

Performance analysis and characterization of a Bluetooth 5.0 architecture for the mobility of visually impaired people

José Urane¹; Evelisse Osorio¹; José Muñoz¹; Edwin Collado^{1,2} ; Héctor Montes^{1,3} ; Yessica Saez^{1,2,*} 

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, Facultad de Eléctrica, Panamá {jose.urane, evelisse.osorio, jose.munoz9, edwin.collado, hector.montes1, yessica.saez}@utp.ac.pa

²Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP), Panamá

³Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI), Panamá

*Corresponding author: yessica.saez@utp.ac.pa

Abstract – Assistive technologies for people with visual impairments (PwVI) face critical wireless connectivity challenges in both urban and rural environments. This study presents the technological evolution of systems previously developed by this research group, transitioning from a radio frequency architecture within the ISM band to an architecture based on Bluetooth 5.0 technology. Unlike solutions dependent on network infrastructure, the proposed system relies on a decentralized architecture of three modules (ETA, STOP, and BUS), optimized for the autonomous navigation of PwVI within public transportation. The core of this research focuses on the experimental characterization of the propagation channel through the monitoring and analysis of Received Signal Strength Indicator (RSSI) stability and latency via Round-Trip Time (RTT). The results demonstrate that the implementation of Bluetooth 5.0, enhanced by the use of high-density integration microcontrollers, not only significantly reduces signal variance but also led to a reduction of over 60% in the surface area of the implemented electronic boards. The integration of PCB antennas constitutes a critical aspect of the system design, as it contributes to cost reduction and increases robustness against multipath interference. The new system enables more precise localization and superior scalability, contributing to the improvement of inclusive mobility for PwVI in environments with limited connectivity.

Keywords– Bluetooth Low Energy (BLE), channel characterization, visual impairment, assistive navigation, RSSI.

Análisis de desempeño y caracterización de una arquitectura Bluetooth 5.0 para la movilidad de personas con discapacidad visual

José Urane¹; Evelisse Osorio¹; José Muñoz¹; Edwin Collado^{1,2}; Héctor Montes^{1,3}; Yessica Saez^{1,2,*}

¹Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, Facultad de Eléctrica, Panamá {jose.urane, evelisse.osorio, jose.munoz9, edwin.collado, hector.montes1, yessica.saez}@utp.ac.pa

²Centro de Estudios Multidisciplinarios en Ciencias, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP), Panamá

³Centro de Investigación e Innovación Eléctrica, Mecánica y de la Industria (CINEMI), Panamá

*Corresponding author: yessica.saez@utp.ac.pa

Resumen—Las tecnologías de asistencia para personas con discapacidad visual (PcDV) enfrentan desafíos críticos de conectividad inalámbrica en entornos urbanos y rurales. Este estudio presenta la evolución tecnológica de sistemas previamente desarrollados por el grupo de investigación, basados en una arquitectura de radiofrecuencia dentro de la banda ISM a una arquitectura basada en la tecnología Bluetooth 5.0. A diferencia de las soluciones dependientes de una infraestructura de red, el sistema propuesto se basa en una arquitectura descentralizada de tres módulos (ETA, STOP y BUS), optimizada para la navegación autónoma de PcDV en el transporte público. El núcleo de la investigación se centra en una caracterización experimental del canal de propagación, mediante la monitorización y análisis de la estabilidad de la intensidad de señal recibida (RSSI) y la latencia mediante el tiempo de ida y vuelta (RTT). Los resultados demuestran que la implementación de Bluetooth 5.0, potenciada por el uso de microcontroladores de alta densidad de integración, no solo reduce significativamente la varianza de la señal, sino que dio lugar a reducir en más del 60% el área de las placas electrónicas implementadas. La integración de las antenas en el PCB constituye un aspecto crítico en el diseño del sistema, dado que influye en la reducción de costos y en el incremento de la robustez frente a interferencias multicamino. El nuevo sistema permite una localización más precisa y una escalabilidad superior, que contribuye a mejorar la movilidad inclusiva de PcDV en entornos de conectividad limitada.

Palabras clave— Bluetooth Low Energy (BLE), caracterización del canal, discapacidad visual, navegación asistida, RSSI.

I. INTRODUCCIÓN

La movilidad es un derecho fundamental que permite a las personas acceder a oportunidades vitales como la educación, el empleo, la salud y la recreación. No obstante, las personas con discapacidad visual (PcDV) enfrentan barreras significativas que limitan su capacidad para desplazarse de manera segura e independiente, especialmente al utilizar el transporte público. Esta limitación repercute negativamente en su inclusión social y calidad de vida, y se asocia además con mayores índices de desempleo y prevalencia de trastornos emocionales, como la depresión y la ansiedad [1].

