

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Ingeniería en Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información



Diseño, calibración e implementación de una red de sensores Ultra-Wideband (UWB) para un sistema de recorrido virtual con realidad aumentada en el Centro de Innovación y Tecnología de la Universidad del Valle de Guatemala (CIT)

Trabajo de graduación en modalidad de Trabajo Profesional presentado por Edwin Eduardo Ramírez Herrera para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información.

Guatemala,

2025

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA

Facultad de Ingeniería

Ingeniería en Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información



DELVALLE
GRUPO EDUCATIVO

Diseño, calibración e implementación de una red de sensores Ultra-Wideband (UWB) para un sistema de recorrido virtual con realidad aumentada en el Centro de Innovación y Tecnología de la Universidad del Valle de Guatemala (CIT)

Trabajo de graduación en modalidad de Trabajo Profesional presentado por Edwin Eduardo Ramírez Herrera para optar al grado académico de Licenciatura en Ingeniería en Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información.

Guatemala,

2025

Vo. Bo.

Firma: _____

Inga. Dulce María Chacón Muñoz

Firma: _____

MsC. Kimberly Marisol Barrera Álvarez

Fecha de aprobación: 18/11/2025

Índice

AGRADECIMIENTOS	9
I. RESUMEN	10
II. ABSTRACT	11
III. INTRODUCCION	12
IV. ANTECEDENTES	15
Evaluación comparativa de tecnologías IPS	15
Aplicaciones globales de IPS y UWB	16
Estudios previos del CIT y hallazgos clave	17
Comprensión del patrón de propagación UWB	18
Interferencias y limitaciones técnicas	19
Contribuciones científicas y tecnológicas	19
V. JUSTIFICACION	20
VI. OBJETIVOS	22
VI. ALCANCE Y LIMITACIONES	23
Alcance del Proyecto.....	23
VII. MARCO TEORICO	26
1. Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS)	26
2. Limitaciones del GPS y la necesidad de IPS	27
3. Tecnología de Localización UWB	28
4. Algoritmos de Localización: Trilateración	29
5. Realidad Aumentada (AR) Basada en Localización.....	30
6. Protocolos de Comunicación y Hardware en UWB: DW1000, DW3000 y Ranging	32
7. Diseño de Redes UWB en Espacios Cerrados	34
8. Calibración y Validación del Sistema.....	36
9. Integración con Aplicaciones Móviles.....	37
10. Herramientas útiles para la gestión de la red de sensores	40
VIII. METODOLOGÍA	42
Fase 1. Levantamiento físico del entorno	42
Fase 2. Diseño de la red de sensores UWB	42
Fase 3. Desarrollo y validación del sniffer UWB.....	43

Fase 4. Desarrollo del sistema web de gestión de sensores.....	44
Fase 5. Calibración, validación y documentación	47
IX. RESULTADOS Y DISCUSION	48
XI. CONCLUSIONES	68
XII. RECOMENDACIONES	69
XIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	71
XIV. ANEXOS	77

Índice de Figuras

Figura 1. Conexión de componentes y pruebas de visualización de tramas en consola serial.	48
Figura 2. Montaje físico del sniffer UWB con ESP32 y módulo DW3000 en protoboard.	49
Figura 3. Ejemplo de tramas UWB capturadas por el sniffer en formato hexadecimal.	49
Figura 4. Ejemplo de conexión de sdk con sensores en trilateración	51
Figura 5. Sniffer en aplicación móvil con sdk estimote.....	51
Figura 6. Captura del modelo original obtenido del escaneo LIDAR	52
Figura 7. Sketch corregido	53
Figura 8. Modelo 3D final corregido con shell y path aplicados.....	53
Figura 9. Representación gráfica de las zonas de cobertura de los sensores en AutoCAD	54
Figura 10. Plano de AutoCAD con distribución de sensores con los puntos de trilateración marcados	54
Figura 11. Fragmento del archivo JSON mostrando la estructura de los datos exportados desde AutoCAD	55
Figura 12. LoginForm para realizar el inicio de sesión.	56
Figura 13. BeaconsForm para crear nuevos sensores.	56
<i>Figura 14. BeaconsList para listar los sensores.</i>	57
Figura 15. LevelCards para listar cada nivel.	57
Figura 16. Dashboard para la gestión general de sensores.	58
Figura 17. Dashboard para la gestión general de areas.....	58
Figura 18. Arduino	77
Figura 19. Implementacion de Wifi Sniffer	78
Figura 20. Código de inicialización del módulo DW3000 y asignación de pines en Arduino IDE.	80

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Comparación entre modulo DW1000 y DW3000.....	50
Cuadro 2. Distribución de sensores por nivel	60

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis agradecimientos primeramente a Dios, mi padre quien siempre ha estado desde el primer momento de mi carrera universitaria a mi lado y nunca me ha abandonado y ha provisto para que pueda cumplir su voluntad en mi vida.

A Jesús por siempre darme de su amor, su paz y su bondad para poder superar todos los retos que he enfrentado en mi vida universitaria. Toda la gloria sea a Él.

A mis padres Edwin Haroldo Ramírez Castillo y Heidy Lorena Jocabed Herrera Estrada por ser la inspiración más grande de mi vida, por todo su inmenso amor y porque siempre han luchado y dado su vida por darme lo mejor, por su esfuerzo, por sus enseñanzas, por su sabiduría y por enseñarme a ser un hombre de bien y esforzado en todo lo que haga. A mis hermanas, Daniela Ramírez y Lorena Ramírez por todo su amor y porque han sido un apoyo incondicional en mi vida y siempre han creído en mí y están para darme ánimos cuando las fuerzas faltan.

A mis abuelos, Eli Herrera y Estela Estrada, Romeo Ramírez y Olga Castillo por todo su inmenso amor, apoyo incondicional, consejos y ánimos para lograr mis metas y objetivos. A mis tíos, Gabriela Ramírez y Ana Lys Ramírez por su amor, apoyo y cuidado tan grande desde el primer día de mi vida y ser como una madre para mí en cada momento. A toda mi familia por ser parte de este viaje tan largo y retador en mi vida universitaria, agradezco todo su apoyo y cariño.

A Jimena Córdova por estar siempre conmigo sin importar la situación, dándome todo su apoyo para que pueda alcanzar mi máximo potencial y poder superar todos los retos que tuve en esta etapa tan importante de mi vida. Gracias por ser la persona que siempre ha estado para celebrar cada paso que doy y por demostrarme que siempre puedo ir por más en la vida. Su amor, comprensión y paciencia fueron vitales para poder llegar hasta este punto.

A mis amigos Juan Manuel Marroquín, Carlos Ráxtum, Javier Cotto, Walter Saldaña y Abraham Gutiérrez por todos esos momentos tan especiales e inolvidables que vivimos en la época universitaria, amigos que son un regalo que voy a llevar para toda mi vida.

A mis amigos Diego Leiva, Gustavo González, María Marta Ramírez y Pablo Orellana por ser un gran apoyo en la última etapa de mi vida universitaria.

A mis catedráticos Dulce Chacón y Gabriel Barrientos por compartir conmigo conocimiento, pasión, compromiso y consejos de vida que me dejan una gran enseñanza que siempre voy a apreciar. Gracias por toda su dedicación, guía e inspiración para poder aportarme y compartirme todo lo que pudieron para poder sacar mi máximo potencial.

A mi asesora Kimberly Barrera por su acompañamiento, guía y dedicación para que pudiera alcanzar este objetivo tan grande en mi vida y carrera universitaria. Gracias por su paciencia, enseñanzas y comprensión en el transcurso de este trabajo.

A la Universidad del Valle por abrirme las puertas para poder realizar mis estudios en la mejor casa de estudios de Guatemala y Centro América y siempre darme las mejores herramientas y conocimientos que me formaron una gran amor y vocación en mí por la Ingeniería en Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información.

I. RESUMEN

El Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la Universidad del Valle de Guatemala se ha consolidado como un espacio importante dentro del campus, tanto por su arquitectura moderna como por su papel en actividades académicas, tecnológicas y de divulgación científica. En este contexto, el proyecto describe el diseño, calibración e implementación de una red de sensores Ultra-Wideband (UWB) como base tecnológica para un sistema de recorrido virtual con realidad aumentada (AR) en el Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG).

Este sistema busca mejorar la experiencia de orientación para estudiantes, visitantes y personal del campus, mediante la activación de contenido digital contextualizado según la ubicación del usuario. El proyecto se desarrolló en cinco fases: levantamiento del entorno, diseño de red, instalación, calibración y validación. En la primera fase se realizó una medición detallada del entorno físico utilizando telémetros láser y cintas métricas, construyendo planos de referencia en AutoCAD con coordenadas cartesianas (X, Y) para cada nivel del edificio.

En la segunda fase, se diseñó la distribución estratégica de los sensores UWB considerando la cobertura direccional de su señal cónica de 120°, visibilidad entre sensores y criterios de trilateración. La tercera fase contempló la instalación física de los sensores y el registro detallado de sus identificadores únicos con su respectiva ubicación.

Posteriormente, en la fase de calibración, se seleccionaron puntos de control representativos del recorrido para comparar distancias reales con las estimadas por el sistema. Finalmente, se evaluó la efectividad de la red instalada midiendo métricas como error promedio, zonas sin cobertura y estabilidad en distintos escenarios del entorno físico. Los resultados obtenidos permitieron validar la viabilidad del sistema para futuras integraciones con aplicaciones móviles y experiencias AR. También se documentó el proceso completo como referencia técnica para su replicación o mejora en otras áreas del campus o instituciones similares.

Este trabajo representa un aporte significativo tanto académico como institucional, al implementar una solución tecnológica real en un entorno universitario, fortaleciendo la imagen de la UVG como una institución innovadora y visionaria en el uso de tecnologías de localización y realidad aumentada.

II. ABSTRACT

The Innovation and Technology Center (CIT) at Universidad del Valle de Guatemala has become an important space on campus, both for its modern architecture and its role in academic, technological, and scientific outreach activities. In this context, the project presents the design, calibration, and implementation of an Ultra-Wideband (UWB) sensor network as the technological foundation for a virtual tour system with Augmented Reality (AR) at the CIT of Universidad del Valle de Guatemala (UVG).

This system aims to enhance orientation experience for students, visitors, and staff by activating contextualized digital content based on the user's location. The project was developed in five phases: environment survey, network design, installation, calibration, and validation. In the first phase, a detailed measurement of the physical environment was conducted using laser distance meters and measuring tapes, creating AutoCAD reference plans with Cartesian coordinates (X, Y) for each level of the building.

In the second phase, the strategic distribution of UWB sensors was designed, considering the 120° conical coverage of their directional signal, sensor line-of-sight, and trilateration criteria. The third phase involved the physical installation of the sensors and the detailed registration of their unique identifiers with their respective locations.

Subsequently, during the calibration phase, representative control points along the route were selected to compare real distances with those estimated by the system. Finally, the effectiveness of the installed network was evaluated by measuring metrics such as average error, coverage gaps, and stability under different physical conditions. The results validated the feasibility of the system for future integration with mobile applications and AR experiences.

The entire process was documented as a technical reference for replication or improvement in other areas of the campus or similar institutions. This work represents a significant academic and institutional contribution by implementing a real technological solution in a university environment, strengthening UVG's image as an innovative and forward-thinking institution in the use of localization and augmented reality technologies.

III. INTRODUCCION

La localización en interiores y su integración con tecnologías inmersivas se han consolidado en los últimos años como uno de los campos más dinámicos y prometedores dentro de la innovación tecnológica contemporánea. A medida que las sociedades avanzan hacia entornos más digitalizados e interconectados, la capacidad de comprender, representar y reaccionar ante el espacio físico en tiempo real se ha convertido en un elemento esencial para múltiples disciplinas. A diferencia de los sistemas de posicionamiento satelital convencionales, como el GPS, cuyo funcionamiento depende de la comunicación con satélites y que por tanto presenta limitaciones significativas en entornos cerrados o subterráneos, los sistemas de localización en interiores —conocidos como Indoor Positioning Systems (IPS)— ofrecen la posibilidad de determinar la ubicación exacta de personas, objetos o dispositivos dentro de edificaciones, con un margen de error que puede reducirse a pocos centímetros.

Esta precisión ha impulsado el desarrollo de una amplia gama de aplicaciones que van desde la automatización industrial hasta la asistencia médica y la gestión inteligente de edificios, marcando un punto de convergencia entre la ingeniería electrónica, las telecomunicaciones, la informática y la arquitectura. En la industria, los sistemas de localización en interiores permiten optimizar procesos de manufactura y logística, controlando en tiempo real la posición de herramientas, vehículos o productos en movimiento. En el ámbito de la salud, estas tecnologías facilitan el monitoreo de pacientes y la trazabilidad de equipos críticos dentro de hospitales. En el comercio y los servicios, posibilitan experiencias personalizadas para los usuarios, como la guía en tiendas o la activación de contenido digital contextualizado según la ubicación.

En el campo de la domótica y los entornos inteligentes, la localización precisa ha adquirido un papel fundamental. Integrada con redes de sensores, actuadores y sistemas de control, permite automatizar tareas cotidianas (como la iluminación, la climatización o la seguridad) en función de la presencia o el movimiento de las personas dentro de un espacio. Esta integración convierte los edificios en ecosistemas adaptativos capaces de responder a las necesidades de sus ocupantes, optimizando el consumo energético y mejorando la comodidad y seguridad. En este sentido, la localización en interiores no solo cumple una función técnica, sino también social y ambiental, al contribuir a la creación de entornos más sostenibles, eficientes y centrados en el ser humano.

En el contexto educativo, su relevancia es aún mayor. Las universidades y centros de investigación se han convertido en escenarios ideales para explorar el potencial de estas tecnologías, tanto como herramienta de apoyo académico como medio para mejorar la experiencia institucional. La capacidad de guiar a estudiantes y visitantes dentro de un campus, mostrar información contextual sobre laboratorios, salas o exposiciones, o integrar recorridos virtuales con elementos de realidad aumentada (AR), abre nuevas formas de interacción con el conocimiento y con el espacio físico. Estas tecnologías permiten transformar los edificios en espacios vivos, donde el aprendizaje, la exploración y la comunicación convergen en experiencias inmersivas, accesibles y atractivas.

En suma, la localización en interiores y su integración con tecnologías inmersivas representan una manifestación tangible de la transformación digital aplicada al espacio físico. Más allá de su carácter técnico, estas soluciones redefinen la forma en que los individuos se orientan, se informan y se relacionan con su entorno, al mismo tiempo que sientan las bases para el desarrollo de entornos inteligentes, conectados y sostenibles. Su implementación en instituciones educativas como la Universidad del Valle de Guatemala refleja no solo un compromiso con la innovación tecnológica, sino también con la formación de profesionales capaces de diseñar y aplicar sistemas complejos que vinculen la ingeniería, la tecnología y la experiencia humana.

En este marco, la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) ha buscado fortalecer su compromiso con la innovación y la adopción de tecnologías emergentes a través de proyectos que integran ingeniería, diseño y experiencia de usuario. El Centro de Innovación y Tecnología (CIT), uno de los espacios más emblemáticos del campus, representa un entorno idóneo para la aplicación de estas tecnologías debido a su complejidad arquitectónica y a la diversidad de actividades que en él se desarrollan. El CIT alberga laboratorios, salas de exhibición, oficinas y aulas, distribuidas en varios niveles interconectados, lo que plantea un desafío interesante en términos de orientación y navegación interior. De esta necesidad surge la propuesta de implementar un sistema de recorrido virtual con realidad aumentada (AR) apoyado en una infraestructura de sensores Ultra-Wideband (UWB), capaz de ofrecer una experiencia de localización y visualización precisa, interactiva y contextualizada.

El presente trabajo se enmarca en este proyecto institucional de recorrido virtual con AR para el CIT, concebido como una herramienta de comunicación, orientación y exploración del espacio físico. Este esfuerzo forma parte de una línea de investigación aplicada que combina elementos de ingeniería electrónica, ciencias de la computación, interacción humano-computadora y modelado 3D. A diferencia de las fases previas, centradas en la experimentación con tecnologías de posicionamiento como Bluetooth Low Energy (BLE) y en el diseño de interfaces móviles, esta etapa abordó la implementación técnica y validación funcional de una red completa de sensores UWB, con un enfoque integral que abarca desde el levantamiento del entorno físico hasta la integración digital y la sincronización con la plataforma de realidad aumentada.

El proyecto se estructuró en cinco fases principales: levantamiento físico del entorno arquitectónico, diseño y distribución de la red de sensores, desarrollo del sistema web de gestión, calibración y validación técnica, y documentación del proceso. En la primera fase, se llevó a cabo un levantamiento exhaustivo de los niveles seleccionados del CIT mediante mediciones con telémetro láser, complementadas con escaneos tridimensionales utilizando tecnología LiDAR. Esta información permitió generar modelos tridimensionales precisos y planos técnicos en AutoCAD que sirvieron de base para definir la ubicación exacta de los sensores. En las fases posteriores, se diseñaron las redes específicas para cada nivel, considerando las particularidades arquitectónicas, la cobertura geométrica y la visibilidad entre dispositivos, hasta consolidar un sistema funcional distribuido y escalable.

El uso de la tecnología Ultra-Wideband fue clave para garantizar la precisión del sistema. A diferencia de otros métodos de localización, como el BLE o el Wi-Fi, el UWB opera mediante pulsos de banda ancha que permiten calcular distancias con errores mínimos (en el orden de centímetros) y reducir significativamente las interferencias. Esta precisión resultó fundamental para que el sistema de realidad aumentada pudiera activar contenido digital de forma exacta, según la ubicación del usuario dentro del recorrido. El diseño e instalación de esta red sentó las bases para futuras aplicaciones en el campo de la domótica, donde la interacción inteligente entre sensores, dispositivos y entornos digitales permite automatizar, controlar y monitorear espacios físicos en tiempo real.

Además del diseño físico, el proyecto incluyó el desarrollo de un sistema web de gestión de sensores, construido con Next.js, TypeScript y PostgreSQL, que permite administrar la red de manera centralizada. Esta herramienta posibilita el registro, edición y monitoreo de cada sensor, su nivel, coordenadas y estado operativo, además de generar automáticamente los archivos JSON que sincronizan la red física con los entornos digitales. La integración de este sistema de gestión no solo optimiza la operación técnica, sino que también garantiza la escalabilidad y mantenibilidad del proyecto, elementos esenciales para su futura expansión a otros edificios o campus.

Este trabajo documenta en detalle el diseño, calibración y validación parcial de la red de sensores UWB implementada en el CIT, la cual constituye la infraestructura base del sistema de posicionamiento para el recorrido virtual con realidad aumentada. Los resultados obtenidos demuestran la factibilidad de integrar tecnología de localización precisa con entornos virtuales inmersivos dentro de una institución educativa. Asimismo, el proyecto se consolida como un modelo replicable y adaptable a otros espacios académicos o culturales, ofreciendo una referencia práctica para el desarrollo de soluciones que combinen ingeniería, arquitectura y tecnología inmersiva.

