemento auditivo.

F. Diseño e integración del sistema

La integración electrónica del sistema se realizó conectando los sensores ultrasónicos HC-SR04 a los pines digitales del Arduino Nano mediante Trigger y Echo, mientras que los motores vibradores y el buzzer fueron vinculados a salidas independientes para generar distintos patrones de alerta. La batería recargable se conectó al circuito a través de un interruptor principal, asegurando el suministro de energía y el control de encendido.

De esta forma, cada componente quedó integrado en la obstáculos, el procesamiento de datos y la activación de

Programación del sistema.

El sistema fue programado en Arduino IDE utilizando lenguaje C/C++, ejecutando de manera continua la lectura de distancias registradas por los sensores, la comparación con umbrales definidos, la determinación del nivel de riesgo y la activación de alertas auditivas y/o hápticas, reiniciando luego el ciclo de monitoreo.

Algoritmo de funcionamiento.

El algoritmo establece cuatro niveles de funcionamiento: sin alerta para distancias mayores a 200 cm; vibración leve entre 100 y 200 cm; vibración moderada con sonido intermitente entre 50 y 100 cm; y vibración intensa con sonido continuo para distancias menores a 50 cm, garantizando una retroalimentación proporcional al riesgo detectado.

G. Procedimiento de simulación

El desempeño del prototipo virtual se evaluó mediante una prueba piloto en el entorno de simulación Wokwi, considerando tres escenarios representativos (pasillo interior, espacio abierto y circuito con obstáculos). Los obstáculos fueron ubicados a distancias de 20, 50, 100, 150 y 200 cm, con cinco repeticiones por cada condición.

Las pruebas se realizaron bajo condiciones controladas: obstáculos fijos, aproximación simulada a velocidad lenta, ambiente ideal del simulador y funcionamiento continuo del sistema, registrando los valores detectados para analizar precisión, tiempo de respuesta y activación de alertas.

H. Variables e indicadores

Variable independiente: implementación del casco inteligente basado en Arduino Nano.

Variables dependientes: Distancia detectada, tiempo de respuesta, activación de alertas y precisión del sistema.

Indicadores de desempeño: Distancia detectada (cm), tiempo de respuesta (ms), error porcentual (%), detección correcta (%) y activación de alertas (correcta/incorrecta).

I. Análisis estadístico

Los datos obtenidos durante las pruebas de simulación fueron registrados en hojas de cálculo para su posterior análisis mediante estadística descriptiva. El porcentaje de error fue calculado mediante la siguiente expresión:

$$\text{Error (\%)} = |\text{Distancia real} - \text{Distancia detectada}| / \text{Distancia real} \times 100$$

Asimismo, se determinó el tiempo promedio de respuesta del sistema y el porcentaje de detección correcta utilizando la relación entre el número de detecciones exitosas y el total de pruebas realizadas en el simulador. Los resultados se presentan mediante tablas y gráficos comparativos, que permiten analizar el comportamiento del casco inteligente en cada escenario evaluado y determinar su viabilidad técnica como una alternativa tecnológica para mejorar la seguridad y movilidad de las personas con discapacidad visual.

IV. RESULTADOS

Con el fin de evaluar el desempeño del casco inteligente, se realizaron pruebas piloto dentro del entorno de simulación Wokwi, en condiciones controladas simuladas y utilizando obstáculos virtuales fijos ubicados a diferentes distancias. Se analizaron indicadores relacionados con la precisión en la detección, el tiempo de respuesta del sistema, el funcionamiento de las alertas multisensoriales y la efectividad general del prototipo virtual.

1. Precisión en la detección de obstáculos.

La Tabla III presenta la comparación entre la distancia real del obstáculo virtual y la distancia promedio registrada por el sistema durante las pruebas de simulación.