De acuerdo con la Organización Mundial de la Salud (OMS), más de 2,200 millones de personas en el mundo presentan algún grado de deterioro visual [1]. En Panamá, el Instituto Nacional de Estadística y Censo reporta que aproximadamente 24,578 personas conviven con discapacidad

visual [2], evidenciando la necesidad imperante de desarrollar estrategias y tecnologías que promuevan su inclusión y movilidad. Aunque existen agrupaciones y organismos gubernamentales como la Secretaría Nacional de Discapacidad (SENADIS) y el Instituto Panameño de Rehabilitación Especial (IPHE) y demás entidades vinculadas, las PcDV continúan enfrentando retos importantes al desplazarse fuera de sus entornos familiares, particularmente en contextos urbanos y sistemas de transporte público que evidencian deficiencias estructurales en accesibilidad y adecuación funcional.

En los últimos años, la accesibilidad ha ganado importancia científica, impulsando el desarrollo de tecnologías orientadas a mejorar la autonomía y movilidad de las PcDV. Los sistemas embebidos se destacan como soluciones clave, integrando sensores, interfaces adaptativas y algoritmos inteligentes en dispositivos portátiles y accesibles.

Diversos enfoques han sido propuestos con base en tecnologías inalámbricas y procesamiento en tiempo real. Por ejemplo, Martínez Cruz et al. [3] desarrollaron un sistema de navegación exterior utilizando BLE (Bluetooth Low Energy, por sus siglas en inglés), con balizas instaladas en vehículos y paradas que interactúan con una aplicación móvil para proporcionar instrucciones verbales. La eficacia del sistema fue validada en entornos reales, demostrando su potencial para mejorar la movilidad urbana.

En una línea complementaria, Ashiq et al. [4] introdujeron un sistema de asistencia basado en comandos de voz automatizados, sustentado en una arquitectura *MobileNet* optimizada para dispositivos de bajo rendimiento, junto con una red neuronal convolucional (*Convolutional Neural Network*, o CNN por sus siglas en inglés) para el reconocimiento preciso de objetos. Su propuesta incluye una aplicación web para monitoreo remoto por familiares, manteniendo la privacidad del usuario. Los resultados de estudios piloto evidenciaron mejoras sustanciales frente a alternativas convencionales.

No obstante, persisten limitaciones técnicas que restringen la efectividad de algunas soluciones existentes. García Ornelas y Vázquez Espínola [5] destacaron la dependencia de los sistemas basados exclusivamente en GPS, cuya precisión puede verse afectada por márgenes de error considerables, comprometiendo la navegación en entornos

urbanos densos. Además, la falta de datos contextuales como altitud o características del entorno reduce su aplicabilidad práctica, lo que ha motivado la integración de tecnologías auxiliares más robustas.

En este marco, en Yessica et al. [6] se propone una solución contextualizada a los desafíos específicos de la movilidad asistida. Los autores proponen desarrollos tecnológicos orientados a fortalecer la autonomía de las PcDV mediante la integración de aplicaciones móviles y dispositivos electrónicos basados en radiofrecuencia (RF) que operan en la banda ISM (*Industrial, Scientific, and Medical*) de corto alcance (902 - 928 MHz). Esta arquitectura ha permitido prescindir de la conectividad permanente a internet, lo que ha habilitado sistemas de asistencia más robustos, sostenibles y adaptables a la variabilidad de los entornos urbanos [6].

Bajo este enfoque, se diseñaron prototipos funcionales basados en una arquitectura distribuida de módulos electrónicos interconectados inalámbricamente. Estos componentes operan en sinergia a través de estaciones de autobuses, vehículos y paradas, integrando al usuario en un ecosistema interoperable adaptado a entornos reales de movilidad (ver Fig. 1).

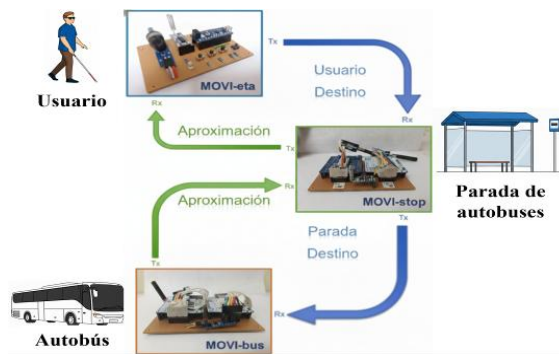


Fig. 1. Arquitectura funcional de la interacción de los dispositivos propuestos en [6].

El sistema propuesto en [6] (ver Fig. 1) consta de tres módulos, los cuales se describen a continuación:

- **MOVI-eta.** Nodo portátil basado en el microcontrolador ATmega328P, integrado con el módulo inalámbrico HC-12 (433 MHz). Permite al usuario seleccionar un destino a través de una interfaz accesible y transmitir la solicitud (flecha azul superior en la Fig. 1) al nodo intermedio MOVI-stop. Incorpora, además, un sistema de retroalimentación auditiva que indica la proximidad del vehículo a la parada (flecha verde superior en la Fig. 1).
- **MOVI-stop.** Nodo intermedio conformado por dos microcontroladores, dos transceptores TI CC1101 en modo semidúplex y un módulo HC-12. Su función es recibir las solicitudes del MOVI-eta y retransmitirlas a los vehículos cercanos (MOVI-bus), actuando como un enlace de comunicación bidireccional entre el usuario y el vehículo. La separación funcional de transmisión y recepción se implementa mediante transceptores

dedicados en un esquema de comunicación por proximidad.