En última instancia, esta propuesta representa un aporte tangible al ecosistema tecnológico de la UVG, al vincular conceptos de domótica, realidad aumentada y sistemas de localización en interiores en una solución real, aplicada y validada en un entorno universitario. Más allá de su valor técnico, el proyecto simboliza la convergencia entre la investigación académica y la aplicación práctica, promoviendo el desarrollo de infraestructura inteligente y sentando las bases para nuevas experiencias interactivas dentro del campus.

IV. ANTECEDENTES

En los últimos años, la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) ha impulsado políticas institucionales orientadas a la transformación digital, la innovación educativa y la incorporación de tecnologías emergentes en los procesos académicos, administrativos y de investigación científica. Como parte de esta estrategia, el Centro de Innovación y Tecnología (CIT) se ha consolidado como un laboratorio interdisciplinario de referencia, en el que confluyen proyectos de ingeniería, informática, diseño, ciencias aplicadas y experimentación tecnológica. Este ecosistema ha permitido el desarrollo de iniciativas que integran la investigación tecnológica con la mejora de la experiencia universitaria, generando soluciones orientadas a la eficiencia, sostenibilidad y modernización institucional. La combinación de disciplinas y la colaboración entre estudiantes, investigadores y personal administrativo ha convertido al CIT en un entorno propicio para la exploración y validación de tecnologías disruptivas aplicadas al ámbito educativo.

Dentro de estas iniciativas, se destaca el desarrollo de un sistema de recorrido virtual con realidad aumentada (AR), cuyo objetivo es mejorar la experiencia de orientación y exploración de las instalaciones universitarias, tanto para estudiantes como para visitantes y personal docente. Este sistema combina tecnologías de localización en interiores (Indoor Positioning Systems, IPS) con plataformas digitales inmersivas, permitiendo al usuario desplazarse dentro del CIT mientras visualiza información contextual, modelos tridimensionales y elementos interactivos en tiempo real desde su dispositivo móvil. Este enfoque se alinea con la tendencia internacional de los campus inteligentes, en los que la convergencia entre infraestructura física y sistemas digitales optimiza la gestión del espacio, la seguridad y la experiencia del usuario (Nguyen & Han, 2022). Además, integra criterios de accesibilidad, usabilidad y experiencia de usuario (UX/UI), de manera que la información y los elementos virtuales se adapten a distintos perfiles de usuario y contextos de uso.

Evaluación comparativa de tecnologías IPS

En las fases iniciales del proyecto se llevaron a cabo pruebas comparativas de tecnologías IPS, enfocándose en Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi y Ultra-Wideband (UWB). El objetivo fue establecer un marco técnico que definiera requerimientos de precisión, latencia, cobertura, confiabilidad y robustez de la señal, así como su adecuación a entornos complejos como el CIT.

BLE se identificó como una alternativa interesante por su compatibilidad con la mayoría de los dispositivos móviles y su bajo consumo energético, factores clave para aplicaciones que requieren autonomía prolongada. Sin embargo, las pruebas demostraron que su dependencia de la intensidad de la señal recibida (RSSI) y su sensibilidad a obstáculos físicos y personas generaban errores de localización significativos. Estos errores se incrementaban en zonas de tránsito denso, donde la atenuación por interferencia electromagnética y reflejos provocaba fluctuaciones constantes en la señal, dificultando el cálculo confiable de distancias.

Wi-Fi, por su parte, ofrecía cobertura amplia y una infraestructura existente en el campus, lo que representaba una ventaja en términos de despliegue y costos. No obstante, los márgenes de error detectados en pruebas experimentales alcanzaban varios metros en entornos densos o con múltiples obstáculos, haciendo que la tecnología resultara insuficiente para aplicaciones que requieren precisión subdecimétrica, como recorridos AR o navegación indoor.

En contraste, UWB se identificó como la tecnología más adecuada para posicionamiento de alta precisión, debido a sus pulsos extremadamente cortos (del orden de nanosegundos) y su capacidad de medir distancias mediante tiempo de vuelo (Time of Flight, ToF) con resolución espacial subdecimétrica. Su amplio ancho de banda (≥ 500 MHz) y operación en frecuencias de 3.1 a 10.6 GHz le confieren una mayor tolerancia a interferencias electromagnéticas, multipath y obstáculos físicos, lo que la hace especialmente adecuada para entornos interiores densos, como laboratorios, pasillos y espacios de interacción del CIT (Alarifi et al., 2016). Estas características aseguran que la señal sea menos afectada por otros dispositivos inalámbricos, como routers Wi-Fi o teléfonos móviles, garantizando precisión y estabilidad en mediciones repetibles.

Aplicaciones globales de IPS y UWB

A nivel mundial, los sistemas de posicionamiento en interiores (Indoor Positioning Systems, IPS) han sido implementados en una diversidad de contextos con el objetivo de mejorar la navegación, la experiencia de usuario, la gestión de activos y la seguridad en espacios complejos. Entre las tecnologías más empleadas, el Ultra-Wideband (UWB) ha demostrado ofrecer ventajas significativas frente a alternativas como Bluetooth Low Energy (BLE) o Wi-Fi, principalmente por su capacidad de medición de distancias mediante tiempo de vuelo (Time of Flight, ToF) con precisión subdecimétrica, su alta tolerancia a interferencias y su estabilidad en entornos con múltiples obstáculos.

En el ámbito educativo, la Universidad de Texas en Austin ha desarrollado un sistema UWB para el rastreo de equipos y la simulación de rutas dentro de laboratorios de ingeniería. Este sistema permite a los estudiantes interactuar con modelos tridimensionales y evaluar rutas óptimas de navegación, contribuyendo a la comprensión de la planificación de espacios y la seguridad en entornos interiores (Chen et al., 2019). De manera similar, la Universidad Técnica de Berlín, a través del proyecto SmartCampus, ha implementado IPS basados en UWB para la gestión de áreas de estudio y laboratorios, integrando recorridos de realidad aumentada que facilitan la orientación de estudiantes nuevos y visitantes, demostrando que estas tecnologías permiten optimizar el uso de espacios y enriquecer la experiencia educativa en campus inteligentes.

El sector cultural también ha adoptado IPS y UWB con resultados exitosos. El Museo de Historia Natural de Londres ha empleado una combinación de UWB y BLE para guiar visitantes dentro de sus salas, activando contenido multimedia contextual en función de la ubicación precisa del usuario. De manera complementaria, el Museo de Arte Moderno de Nueva York utiliza sistemas IPS para rastrear el flujo de visitantes y ofrecer recorridos personalizados de realidad aumentada, ajustando la información presentada según la densidad de personas y el trayecto de cada visitante. Estos casos evidencian la relevancia de la precisión

y estabilidad que ofrece UWB en entornos con alta concurrencia y necesidad de interacción digital contextual.

En entornos industriales y de salud, la adopción de IPS basados en UWB ha permitido mejorar la eficiencia operativa y la seguridad. En hospitales de Alemania y Estados Unidos, los sistemas UWB facilitan la localización de equipos médicos críticos, reduciendo tiempos de respuesta en emergencias y optimizando el mantenimiento de dispositivos. En plantas de manufactura, la tecnología UWB se utiliza para la navegación de vehículos autónomos y robots de logística, garantizando precisión subdecimétrica incluso en presencia de interferencias electromagnéticas y estructuras metálicas que dificultarían el desempeño de otras tecnologías.

Los estudios experimentales han documentado que, bajo condiciones de línea de vista (LOS), UWB puede alcanzar errores de ubicación inferiores a 10 cm, mientras que en escenarios sin línea de vista (NLOS), los errores pueden incrementarse significativamente, llegando a decenas de centímetros. Investigaciones recientes han aplicado estrategias de optimización, como la creación de modelos digitales (“digital twin”) del entorno físico, que permiten determinar la disposición óptima de anclas UWB y reducir los errores en zonas complejas, demostrando que el diseño y calibración de la red de sensores es tan importante como la tecnología utilizada.

Estos antecedentes internacionales muestran que la implementación de IPS basados en UWB no solo mejora la precisión de la localización en interiores, sino que también permite integrar servicios interactivos de realidad aumentada, optimizar la gestión de recursos y asegurar la escalabilidad de sistemas en entornos variados, desde campus universitarios hasta hospitales, museos y plantas industriales. La evidencia empírica obtenida de estos casos de estudio proporciona un marco de referencia que valida la elección de UWB para aplicaciones de navegación indoor avanzadas, confirmando la pertinencia de esta tecnología para proyectos como el desarrollado en el CIT de la Universidad del Valle de Guatemala.

En consecuencia, los resultados de estos proyectos internacionales consolidan la idea de que un sistema de posicionamiento indoor basado en UWB puede ofrecer precisión, robustez y tolerancia a interferencias, características esenciales para el desarrollo de recorridos virtuales con realidad aumentada y otras aplicaciones interactivas, sirviendo como antecedentes clave para la planificación, calibración y despliegue de redes de sensores en entornos complejos como los edificios del CIT.

Estos ejemplos muestran que la precisión, robustez y tolerancia a interferencias que ofrece UWB son requisitos fundamentales para sistemas de navegación indoor avanzados, aplicaciones de AR y seguimiento de activos en entornos complejos.

Estudios previos del CIT y hallazgos clave

Uno de los trabajos fundamentales que sirvieron de base para este proyecto fue la investigación desarrollada por Pablo González (2024), donde se implementó un prototipo híbrido BLE-UWB con el objetivo de evaluar precisión y estabilidad en distintos escenarios dentro del CIT. Este estudio se centró en medir errores promedio de localización y variaciones

de señal en entornos con diferentes obstáculos estructurales, densidad de personas y geometría compleja.

Los resultados indicaron que UWB alcanzaba errores promedio de 2.42 %, manteniendo consistencia incluso en escenarios con múltiples obstáculos y condiciones de propagación complejas. Por otro lado, BLE mostraba errores superiores al 100 % en diversas zonas del CIT, confirmando su limitada capacidad para aplicaciones de alta precisión. Estos hallazgos respaldaron la elección de UWB como tecnología base para el despliegue de redes de sensores y sentaron las bases para metodologías de calibración y posicionamiento.

Asimismo, el estudio documentó factores que afectan directamente la precisión de UWB, incluyendo:

- Orientación del dispositivo receptor: pequeñas variaciones en la inclinación del sensor podían generar cambios en la estimación de distancia, aunque menores que en BLE.
- Altura de instalación de los sensores: se estableció que la altura óptima para lograr cobertura homogénea debía considerar el ángulo de apertura del patrón direccional de las antenas.
- Densidad de cobertura: la colocación estratégica de anclajes (anchors) era determinante para minimizar zonas de sombra y errores por superposición de señales.

El trabajo también analizó el patrón de propagación de la señal UWB, corrigiendo la concepción inicial de cobertura isotrópica. De acuerdo con la documentación oficial de Decawave/Qorvo y las normas IEEE 802.15.4a-2011 y 802.15.4z-2020, se confirmó que la señal presenta un patrón direccional cónico, con ángulos de apertura de aproximadamente 110° a 130°. Esta característica concentraba la energía radiada hacia la dirección principal, optimizando la precisión de medición mediante ToF y disminuyendo lateral y posteriormente la potencia de la señal. Este hallazgo fue esencial para redefinir la estrategia de ubicación, orientación y altura de los sensores, asegurando cobertura óptima para los recorridos AR y reduciendo interferencias por superposición de haces.

Comprensión del patrón de propagación UWB

Uno de los hallazgos más relevantes de los trabajos anteriores fue la corrección del patrón de propagación de la señal UWB. Inicialmente, se asumía que los sensores emitían señales de manera isotrópica, con cobertura circular uniforme alrededor del dispositivo. Sin embargo, al revisar la documentación oficial de Decawave (Qorvo) y las normas IEEE 802.15.4a-2011 y 802.15.4z-2020, se confirmó que la señal UWB presenta un patrón direccional cónico, con ángulos de apertura que oscilan entre 110° y 130°, dependiendo del modelo de antena y la frecuencia central.

Este patrón direccional concentra la energía radiada hacia la dirección principal, optimizando la precisión de medición mediante ToF, mientras que la potencia disminuye lateralmente y hacia atrás. Este hallazgo fue clave para redefinir la estrategia de ubicación, orientación y altura de los sensores, evitando zonas de sombra, interferencias por superposición de haces y garantizando una cobertura óptima de los recorridos virtuales.

Interferencias y limitaciones técnicas

Los antecedentes también destacan la evaluación de interferencias electromagnéticas y reflexiones multipath como factores críticos en el diseño de IPS. En BLE, la operación en 2.4 GHz provocaba alta sensibilidad a interferencias de Wi-Fi y otros dispositivos Bluetooth. UWB, por su parte, demostró mayor resiliencia, aunque se confirmó que la alineación correcta de los sensores y dispositivos receptores es esencial para mantener precisión y evitar pérdida de señal. Además, se documentaron limitaciones de los dispositivos comerciales, como dependencia de baterías, necesidad de calibración periódica, variaciones en propagación de señal según la geometría y obstáculos, y sensibilidad a cambios estructurales. Estos hallazgos permitieron establecer protocolos de calibración, mantenimiento y optimización, asegurando que los sistemas puedan operar de manera estable y confiable en implementaciones futuras.

Contribuciones científicas y tecnológicas

Estos antecedentes proporcionan una base sólida para la implementación a escala de los sistemas de posicionamiento indoor en el CIT, así como para su replicabilidad en otros edificios y campus universitarios. La documentación de errores promedio, patrones de propagación, interferencias y calibración establece criterios de diseño que pueden ser aplicados en proyectos de robótica, automatización, navegación autónoma y experiencias de realidad aumentada educativa. Asimismo, los hallazgos confirman que la tecnología UWB, estandarizada bajo IEEE 802.15.4z, constituye la alternativa más confiable y precisa frente a sistemas tradicionales como BLE o Wi-Fi, consolidando a la UVG como institución pionera en la adopción de tecnologías de localización avanzada en entornos académicos.

En síntesis, los trabajos previos realizados dentro del CIT permitieron:

- Comparar tecnologías IPS y establecer UWB como la opción más precisa y estable.
- Validar experimentalmente el patrón de propagación de UWB y su impacto en el diseño de redes.
- Establecer criterios de calibración, orientación y densidad de sensores por nivel.
- Documentar limitaciones técnicas y operativas de dispositivos comerciales.
- Proporcionar un marco metodológico sólido para implementaciones a gran escala, garantizando precisión, escalabilidad y confiabilidad.

Estos antecedentes constituyen la base sobre la cual se desarrollaron las fases posteriores del proyecto, incluyendo la instalación física de sensores, la calibración de redes, el diseño de recorridos virtuales interactivos y la integración de sistemas de gestión de datos y plataformas web, permitiendo que el CIT avance hacia un modelo de campus inteligente, eficiente y tecnológicamente innovador.

V. JUSTIFICACION

El Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la Universidad del Valle de Guatemala representa uno de los espacios más emblemáticos y dinámicos del campus, tanto por su arquitectura moderna y compleja distribución espacial, como por su rol central en eventos institucionales, ferias estudiantiles, visitas académicas y actividades de bienvenida. La experiencia que viven los visitantes al recorrer el CIT por primera vez es un componente esencial para transmitir el valor académico, científico y tecnológico que la universidad busca proyectar. Sin embargo, los métodos actuales de recorridos guiados, basados principalmente en la participación de personal voluntario o guías humanos, presentan limitaciones evidentes: baja escalabilidad, variabilidad en la calidad de la experiencia, y una alta demanda logística y de coordinación.

En este contexto, el proyecto se plantea no solo como una solución digital innovadora, sino como una propuesta tecnológica integral que combina ingeniería, diseño y experiencia de usuario. A diferencia de aproximaciones previas centradas únicamente en el desarrollo de interfaces móviles o simulaciones de posicionamiento virtual, esta iniciativa aborda el problema desde su infraestructura física, a través del diseño, instalación y calibración de una red de sensores Ultra-Wideband (UWB) que permite la localización precisa en tiempo real dentro del CIT.

El uso de sensores UWB se justifica por su superior precisión centimétrica y su robustez frente a interferencias electromagnéticas y fenómenos de multipath, aspectos críticos en entornos arquitectónicamente complejos como el CIT. Mientras tecnologías tradicionales como Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi o GPS presentan errores significativos en interiores, UWB ofrece una medición basada en el tiempo de vuelo (Time of Flight) que permite conocer la posición del usuario con un margen de error mínimo. Gracias a esta precisión, el sistema puede activar contenido en realidad aumentada (AR) justo en el lugar y momento adecuados, logrando una experiencia inmersiva, contextual y fluida para cada visitante.

Además, este trabajo aporta un valor académico y práctico significativo, al abordar la implementación real y calibración de una red física de sensores, un proceso que combina aspectos de electrónica, redes inalámbricas, análisis de señal y desarrollo de software. La experiencia adquirida en la selección de puntos de instalación, el ajuste de parámetros de señal, la sincronización entre dispositivos, y la integración con una aplicación de realidad aumentada constituye un modelo replicable para futuros proyectos en otros espacios del campus o en instituciones similares. Este enfoque fomenta el aprendizaje basado en proyectos (project-based learning) y refuerza la visión de la UVG como una universidad que aprende haciendo.

La implementación de un sistema de recorrido autónomo e interactivo, potenciado por tecnologías de localización avanzada y realidad aumentada, posiciona a la UVG como institución líder en innovación tecnológica aplicada al ámbito educativo. Esta solución no solo mejora la eficiencia operativa y la experiencia de los visitantes, sino que también fortalece la imagen institucional de la universidad como referente en el uso de tecnologías emergentes en América Latina.

Por otro lado, la red UWB diseñada ofrece un potencial de expansión que trasciende el propósito inicial del recorrido virtual. Su infraestructura puede servir como base para aplicaciones futuras, tales como sistemas de asistencia a personas con discapacidad, recorridos personalizados según perfil del visitante, navegación autónoma en interiores, domótica inteligente o simulaciones colaborativas. De esta manera, el proyecto no solo responde a una necesidad puntual, sino que sienta las bases de un ecosistema digital inteligente dentro del campus, alineado con la visión de un “Smart Campus UVG” y con los objetivos estratégicos de sostenibilidad, accesibilidad e innovación educativa.

En síntesis, este proyecto se justifica plenamente por su impacto institucional, técnico, académico y social. Representa una oportunidad concreta para demostrar cómo la Ingeniería en Ciencias de la Computación y las Tecnologías de la Información pueden transformar la interacción entre las personas y el entorno físico, convirtiendo la visita al CIT en una experiencia inmersiva, informativa y memorable, al tiempo que impulsa el desarrollo tecnológico y científico dentro de la universidad.