TABLA III.
DISTANCIA REAL Y DISTANCIA DETECTADA POR EL SISTEMA

Distancia real (cm)	Distancia detectada promedio (cm)	Error (%)
20	19,6	2,0
50	49,2	1,6
100	98,8	1,2
150	147,4	1,7
200	196,8	1,6

Los resultados muestran que el casco inteligente registró una elevada precisión en la medición de distancias, presentando un error porcentual inferior al 2 % en todos los ensayos realizados. El menor error se obtuvo a 100 cm (1,2 %), mientras que el mayor correspondió a la distancia de 20 cm (2,0 %). Estos hallazgos evidencian la estabilidad del sistema, en el entorno de simulación, dentro del rango operativo establecido.

2. Tiempo de respuesta del sistema.

Se registró el tiempo transcurrido, dentro del simulador, entre la detección del obstáculo y la activación de la alerta correspondiente.

TABLA IV

TIEMPO PROMEDIO DE RESPUESTA

Distancia (cm)	Tiempo promedio (ms)
20	145
50	142
100	139
150	141
200	146

El tiempo promedio de respuesta del sistema simulado fue de 143 ms, lo que sugiere que, de replicarse en un prototipo físico, el sistema podría emitir alertas oportunas antes de que el usuario alcanzara el obstáculo. La baja variación observada entre las diferentes distancias evaluadas demuestra un comportamiento uniforme del sistema durante su funcionamiento en el simulador.

3. Funcionamiento de las alertas multisensoriales.

El casco inteligente fue programado para generar distintos niveles de alerta en función de la proximidad del obstáculo detectado, con el propósito de facilitar la interpretación del riesgo por parte del usuario.

TABLA V

COMPORTAMIENTO DE LAS ALERTAS MULTISENSORIALES

Distancia detectada	Vibración	Alerta sonora
> 200 cm	No	No
100 – 200 cm	Leve	No
50 – 100 cm	Moderada	Intermitente
< 50 cm	Intensa	Continua

Durante las pruebas realizadas en el simulador, el sistema activó correctamente las alertas establecidas para cada rango de distancia, permitiendo diferenciar el nivel de proximidad del obstáculo y favoreciendo una respuesta anticipada ante situaciones de riesgo.

4. Porcentaje de detección correcta.

Para determinar la efectividad del prototipo virtual se realizaron cinco repeticiones por cada distancia evaluada, obteniéndose un total de 25 mediciones en el entorno de simulación.

TABLA VI

EFECTIVIDAD DE DETECCIÓN DEL SISTEMA

Distancia (cm)	Mediciones realizadas	Detecciones correctas	Efectividad (%)
20	5	5	100
50	5	5	100
100	5	5	100
150	5	5	100
200	5	5	100

La efectividad global del sistema simulado alcanzó el 100 % en condiciones controladas, evidenciando la capacidad del algoritmo del casco inteligente para detectar correctamente los obstáculos virtuales ubicados dentro del rango de evaluación establecido.

5. Resultados generales.

Los resultados obtenidos indican que el casco inteligente presentó un desempeño satisfactorio durante la fase de simulación. El sistema fue capaz de detectar obstáculos virtuales ubicados entre 20 y 200 cm con un bajo porcentaje de error, tiempos de respuesta inferiores a 150 ms y una activación adecuada de las alertas auditivas y hápticas. En conjunto, estos hallazgos sugieren que la propuesta desarrollada constituye una alternativa tecnológica prometedora para complementar la movilidad de personas con discapacidad visual, si bien su capacidad real para proporcionar información inmediata sobre la presencia de obstáculos y contribuir a una respuesta más segura durante el desplazamiento deberá confirmarse mediante la construcción de un prototipo físico y pruebas con usuarios.

V. DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos mediante simulación muestran que el sistema diseñado permitió detectar obstáculos virtuales dentro del rango de 20 a 200 cm, con errores porcentuales inferiores al 2 % en las distancias evaluadas. Asimismo, el tiempo promedio de respuesta registrado en el entorno simulado fue de 143 ms. Estos resultados describen el comportamiento del algoritmo y de la arquitectura electrónica bajo las condiciones específicas establecidas en Wokwi y, por tanto, no deben interpretarse como una validación del desempeño del dispositivo en condiciones reales.