- **MOVI-bus.** Nodo abordó del autobús, integrado por dos microcontroladores y dos transceptores TI CC1101. Recibe las solicitudes retransmitidas por el nodo MOVI-stop (flecha azul inferior en la Fig. 1) y emite una notificación sonora al conductor, seguida de una respuesta oportuna conforme el vehículo se aproxima a la parada (flecha verde inferior en la Fig. 1). Funciona como el eslabón final del sistema de notificación.

En este artículo se presenta una nueva versión del sistema descrito en los párrafos anteriores, en donde se optimiza el diseño y la funcionalidad del sistema, evolucionando hacia prototipos más robustos, compactos y eficientes mediante la miniaturización y la integración de un radioenlace de mayor rendimiento y estabilidad.

Esta evolución se analiza a través de un estudio técnico comparativo entre ambas generaciones de prototipos, centrado en la evaluación del desempeño del sistema de comunicación y de las características físicas del diseño, con el objetivo de determinar su viabilidad tecnológica, adecuación funcional y potencial de escalabilidad bajo condiciones de prueba controladas, identificando tanto sus fortalezas como sus limitaciones.

II. MARCO TEÓRICO

El sistema propuesto en este artículo representa una evolución de un prototipo previo que operaba en la banda de 902 MHz, migrado a la tecnología Bluetooth en 2.4 GHz para evaluar su desempeño como alternativa de comunicación inalámbrica. La caracterización del enlace se basa en dos métricas principales: la intensidad de la señal recibida (RSSI) y el tiempo de ida y vuelta de la señal (RTT), empleadas como indicadores de la estabilidad del enlace y del desempeño temporal. En las secciones siguientes se presenta el fundamento conceptual de estos indicadores, que sustenta la metodología experimental y los resultados.

A. Sistema de comunicación

El sistema propuesto utiliza un enlace de comunicación inalámbrica basado en la tecnología Bluetooth 5.0/BLE, la cual también es un estándar que opera en la banda ISM, al igual que los desarrollos previos. Sin embargo, en este caso, el sistema se implementa en el rango de frecuencias entre 2400-2483.5 MHz. Utiliza técnicas de espectro ensanchado por salto de frecuencia (*Frequency Hopping Spread Spectrum*, FHSS, por sus siglas en inglés) para minimizar interferencias y mejorar la robustez de la señal [7].

Este sistema organiza su arquitectura mediante perfiles, servicios y características estructurados según el modelo GATT (*Generic Attribute Profile*). Cada entidad funcional es identificada mediante un identificador único universal (UUID, por sus siglas en inglés *Universally Unique Identifier*), que es un valor estandarizado de 128 bits que permite distinguir de manera inequívoca cada servicio o característica dentro de la red. Esta estructura facilita una implementación modular,

escalable y flexible, en la cual los dispositivos pueden actuar como servidores, clientes o ambos, intercambiando datos a través de servicios compuestos por características configurables [8].

Bluetooth 5.0 introdujo avances sustanciales en el alcance de la comunicación inalámbrica, destacando el modo LE Coded PHY (*Low Energy Coded Physical Layer*), el cual emplea técnicas de codificación que extienden la distancia de transmisión sin requerir un incremento en la potencia de emisión. En condiciones ideales, puede alcanzar hasta 400 metros, aunque este valor depende de factores como la densidad de obstáculos, las condiciones climáticas y la sensibilidad del receptor. Este modo opera a velocidades de 125 o 500 kbps, utilizando redundancia y corrección de errores para mejorar la robustez del enlace. Tales características lo hacen especialmente adecuado para aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT) y escenarios con infraestructura limitada [9], [10].

B. Métricas de evaluación

1) Indicador de la intensidad de la señal recibida (RSSI). Este indicador se utiliza para evaluar las ventajas y limitaciones inherentes a la tecnología de comunicación por RF. Este parámetro cuantifica la potencia de la señal captada por un receptor, expresada en decibelios miliwatt (dBm), proporcionando una referencia objetiva sobre la calidad de la conexión [11].

En este contexto, los valores negativos de RSSI más cercanos a cero indican una señal más intensa. Esta métrica es clave para optimizar el sistema, permitiendo ajustes precisos en la ubicación de módulos y potencia de transmisión para maximizar la robustez y estabilidad del enlace.