VI. OBJETIVOS

Objetivo General

Diseñar, calibrar e implementar una red de sensores Ultra-Wideband (UWB) para habilitar un sistema de recorrido virtual con realidad aumentada en el Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la Universidad del Valle de Guatemala.

Objetivos Específicos

- Diseñar la topología de la red de sensores UWB considerando la distribución espacial del CIT, la cobertura óptima y los requerimientos de posicionamiento, con el fin de garantizar una localización precisa del usuario mediante principios de trilateración y simulación digital de cobertura.
- Instalar y calibrar los sensores UWB en puntos estratégicos del edificio, mediante pruebas de campo, medición con telémetro láser y análisis de señal, ajustando parámetros de ubicación y orientación para minimizar el error de localización y maximizar la estabilidad del sistema.
- Integrar la red UWB con una aplicación móvil desarrollada en paralelo, utilizando sensores Estimote y protocolos de comunicación compatibles, para permitir la activación de contenido en realidad aumentada AR basado en la posición física del usuario dentro del edificio.
- Evaluar el desempeño del sistema en condiciones reales, mediante pruebas técnicas en múltiples niveles del CIT y con usuarios reales, midiendo métricas de error promedio de localización, latencia de señal y respuesta del sistema, con el objetivo de validar su precisión y fiabilidad.
- Documentar la infraestructura instalada y la metodología empleada, incluyendo planos, tablas, mapas de sensores y resultados de calibración, con el propósito de facilitar futuras implementaciones en otras áreas del campus.

VI. ALCANCE Y LIMITACIONES

Alcance del Proyecto

El presente trabajo tuvo como alcance el diseñar, calibrar e implementar una red funcional de sensores Ultra-Wideband (UWB) que permita habilitar la localización precisa de usuarios dentro del Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), como parte integral de un sistema de recorrido virtual con realidad aumentada (AR). Este sistema tiene como objetivo mejorar la orientación y la experiencia de los visitantes mediante la activación de contenido digital contextualizado en función de la ubicación del usuario.

El enfoque de este trabajo se centra en el desarrollo e implementación de la infraestructura técnica de localización UWB. No obstante, ambos componentes están diseñados para integrarse como una solución conjunta y operativa desde el momento de entrega.

El trabajo contempla no solo la experimentación o pruebas en escenarios controlados, sino también la entrega de un sistema real, instalado y validado en el Centro de Innovación y Tecnología, los cuales quedarán listos para su uso institucional. Estos espacios funcionarán como zonas habilitadas para recorridos con localización activa y servirán como base para futuras extensiones del sistema en otras áreas del campus.

Dentro del alcance se incluyen las siguientes dimensiones principales:

- Diseño y despliegue de la red de sensores UWB: Se desarrolló la planificación integral de la red para los niveles 1, 2, 3, 6 y 7 del CIT, incorporando criterios de trilateración, cobertura angular de 120°, redundancia espacial y precisión centimétrica. Cada nivel fue diseñado de acuerdo con su complejidad estructural y el tipo de recorrido a habilitar, alcanzando un total de 59 sensores distribuidos estratégicamente.
- Implementación y calibración operativa: Se logró una calibración funcional de los sensores, estableciendo coordenadas cartesianas precisas y validando la consistencia de la señal mediante pruebas comparativas de distancia. Los ajustes de configuración y filtros de procesamiento garantizan una localización estable y confiable, adecuada para el uso en experiencias de realidad aumentada.
- Integración con sistemas digitales: La red fue configurada para interoperar con un sistema digital de gestión que emplea bases de datos PostgreSQL y un entorno de desarrollo web escalable, asegurando que la infraestructura pueda ser administrada, monitoreada y extendida de forma centralizada.
- Operatividad en entornos reales: Se habilitaron cinco niveles del CIT como zonas activas de posicionamiento, listas para ser utilizadas en recorridos institucionales, ferias académicas o demostraciones tecnológicas. La red instalada permite la detección continua de usuarios y la activación de contenido contextual sin intervención manual.

- Escalabilidad y transferencia tecnológica: La estructura técnica y los procedimientos de configuración fueron diseñados para ser replicables en otros niveles del CIT o en diferentes edificios del campus. Esto convierte la red UWB en una infraestructura modular y adaptable, preparada para futuras integraciones con sistemas de automatización, domótica o navegación interior.
- Documentación técnica y base de conocimiento: Se elaboró una documentación integral que consolida planos, coordenadas, configuraciones, resultados de calibración y métricas de rendimiento. Esta base técnica permitirá la continuidad del proyecto en fases posteriores y facilitará su adopción por otros equipos o instituciones.

En términos generales, el alcance del proyecto se define como la implementación real y funcional de un sistema de localización UWB operativo, validado y documentado, que constituye el primer paso tangible hacia la creación de un recorrido virtual con realidad aumentada dentro de la UVG.

Fuera del alcance quedan aspectos relacionados con el desarrollo completo de la aplicación móvil, la gestión de contenido AR y la expansión total de la red a otros edificios del campus, los cuales se proyectan como etapas futuras a partir de la infraestructura establecida.

Este trabajo, por tanto, no se limita a la experimentación teórica o la simulación, sino que materializa un sistema tangible, comprobado y escalable, posicionando a la Universidad del Valle de Guatemala como pionera en la adopción de tecnologías UWB aplicadas a la educación, la orientación espacial y la innovación tecnológica universitaria.

Limitaciones técnicas y operativas

A pesar de su enfoque técnico riguroso y del alcance significativo que representa dejar niveles operativos y funcionales, existen limitaciones propias del contexto, los recursos y la naturaleza del proyecto que deben considerarse:

- Enfoque específico en infraestructura de localización: Este trabajo se enfoca exclusivamente en el diseño, instalación, calibración y validación de la red de sensores UWB.
- Cobertura limitada al edificio del CIT: Aunque el diseño es escalable y replicable, no se contempla en esta etapa extender la red a otros edificios, corredores o espacios abiertos dentro del campus. No obstante, se dejan las bases técnicas para hacerlo en fases futuras.
- Condiciones arquitectónicas desafiantes: El CIT presenta una estructura arquitectónica moderna que incluye materiales como concreto, vidrio y metal, así como múltiples niveles con transiciones verticales. Estos factores pueden generar zonas con mayor interferencia o atenuación de señal, aunque se han tomado medidas para minimizar su impacto mediante simulaciones, orientación estratégica de sensores y aplicación de filtros de señal.
- Limitaciones técnicas del hardware: Los módulos UWB empleados presentan restricciones inherentes a su capacidad de procesamiento y potencia de transmisión. Esto afecta la estabilidad de la señal en entornos con alta densidad de objetos metálicos, interferencias electromagnéticas o barreras físicas. Si bien el sistema demostró un rendimiento adecuado en condiciones controladas, en escenarios complejos la precisión de posicionamiento

puede degradarse. Este tipo de limitaciones es común en la implementación de redes de sensores de alta frecuencia (Müller et al., 2022).

- Dependencia de recursos técnicos y logísticos: El proyecto depende de la disponibilidad continua de sensores UWB, herramientas de medición (telémetros, Metros físico), software especializado (AutoCAD, hojas de cálculo), acceso físico a las instalaciones del CIT y la funcionalidad del sniffer para comprobar funcionamiento de los sensores. Cualquier limitación en estos aspectos podría afectar el ritmo de trabajo o la ejecución de ciertas fases.
- Validación centrada en desempeño técnico, con participación de usuarios reales: Aunque el enfoque principal del proyecto es técnico, se contempla la realización de pruebas con usuarios reales (como estudiantes o personal del CIT) en escenarios prácticos. Estas pruebas permitirán validar el comportamiento del sistema en condiciones reales de uso, identificando posibles mejoras en la precisión, cobertura y estabilidad del posicionamiento. No obstante, el estudio profundo de usabilidad y experiencia del usuario respecto al contenido AR se abordará desde el desarrollo de la aplicación móvil.

VII. MARCO TEORICO

1. Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS)

Los Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS) son tecnologías diseñadas para determinar la ubicación precisa de personas u objetos dentro de espacios cerrados, donde las señales de GPS no funcionan correctamente debido a la atenuación, reflexión y bloqueo de las señales satelitales por muros, techos u otras estructuras (Zafari, Gkelias y Leung, 2019). En pocas palabras, un IPS busca hacer dentro de un edificio lo que el GPS hace en exteriores: indicar con exactitud dónde se encuentra un dispositivo o persona, pero utilizando tecnologías diferentes.

Estos sistemas pueden lograr una precisión que varía desde algunos metros hasta 2 cm en entornos controlados, dependiendo del tipo de tecnología empleada y de las condiciones del entorno (Alarifi et al., 2016). Por ejemplo, los sistemas basados en Ultra-Wideband (UWB) ofrecen una resolución temporal muy alta, permitiendo estimaciones de distancia sumamente precisas, mientras que otras opciones como Wi-Fi o Bluetooth Low Energy (BLE) logran resultados adecuados para aplicaciones donde no se requiere precisión centimétrica (Liu et al., 2020).

Un IPS puede basarse en distintas fuentes de información. Entre las más comunes se encuentran las señales de radiofrecuencia, como Wi-Fi, BLE, RFID o ZigBee. Estas aprovechan la infraestructura existente (por ejemplo, los puntos de acceso Wi-Fi de un edificio) para calcular distancias o intensidades de señal (Farid et al., 2013). Por otro lado, la tecnología UWB se ha posicionado como una de las más prometedoras por su capacidad de medir tiempos de vuelo de las señales (Time of Flight) con precisión de nanosegundos, lo que permite conocer la distancia entre un emisor y un receptor con errores inferiores a 10 cm (Alarifi et al., 2016).

También existen enfoques que no dependen únicamente de señales de radio. Algunos sistemas integran sensores iniciales (como acelerómetros y giroscopios) que permiten estimar el movimiento del usuario a partir de sus desplazamientos previos, técnica conocida como dead-reckoning (Wu et al., 2017). Otros aprovechan señales acústicas o huellas magnéticas del entorno para complementar las mediciones y mejorar la estabilidad del sistema (Yassin et al., 2017).

Para determinar la posición dentro de un edificio, los IPS aplican distintos métodos matemáticos y físicos. Uno de los más conocidos es la trilateración, que se basa en medir la distancia entre el dispositivo y varios puntos de referencia (balizas o anclajes) con posiciones conocidas. A partir de esas distancias, el sistema calcula la posición exacta del objeto o persona (Liu et al., 2007).

Otro enfoque común es el fingerprinting, que consiste en crear previamente un mapa de intensidades de señal dentro del edificio; luego, cuando un usuario se mueve, su dispositivo compara las señales que recibe con la base de datos y determina la ubicación

más probable (Bahl y Padmanabhan, 2000). Además, muchos sistemas modernos combinan diferentes sensores mediante técnicas de fusión de datos, lo que mejora la precisión y reduce los errores generados por interferencias o movimientos bruscos (Zafari et al., 2019).

Las aplicaciones de los IPS son muy amplias. En aeropuertos permiten que los pasajeros se orienten y encuentren su puerta de embarque; en hospitales, facilitan la localización de personal médico o equipos críticos, optimizando tiempos de respuesta; en centros comerciales, guían al visitante y ofrecen promociones basadas en su ubicación; y en entornos industriales, permiten rastrear herramientas, vehículos o mercancías dentro de almacenes donde el GPS no llega (Yassin et al., 2017). Incluso en campus universitarios o museos, los IPS se utilizan para ofrecer experiencias interactivas y mapas dinámicos de navegación interior (Farid et al., 2013).

A pesar de sus ventajas, los sistemas IPS enfrentan desafíos importantes. Uno de los principales es la variabilidad del entorno: los materiales de construcción, las personas en movimiento y los objetos metálicos pueden alterar las señales y reducir la precisión (Zafari et al., 2019). Además, la instalación y calibración inicial pueden requerir un esfuerzo considerable, sobre todo en sistemas basados en huellas de señal (Liu et al., 2007). También es necesario considerar aspectos como el consumo energético en dispositivos móviles, la interoperabilidad entre diferentes fabricantes y los problemas de privacidad, ya que la localización de personas implica el manejo de datos sensibles (Wu et al., 2017).

2. Limitaciones del GPS y la necesidad de IPS

El sistema de posicionamiento global (GPS) es altamente efectivo en espacios abiertos, donde las señales de los satélites pueden recibirse sin interferencias. Sin embargo, su desempeño se ve drásticamente afectado en entornos interiores debido a la naturaleza de las señales de radio que utiliza. Las estructuras físicas como paredes, techos, muebles metálicos o incluso cuerpos humanos generan atenuación, reflexión y difracción de las señales satelitales, lo que provoca errores significativos en la estimación de posición. En muchos casos, la señal puede ser tan débil que los receptores GPS no logran establecer una conexión estable con los satélites, haciendo imposible determinar la ubicación del dispositivo (Dardari et al., 2015).

Además, el GPS requiere una línea de vista directa con al menos cuatro satélites para calcular una posición precisa. En interiores, esta condición rara vez se cumple, lo que incrementa la incertidumbre de la medición o impide completamente el posicionamiento. Factores como el tipo de material de construcción, la densidad de la estructura y la presencia de interferencias electromagnéticas también contribuyen a la degradación del rendimiento (Misra & Enge, 2011). Por estas razones, la precisión del GPS, que en exteriores puede ser del orden de unos pocos metros, puede degradarse a decenas de metros o más en interiores, volviéndolo inadecuado para aplicaciones que requieren localización precisa dentro de edificios o instalaciones industriales.

3. Tecnología de Localización UWB

En los sistemas de posicionamiento en interiores (IPS), la elección de la tecnología de comunicación inalámbrica es fundamental para determinar la precisión, el consumo energético y la complejidad del sistema. Entre las tecnologías más utilizadas se encuentra Ultra-Wideband (UWB), basada en la propagación de señales de radiofrecuencia con un comportamiento, alcance y exactitud eficientes y precisos (Zafari et al., 2019).

Ultra-Wideband (UWB)

Ultra-Wideband (UWB) representa una tecnología muy avanzada para el posicionamiento de alta precisión. UWB transmite pulsos extremadamente cortos de energía que abarcan un amplio espectro de frecuencias, típicamente entre 3.1 y 10.6 GHz (Alarifi et al., 2016). Esta característica permite medir el tiempo que tarda la señal en viajar entre el emisor y el receptor (Time of Flight, ToF), lo que se traduce en una estimación directa y más precisa de la distancia, en lugar de depender de la potencia de la señal como en BLE.

Gracias a su resolución temporal extremadamente fina, UWB puede alcanzar precisiones de localización del orden de los 10 centímetros o menos, incluso en entornos con obstáculos o con presencia de interferencias electromagnéticas (Alarifi et al., 2016). Esto la convierte en la opción ideal para aplicaciones donde se requiere exactitud centimétrica, como el seguimiento de personal o activos en fábricas, robots móviles, sistemas de realidad aumentada o medición de movimientos humanos.

Además, la señal UWB tiene una forma de propagación cónica, con una apertura aproximada de 120°, similar al campo visual humano, lo que facilita la cobertura espacial de los nodos emisores (Decawave, 2020). Su naturaleza de baja potencia también hace que sea menos detectable y más segura, reduciendo el riesgo de interferencias o intercepciones de datos.

Otra ventaja importante es su baja susceptibilidad a la multipropagación (multipath), un fenómeno común en interiores donde las señales rebotan en las paredes y generan errores en la medición. Los receptores UWB son capaces de distinguir las trayectorias directas de las reflejadas, aumentando así la confiabilidad del posicionamiento. Por estas razones, UWB ha sido adoptada en entornos industriales, deportivos y de investigación científica, desplazando a BLE en aplicaciones críticas donde la precisión es prioritaria (Mekikis et al., 2020).

4. Algoritmos de Localización: Trilateración

En los sistemas de posicionamiento en interiores (IPS), obtener una ubicación precisa no depende únicamente de la tecnología de comunicación utilizada (como BLE o UWB), sino también de los algoritmos matemáticos y estadísticos que procesan las señales recibidas. Estos algoritmos transforman las mediciones de distancia o tiempo en coordenadas espaciales, corrigen errores y suavizan los resultados para lograr un posicionamiento estable y confiable.

Trilateración

La trilateración es una técnica geométrica que permite determinar la posición de un punto desconocido a partir de las distancias conocidas hacia tres o más puntos de referencia (también llamados *anclas* o *balizas*). Cada ancla tiene coordenadas fijas en el espacio, y la distancia desde el punto desconocido hasta cada una de ellas define una esfera (en 3D) o un círculo (en 2D). La intersección de estas superficies determina la posición estimada del objeto (Wang et al., 2013).

Matemáticamente, si conocemos las posiciones (x_i, y_i, z_i) de las anclas y las distancias d_i medidas hacia el dispositivo, la posición (x, y, z) del dispositivo se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones:

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = d_i^2$$

Para tres anclas en 2D (o cuatro en 3D), este sistema puede resolverse mediante métodos algebraicos o numéricos. Sin embargo, en escenarios reales —como laboratorios, fábricas o edificios universitarios— las mediciones de distancia contienen errores de ruido, por lo que el punto de intersección exacto, rara vez existe. En estos casos, se aplica trilateración por mínimos cuadrados, que busca la posición que minimiza la suma de los errores entre las distancias medidas y las calculadas teóricamente (Dardari et al., 2015).

La precisión de la trilateración depende fuertemente de dos factores:

- Exactitud de las mediciones de distancia, que puede verse afectada por interferencias, reflexiones o errores de tiempo de vuelo.
- Geometría de las anclas, es decir, su disposición espacial. Si las anclas están muy cercanas entre sí o alineadas, el error de localización aumenta. Por el contrario, una distribución amplia y triangular proporciona mejores resultados (Bensky, 2016).
- En sistemas basados en UWB, la trilateración resulta especialmente efectiva, ya que esta tecnología permite medir el tiempo de vuelo (ToF) con precisión en el orden de nanosegundos, reduciendo significativamente el error de distancia y, por tanto, el error de posición final.

5. Realidad Aumentada (AR) Basada en Localización

La Realidad Aumentada (AR) es una tecnología que combina el mundo físico con elementos digitales en tiempo real, superponiendo información visual, auditiva o haptica sobre el entorno percibido por el usuario (Azuma, 1997). A diferencia de la realidad virtual (VR), que sumerge completamente al usuario en un entorno digital, la AR complementa la percepción del mundo real con información adicional. En la AR basada en localización, esta información virtual se posiciona y activa en función de la ubicación geográfica o espacial del usuario, lo que permite generar experiencias interactivas contextuales.

Principios de la AR Basada en Localización

El funcionamiento de la AR basada en localización se apoya en tres pilares tecnológicos:

- Sensores de posicionamiento, que determinan la ubicación y orientación del usuario en el espacio.
- Dispositivos de visualización, como teléfonos inteligentes, tabletas o gafas AR.
- Software de renderizado, que integra la información del mundo físico con los modelos digitales y la presenta visualmente en el dispositivo (Billinghurst et al., 2015).