Los resultados presentan relación con el trabajo de Acosta Parra y Mena Mafla [4], quienes desarrollaron un dispositivo

electrónico integrado a un bastón tradicional para detectar obstáculos superiores mediante un sensor ultrasónico. Su prototipo generaba una alerta vibratoria ante obstáculos ubicados aproximadamente a 120 cm y fue evaluado mediante pruebas de aceptación, manipulación y desplazamiento. La presente investigación se diferencia de dicho antecedente porque plantea una arquitectura basada en múltiples sensores distribuidos sobre un casco y evalúa inicialmente su comportamiento mediante simulación electrónica.

Asimismo, existe correspondencia con el trabajo de Memon et al. [5], quienes desarrollaron un bastón inteligente basado en sensores ultrasónicos, Arduino y Raspberry Pi, con señales de alerta para informar al usuario sobre obstáculos y otros elementos del entorno. Los autores reportaron una capacidad de detección de obstáculos de aproximadamente 2 m y realizaron pruebas de precisión. En comparación, el presente estudio evalúa mediante simulación distancias comprendidas entre 20 y 200 cm y analiza adicionalmente el comportamiento de alertas auditivas y hápticas dentro de una arquitectura diferente.

La incorporación de retroalimentación auditiva y háptica también presenta relación con el estudio de Trujillo Mora et al. [6], quienes evaluaron un bastón inteligente equipado con sensores ultrasónicos, alarmas, vibraciones y GPS mediante la participación de 20 adultos con discapacidad visual severa y ceguera. Dicho antecedente proporciona evidencia de que los mecanismos de vibración y sonido pueden formar parte de dispositivos de asistencia evaluados con usuarios. No obstante, la presente investigación no realizó pruebas con personas, por lo que no es posible afirmar que las alertas diseñadas produzcan una mejora real en la movilidad, seguridad o autonomía.

Los antecedentes de Cayambe Gamarra [7], Colcha Ulcuango [8] y Morocho Ponce [9] muestran diferentes formas de integrar tecnologías de percepción y retroalimentación en dispositivos portátiles dirigidos a personas con discapacidad visual. Estas propuestas utilizan, respectivamente, sensores y GPS en un dispositivo corporal, alertas auditivas en gafas electrónicas y retroalimentación háptica mediante un guante multifunción. La presente investigación comparte con estos trabajos el empleo de tecnología portátil y mecanismos alternativos de comunicación, pero se concentra en la detección ultrasónica de obstáculos mediante Arduino Nano y en su evaluación preliminar mediante simulación.

En conjunto, los resultados obtenidos respaldan la viabilidad técnica preliminar de la arquitectura propuesta bajo las condiciones simuladas. Sin embargo, la simulación no permite determinar la comodidad del casco, la autonomía energética, la robustez frente a condiciones ambientales, la interferencia entre sensores, la respuesta ante obstáculos móviles ni la aceptación por parte de personas con discapacidad visual.

Por ello, una etapa posterior deberá comprender la construcción de un prototipo físico y su evaluación mediante un protocolo experimental apropiado. Esta etapa permitirá determinar si los resultados obtenidos en simulación se mantienen bajo condiciones reales de funcionamiento.

VI. CONCLUSIONES

1. Se validó mediante simulación un casco inteligente basado en Arduino Nano y sensores HC-SR04, demostrando viabilidad técnica preliminar, aunque sin evidencia aún de impacto real en la movilidad o seguridad de usuarios con discapacidad visual.

2. Se diseñó la arquitectura electrónica y estructural con Arduino Nano, tres sensores ultrasónicos, motores vibradores, buzzer y batería recargable, distribuidos en zonas frontal y laterales, seleccionados por su compatibilidad, disponibilidad y bajo costo.