2) Indicador del tiempo de ida y vuelta (RTT). Este parámetro es fundamental en el ámbito de las telecomunicaciones y las redes, ya que cuantifica el intervalo temporal requerido para que un paquete de datos viaje desde un emisor hacia un receptor y regrese al punto de origen [12].

En sistemas de comunicación por RF, el RTT se emplea como indicador clave para evaluar la latencia y el desempeño del enlace inalámbrico. Durante este proceso, las señales electromagnéticas transmitidas atraviesan el medio ambiente, donde fenómenos como reflexiones, refracciones y atenuación pueden influir en el tiempo total de propagación, afectando así la magnitud del RTT [13].

Un RTT reducido agiliza la transferencia de datos entre nodos, optimizando respuestas y mejorando la experiencia del usuario. Por ello, su caracterización y optimización son clave para la eficiencia y fiabilidad de las redes inalámbricas.

Las métricas RSSI y RTT se seleccionaron por su relación directa con la estabilidad del enlace y la percepción funcional del sistema por parte del usuario. Otras métricas de red, como la tasa de error de paquetes o el ruido por fluctuación por retardo (*jitter*), en el sistema propuesto en este artículo, se consideran de menor impacto en esta etapa, dado que el sistema opera con mensajes cortos, confirmados y de baja frecuencia.

III. MATERIALES Y MÉTODOS

Se implementó una arquitectura distribuida de nodos inalámbricos programados para la adquisición continua de las métricas RSSI y RTT. La evaluación se realizó mediante un protocolo experimental definido, orientado a la caracterización del enlace de comunicación y a garantizar la consistencia y reproducibilidad de las mediciones. Las secciones siguientes presentan los materiales y métodos empleados para el desarrollo y la validación del sistema.

A. Descripción del sistema

La arquitectura del sistema se basa en la tecnología Bluetooth 5.0, seleccionada como núcleo de comunicación por su eficiencia y alcance mejorado. El firmware fue desarrollado en el entorno Arduino IDE, mientras que la adquisición y el registro masivo de datos se realizó mediante Microsoft Excel, empleando los complementos COM y *Data Streamer* para la monitorización de los indicadores de la señal en tiempo real. Es importante destacar que el cálculo del RTT fue ejecutado internamente por el microcontrolador mediante temporizadores de alta precisión, para considerar que la comunicación fue realizada en tiempo real. La interfaz implementada en Excel se utilizó exclusivamente para el almacenamiento y la visualización de las métricas reportadas por los nodos de comunicación.

Los módulos MOVI-stop y MOVI-bus fueron concebidos para monitorear dos parámetros críticos: RSSI y RTT. Esta fase experimental se centró en evaluar la conectividad y el intercambio de datos entre los nodos MOVI-eta, MOVI-stop y MOVI-bus, replicando las pruebas realizadas en la primera versión del sistema.

Para asegurar un diseño compacto y manipulable, se desarrollaron placas de circuito impreso (PCB) de prueba y carcasas mediante impresión 3D para cada módulo, cuyo proceso de diseño y prototipado se presenta en la Fig. 2. Todos estos prototipos se construyeron sobre el microcontrolador Seeed Studio XIAO ESP32C3, que incorpora conectividad Bluetooth 5.0/BLE de forma nativa.

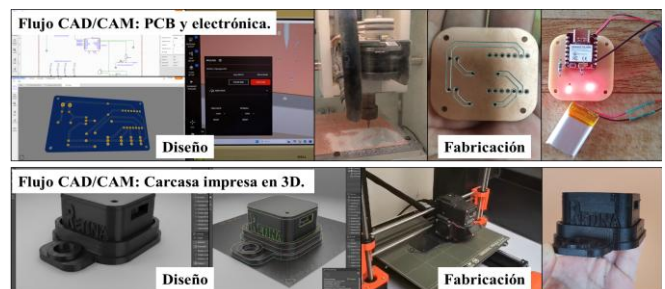


Fig. 2. Flujo CAD/CAM de las PCB de prueba y carcasas.

Partiendo de la descripción general del sistema, se describe a continuación la arquitectura electrónica y los principios operativos de cada prototipo desarrollado.

1) *MOVI-eta*: es un dispositivo que porta la PcDV y cuyo PCB ensamblado se muestra en la Fig. 3. Integra un sistema de selección basado en tres interruptores cuya codificación binaria permite elegir entre ocho destinos predefinidos, junto con un botón de confirmación y un LED indicador empleado durante la fase experimental, como indicador para los diseñadores. La retroalimentación se implementa mediante un actuador lineal resonante que proporciona señales hápticas. Adicionalmente, incorpora un interruptor para definir la dirección del desplazamiento del usuario, ya sea de ida o retorno.

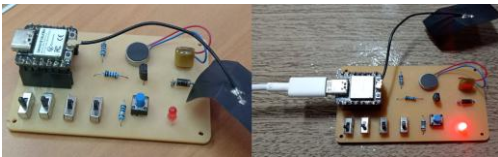


Fig. 3. Prototipo del dispositivo MOVI-eta.