En exteriores, la mayoría de las aplicaciones AR utilizan el GPS para determinar la posición del usuario. Sin embargo, este método no es adecuado en interiores debido a la pérdida de señal y la falta de precisión, como se explicó anteriormente. Por ello, en entornos cerrados se emplean Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS) basados en tecnologías como Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi, o Ultra-Wideband (UWB), siendo esta última la que ofrece mayor precisión y estabilidad (Mekikis et al., 2020).

Un ejemplo popular de AR basada en localización es el juego Pokémon GO, que utiliza la posición GPS del usuario para mostrar criaturas virtuales en ubicaciones del mundo real. En este caso, la localización no necesita ser exacta al centímetro, pero en contextos industriales, educativos o científicos, esa precisión sí resulta fundamental. Por ejemplo, en un laboratorio o fábrica, se podría usar AR para mostrar información contextual sobre una máquina específica, o en un museo, para activar modelos 3D sobre una exposición al acercarse a cierto punto (Höllerer & Feiner, 2004).

Integración de UWB con AR

La integración de Ultra-Wideband (UWB) con sistemas de AR representa una de las combinaciones más prometedoras para lograr experiencias inmersivas y precisas en interiores. Gracias a su capacidad para medir la distancia con errores menores a 10 cm, UWB permite determinar con exactitud la posición tridimensional del usuario o del dispositivo (Alarifi et al., 2016).

En un entorno de AR, esta información se utiliza para anclar objetos virtuales a ubicaciones físicas concretas, de manera que los modelos digitales permanezcan fijos en el espacio, incluso cuando el usuario se mueve. Esto soluciona uno de los principales desafíos

de la AR tradicional: el desplazamiento o deriva de los objetos virtuales debido a imprecisiones del sensor de posición.

Por ejemplo, si un usuario se desplaza dentro de un edificio con un dispositivo AR equipado con un receptor UWB, el sistema puede determinar su ubicación exacta en tiempo real y renderizar objetos digitales alineados con el entorno físico. Esto permite mostrar, por ejemplo:

- Indicadores visuales para navegación en interiores, como flechas virtuales sobre el piso o señales flotantes.
- Modelos tridimensionales de equipos industriales, superpuestos sobre su ubicación real para facilitar mantenimiento o entrenamiento técnico.
- Experiencias educativas o turísticas, en las que la posición del usuario activa información multimedia sobre puntos de interés específicos (Zhu et al., 2015).

Beneficios y Desafíos

El principal beneficio de combinar UWB con AR radica en la coherencia espacial y temporal: los elementos virtuales se mantienen estables en relación con el entorno real, sin desplazamientos erráticos. Además, al usar UWB en lugar de GPS o BLE, se obtiene una mayor resistencia a interferencias, una latencia reducida y una precisión suficiente para sincronizar contenido interactivo con precisión centimétrica (MacGougan et al., 2020).

Sin embargo, esta integración también presenta desafíos técnicos:

- Costo e infraestructura: la instalación de anclas UWB requiere planificación y calibración previa.
- Procesamiento en tiempo real: la fusión de datos de posicionamiento y gráficos 3D exige hardware potente y algoritmos eficientes de sincronización.
- Interoperabilidad: la combinación de motores gráficos (como Unity o Unreal Engine) con sistemas de localización UWB aún requiere soluciones personalizadas o SDKs propietarios.

Pese a estos retos, la tendencia actual en la investigación y la industria apunta hacia la convergencia entre sistemas de localización precisa y entornos aumentados, especialmente en campos como la industria 4.0, la educación interactiva y la simulación médica (Rauschnabel et al., 2022). La integración de sensores UWB en dispositivos móviles modernos (como algunos modelos de Apple y Samsung) confirma que esta tecnología está avanzando hacia un uso cada vez más cotidiano.

Perspectiva de Aplicación en Proyectos IPS

En el contexto de un sistema IPS con UWB, implementar AR basada en localización permitiría visualizar en tiempo real la posición y movimiento de los sensores o personas dentro de un edificio, facilitando la supervisión y el análisis de datos espaciales. Por ejemplo, un investigador podría visualizar la trayectoria de un sensor UWB directamente sobre un mapa 3D del laboratorio, o un técnico podría recibir indicaciones visuales sobre

la ubicación exacta de un dispositivo que necesita mantenimiento. De esta forma, la AR no solo mejora la experiencia de usuario, sino que también potencia la interpretación visual de la información espacial, convirtiéndose en una herramienta poderosa de análisis y comunicación dentro de los sistemas de posicionamiento en interiores.

6. Protocolos de Comunicación y Hardware en UWB: DW1000, DW3000 y Ranging

El Ultra-Wideband (UWB) es una tecnología de radiofrecuencia de espectro amplio utilizada en sistemas de posicionamiento en interiores, destacada por su alta precisión de localización, bajo consumo energético y resistencia a interferencias. Para implementar UWB se emplean chips especializados, como los DecaWave DW1000 y DW3000, los cuales cumplen estándares internacionales y permiten funcionalidades avanzadas de medición de distancia (ranging) y comunicación segura entre dispositivos.

Protocolos de comunicación UWB

Los sistemas UWB se basan principalmente en los estándares:

- IEEE 802.15.4-2011 y 802.15.4z:
 - El estándar IEEE 802.15.4-2011 define la capa física y la capa MAC para comunicaciones de bajo consumo en redes de área personal inalámbricas (WPAN), incluyendo UWB.
 - La extensión 802.15.4z, conocida como Enhanced Impulse Radio UWB (IR-UWB), mejora la precisión de ranging, la seguridad y la resistencia a interferencias mediante codificaciones avanzadas y técnicas de sincronización mejoradas (IEEE, 2020).

Canales de comunicación:

UWB opera entre 3.1 y 10.6 GHz, divididos en varios canales.

Los chips DW1000 suelen usar canales 1, 2, 3 y 5, mientras que DW3000 soporta canales adicionales, incluyendo el 4, 7 y 9, ofreciendo más opciones para evitar interferencias y mejorar la cobertura (DecaWave, 2018; 2021). La selección de canal impacta directamente la precisión de la medición de distancia y la estabilidad del sistema en entornos interiores con obstáculos o ruido electromagnético.

Chips DW1000 vs DW3000

- DW1000 (DecaWave, 2018):
 - Compatible con IEEE 802.15.4-2011.
 - Alcance máximo: ~100 m en interiores.
 - Precisión: ~10 cm.
 - Canales habilitados: 1, 2, 3, 5.
 - Funcionalidad: soporte de Two-Way Ranging (TWR) estándar para medir distancias.
- DW3000 (DecaWave, 2021):

- Compatible con IEEE 802.15.4z (Enhanced IR-UWB).
- Precisión mejorada: 2–5 cm en entornos controlados.
- Canales habilitados: 1, 2, 3, 4, 5, 7, 9.
- Funcionalidades: Secure Ranging, mitigación de ataques de spoofing y medición de distancia optimizada con tiempos de vuelo (ToF) más precisos.
- Integración con sniffers UWB y análisis de red en tiempo real.

Ranging en UWB

El ranging permite determinar la distancia entre un tag y las anclas mediante la medición del Time of Flight (ToF) de pulsos UWB:

- Two-Way Ranging (TWR): un dispositivo envía un mensaje, el otro responde y el primero calcula la distancia considerando el tiempo total de ida y vuelta.

La precisión depende de:

- Resolución temporal del chip (DW1000 vs DW3000).
- Canales disponibles y nivel de interferencia.
- Obstáculos físicos y efectos multipath en interiores.

Ranging con Estimote

En el ecosistema Estimote, el protocolo de ranging es propietario y no está disponible públicamente. Solo se puede acceder mediante su SDK oficial, que permite:

- Medir distancias entre tags y anclas sin gestionar manualmente la comunicación UWB.
- Acceder a funciones avanzadas de sincronización, filtrado y calibración.
- Garantizar precisión y seguridad en entornos reales mediante Secure Ranging.

Esto simplifica la integración con aplicaciones móviles y AR, asegurando que la información de distancia sea confiable dentro del ecosistema Estimote (Estimote, 2024).

Sniffers UWB

Los sniffers UWB son dispositivos que capturan y analizan paquetes transmitidos en la red UWB:

- Permiten verificar cobertura, calidad de señal y sincronización entre anclas y tags.
- Ayudan a detectar interferencias y ajustar parámetros como canal, potencia y algoritmos de filtrado.

DW3000 permite sniffing seguro gracias al estándar 802.15.4z, mientras que DW1000 es más adecuado para pruebas controladas o prototipos (Vasudevan et al., 2022). El análisis mediante sniffer es crucial para optimizar redes UWB complejas, asegurando precisión en IPS, AR y sistemas de localización industrial.

Canales y configuraciones

- DW1000: canales 1, 2, 3 y 5.
- DW3000: canales 1, 2, 3, 4, 5, 7 y 9.
- La elección de canal depende del entorno, la interferencia de Wi-Fi, Bluetooth y otros dispositivos RF.
- El rango de apertura de señal y geometría de colocación de anclas influyen en la precisión del posicionamiento, siendo posibles cálculos trigonométricos (Pitágoras) para estimar ángulos de cobertura y zonas muertas.

7. Diseño de Redes UWB en Espacios Cerrados

El diseño de una red basada en Ultra-Wideband (UWB) para posicionamiento en interiores requiere una planificación meticulosa: la infraestructura, la disposición de los nodos, el entorno físico e incluso el mantenimiento tienen un impacto directo en la cobertura, la precisión y la fiabilidad del sistema. A continuación, se detalla cómo abordar este diseño paso a paso, así como los factores críticos que deben tenerse en cuenta.

Ubicación estratégica de anclas

Uno de los elementos más importantes es la instalación de los anclajes (o balizas) UWB —nodos fijos con posición conocida— de modo que maximicen la cobertura del espacio de interés y minimicen las “zonas muertas” (áreas sin cobertura o con imprecisión elevada). Según estudios sobre localización en interiores con UWB, la geometría de colocación de los anclajes tiene un impacto significativo en la precisión; ubicaciones mal distribuidas generan grandes errores debido a ángulos poco favorables o distancias largas entre los nodos (Zhao, Goudar & Schoellig, 2022).

En la práctica, se recomienda:

- Colocar los anclajes a una altura adecuada (por ejemplo, por encima de obstáculos comunes) para que tengan línea de vista lo más limpia posible.
- Evitar alineaciones de anclajes en línea recta, ya que esto reduce la riqueza geométrica del sistema y empeora la precisión de la trilateración o diferencias de tiempo de llegada (TDoA).
- Distribuir los nodos alrededor del perímetro y también dentro del espacio, para asegurar cobertura desde múltiples ángulos.
- Considerar la densidad de anclajes: en espacios grandes o con muchas obstrucciones, puede requerirse mayor número de nodos.

Calibración del sistema

Una vez instalados los anclajes, es necesario calibrar el sistema para asegurar que las posiciones asignadas a cada ancla sean efectivamente correctas y que el sistema esté sincronizado. La calibración implica:

- Medir las distancias reales entre anclajes (usando telémetro láser, cinta métrica profesional, etc.) para validar que la configuración física corresponde con lo configurado en el sistema.
- Verificar la sincronización de relojes entre los anclajes (fundamental en esquemas ToF/TDoA de UWB). Si los anclajes no comparten una referencia de tiempo coherente, las mediciones de distancia/toma de tiempo se deforman.
- Realizar un mapeo inicial del entorno, registrando cómo las señales se comportan (por ejemplo, tiempos de vuelo, potencia recibida, posibles retrasos en trayectos no-línea de vista) para ajustar parámetros de calibración del sistema.
- Ajustar la configuración del backend (servidor de localización) de modo que utilice la geometría real del sistema para calcular posiciones con precisión.

Consideración de obstáculos

Aunque UWB ofrece ventajas frente a otras tecnologías en interiores, su rendimiento no es independiente del entorno. Como se señala, el sistema de posicionamiento UWB es “diseñado” para interiores, pero requiere condiciones razonables de línea de vista (LOS) entre el tag (etiqueta móvil) y los anclajes para alcanzar precisión centimétrica (Marvelmind Robotics, s. f.). Las estructuras y obstáculos generan propagación indirecta y retrasos que afectan la medida de distancia. Por tanto, al diseñar la red UWB es esencial:

- Identificar muros, columnas, estanterías metálicas y mobiliario pesado que puedan bloquear la señal o crear trayectorias reflejadas (“multipath”).
- Evitar ubicar anclajes directamente detrás de grandes masas metálicas o en espacios con muchas obstrucciones entre la etiqueta y varios anclajes.
- Si es inevitable, considerar configuraciones redundantes o incrementar densidad de anclajes para compensar zonas con visibilidad limitada.
- Documentar el ambiente físico y registrar los materiales de construcción, altura de techo, tipo de piso, etc., pues todos estos factores afectan el retraso de señal y la propagación.

Pruebas de campo

Una vez que la instalación y calibración inicial están hechas, realizar pruebas de campo es indispensable para validar la precisión, latencia y cobertura del sistema. Este proceso comprende:

1. Movilizar un tag UWB a lo largo de trayectorias predefinidas (por ejemplo, de un extremo a otro del espacio) y registrar la posición estimada versus la posición real medida.
2. Identificar zonas con error elevado, saltos o pérdida de señal.
3. Ajustar la configuración (por ejemplo, añadir anclajes, reubicar nodos, cambiar parámetros de filtrado o sincronización) hasta conseguir la precisión requerida. Según un artículo reciente, la instalación de UWB que tuvo en cuenta la colocación

óptima de las radios redujo el error del sistema en ~47-76 % en entornos con obstáculos complejos (Zhao et al., 2022).

4. Verificar el mantenimiento continuado: revisar que los anclajes no se han desplazado, comprobar el estado de la alimentación y validar conectividad de los sensores.

8. Calibración y Validación del Sistema

La calibración y validación son procesos fundamentales dentro del diseño de sistemas de posicionamiento en interiores basados en tecnología Ultra-Wideband (UWB), ya que garantizan la precisión, fiabilidad y consistencia de las mediciones obtenidas. Su objetivo principal es asegurar que los valores de distancia y posición estimados por el sistema se correspondan de manera fiel con las medidas reales del entorno físico (Márquez et al., 2021).

Calibración del sistema

La calibración consiste en el ajuste de los parámetros del sistema para minimizar los errores de medición derivados de factores físicos, geométricos o de sincronización. En redes UWB, esto implica verificar la correcta disposición de las anclas, compensar las diferencias de tiempo de llegada de las señales (Time of Flight, ToF) y ajustar las coordenadas base de referencia.

Para ello, se emplean instrumentos de alta precisión como telémetros láser, que permiten comparar las distancias medidas por el sistema con las distancias reales obtenidas mediante métodos geométricos controlados (López et al., 2020). También pueden utilizarse cintas métricas calibradas, especialmente en entornos experimentales donde se busca validar la coherencia espacial entre los nodos emisores y receptores.

La geometría del entorno tiene un papel determinante. Una mala distribución de las anclas (por ejemplo, colocarlas demasiado cerca o en línea recta) puede amplificar los errores de posición, fenómeno conocido como Dilución Geométrica de Precisión (GDOP) (Zhang et al., 2022). Por ello, las configuraciones triangulares o cuadrangulares suelen ser preferidas, ya que permiten obtener un mejor balance angular para el cálculo de coordenadas tridimensionales mediante trilateración.

Determinación del ángulo de apertura de los sensores

Otro aspecto clave en la calibración es la determinación del ángulo de apertura de los sensores UWB, que define la extensión del área efectiva de cobertura del transmisor. Este ángulo, que suele variar entre 100° y 130°, representa el cono de propagación de la señal dentro del cual las mediciones mantienen una precisión óptima (Rashid et al., 2020).

Desde un punto de vista geométrico, el ángulo de apertura puede analizarse aplicando trigonometría. Si se modela el frente de propagación como un triángulo isósceles, el ángulo de apertura θ se puede estimar mediante la siguiente relación:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{x}{d}$$

Donde:

- x es la distancia lateral desde el eje central del sensor hasta el borde del área de cobertura.
- d es la distancia máxima efectiva de la señal.

Este análisis permite modelar teóricamente la zona de cobertura sin depender exclusivamente de mediciones empíricas, lo cual resulta útil en la planificación de redes UWB en entornos cerrados complejos.

Documentación y mantenimiento

La documentación de los resultados de calibración y validación es esencial para la reproducibilidad y el mantenimiento del sistema. Registrar parámetros como:

- Coordenadas de las anclas.
- Potencias de transmisión.
- Configuraciones de filtrado.
- Métricas de error.

Esto facilita la detección de desviaciones en futuras pruebas y asegura la trazabilidad del desempeño del sistema a lo largo del tiempo (Pérez & Morales, 2021).

En conjunto, la calibración y validación permiten establecer un modelo de posicionamiento confiable, robusto y adaptable a distintos tipos de entornos, asegurando que las mediciones UWB representen de manera precisa la realidad física en escenarios interiores.

9. Integración con Aplicaciones Móviles

La integración de un sistema de posicionamiento en interiores (IPS) con aplicaciones móviles constituye un pilar fundamental para la creación de experiencias interactivas, inmersivas y confiables en entornos cerrados. Las aplicaciones móviles no solo actúan como interfaz de usuario sino también como centro de procesamiento de datos de ubicación, coordinando información proveniente de múltiples sensores, calculando la posición exacta del usuario y habilitando funcionalidades avanzadas como realidad aumentada (AR) basada en localización (Azuma, 2017; Mautz, 2012).

En este tipo de sistemas, la calidad de la experiencia depende de que la aplicación pueda representar con precisión la ubicación real y la orientación del usuario, así como actualizar la información en tiempo real. Esto es crucial en entornos como hospitales, aeropuertos, museos o fábricas, donde la correcta interpretación espacial es fundamental para la

navegación, la seguridad y la interacción con contenidos digitales (Liu et al., 2020; Zafari et al., 2019).

Sincronización de datos y transmisión en tiempo real

Para que la experiencia AR y la navegación interior sean efectivas, los datos de ubicación deben actualizarse con latencia mínima y alta consistencia. La comunicación BLE y UWB permite que la aplicación reciba información de distancia y ángulo desde las balizas o anclajes ubicados estratégicamente.

El flujo típico de datos es el siguiente:

1. Las balizas UWB emiten señales de corta duración, detectadas por el dispositivo móvil.
2. El dispositivo calcula la distancia y orientación hacia cada baliza usando técnicas como trilateración o multilateración.
3. El SDK transforma estos datos en coordenadas espaciales utilizables por la aplicación.
4. La aplicación actualiza la posición del usuario en tiempo real y activa contenido AR en función de la ubicación y el ángulo de visión.