3. Se implementó la lógica de control para procesar señales ultrasónicas y activar alertas. En 25 pruebas simuladas se obtuvo una efectividad del 100 %, confirmando el correcto funcionamiento del algoritmo en condiciones controladas, sin extrapolación directa a un prototipo físico.

4. Se configuró un sistema de retroalimentación multisensorial con cuatro niveles de alerta (sin señal, vibración leve, vibración moderada con sonido intermitente y vibración intensa con sonido continuo). Su utilidad práctica deberá comprobarse en pruebas de usabilidad con usuarios reales.

5. El sistema presentó errores de medición entre 1,2 % y 2,0 % y un tiempo promedio de respuesta de 143 ms, resultados que verifican su desempeño en simulación, pero no constituyen una validación en condiciones reales.

6. Se determinó una viabilidad técnica y económica preliminar, con un costo de S/. 69,50 para los componentes principales y S/. 89,50 en total. La comparación con otras tecnologías de asistencia requiere criterios equivalentes y pruebas físicas que evalúen precisión, autonomía, comodidad y aceptación de usuarios.

REFERENCIAS

[1] World Health Organization, “Blindness and vision impairment,” World Health Organization, Feb. 10, 2026. WHO – Blindness and vision impairment

[2] World Health Organization and United Nations Children’s Fund, Global Report on Assistive Technology. Geneva, Switzerland: World Health Organization, 2022. WHO/UNICEF – Global Report on Assistive Technology

[3] Instituto Nacional de Estadística e Informática, Perú: Características de la población con discapacidad. Lima, Perú: INEI, 2015. INEI –Características de la población con discapacidad

[4] D. R. Acosta Parra and J. M. Mena Mafla, “Prototipo para la detección de obstáculos superiores a la capacidad de rastreo de ayuda a personas con discapacidad visual,” Project Report, Universidad de Nariño, Pasto, Colombia, 2016. Repositorio Universidad de Nariño

[5] S. Memon, M. M. Aamir, S. Ur Rehman, H. Mustafa, and M. S. Sheikh, “Enhanced Mobility Aid for the Visually Impaired: An Ultrasonic Sensor and Arduino-Based Smart Walking Stick,” Memoria Investigaciones en Ingeniería, no. 28, pp. 20–31, 2025, doi: 10.36561/ING.28.3. Artículo de Memon et al.

[6] V. Trujillo Mora, E. I. González Jaimes, A. López Chau, and J. Bautista López, “Análisis de la utilidad del Bastón Blanco Inteligente UAEM para personas con discapacidad visual,” RIDE. Revista Iberoamericana para la Investigación y el Desarrollo Educativo, vol. 11, no. 22, e045, 2021, doi: 10.23913/ride.v11i22.897. Artículo en SciELO

[7] F. A. Cayambe Gamarra, “Diseño e implementación de un prototipo de ubicación espacial para personas con discapacidad visual mediante IOT,” trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, 2025. Repositorio Universidad Politécnica Salesiana

[8] J. Colcha Ulcuango, “Desarrollo de un prototipo de gafas para personas con discapacidad visual,” Penságora MD, vol. 3, no. 1, 2025. Artículo de Colcha Ulcuango

[9] R. J. Morocho Ponce, “Guante multifunción con entorno virtual inmersivo y comunicación háptica para personas con discapacidad visual,” trabajo de titulación, Universidad Politécnica Salesiana, 2025. Repositorio Universidad Politécnica Salesiana

[10] Universidad Privada del Norte S.A.C., “Bastón guía electrónico para personas con discapacidad visual con un sistema de detección de superficies,” proyecto de investigación, 2023–2025. Proyecto de investigación UPN

[11] Arduino, “Arduino Nano,” Arduino Documentation. Arduino Nano – documentación oficial

[12] ElecFreaks, “Ultrasonic Ranging Module HC-SR04,” datasheet, 2020. Ficha técnica HC-SR04