2) *MOVI-stop*: dispositivo ilustrado en la Fig. 4, actúa como nodo intermediario encargado de gestionar las solicitudes del MOVI-eta y retransmitirlas al nodo MOVI-bus. Este nodo establece una comunicación bidireccional con ambos dispositivos, asegurando una transmisión de datos confiable y eficiente. Además, el MOVI-stop funciona como punto de referencia dentro del sistema de comunicación.



Fig. 4. Prototipo del dispositivo MOVI-stop.

3) *MOVI-bus*: dispositivo instalado en el vehículo y representado en la Fig. 5. Este recibe las solicitudes transmitidas por el MOVI-stop y activa una señal acústica mediante un zumbador para alertar al conductor. De forma simultánea, emite una confirmación de recepción al usuario, retransmitida a través del mismo nodo intermedio.



Fig. 5. Prototipo del dispositivo MOVI-bus.

B. Procedimiento de prueba

Con la finalidad de validar el funcionamiento de los dispositivos diseñados e implementados para este proyecto, se

definió un conjunto de pruebas, las cuales se dividieron en dos fases.

La primera fase se enfocó en validar la operatividad funcional de los dispositivos, desarrollando circuitos y programando los módulos electrónicos conforme a especificaciones técnicas predefinidas para asegurar la interoperabilidad del sistema. Este proceso se respaldó con recursos de código abierto extraídos de la literatura científica y plataformas digitales especializadas, orientados a potenciar el desempeño integral de cada componente.

La segunda fase experimental consistió en pruebas realizadas en el campus de la Universidad Tecnológica de Panamá, concretamente, en el Centro Regional de Azuero. Los dispositivos fueron instalados a alturas diferenciadas: el MOVI-stop a 2.00 metros y el MOVI-bus a 1.20 metros respecto al nivel del suelo. Dado que el objetivo principal del estudio es la comparación entre dos arquitecturas bajo condiciones equivalentes, el escenario de línea de vista se considera adecuado para evaluar de forma controlada el impacto del hardware y del protocolo inalámbrico empleado; en consecuencia, los resultados obtenidos deben interpretarse como una referencia comparativa bajo condiciones ideales, dentro de un entorno controlado, y no como una caracterización del desempeño del sistema en entornos urbanos reales (ver Fig. 6).

Con el fin de garantizar el rigor metodológico del escenario de prueba, se integró un perfil de elevación del tramo basado en datos validados por la Facultad de Ingeniería Civil. El registro mostró variaciones entre los 21 y 27 metros (ver Fig. 7), proporcionando un marco topográfico preciso para validar la estabilidad de la comunicación ante las irregularidades del terreno durante la evaluación técnica.

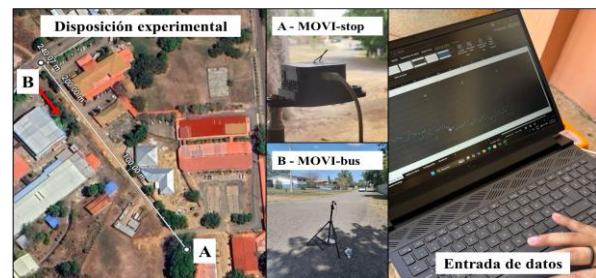


Fig. 6. Disposición experimental para la validación de la comunicación entre los módulos (A) MOVI-stop y (B) MOVI-bus.



Fig. 7. Perfil de elevación de la ruta de pruebas.

El protocolo experimental de la segunda fase incluyó dos tipos de pruebas: una estacionaria y otra dinámica. En la primera, se realizaron pruebas estacionarias, en las que ambos dispositivos permanecieron fijos para evaluar la estabilidad del enlace y la integridad en la transmisión de datos.

Se transmitieron paquetes de 16 bytes y se registraron de forma continua los valores de RSSI y RTT en 15 puntos de medición, distribuidos entre 16 y 240 metros. Este último corresponden al límite máximo establecido por el espacio disponible, con intervalos de muestreo de aproximadamente 1 segundo (ver Fig. 8). En cada punto se realizaron al menos diez mediciones independientes para garantizar su representatividad estadística. Asimismo, se verificó la estabilidad del enlace bidireccional durante todo el recorrido de prueba, con el objetivo de confirmar la operatividad continua y sin interrupciones del sistema.



Fig. 8 Adquisición de muestras de RSSI y RTT en el entorno experimental.

Posteriormente, en la segunda etapa, el módulo receptor fue transportado por una persona que caminaba a velocidad normal (1.0 m/s, aproximadamente), con el fin de observar el comportamiento del sistema en condiciones de desplazamiento.

Las pruebas se realizaron en el intervalo comprendido entre las 9:00 y las 11:00 de la mañana, bajo condiciones meteorológicas estables: cielo despejado, exposición solar directa y brisa ligera. Esta planificación buscó minimizar la influencia de variables ambientales, contribuyendo así a la confiabilidad de los resultados.