Este flujo requiere alta eficiencia de transmisión, con protocolos de baja latencia como BLE, Wi-Fi Direct o MQTT, y procesamiento en tiempo real para garantizar que la visualización y las interacciones sean coherentes (Li et al., 2021). Zafari et al. (2019) señalan que retrasos superiores a 200 ms pueden afectar la percepción espacial en AR, causando desincronización entre la posición real y la representada en la aplicación móvil.

SDK en sistemas UWB

Un SDK (Software Development Kit) es un conjunto de herramientas de desarrollo que incluye APIs, librerías y ejemplos de código, diseñado para simplificar la integración de hardware complejo con aplicaciones (Rahman et al., 2021).

En sistemas IPS basados en UWB, un SDK permite:

- Iniciar el escaneo y detección de balizas o anclajes automáticamente.
- Recibir datos de distancia y ángulo estimados en tiempo real.
- Detectar entrada y salida de zonas definidas (“geofencing”).
- Consultar telemetría de hardware, incluyendo batería, intensidad de señal y temperatura.
- Transformar las mediciones crudas en coordenadas utilizables por la aplicación y sistemas de AR.

Esto elimina la necesidad de que el desarrollador gestione la comunicación de bajo nivel con los sensores y permite concentrarse en experiencia de usuario y lógica de negocio.

Estimote y su SDK

Estimote es un proveedor de balizas BLE y UWB que ofrece SDKs para Android e iOS, diseñados para facilitar la integración con aplicaciones móviles y AR (Estimote Developer Portal, 2024).

El SDK de Estimote permite:

- Abstracción del hardware: El SDK gestiona la detección BLE inicial y activa UWB para mediciones precisas de distancia y ángulo.
- Acceso directo a datos espaciales: Proporciona coordenadas y orientación angular mediante métodos como startScanning() o rangingResult.
- Compatibilidad multiplataforma: SDKs oficiales para Android (GitHub) e iOS (GitHub).
- Gestión de hardware y telemetría: Permite monitorear estado de balizas, intensidad de señal, batería y temperatura.
- Integración con AR: La información de orientación y distancia permite que objetos virtuales se anclen correctamente en el espacio físico, habilitando experiencias inmersivas y precisas.

Telemetría y gestión del sistema

El SDK de Estimote permite:

- Supervisar la intensidad de señal (RSSI) para detectar interferencias.
- Controlar la batería de las balizas y planificar mantenimiento preventivo.
- Ajustar parámetros de transmisión y filtrado para mejorar la precisión.
- Monitorear la conectividad y generar alertas en caso de fallas, optimizando la fiabilidad del sistema.

Esto es especialmente importante en escenarios industriales o educativos, donde la continuidad del servicio es crítica.

Relevancia para el proyecto

El uso del SDK de Estimote garantiza que la aplicación móvil funcione como un hub central, coordinando:

- Posicionamiento en tiempo real y alta precisión.
- Orientación angular para AR.
- Activación de contenido digital en zonas específicas.
- Sincronización con backend y otros sensores.
- Escalabilidad y mantenimiento simplificado de la infraestructura de balizas.

Gracias al SDK, el proyecto puede concentrarse en la experiencia del usuario y lógica de aplicación, mientras la infraestructura de posicionamiento UWB se integra de manera confiable y eficiente.

10. Herramientas útiles para la gestión de la red de sensores

La gestión de redes de sensores en entornos complejos, como edificios, laboratorios o instalaciones industriales, requiere el uso de herramientas digitales que permitan modelar, visualizar y administrar tanto la infraestructura física como los datos generados por los dispositivos. Para este propósito, se emplean software de modelado 3D, diseño asistido por computadora (CAD) y formatos de intercambio de información, que facilitan la integración entre el mundo físico y virtual.

Software de Modelado y Diseño

Blender: Es una plataforma de modelado 3D de código abierto que permite crear, editar y animar modelos tridimensionales de objetos, estructuras o dispositivos. Su utilidad en la gestión de redes de sensores radica en la posibilidad de generar representaciones virtuales de los nodos de la red, analizar la cobertura espacial y simular la interacción de los sensores con el entorno. Blender soporta exportaciones a formatos como OBJ y FBX, que son compatibles con motores de simulación, entornos de realidad aumentada y otras aplicaciones de visualización 3D (Khronos Group, 2022).

Autodesk Inventor: Software especializado en diseño mecánico y de componentes técnicos en 3D. Permite modelar objetos físicos como sensores, soportes y carcasa, incluyendo detalles dimensionales y propiedades de ensamblaje. Este tipo de modelado es esencial para planificar la instalación de dispositivos en entornos reales y prever posibles interferencias físicas entre elementos estructurales y tecnológicos (Autodesk, 2021a).

AutoCAD: Herramienta de diseño asistido por computadora ampliamente utilizada en ingeniería y arquitectura. AutoCAD permite crear planos 2D y 3D precisos de edificios o espacios interiores, los cuales sirven como referencia para la planificación de redes de sensores y la simulación de su cobertura. Los archivos generados (DWG) pueden integrarse con otros softwares para validar la ubicación y el alcance de los nodos de la red (Autodesk, 2021b).

Formatos de Archivo y su Aplicación

OBJ: Formato universal para geometrías 3D que describe la estructura de un objeto mediante vértices y caras. Es útil para intercambiar modelos entre distintas plataformas de visualización y simulación, facilitando el análisis de la colocación de sensores y la interacción con el entorno.

FBX: Formato propietario que permite transportar geometría 3D, jerarquías de objetos y animaciones entre aplicaciones de modelado y motores de juego o simulación. Su ventaja radica en mantener la integridad de las escalas y posiciones de los objetos, lo que es crucial para la representación precisa de redes de sensores en entornos virtuales (Unity Technologies, 2020).

STL: Formato de malla 3D utilizado principalmente para prototipado y fabricación aditiva. Permite validar físicamente diseños de soportes o carcasa de sensores antes de su

instalación en el mundo real, asegurando compatibilidad espacial y reduciendo riesgos de interferencia o incompatibilidad.

IPT: Archivo nativo de Autodesk Inventor que almacena información detallada de componentes individuales, incluyendo geometría, materiales y ensamblajes. Se utiliza para crear modelos precisos que luego pueden exportarse a otros formatos para integración en simulaciones o entornos virtuales.

DWG: Formato de AutoCAD que representa planos 2D y 3D. Los DWG son esenciales para la planificación de redes de sensores en espacios complejos, ya que permiten mapear la estructura física, analizar recorridos y verificar la cobertura de la señal en diferentes escenarios.

JSON: Formato de intercambio de datos estructurados, ampliamente utilizado para almacenar información de ubicación, parámetros de sensores y configuraciones de red. En sistemas de posicionamiento y simulación, los archivos JSON facilitan la comunicación entre la infraestructura física y el software de visualización, permitiendo la actualización de datos en tiempo real y la sincronización con entornos virtuales o aplicaciones móviles.

Aplicaciones en Proyectos Similares

El uso combinado de estas herramientas y formatos no se limita a la gestión de redes UWB, sino que tiene aplicaciones en múltiples contextos:

- Simulación de entornos inteligentes: Para planificar redes de sensores en edificios inteligentes, hospitales, fábricas o campus universitarios.
- Integración física-digital: Permite vincular modelos 3D de sensores con aplicaciones de realidad aumentada o virtual, garantizando que la representación virtual coincida con el entorno real.
- Optimización y calibración de redes: Facilita la ubicación estratégica de nodos, evitando zonas muertas o interferencias y mejorando la precisión de sistemas de localización.
- Documentación y mantenimiento: Los archivos digitales actúan como registro técnico de la red, permitiendo futuras modificaciones, ampliaciones o integraciones con otros sistemas de monitoreo y control.

VIII. METODOLOGÍA

La metodología desarrollada para este trabajo se estructuró en cinco fases principales que abarcaron desde el levantamiento físico del entorno hasta la validación y documentación del sistema. A diferencia de lo propuesto en el protocolo original, varias etapas se ajustaron durante el proceso para responder a los hallazgos técnicos y a las limitaciones identificadas en el hardware y el entorno real del CIT.

Fase 1. Levantamiento físico del entorno

En esta fase se realizó el análisis espacial de los niveles 1, 2, 3, 6 y 7 del Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la Universidad del Valle de Guatemala. El proceso inició con un levantamiento físico mediante mediciones manuales con telémetro láser y cinta métrica para verificar las dimensiones básicas y validar los planos arquitectónicos existentes. Durante esta comparación se detectaron discrepancias significativas entre los planos y las condiciones reales del edificio.

Para corregirlas, se empleó tecnología LiDAR, obteniendo un mapeo tridimensional preciso que permitió generar modelos digitales en formato .blend, posteriormente depurados y convertidos a obj, fbx y stl para su procesamiento en Autodesk Inventor. En esta herramienta se ajustaron orientaciones, alineaciones y geometrías mediante 2D Sketch y extrusions, produciendo modelos sólidos ipt que luego fueron exportados a dwg para su integración en AutoCAD.

A partir de los modelos finales, se definió un sistema de coordenadas espaciales (X, Y, Z) que sirvió como referencia para la ubicación exacta de los sensores UWB. Gracias al levantamiento LiDAR, se obtuvo una base geométrica precisa y confiable para el diseño, simulación y despliegue físico de la red UWB dentro del CIT.

Fase 2. Diseño de la red de sensores UWB

El diseño de la red UWB fue esencial para lograr precisión espacial, cobertura y compatibilidad entre los entornos físico, digital y virtual. Se basó en modelos 3D generados mediante escaneo LiDAR del Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la Universidad del Valle de Guatemala.

Los modelos LiDAR, aunque fueron precisos, presentaron distorsiones geométricas que se corrigieron en Autodesk Inventor mediante sketches 2D y mediciones físicas reales. Luego, se extruyeron sólidos con proporciones exactas y se aplicaron operaciones de shell para definir espesores y rutas estructurales, base para la integración posterior en Unity.

En AutoCAD, cada nivel del CIT se trató como un plano independiente (X, Y) para ubicar los sensores sin interferencias y asignar coordenadas únicas por piso. Los sensores se distribuyeron siguiendo principios de trilateración, garantizando que cada punto estuviera cubierto por al menos tres sensores. Se consideró el ángulo de cobertura de 120°

y el radio de alcance de los dispositivos Estimote, graficando zonas de solapamiento para optimizar la ubicación final.

La red final incluyó los niveles 1, 2, 3, 6 y 7, aprovechando 60 sensores con cobertura homogénea y múltiples triángulos de trilateración. Las coordenadas finales se exportaron a un archivo JSON por nivel con los campos: identificador y coordenadas (X, Y, Z). Este archivo permitió vincular los sensores físicos con su representación digital en Unity y en el sistema web, logrando sincronización espacial precisa para funciones de posicionamiento, navegación y realidad aumentada.

Fase 3. Desarrollo y validación del sniffer UWB

Como parte del proceso de experimentación técnica y validación del comportamiento de la señal Ultra-Wideband (UWB), se construyó un sniffer UWB utilizando el módulo DW3000 de Makerfabs. El propósito principal de este dispositivo fue capturar las tramas de comunicación emitidas por los beacons Estimote UWB en el entorno de pruebas y analizar la información obtenida para evaluar la posibilidad de calcular distancias (ranging) mediante técnicas de tiempo de vuelo (Time of Flight, ToF).

Etapa inicial de aprendizaje y configuración

Antes de implementar el sniffer UWB, se realizó una fase de aprendizaje con una placa Arduino ESP32 con Wi-Fi y Bluetooth, para familiarizarse con la programación de microcontroladores, sensores inalámbricos y procesamiento de datos en tiempo real. Se desarrolló un sniffer en modo promiscuo para Wi-Fi y Bluetooth en Arduino IDE (C++), usando las librerías esp_wifi.h, esp_bt.h y esp_event_loop.h. Esto permitió comprender la estructura de tramas, encabezados MAC y flujos de paquetes, visualizados en el Serial Monitor. Además, se practicó la conexión de periféricos en protoboard con resistencias y LEDs como indicadores de señal.

Configuración del módulo DW3000

Con la llegada de los módulos DW3000, se utilizaron librerías de Makerfabs (dw3000.h, dw3000_regs.h, dw3000_port.h). Se configuraron los pines de conexión, la comunicación SPI, las interrupciones y el modo de recepción continua (RX). Las pruebas con las funciones dwt_readdevid() y dwt_initialise() confirmaron la correcta respuesta del chip y su registro interno.

Prototipo con DW3000

Se construyó un sniffer experimental basado en el ESP32 UWB con módulo Decawave DW3000, capaz de recibir y analizar tramas UWB de los beacons Estimote. El montaje se realizó en protoboard, con fuente regulada de 3.3 V y LEDs indicadores. El código en C++ configuró la inicialización, canal, tasa de transmisión y modo receptor.

Durante las pruebas, el sniffer logró capturar tramas UWB en formato hexadecimal, evidenciando una configuración funcional. Los datos mostraron encabezados, payloads y CRCs del protocolo IEEE 802.15.4, aunque el análisis reveló que solo correspondían a la capa PHY y MAC, sin incluir los campos de tiempo ni etiquetas STS (Secure Time Stamping) requeridas para cálculos de distancia mediante ToF (Time of Flight).

Migración a una solución basada en el SDK oficial

Dado que el sniffer solo podía recibir tramas sin interpretarlas, se optó por usar el SDK oficial mediante una aplicación móvil en Swift, que permitió capturar directamente las distancias, identificadores y niveles de señal (RSSI) de los beacons, con datos procesados y calibrados por el sistema de Estimote.

Fase 4. Desarrollo del sistema web de gestión de sensores

Durante esta fase se abordó el desarrollo de un sistema web destinado a la gestión centralizada de los sensores UWB, con el propósito de unificar la información proveniente de la red física y los entornos digitales de simulación

El sistema se diseñó para permitir el registro, edición, eliminación y visualización de los sensores, organizados por nivel del edificio, además de incluir filtros de búsqueda y exportación automática de datos en formato JSON para facilitar su integración con otros módulos. A nivel estructural, se establecieron requisitos no funcionales orientados a mantener la integridad y seguridad de la información, garantizar la escalabilidad del sistema y ofrecer una interfaz intuitiva para los usuarios técnicos.

La implementación se llevó a cabo utilizando Next.js 14 con TypeScript, lo que permitió integrar frontend y backend en un mismo entorno de desarrollo, reduciendo la complejidad del mantenimiento. Para el almacenamiento de datos se seleccionó PostgreSQL, debido a su robustez y compatibilidad con los datos de los sensores y su ubicación, útil para el manejo de coordenadas espaciales. En cuanto al diseño visual, se empleó Tailwind CSS por su eficiencia en la creación de interfaces responsivas, y en materia de seguridad se implementaron bcrypt para el cifrado de contraseñas y JWT para la autenticación de usuarios.

Diseño de la Arquitectura del Sistema

El diseño arquitectónico se realizó siguiendo el principio de separación de responsabilidades, organizando el sistema en capas que facilitan el mantenimiento y la escalabilidad.

- Capa de presentación (Frontend): Se diseñó utilizando componentes React reutilizables organizados por funcionalidad. Los componentes de autenticación (LoginForm) maneja el inicio de sesión. Los componentes de gestión (BeaconsForm, BeaconsList) permiten crear, ver, editar y eliminar sensores. Los componentes de visualización (LevelCards, Dashboard) proporcionan una vista

organizada de los datos. Cada componente se diseñó para ser independiente y reutilizable, facilitando el mantenimiento y la adición de nuevas funcionalidades.

- Capa de lógica de negocio (Backend API): Se implementó mediante las rutas API de Next.js, que actúan como intermediarios entre el frontend y la base de datos. Cada endpoint tiene responsabilidades específicas: los endpoints de autenticación (/api/auth/login, /api/auth/register) manejan la validación de credenciales y generación de tokens. Los endpoints de sensores (/api/beacons, /api/beacons/[id]) gestionan las operaciones CRUD. Los endpoints de áreas y niveles proporcionan información complementaria necesaria para la organización de los datos.
- Capa de acceso a datos: Se diseñó mediante módulos de abstracción que encapsulan la lógica de conexión y consultas a la base de datos. El módulo de conexión gestiona el pool de conexiones PostgreSQL, optimizando el uso de recursos. El módulo de autenticación centraliza las funciones de hash de contraseñas y generación de tokens. Los módulos de tipos TypeScript proporcionan definiciones que aseguran la consistencia de datos en todo el sistema.

Diseño e Implementación del Modelo de Datos

El modelo de datos se diseñó de forma iterativa, identificando tres entidades principales: sensores (info_beacons), usuarios (users) y áreas del edificio (areas_beacons). Los sensores almacenan identificadores, coordenadas (x, y, z), nivel y área; los usuarios, información de autenticación segura; y las áreas, los distintos niveles o zonas.

El esquema de base de datos incluyó claves primarias autoincrementales, validaciones de nivel (1, 2, 3, 6, 7) y campos de auditoría. Las tablas se crearon mediante scripts SQL sobre PostgreSQL, complementadas con scripts de inicialización y carga de datos, además de un sistema de migraciones para mantener la evolución del esquema sin pérdida de información.

Metodología de Implementación de Funcionalidades

El desarrollo siguió un enfoque incremental:

- Fase 1: Creación de la infraestructura base, conexión a la base de datos y sistema de autenticación (registro e inicio de sesión).
- Fase 2: Implementación de operaciones CRUD de sensores con validaciones, generación automática de códigos y filtros dinámicos.
- Fase 3: Desarrollo del frontend en React, con dashboard unificado, validación en tiempo real y listas con paginación y filtrado.
- Fase 4: Visualización por niveles y exportación JSON, agrupando sensores por área y garantizando compatibilidad con sistemas externos.

Implementación de Medidas de Seguridad

La seguridad se abordó con un enfoque multicapa, siguiendo las recomendaciones OWASP:

- Base de datos: Uso de consultas parametrizadas para prevenir inyección SQL.
- Validación de datos: Doble validación (frontend y backend) para asegurar integridad y formatos correctos.
- Contraseñas: Almacenamiento con bcrypt (coste 10), sin guardar texto plano.
- Autenticación: Sistema de tokens JWT firmados con clave secreta y expiración configurada, protegiendo endpoints y reduciendo riesgos de acceso no autorizado

Proceso de Integración con Sistemas Externos

La integración se implementó mediante un mecanismo de exportación que conecta el sistema de gestión con los entornos digitales. Se definió el formato JSON como estándar de intercambio, utilizando el identificador del sensor como clave y las coordenadas como valores, garantizando compatibilidad sin necesidad de conversiones. El proceso de exportación, desarrollado en el frontend, permite filtrar sensores por área, generar el archivo JSON legible y descargarlo automáticamente con nombre descriptivo. Las pruebas de integración en Unity confirmaron la correcta coincidencia de coordenadas y la importación sin errores, asegurando la sincronización entre la red física y el modelo 3D.

Metodología de Desarrollo y Control de Versiones

El desarrollo se gestionó con Git, manteniendo un historial completo de cambios y convenciones de commits para trazabilidad. Se elaboró documentación técnica sobre la estructura del proyecto, la base de datos y los procesos de despliegue. Además, se crearon scripts de utilidad para tareas como inicialización, carga de datos de prueba, backups y verificación de conexiones, optimizando tiempo y reduciendo errores humanos.

Proceso de Validación y Pruebas

El sistema se validó mediante pruebas funcionales, de seguridad e integración. Las pruebas funcionales verificaron los flujos principales (registro, login, CRUD de sensores, filtros y exportaciones). Las de seguridad confirmaron la protección de endpoints, validaciones de entrada y correcto hash de contraseñas. Las pruebas de integración validaron la compatibilidad del formato JSON y la sincronización entre la base de datos y el entorno de simulación.

Consideraciones para Escalabilidad y Mantenibilidad

El sistema fue diseñado con una arquitectura escalable y modular, permitiendo ampliar componentes sin afectar otros. La base de datos PostgreSQL admite escalamiento horizontal o vertical, y la API soporta nuevas extensiones sin alterar funcionalidades existentes. El código sigue principios de desarrollo limpio, con funciones bien definidas y documentación clara, facilitando su mantenimiento. Finalmente, el modelo de datos

permite agregar nuevas áreas o niveles sin cambios estructurales, asegurando la expansión futura del sistema.

Fase 5. Calibración, validación y documentación

La fase final correspondió al proceso integral de calibración, validación y documentación de la red de sensores UWB, con el objetivo de garantizar la precisión de las mediciones y la coherencia entre el modelo digital y el entorno físico. Además de comprobar el correcto funcionamiento técnico, se buscó establecer una metodología replicable para futuras expansiones o proyectos similares.

La calibración se realizó mediante una metodología experimental que comparó las distancias obtenidas por el SDK de Estimote UWB con mediciones físicas tomadas con un telémetro láser de alta precisión y cintas métricas para rectificar las medidas. Las pruebas se efectuaron en puntos de control estratégicos del nivel 6 del CIT, seleccionados por su complejidad estructural y densidad de sensores. En cada punto se registraron datos simultáneos desde el SDK, el telémetro y la cinta métrica, calculando posteriormente el error absoluto, relativo y el RMSE para evaluar la precisión y estabilidad del sistema bajo distintas condiciones de visibilidad y orientación.

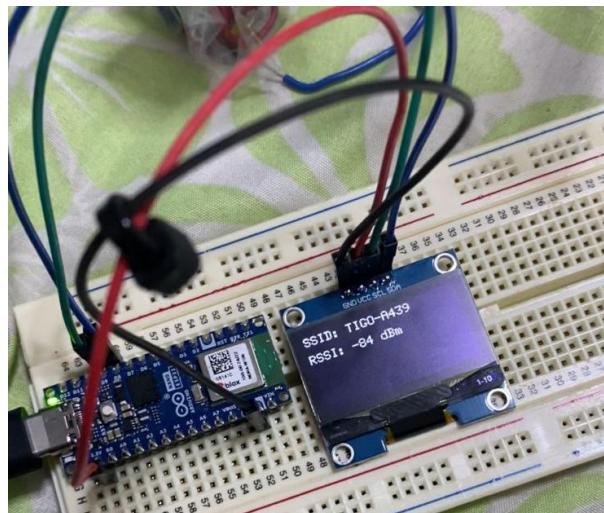
Cuando el error medio superaba el 5 %, se ajustaban las posiciones y se actualizaban las coordenadas en el sistema web, manteniendo la sincronización entre el entorno físico y digital. La documentación generada incluyó protocolos de medición, formatos de registro, ecuaciones de cálculo, planos actualizados en formatos DWG y PDF, y archivos JSON con las coordenadas tridimensionales finales para su integración en Unity. También se elaboraron manuales de configuración, guías de importación y documentación del código utilizado en la captura y visualización de datos, consolidando un repositorio técnico modular que garantiza la trazabilidad y mantenibilidad del sistema. Asimismo, se incorporó documentación visual del proceso —fotografías, capturas de pantalla y registros de campo— como evidencia metodológica y soporte para futuras auditorías.

IX. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la ejecución del proyecto se obtuvieron resultados técnicos y metodológicos que redefinieron de manera sustancial el alcance inicialmente propuesto en el protocolo. El proceso de implementación permitió identificar limitaciones no contempladas al inicio, así como desarrollar soluciones innovadoras que fortalecieron la precisión y escalabilidad del sistema de posicionamiento UWB.

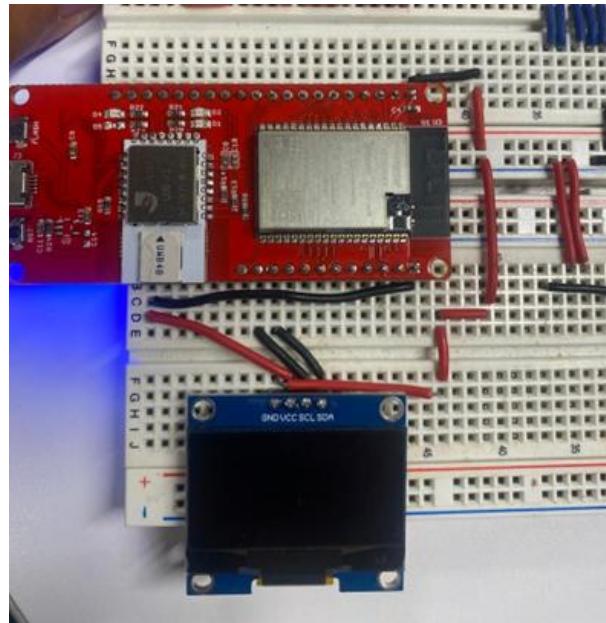
En una primera etapa, se construyó un sniffer UWB utilizando el módulo DW3000 de Makerfabs, con el propósito de capturar las tramas transmitidas por los beacons Estimote instalados en el entorno de pruebas. El dispositivo fue configurado correctamente y se verificó su capacidad de detección al registrar múltiples emisiones UWB en formato hexadecimal. Estas tramas incluían encabezados, payloads y códigos CRC válidos, lo que confirmó la correcta recepción de la señal a nivel físico. Sin embargo, al analizar la información capturada, se determinó que los datos correspondían únicamente a las capas física y MAC del protocolo, sin contener valores legibles asociados al cálculo de distancia o a los parámetros temporales necesarios para aplicar técnicas de *Time of Flight* (ToF). Este resultado evidenció que el protocolo de ranging empleado por Estimote no es accesible desde un sniffer pasivo, sino que se encuentra encapsulado dentro del firmware del fabricante.

Figura 1. Conexión de componentes y pruebas de visualización de tramas en consola serial.



Fuente: Elaboración propia

Figura 2. Montaje físico del sniffer UWB con ESP32 y módulo DW3000 en protoboard.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3. Ejemplo de tramas UWB capturadas por el sniffer en formato hexadecimal.

```
=====
PACKET #1 | Channel: 5 (6.5 GHz)
Hex Dump:
0x0000: 41 88 00 0C 6A 52 48 00 00 00 00 00 21 43 65 87 |A...jRH.....!Ce.|
Frame Control: 0x8841
Frame Type: Data
Source Address: 0C:6A:52:48:00:00
=====

=====
PACKET #2 | Channel: 5 (6.5 GHz)
Hex Dump:
0x0000: 41 88 01 0D 6B 53 49 01 00 00 00 00 22 44 66 98 01 02 |A....kSI....."Df..|
Frame Control: 0x8841
Frame Type: Data
Source Address: 0D:6B:53:49:01:00
=====
```

Fuente: Elaboración propia

Como parte del proceso de análisis se descubrió que los beacons Estimote operan bajo el estándar IEEE 802.15.4z, una versión mejorada del protocolo 802.15.4 que introduce mecanismos avanzados de autenticación y precisión temporal, como el *Secure Time Stamping (STS)*, además del uso de canales específicos (6 y 9) no compatibles con los módulos DW1000 utilizados originalmente. Este hallazgo explicó la imposibilidad de realizar mediciones de distancia con el hardware inicial, obligando a sustituirlo por el módulo DW3000, capaz de soportar las características extendidas del nuevo estándar. A pesar de esta actualización, las pruebas posteriores confirmaron que las tramas seguían sin incluir información de ranging accesible al investigador, ya que las rutinas de medición permanecen cifradas dentro del SDK propietario de Estimote.

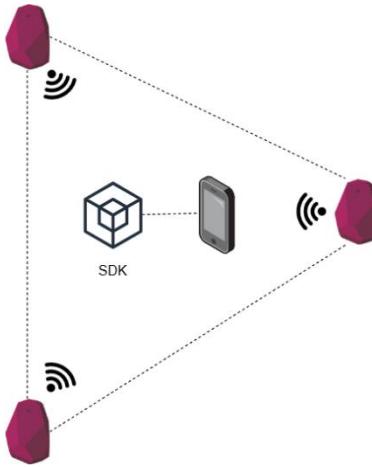
Cuadro 1. Comparación entre modulo DW1000 y DW3000

Característica	Makerfabs UWB DW1000	Makerfabs UWB DW3000
Chip principal	Decawave DW1000	Qorvo DW3000
Estándar UWB soportado	IEEE 802.15.4-2011	IEEE 802.15.4-2011 + 802.15.4z (moderno)
Canales UWB disponibles	1–5 y 7 (hasta 6.5 GHz)	5–9 (hasta 8 GHz)
Scrambled Timestamp Sequence (STS)	No soportado	Soportado, necesario para paquetes cifrados
Sniffer funcional con dispositivos Apple	No detecta Apple U1 ni Airtags	Sí detecta U1, Airtags, Vision Pro, etc.
Compatibilidad con Estimote UWB	No compatible: usa canales y protocolos modernos	Compatible con beacons Estimote UWB
Protocolo de ranging bidireccional	Limitado	Compatible con TWR, TDoA y STS
Frecuencia usada por Estimote UWB	Usa canales altos (6.5–8 GHz, típicamente canal 9)	DW3000 cubre esas bandas
Recepción de paquetes cifrados (STS)	No	Sí
Costo estimado Makerfabs	~\$38 USD	~\$52 USD
Ideal para proyectos con Estimote	No sirve	Recomendado 100%

Fuente: Elaboración propia

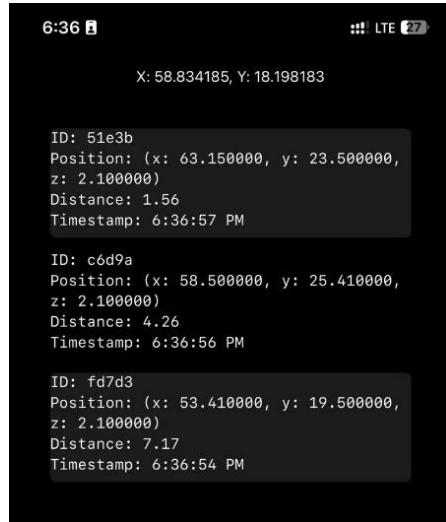
Como consecuencia, se modificó la estrategia metodológica. En lugar de continuar con el desarrollo del sniffer, se decidió utilizar el SDK oficial de Estimote desde una aplicación móvil, lo que permite acceder a los cálculos de distancia ya procesados y calibrados por el firmware del fabricante. Este cambio no solo permitió asegurar la compatibilidad total con los dispositivos UWB utilizados, sino que también redujo la necesidad de aplicar técnicas de ingeniería inversa o de procesamiento de señales de bajo nivel, las cuales habrían incrementado la complejidad y el margen de error.

Figura 4. Ejemplo de conexión de sdk con sensores en trilateración



Fuente: Elaboración propia

Figura 5. Sniffer en aplicación móvil con sdk estimote

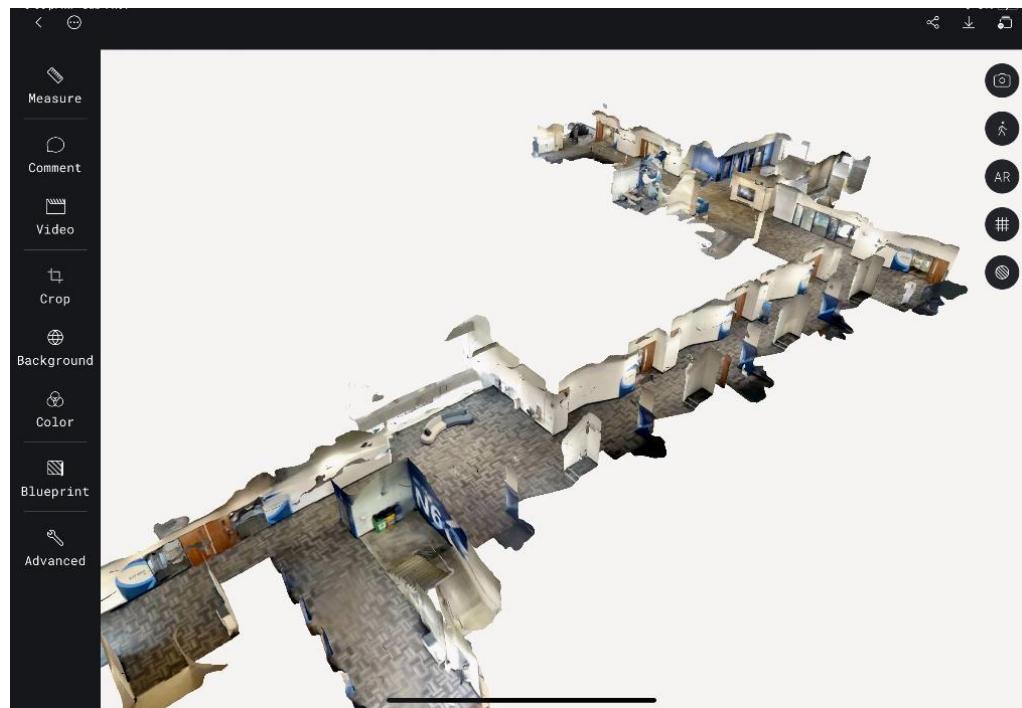


Fuente: Elaboración propia

De manera paralela, se realizó el levantamiento espacial del nivel 6 del Centro de Innovación y Tecnología (CIT). En esta fase se identificaron discrepancias considerables entre las medidas obtenidas con telémetro láser y las dimensiones registradas en los planos arquitectónicos proporcionados por la universidad. Ante esta situación, se optó por realizar un escaneo completo mediante tecnología LiDAR, lo que permitió obtener un modelo tridimensional del nivel con una precisión mucho mayor. Este modelo fue procesado en formato IPT y posteriormente exportado a DWG, sirviendo como base exacta para el diseño y la simulación de la red de sensores. La implementación de esta técnica representó una mejora sustancial respecto a la metodología original, ya que garantizó la correspondencia

entre la representación digital y la estructura física real del edificio, minimizando los errores geométricos en el proceso de calibración.

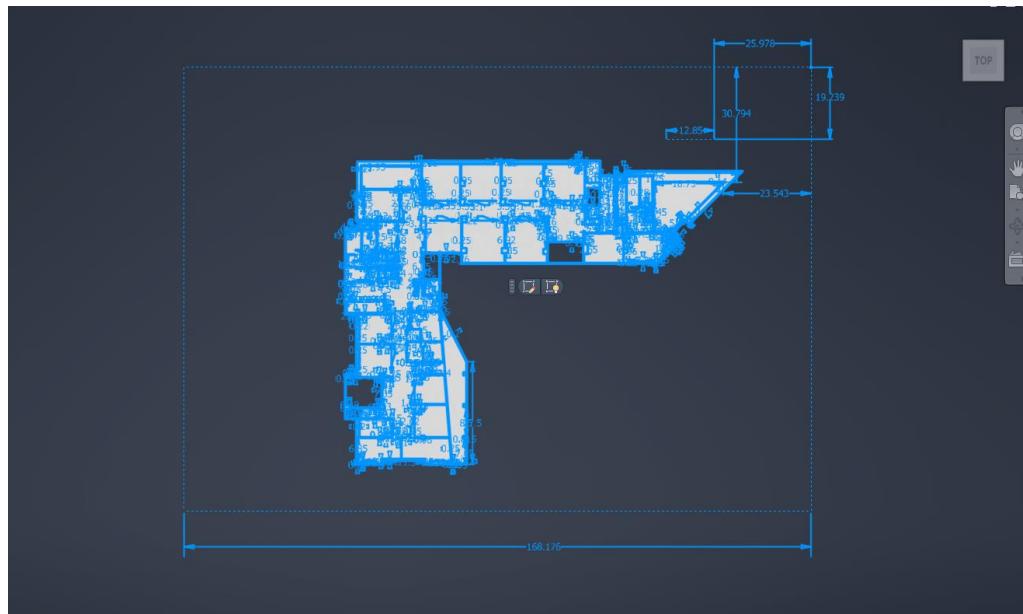
Figura 6. Captura del modelo original obtenido del escaneo LIDAR



Fuente: Leiva, 2025

Con el modelo tridimensional ya disponible, se procedió al diseño de la red de sensores UWB. Inicialmente se había proyectado instalar doce sensores, pero el análisis del modelo reveló zonas con estructuras complejas y obstrucciones que podían afectar la propagación de la señal. Como resultado, se amplió la red a quince sensores para garantizar una cobertura completa, redundancia de visibilidad y una trilateración más estable en cada punto del recorrido. Cada sensor fue posicionado estratégicamente según criterios de cobertura angular, distancias máximas de detección y accesibilidad física para su futura instalación. Los datos finales de ubicación se exportaron en formato JSON, estableciendo un puente directo entre el entorno físico y el entorno virtual desarrollado en Unity.