El análisis comparativo entre ambas versiones incluyó la evaluación de sus características físicas, con mediciones precisas de dimensiones y una estimación detallada de los costos de fabricación.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la primera fase de verificación funcional se validó la capacidad de comunicación bidireccional entre los módulos MOVI-bus y MOVI-stop mediante la integración del módulo MOVI-eta como elemento conmutador encargado de activar el flujo de señales entre ambos sistemas. La interacción establecida permitió el intercambio de datos en tiempo real, confirmando el correcto funcionamiento del esquema de comunicación propuesto.

Si bien la utilización de un sistema de comunicación común para todos los módulos introdujo desafíos asociados a la gestión de los mensajes, la implementación de identificadores únicos (UUID) permitió asignar funciones

específicas a cada módulo, evitando interferencias y errores en la operación. Los prototipos presentados en la Fig. 9 demostraron un funcionamiento consistente con los roles predefinidos, y las pruebas realizadas evidenciaron la posibilidad de integrar nodos adicionales sin comprometer la operatividad del sistema ni generar conflictos en la transmisión de datos, bajo las condiciones de prueba evaluadas.



Fig. 9 Prototipos ensamblados y sometidos a evaluación funcional.

La Fig. 10 presenta los resultados obtenidos en las pruebas estáticas realizadas en 15 puntos de medición distribuidos a lo largo de un trayecto establecido, con intervalos desde los 16 metros hasta el límite de cobertura (ver Fig. 7). Se observa una atenuación progresiva de la señal RSSI conforme aumenta la distancia, comportamiento coherente con los principios de propagación electromagnética en condiciones de línea de vista. Pese a las variaciones propias de cada punto de medición, la señal se mantuvo dentro de márgenes operativos estables a lo largo de todo el trayecto evaluado. Al igual que en las pruebas estáticas en la primera versión de los prototipos desarrollados, se alcanzó una tasa de comunicación del 100%, lo que confirma la estabilidad funcional del enlace bajo condiciones controladas. En conjunto, los resultados indican que la variabilidad observada no compromete la continuidad de la comunicación ni la operatividad del sistema en el escenario considerado.

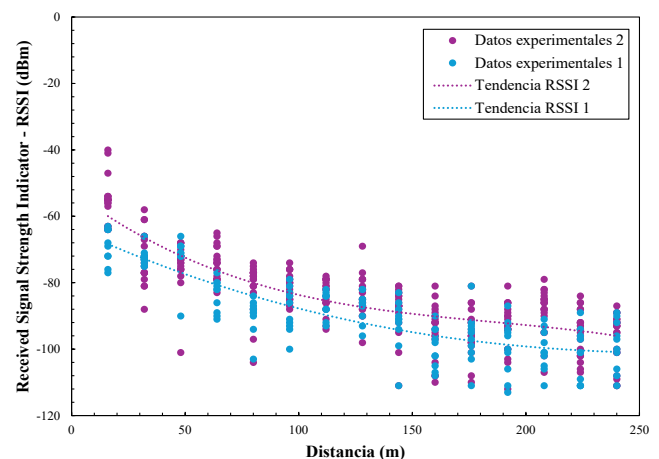


Fig. 10 Análisis del comportamiento del RSSI vs distancia en condiciones estáticas: Medición en 15 puntos entre 16 m y 240 m.

En comparación con el sistema desarrollado previamente, que registró valores promedio de RSSI de -74 dBm a 16 m y -86 dBm a 224 m, las pruebas estáticas del sistema propuesto

en este artículo mostraron una atenuación coherente con la distancia, alcanzando promedios aproximados de -70 dBm a 16 m y -88 dBm a 240 m. Los resultados, representados en la Fig. 10, evidencian un comportamiento globalmente comparable entre ambos sistemas, con una ligera mejora de la versión actual en las distancias cortas.

La Fig. 11 presenta los resultados del ensayo de transmisión continua, ejecutado desde el límite máximo de cobertura establecido (240 metros) hasta el punto de origen (0 metros). Durante el desplazamiento, los valores de RSSI presentaron fluctuaciones atribuibles a la propagación multicamino, la dinámica del movimiento y los saltos de frecuencia del esquema FHSS de Bluetooth. Las oscilaciones de mayor amplitud pueden asociarse a variaciones en la velocidad de marcha, estimada entre 0.8 y 1 m/s, así como a movimientos involuntarios que alteraron momentáneamente la orientación del dispositivo. A pesar de ello, la dispersión observada se mantuvo acotada a lo largo de todo el recorrido, sin registrarse pérdidas abruptas de señal, lo que indica un comportamiento estable del enlace bajo las condiciones del ensayo.

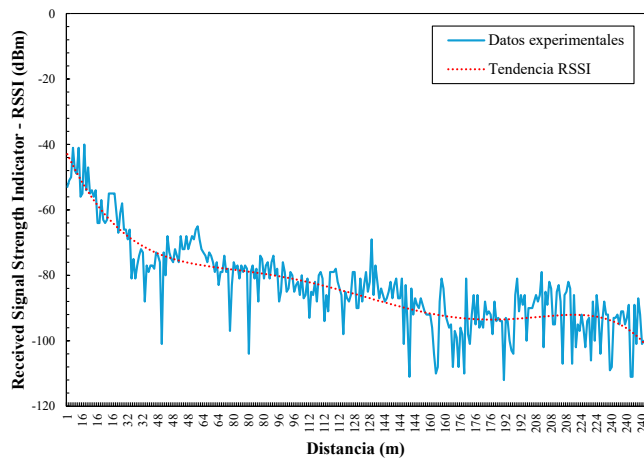


Fig. 11 Variación del RSSI vs distancia en condiciones dinámicas: Ensayo de transmisión continua desde 240 m hasta 0 m.

Por su parte, la latencia medida por RTT se mantuvo entre 500 y 1000 ms. En este trabajo, dicha métrica corresponde a un tiempo de respuesta evaluado a nivel de aplicación, que integra no solo el retardo de transmisión del enlace Bluetooth 5.0/BLE, sino también los tiempos de procesamiento del firmware, la planificación de mensajes y los intervalos de comunicación configurados para la operación del sistema. Bajo esta definición, se observó una respuesta estable en condiciones dinámicas controladas, aunque puede variar por obstáculos, interferencias y cambios en la velocidad.

La Fig. 12 compara directamente las características físicas de ambos prototipos, donde se evidencia una reducción drástica del factor de forma. En el caso del nodo portátil (MOVI-eta), el área de ocupación disminuyó un 67% , mientras que los nodos de infraestructura (MOVI-stop y

MOVI-bus) alcanzaron una optimización del 81% , ambos con respecto a los módulos del sistema desarrollado previamente.

Asimismo, la optimización técnica se tradujo en una mejora significativa de la viabilidad económica. Como se detalla en la Tabla I, la transición a la arquitectura propuesta en este documento supuso una reducción del 55.5% en el costo total de fabricación del ecosistema de tres nodos. La disminución del volumen y la simplificación del diseño resultan clave para garantizar la viabilidad técnica y socioeconómica del sistema, especialmente en contextos donde la asequibilidad es crucial para su adopción.

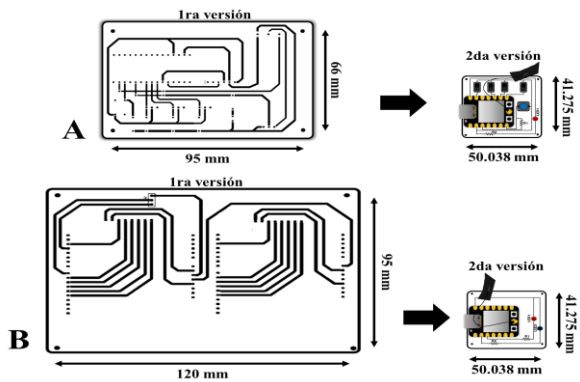


Fig. 12 Comparación de las dimensiones de los PCB en los dispositivos de las dos versiones desarrolladas: (A) MOVI-eta; (B) MOVI-stop y MOVI-bus.

TABLA I
COSTO APROXIMADO DE LOS PROTOTIPOS DE AMBAS VERSIONES

Costo de fabricación		
Prototipos	Proyectos	
	Primera versión	Versión actual
MOVI-eta	26.95	20.82
MOVI-stop	44.57	15.52
MOVI-bus	45.02	15.52
Total, Aproximado	116.54	51.86

Nota. Los costos de la Tabla I se basan en precios actuales del mercado en USD.

Si bien la arquitectura propuesta muestra mejoras claras en tamaño y costo, su dependencia de la banda de 2.4 GHz implica una sensibilidad inherente a interferencias, lo que deberá abordarse en futuras versiones mediante estrategias de coexistencia o selección adaptativa de canal.

V. CONCLUSIONES

Este estudio representa un avance relevante en el desarrollo de tecnologías de asistencia orientadas a un transporte público más accesible. A partir de la optimización del diseño, la eficiencia operativa y la escalabilidad de los prototipos derivados de la primera versión, se desarrolló un sistema más compacto y robusto. Esto fue posible gracias a la integración de un microcontrolador con conectividad Bluetooth 5.0/BLE nativa, cuya funcionalidad fue validada

mediante pruebas funcionales en laboratorio y evaluaciones controladas en campo. Se demuestra la viabilidad técnica y potencial aplicabilidad del sistema en entornos urbanos, destacando su comunicación bidireccional estable, modularidad y facilidad de implementación, lo que favorece la autonomía de PcDV. No obstante, se identifican limitaciones asociadas a la tecnología de RF, particularmente en cuanto a la ubicación de la antena y la sensibilidad del enlace ante obstrucciones físicas, lo que señala áreas claras de mejora para futuras versiones sin comprometer su desempeño, escalabilidad ni su potencial como plataforma replicable de movilidad asistida.