Figura 7. Sketch corregido



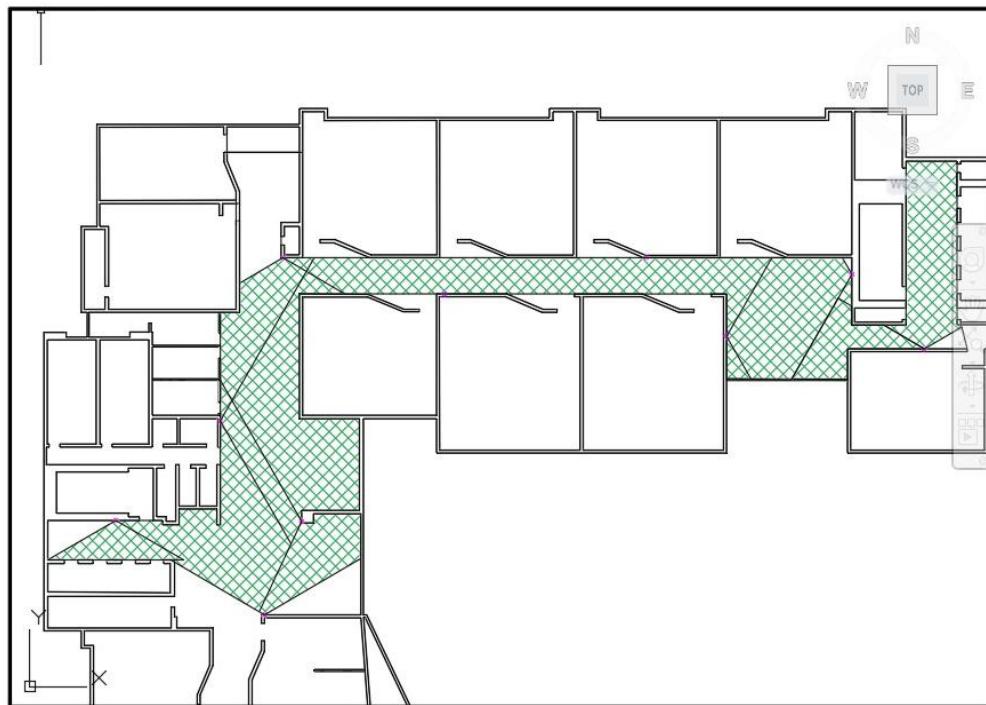
Fuente: Elaboración Propia

Figura 8. Modelo 3D final corregido con shell y path aplicados



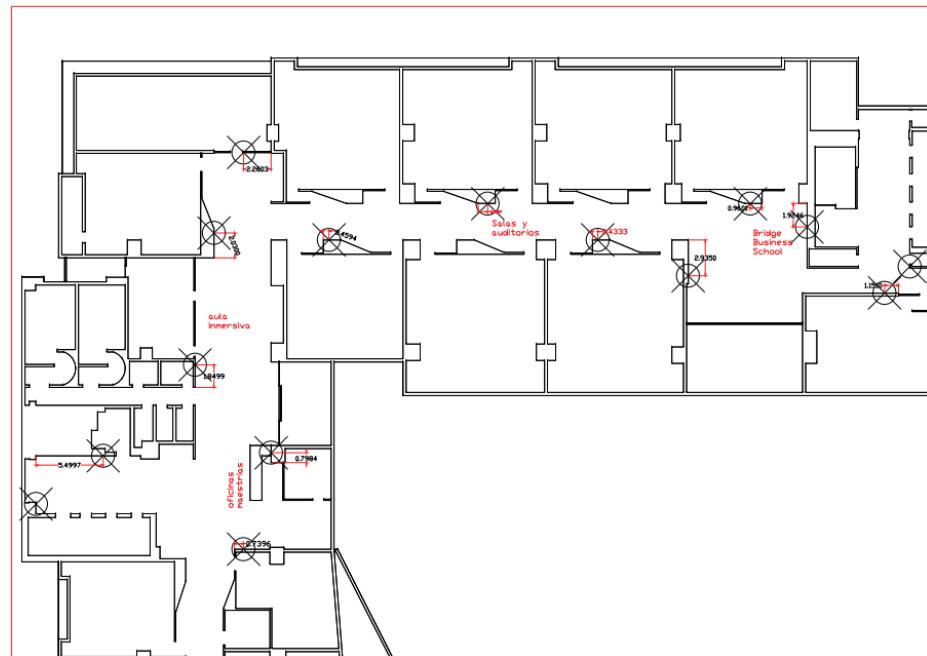
Fuente: Elaboración propia

Figura 9. Representación gráfica de las zonas de cobertura de los sensores en AutoCAD



Fuente: Elaboración propia

Figura 10. Plano de AutoCAD con distribución de sensores con los puntos de trilateración marcados



Fuente: Elaboración propia

Figura 11. Fragmento del archivo JSON mostrando la estructura de los datos exportados desde AutoCAD

```

1  {
2    "73bac8b3c05cd899eb9bcaa46827f630": {
3      "x": -0.9,
4      "y": 2.5,
5      "z": 2.5
6    },
7    "a3be3bc5d733fad28a6ec7878b5d3929": {
8      "x": 5.5,
9      "y": 4.75,
10     "z": 2.5
11   },
12   "0a1abe6e426f05f0c70a65a61313c63c": [
13     {
14       "x": 17,
15       "y": -2.9,
16       "z": 2.5
17     },
18     "44d22f737b259dd4e31a23b324ef941f": {
19       "x": 19.26,
20       "y": 5,
21       "z": 2.5
22     },
23     "550aed08145ffba276256b188a968124": {
24       "x": 13.03,
25       "y": 12.2,
26       "z": 2.5
27     }
28   }
29 }
```

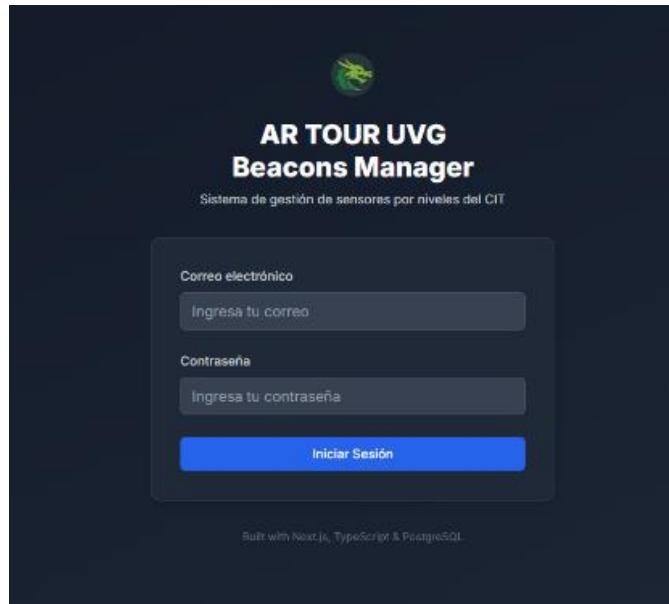
Fuente: Elaboración propia

Se implementó un sistema web de gestión de sensores UWB utilizando Next.js, TypeScript y PostgreSQL como base de datos. La finalidad principal del sistema fue crear una plataforma centralizada que permitiera registrar, organizar y actualizar la información de toda la red de sensores, asegurando que el entorno virtual reflejara con precisión la disposición física de los dispositivos. Esto resulta fundamental para aplicaciones de posicionamiento y recorridos virtuales, ya que cualquier discrepancia entre la ubicación real de los sensores y la representación digital podría afectar la exactitud y confiabilidad del sistema. La necesidad de este sistema surgió porque, aunque inicialmente la metodología solo contemplaba la instalación de los sensores, pronto se identificó que mantener la red sin un control centralizado sería ineficiente y propenso a errores, especialmente al agregar nuevos sensores, modificar coordenadas o gestionar diferentes áreas del edificio.

El sistema fue diseñado con una arquitectura modular y escalable, lo que permite gestionarlo inicialmente por niveles dentro del edificio, pero también expandirlo fácilmente a múltiples áreas o instalaciones según las necesidades futuras. Cada sensor se almacena en la base de datos con toda su información relevante, incluyendo coordenadas, identificadores únicos y metadatos asociados, y la plataforma permite editar todos estos datos de manera dinámica. Esto hace que la gestión sea completamente flexible y adaptable, de modo que cualquier cambio en la red física puede reflejarse de inmediato en el entorno digital sin necesidad de reestructurar el sistema. Adicionalmente, se implementó un mecanismo que genera automáticamente archivos JSON a partir de la información de la base de datos. Estos archivos son utilizados para sincronizar el entorno virtual con la red física, garantizando que cualquier modificación realizada en la plataforma se traduzca

instantáneamente en el modelo digital, lo cual es crítico para mantener la precisión de los recorridos virtuales y cualquier aplicación de análisis basada en la red UWB.

Figura 12. LoginForm para realizar el inicio de sesión.



Fuente: Elaboración propia

Figura 13. BeaconsForm para crear nuevos sensores.

A screenshot of a dark-themed form titled "Agregar Sensores" (Add Sensors). The form is divided into sections: "Sensor #1", "Área *", "Número de Sensor *", "Código de Sensor", and "Identificación de Sensor *". In the "Sensor #1" section, there is a "Coordinadas" (Coordinates) group with input fields for X (0.0), Y (0.0), and Z (1.65). Below the coordinates, a note says "Valor fijo: 1.65 metros" (Fixed value: 1.65 meters). The "Número de Sensor" field contains "Ej: SENSOR001". The "Código de Sensor" field has the placeholder "Se genera automáticamente" (Automatically generated) and "Unidades" (Units) set to "metros". The "Identificación de Sensor" field has the placeholder "Ej: ID001". At the bottom of the form are buttons for "+ Agregar Otro Sensor" (Add Another Sensor), "Cancelar" (Cancel), and "Crear 1 Sensor" (Create 1 Sensor).

Fuente: Elaboración propia

Figura 14. BeaconsList para listar los sensores

Todos los Sensores		Buscar sensores...	
49 sensores encontrados			
SENSOR	COORDENADAS	NIVEL	ACCIONES
Sensor: 1 Codigo: CIT-01 ID: 4725f05f070aa2ee4ac6b8cf8b765f0d	X: 0.01 Y: 2.5 Z: 1.65 metros	Nivel 1	Editar Eliminar
Sensor: 1 Codigo: CIT-03-1 ID: 4733015a078ca593535af92a45aa5f39	X: 0.01 Y: 0.8 Z: 1.65 metros	Nivel 3	Editar Eliminar
Sensor: 2 Codigo: CIT-03-2 ID: 0bc9f864f82a6825a6c242646ce3d429	X: 5 Y: 4.75 Z: 1.65 metros	Nivel 3	Editar Eliminar

Fuente: Elaboración propia

Figura 15. LevelCards para listar cada nivel.

AR TOUR UVG - Beacons Manager		Hola, admin	Cerrar Sesión
Gestión de Sensores	Gestión de Áreas		
+ Agregar Sensores			
<h3>Áreas de Sensores</h3> <p>49 sensores distribuidos en 3 áreas</p>			Ver Todos
CIT-01 Nivel 1 CIT	13 sensores Sensores registrados	<input checked="" type="checkbox"/> Activo	Hacer clic para ver JSON
CIT-03 Nivel 3 CIT	17 sensores Sensores registrados	<input checked="" type="checkbox"/> Activo	Hacer clic para ver JSON
CIT-06 Nivel 6 CIT	19 sensores Sensores registrados	<input checked="" type="checkbox"/> Activo	Hacer clic para ver JSON
<h3>Todos los Sensores</h3> <p>49 sensores encontrados</p>		Buscar sensores...	

Fuente: Elaboración propia

Figura 16. Dashboard para la gestión general de sensores.

The screenshot shows the 'Gestión de Sensores' section of the dashboard. It displays three sensor areas: CIT-01 (Nivel 1 CIT, 13 sensores), CIT-03 (Nivel 3 CIT, 17 sensores), and CIT-06 (Nivel 6 CIT, 19 sensores). Each area has a status indicator ('Listo') and a 'Ver Todos' button. Below this, the 'Todos los Sensores' section shows 49 sensors found, with a search bar and a table listing sensor details like ID, Código, and Coordinates (X: 0.01, Y: 2.5, Z: 1.65).

SENSOR	COORDENADAS	NIVEL	ACCIONES
Sensor: 1 Código: CIT-01-1 ID: 4725f05070a2ce4ac6b8cf8b7650d	X: 0.01 Y: 2.5 Z: 1.65	Nivel 1	Editar Eliminar

Fuente: Elaboración propia

Figura 17. Dashboard para la gestión general de areas.

The screenshot shows the 'Gestión de Áreas' section of the dashboard. It lists three areas: Nivel 1 (Área 1, Código: CIT-01), Nivel 3 (Área 3, Código: CIT-03), and Nivel 6 (Área 6, Código: CIT-06). Each area has a status indicator ('Activos') and edit/delete buttons.

ÁREA	CÓDIGO	UBICACIÓN	ESTADO	ACCIONES
Nivel 1 Área 1	CIT-01	CIT	Activos	Editar Eliminar
Nivel 3 Área 3	CIT-03	CIT	Activos	Editar Eliminar
Nivel 6 Área 6	CIT-06	CIT	Activos	Editar Eliminar

Fuente: Elaboración propia

La seguridad del sistema fue un aspecto prioritario durante el desarrollo. Se implementó un sistema de autenticación mediante tokens JWT y se restringió el acceso a un único usuario administrador, asegurando que solo personal autorizado pueda realizar cambios en la red de sensores. Además, se aplicaron buenas prácticas de desarrollo basadas en las recomendaciones de OWASP, previniendo inyecciones SQL y accesos no autorizados, lo que protege la integridad de los datos y garantiza que el sistema cumpla con estándares de seguridad reconocidos en la industria. Esta combinación de seguridad y control centralizado permite que la gestión de la red sea confiable, evitando errores humanos y problemas derivados de modificaciones no controladas.

Los resultados del sistema son múltiples y significativos. Por un lado, permite administrar la red de sensores de manera centralizada y escalable, reduciendo significativamente los errores y el tiempo requerido para el mantenimiento. Por otro lado, su arquitectura flexible facilita la incorporación de nuevos sensores o áreas sin necesidad de modificar la estructura del sistema, garantizando que la plataforma pueda adaptarse a futuras expansiones o cambios operativos. La sincronización automática con el entorno virtual asegura que cualquier cambio en la ubicación o configuración de los sensores se refleje de inmediato, aumentando la confiabilidad y precisión de los datos. Finalmente, la combinación de control de acceso robusto y medidas de seguridad avanzadas protege la información crítica, asegurando que solo el personal autorizado pueda interactuar con el sistema y evitando riesgos asociados a vulnerabilidades comunes en aplicaciones web.

En resumen, este sistema no solo cumple con la función de gestión operativa de sensores UWB, sino que también proporciona una solución escalable, flexible, segura y totalmente sincronizada con el entorno físico. Gracias a su diseño modular y su capacidad de actualización dinámica, garantiza que la red pueda crecer y adaptarse a nuevas necesidades, manteniendo la precisión del modelo digital y ofreciendo una herramienta confiable para la administración de la infraestructura de sensores. Este desarrollo surge como una respuesta práctica a necesidades reales del proyecto, demostrando cómo la tecnología puede integrarse de manera efectiva para resolver problemas operativos y estratégicos en un entorno complejo y dinámico.

Gracias a los resultados obtenidos durante las fases previas de levantamiento, modelado y calibración, el proyecto alcanzó una integración sólida entre los componentes físicos, digitales y virtuales del sistema. La instalación de los sensores Ultra-Wideband (UWB), su incorporación en el modelo tridimensional y la posterior vinculación con el recorrido virtual en realidad aumentada permitieron consolidar una red de posicionamiento coherente, funcional y escalable.

El trabajo inicial se concentró en el nivel 6 del Centro de Innovación y Tecnología (CIT), el cual sirvió como entorno experimental y de validación para la metodología general. En este nivel se desplegaron quince sensores Estimote UWB, ubicados estratégicamente con base en el análisis arquitectónico del espacio, las trayectorias de los usuarios y las zonas de mayor tránsito o visibilidad. Esta primera implementación permitió comprobar la cobertura efectiva del sistema, el comportamiento de las señales en diferentes

condiciones estructurales (muros, materiales reflectantes, obstáculos) y la precisión en la determinación de posiciones mediante trilateración.

Una vez comprobada la viabilidad técnica del diseño, el proyecto se amplió a los niveles 1, 2, 3, 6 y 7, con el objetivo de establecer una red de sensores integral que abarque todo el edificio. Cada nivel fue tratado de manera independiente, tanto en la fase de modelado como en la planificación de la ubicación de los sensores, ya que se determinó que las características espaciales, arquitectónicas y funcionales de cada planta exigían configuraciones diferenciadas para alcanzar el mismo nivel de precisión.

La cantidad de sensores por nivel se estableció con base en tres criterios principales:

- Extensión del área útil: los niveles de mayor superficie o con mayor número de zonas de tránsito requirieron un mayor número de sensores.
- Complejidad arquitectónica: se consideró la cantidad de divisiones internas, la altura de los techos, la presencia de estructuras metálicas o muros gruesos, y las posibles interferencias de señal.
- Cobertura mínima para trilateración: se garantizó que en cada punto del recorrido existiera la intersección de señales provenientes de al menos tres sensores, condición fundamental para el cálculo preciso de coordenadas en 3D.

De acuerdo con estos parámetros, se definió la siguiente distribución final:

Cuadro 2. Distribución de sensores por nivel

Nivel	Número de Sensores (Estimote Beacons)
Nivel 1	13
Nivel 2	6
Nivel 3	17
Nivel 6	15
Nivel 7	8

Fuente: Elaboración propia

Esta distribución no solo respondió a criterios de cobertura espacial, sino también a la optimización de recursos y la eficiencia del sistema. Los niveles con diseños más simples y pasillos lineales, como el nivel 2, pudieron cubrirse con un número reducido de sensores sin afectar la precisión, mientras que niveles con geometrías más irregulares o áreas con interconexiones complejas, como el nivel 3, requirieron una densidad mayor para mantener la triangulación estable.

En el caso particular del nivel 3, el mayor número de sensores (17 en total) se justificó por la presencia de múltiples salas y pasillos interconectados, donde las señales UWB podían sufrir interferencias o pérdidas parciales. Por el contrario, el nivel 2, con

espacios más abiertos y sin grandes obstáculos, permitió mantener un desempeño estable con solo seis sensores. Este enfoque de diseño adaptativo demostró la versatilidad del sistema para ajustarse a distintos escenarios arquitectónicos sin comprometer la precisión global del modelo.

Para cada nivel se elaboraron planos técnicos en AutoCAD, derivados de los modelos tridimensionales corregidos en Autodesk Inventor, donde se representaron las posiciones exactas de los sensores mediante puntos referenciados (Points) en coordenadas X, Y, Z. Dichas coordenadas fueron posteriormente exportadas a archivos JSON, lo que permitió integrarlas directamente en el sistema digital y en el entorno de realidad aumentada desarrollado en Unity.

El proceso de vinculación entre los datos físicos y el entorno virtual garantizó que el recorrido virtual del CIT reprodujera fielmente la estructura real del edificio y que las posiciones de los sensores coincidieran con su ubicación exacta en el modelo 3D. Gracias a esta interoperabilidad entre plataformas (Inventor, AutoCAD, Unity y el sistema web de gestión) se logró una sincronización completa entre las distintas dimensiones del proyecto: la física (instalación de sensores), la digital (modelo tridimensional y base de datos) y la virtual (recorrido inmersivo en realidad aumentada).