Se sugiere que futuras investigaciones se orienten hacia una profundización en la gestión avanzada del canal de comunicación, la implementación y validación de algoritmos adaptativos en entornos urbanos dinámicos y de alta densidad, así como el desarrollo de aplicaciones móviles que expandan las capacidades funcionales del sistema. Asimismo, se recomienda evaluar rigurosamente el desempeño del sistema bajo condiciones de alta interferencia electromagnética y escenarios climáticos adversos. Además, es necesario definir y validar cuidadosamente los patrones de retroalimentación háptica, asegurando que sean fácilmente perceptibles e interpretables por el usuario final. Este trabajo impacta en la comunidad científica y tecnológica al integrar hardware, protocolos y análisis funcional en una solución coherente y replicable, alineada con diseño universal e inclusión social.

AGRADECIMIENTO/RECONOCIMIENTO

Los autores agradecen al grupo de Investigación en Ingeniería de Telecomunicaciones y Sistemas Inteligentes Aplicados a la Sociedad (ITSIAS) y al proyecto de movilidad de personas con discapacidad visual (MOVIDIS, financiado por la SENACYT con contrato por mérito N°. 109-2015-4-FID14-073). Este trabajo fue desarrollado dentro del marco del proyecto RETINA, financiado por la SENACYT con contrato por mérito N°. PFID-FID-2021-131. Yessica Sáez, Edwin Collado y Héctor Montes agradecen al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá por el apoyo que les proporcionan a sus miembros.

REFERENCIAS

- [1] World Health Organization, "Blindness and visual impairment," *WHO Fact Sheets*, Aug. 10, 2023. [Online]. Available: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment>
- [2] Instituto Nacional de Estadística y Censo (INEC), "Población con algún tipo de discapacidad física o mental en la República, según provincia, comarca indígena, sexo y grupos de edad: Censo 2023," Panamá, 2023. [Online]. Available: <https://www.inec.gob.pa/archivos/P0774740120231009162832CUADRO%2016.pdf>
- [3] S. Martínez-Cruz, L. Morales-Hernández, G. Pérez-Soto, J. Benítez-Rangel, and K. Camarillo-Gómez, "An outdoor navigation assistance system for visually impaired people in public transportation," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 1468–1494, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3048056.
- [4] F. Ashiq, M. Asif, M. Ahmad, S. Zafar, K. Masood, T. Mahmood, *et al.*, "CNN-based object recognition and tracking system to assist visually

- impaired people," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 14819–14834, 2022, doi: 10.1109/ACCESS.2022.3147637.
- [5] J. García Ornelas and J. Vázquez Espinola, "Estudio valorativo de la accesibilidad y barreras urbanas para personas con discapacidad visual en Guadalajara, Jalisco (México)," *Red Visual*, no. 84, pp. 9–22, 2024.
- [6] Y. Sáez, J. Muñoz, F. Cantó, A. García, and H. Montes, "Assisting visually impaired people in the public transport system through RF communication and embedded systems," *Sensors*, vol. 19, no. 6, p. 1282, 2019, doi: 10.3390/s19061282.
- [7] Nordic Semiconductor, "Things you should know about Bluetooth range," *Get Connected Blog*, 2019. [Online]. Available: <https://blog.nordicsemi.com/getconnected/things-you-should-know-about-bluetooth-range>
- [8] Silicon Labs, "Bluetooth 5: Refined for the IoT," *White Paper*, 2020. [Online]. Available: <https://www.silabs.com/whitepapers/bluetooth-5-refined-for-the-iot>
- [9] Chengdu Ebyte Electronic Technology Co., "How far can Bluetooth 5.0 transmit?" *CDEBYTE Technical News*, 2021. [Online]. Available: <https://www.cdebyte.com/news/927>
- [10] Bluetooth SIG, "Generic Attribute Profile (GATT)," *Bluetooth® Technology Website*. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/specifications/gatt/>
- [11] K. Mikhaylov, N. Plevritakis, and J. Tervonen, "Performance analysis and comparison of Bluetooth Low Energy with IEEE 802.15.4 and SimplicTI," *Journal of Sensor and Actuator Networks*, vol. 2, no. 3, pp. 589–613, 2013.
- [12] P. Kam and C. Partridge, "Improving round-trip time estimates in reliable transport protocols," *ACM SIGCOMM Computer Communication Review*, vol. 17, no. 5, pp. 2–7, Oct. 1987.
- [13] S. Sengupta, H. Kim, and J. Rexford, "Continuous in-network round-trip time monitoring," in *Proceedings of the ACM SIGCOMM 2022 Conference*, Amsterdam, Netherlands, Aug. 2022, pp. 473–485.