Adicionalmente, la red fue diseñada para ser modular y escalable, lo que permite incorporar nuevos sensores o ajustar los existentes en caso de ampliaciones futuras del recorrido o actualizaciones del edificio. Cada sensor puede ser gestionado desde la plataforma digital, donde se registran sus coordenadas, estado, nivel asignado y parámetros de calibración. Esta gestión centralizada facilita el mantenimiento del sistema y asegura la trazabilidad de los cambios realizados.

El resultado final de esta distribución y configuración fue un sistema robusto, equilibrado y técnicamente validado, capaz de garantizar una precisión métrica estable y una integración fluida con la experiencia de realidad aumentada. Cada nivel del edificio quedó configurado como una unidad independiente dentro de la red, pero vinculada al mismo modelo digital central, lo que permite su expansión sin necesidad de reconfigurar toda la infraestructura.

En términos generales, la implementación de esta red permitió alcanzar los siguientes logros técnicos y metodológicos:

- Consolidación de un modelo de localización adaptable a distintas configuraciones espaciales.
- Sincronización completa entre los modelos 3D y las coordenadas físicas reales.
- Optimización del número de sensores sin pérdida de cobertura o precisión.
- Estandarización del proceso de registro y documentación de cada dispositivo.
- Escalabilidad y mantenimiento simplificado mediante la plataforma de gestión digital.

Estos resultados consolidaron la base tecnológica del sistema de posicionamiento y permitieron sentar los cimientos para su futura integración completa con el recorrido de realidad aumentada del CIT. En conjunto, el proyecto logró un equilibrio entre precisión, eficiencia y replicabilidad, características esenciales para su evolución hacia una red institucional de localización inteligente que combine sensores física, modelado digital y experiencia inmersiva.

El desarrollo e implementación del sistema de posicionamiento en interiores basado en tecnología Ultra-Wideband (UWB) constituyó un proceso de aprendizaje técnico y metodológico de alta complejidad, en el cual los principios teóricos planteados en el marco conceptual fueron sometidos a una validación empírica rigurosa. Este proceso permitió no solo comprobar los fundamentos del posicionamiento por tiempo de vuelo (Time of Flight, ToF), sino también identificar las limitaciones prácticas y los desafíos reales que surgen al trasladar estos conceptos desde el plano experimental hacia una aplicación funcional dentro de un entorno arquitectónico real.

A lo largo del proyecto se enfrentaron obstáculos que abarcaron desde la configuración electrónica de los módulos y la compatibilidad de protocolos, hasta la precisión geométrica del modelado tridimensional del entorno y la necesidad de garantizar la interoperabilidad entre sistemas digitales y físicos. Estas dificultades obligaron a replantear varias decisiones del protocolo inicial, generando un proceso iterativo de rediseño metodológico que fortaleció la comprensión integral del sistema y su potencial de expansión.

En la fase inicial, la metodología contemplaba el uso de un sniffer UWB como herramienta principal para capturar tramas de la capa física y obtener de ellas las marcas de tiempo necesarias para el cálculo de distancias mediante el principio de Time of Flight (ToF). Este enfoque se sustentaba en la posibilidad de acceder directamente a los paquetes transmitidos entre dispositivos y, a partir de ellos, derivar los tiempos de transmisión y recepción para aplicar algoritmos de Two-Way Ranging (TWR) o Double-Sided Two-Way Ranging (DS-TWR), conforme a lo establecido en las normas IEEE 802.15.4 (IEEE, 2020).

No obstante, la experimentación práctica reveló una limitación crítica. Aunque los módulos DW3000 empleados son compatibles con el estándar IEEE 802.15.4z, estos no exponen las marcas temporales internas cuando operan en modo pasivo. El sniffer logró capturar encabezados, direcciones MAC y metadatos de control —confirmando la correcta recepción de señales a nivel físico—, pero no permitió acceder a la información cronométrica necesaria para la medición de distancias.

La razón técnica detrás de esta restricción radica en la naturaleza de la sincronización temporal en los sistemas UWB. Dicha sincronización ocurre con precisión en el rango de los nanosegundos y solo los dispositivos que participan activamente en la comunicación —es decir, anclas y etiquetas sincronizadas— tienen acceso a las marcas de tiempo precisas utilizadas en el cálculo de ToF (Luo et al., 2023). Los dispositivos en modo pasivo, como los sniffers, no pueden obtener ni reconstruir estos valores sin intervenir directamente en el protocolo de ranging, lo que invalida su uso como herramienta de medición directa.

A esta limitación se suma la implementación del estándar IEEE 802.15.4z, que introduce mecanismos avanzados de seguridad, entre ellos las Secure Time Stamps (STS) y el cifrado de tramas de ranging, diseñados para prevenir ataques de suplantación o manipulación de distancias. Este nivel de protección, promovido por el FiRa Consortium (2024), garantiza la integridad del proceso de ranging, pero también imposibilita que un sniffer no autenticado interprete las marcas temporales reales. En consecuencia, las tramas capturadas contienen únicamente información de capa física y MAC, pero no los datos de tiempo o distancia que constituyen el núcleo del posicionamiento. Esta observación se evidencia en el Cuadro 2, que compara las características de los módulos DW1000 y DW3000.

Ante esta barrera tecnológica, se tomó la decisión de reorientar la metodología hacia un enfoque más estable y confiable: el uso del SDK oficial de Estimote. Este cambio representó un giro estratégico en la dirección del proyecto. En lugar de insistir en la reconstrucción del proceso de ranging a bajo nivel (una tarea que habría requerido ingeniería inversa, alta capacidad de sincronización temporal y un control preciso del firmware), se optó por aprovechar las rutinas de medición integradas en el software del fabricante.

El SDK de Estimote encapsula el protocolo propietario de ranging, el cual aplica algoritmos de filtrado de ruido, compensación de sesgo y calibración ambiental. Si bien su código es cerrado y su acceso limitado, garantiza resultados estables y consistentes, alineados con las especificaciones técnicas de los dispositivos (Estimote, 2023). De este modo, se priorizó la confiabilidad, interoperabilidad y precisión sobre la exploración de bajo nivel, en concordancia con las buenas prácticas de la ingeniería aplicada (Coppens et al., 2022).

Este cambio metodológico no solo simplificó la fase experimental, sino que permitió concentrar los esfuerzos en la validación del posicionamiento, la calibración espacial y la optimización de la red de sensores, en lugar de en el análisis y decodificación de tramas. La decisión marcó una transición clave en el proyecto: pasar de un enfoque exploratorio a uno orientado a la funcionalidad y la replicabilidad.

Otro de los avances metodológicos más relevantes fue la incorporación de tecnología LiDAR para el levantamiento espacial del edificio. La metodología inicial contemplaba mediciones manuales o mediante telémetro láser, sin considerar las discrepancias entre los planos arquitectónicos y la estructura real. Durante la fase de pruebas en el nivel 6 del Centro de Innovación y Tecnología (CIT), se detectaron desviaciones de hasta 25 cm entre las medidas de plano y las dimensiones físicas.

En un sistema de posicionamiento basado en trilateración UWB, un error estructural de esa magnitud puede traducirse en desplazamientos significativos en las coordenadas finales. La precisión del sistema depende directamente de la geometría de las anclas, por lo que cualquier inconsistencia espacial altera la propagación del tiempo de vuelo y la posición calculada (Alarifi et al., 2016).

Frente a este hallazgo, se implementó un escaneo tridimensional con LiDAR, generando modelos digitales con precisión milimétrica. Estos modelos, procesados en Autodesk Inventor y exportados a AutoCAD en formato DWG, permitieron definir coordenadas exactas (X, Y, Z) para cada sensor. Además, posibilitaron la simulación de la propagación de señales, la detección de posibles interferencias y la optimización de la cobertura. Esta integración entre el levantamiento físico y el modelado digital elevó significativamente la calidad técnica del sistema, asegurando una correspondencia real entre el entorno físico y el modelo tridimensional.

La expansión del sistema desde un entorno controlado (el nivel 6 del edificio) hacia una implementación multinivel en los niveles 1, 2, 3, 6 y 7 representó una validación crucial de su escalabilidad técnica y operativa. Este proceso permitió evaluar la capacidad del sistema para mantener su precisión y estabilidad en condiciones arquitectónicas heterogéneas, comprobando que el diseño era lo suficientemente flexible como para adaptarse a variaciones estructurales y materiales sin comprometer la calidad de las mediciones.

En el nivel 1, la cantidad y distribución de sensores respondió a la necesidad de cubrir amplios pasillos con baja densidad de obstáculos. Dado que las trayectorias eran lineales y los materiales predominantes eran de baja reflectividad, bastó con una disposición más espaciada, priorizando la estabilidad del enlace y la reducción del consumo energético.

El nivel 2 presentó una configuración más compacta, dado que este mismo cuenta con espacios abiertos y no tiene una alta carga estructural. Su menor superficie útil y su geometría relativamente sencilla justificaron un número reducido de sensores, buscando eficiencia sin redundancia. Este escenario fue clave para comprobar que el sistema podía mantener la trilateración estable incluso con densidades bajas de anclajes, siempre que existiera visibilidad directa entre ellos. Este nivel sirvió como referencia para validar la cobertura mínima necesaria en entornos abiertos.

El nivel 3, por su parte, constituyó el entorno más desafiante. La presencia de pasillos curvos, divisiones de vidrio y estructuras metálicas incrementó los efectos de multitrayectoria (multipath) y atenuación de la señal. En este contexto, se incrementó deliberadamente la cantidad de sensores, reduciendo la distancia entre anclas y ajustando los ángulos de orientación para asegurar que cada punto del espacio tuviera visibilidad con al menos tres nodos. Este ajuste no solo mejoró la precisión del posicionamiento, sino que permitió analizar cómo la densidad de la red influye en la estabilidad del cálculo tridimensional, confirmando las recomendaciones de Zhang et al. (2020) sobre la importancia de mantener redundancia geométrica en entornos estructuralmente complejos.

El nivel 6, escenario inicial de pruebas, fue el más representativo para la calibración del sistema. Aquí se logró un equilibrio entre densidad y rendimiento, configurando un número intermedio de sensores que sirvió como base para definir los parámetros de referencia de toda la red. Además, este nivel permitió validar experimentalmente los patrones de error y las zonas de interferencia, lo que facilitó la posterior estandarización del protocolo de instalación en los demás niveles.

Finalmente, el nivel 7 tuvo un propósito más experimental: evaluar la interoperabilidad vertical y la consistencia del sistema al extenderse hacia nuevos pisos. Su despliegue confirmó que la arquitectura diseñada era efectivamente modular, capaz de admitir nuevos nodos sin necesidad de reconfigurar los niveles anteriores ni alterar la sincronización global del sistema.

Cada una de estas configuraciones respondió a un principio técnico específico. La densidad de sensores estuvo determinada por la extensión del área útil, la geometría del entorno y la necesidad de garantizar la trilateración mínima en todo punto del mapa. Asimismo, la orientación de los módulos (considerando su ángulo de emisión aproximado de 120°) se ajustó para optimizar la cobertura y minimizar interferencias por reflexiones o superposición excesiva de señales.

Esta estrategia de despliegue progresivo no solo permitió adaptar la red a las particularidades físicas del edificio, sino que también evidenció la madurez del diseño desde una perspectiva de ingeniería de sistemas. La capacidad de escalar horizontal y verticalmente sin modificar los fundamentos del protocolo confirmó que el sistema puede extenderse a otras áreas del campus, consolidándose como una infraestructura base para futuras aplicaciones de localización, realidad aumentada y trazabilidad inteligente dentro del entorno universitario.

Una de las innovaciones más significativas del proyecto fue el desarrollo de una plataforma web de gestión de sensores, concebida como un puente entre el entorno físico y el digital, consolidando el sistema UWB como una infraestructura ciberfísica integral. Implementada con Next.js y TypeScript en el frontend y PostgreSQL en el backend, la plataforma incorpora autenticación mediante tokens JWT, validaciones de seguridad según buenas prácticas de OWASP y una API modular que permite realizar operaciones CRUD sobre los sensores de manera controlada y confiable.

La necesidad de esta herramienta surgió de los desafíos identificados durante la fase experimental: la complejidad de mantener la red de sensores, la posibilidad de modificaciones continuas en su ubicación, la calibración de distancias y la gestión de metadatos asociados a cada dispositivo. Sin un sistema centralizado, cualquier cambio en la red física —como agregar un sensor, ajustar coordenadas o sustituir un dispositivo— podría derivar en inconsistencias con el modelo digital, afectando la precisión de la trilateración y la confiabilidad de los recorridos virtuales.

La plataforma permite registrar, editar y visualizar la información de cada sensor, incluyendo sus coordenadas tridimensionales (X, Y, Z), identificadores únicos, nivel del edificio y parámetros de calibración. Adicionalmente, ofrece la exportación automática de archivos JSON que sincronizan de manera directa los datos físicos con el entorno virtual desarrollado en Unity, asegurando que cualquier modificación en la infraestructura real se refleje instantáneamente en la representación digital. Esta integración constituye un ejemplo claro de ciberfísica aplicada, donde hardware, software y modelos virtuales interactúan dinámicamente, generando un sistema consistente, trazable y adaptable a distintas condiciones operativas.

Desde la perspectiva de ingeniería de sistemas y del ciclo de vida del software, esta plataforma aporta varias ventajas estratégicas. Primero, añade una capa de abstracción que desacopla la gestión lógica del hardware físico, reduciendo la dependencia directa de los operadores sobre el equipamiento físico y minimizando riesgos de error humano. Segundo, permite escalabilidad y replicabilidad, ya que la arquitectura modular del sistema facilita la incorporación de nuevos sensores, la expansión a otros niveles o edificios, y la adaptación a futuras tecnologías UWB sin necesidad de reconfigurar la infraestructura completa. Tercero, mejora la mantenibilidad y la trazabilidad, al mantener un registro centralizado de cambios, histórico de sensores y configuraciones de calibración, lo que es crucial para proyectos de largo plazo y entornos académicos con múltiples usuarios y experimentos simultáneos (Zhao et al., 2022).

Además, la plataforma refuerza la seguridad y la integridad de los datos, al limitar el acceso solo a personal autorizado y aplicar mecanismos de validación en cada operación. Esto protege la red UWB frente a modificaciones no controladas y garantiza que los datos utilizados en simulaciones, recorridos virtuales o análisis de posicionamiento sean fiables y coherentes con la infraestructura física.

Esta solución ilustra cómo la gestión digital centralizada se convierte en un componente esencial en proyectos de sistemas ciberfísicos. No solo permite administrar de manera eficiente la infraestructura existente, sino que también facilita la integración de distintos subsistemas, la planificación de expansiones futuras y la interoperabilidad con entornos virtuales o de realidad aumentada. De esta forma, la plataforma web no es un componente secundario, sino una pieza clave que asegura que la red de sensores UWB funcione de manera robusta, escalable y sostenible, transformando un conjunto de dispositivos individuales en un sistema inteligente interconectado y adaptable a diferentes escenarios.

El proceso completo evidenció la necesidad de flexibilidad metodológica y de un enfoque interdisciplinario en el desarrollo de sistemas de posicionamiento en interiores. Cada modificación realizada, desde el abandono del sniffer como herramienta principal hasta la adopción del SDK oficial de Estimote, la integración de tecnología LiDAR, la adaptación de los modelos tridimensionales a formatos CAD y DWG, la creación de planos técnicos con la ubicación precisa de los sensores, y finalmente la implementación de un sistema web de gestión, respondió a hallazgos empíricos concretos que fortalecieron la robustez técnica del sistema. El abandono del sniffer se debió a que, aunque los módulos DW3000 podían capturar tramas físicas y metadatos, no permitían acceder a las marcas de tiempo necesarias para el cálculo de distancias mediante Time of Flight (ToF), debido a la sincronización nanosegundo de los dispositivos activos y a los mecanismos de seguridad implementados por el estándar IEEE 802.15.4z, como las Secure Time Stamps (STS) y el cifrado de tramas de ranging.

La adopción del SDK oficial permitió superar estas limitaciones, proporcionando acceso a las mediciones de distancia ya procesadas y calibradas por el fabricante, con algoritmos internos de corrección de sesgo, filtrado de ruido y compensación ambiental. Esto garantizó no solo la precisión de los datos, sino también la consistencia en su uso para la validación del posicionamiento, evitando errores derivados de intentos de decodificación de tramas a bajo nivel.

Por su parte, la implementación de LiDAR permitió capturar un modelo tridimensional detallado del entorno, corrigiendo desviaciones significativas detectadas entre los planos arquitectónicos originales y las mediciones físicas reales, que en algunos casos superaban los 25 cm. Los datos obtenidos fueron procesados en formato IPT, adaptados y exportados a DWG, lo que facilitó la generación de planos técnicos precisos con la ubicación exacta de cada sensor. Esta integración de modelos 3D y CAD posibilitó evaluar la cobertura, la orientación de los sensores y la interacción de la señal UWB con elementos estructurales complejos, anticipando zonas de interferencia o pérdida de visibilidad.

La transformación de estos modelos en archivos JSON permitió una sincronización directa con la plataforma digital y el entorno virtual desarrollado en Unity, asegurando una correspondencia fiel entre el espacio físico y su representación digital. Este flujo de trabajo interdisciplinario, que conecta LiDAR, CAD, bases de datos y simulación virtual, constituyó un aprendizaje central del proyecto, demostrando la importancia de combinar hardware, software y modelado geométrico para alcanzar resultados precisos y reproducibles.

Finalmente, la creación de un sistema web centralizado de gestión de sensores consolidó todos estos elementos en una infraestructura flexible, segura y escalable. La plataforma, desarrollada con Next.js y TypeScript para el frontend y PostgreSQL para el backend, incorporó autenticación JWT, validaciones de seguridad, operaciones CRUD sobre los sensores y herramientas de monitoreo de estado y rendimiento. Esto permitió administrar de manera eficiente la red UWB, actualizar coordenadas y metadatos de manera dinámica, generar archivos JSON automáticamente para sincronización con el entorno virtual, y mantener trazabilidad de cambios en tiempo real.

En términos de impacto, el proyecto no solo demostró la viabilidad de implementar una red UWB de alta precisión y escalabilidad en un entorno universitario real, sino que también sienta un precedente para aplicaciones futuras en recorridos virtuales, realidad aumentada, trazabilidad de activos y optimización de movilidad interna. Además, cada etapa del proyecto evidenció la necesidad de un enfoque flexible, interdisciplinario y basado en evidencia, que combina análisis estructural, ingeniería de sistemas, programación y modelado geométrico para superar limitaciones técnicas y maximizar la precisión del sistema.

En conjunto, esta experiencia consolidó una transición del enfoque teórico a la ingeniería aplicada: se pasó de la exploración experimental a la creación de una infraestructura funcional, segura y extensible. El resultado final valida los fundamentos tecnológicos del posicionamiento UWB y demuestra cómo la investigación aplicada puede transformarse en soluciones tecnológicas tangibles, reforzando el vínculo entre innovación, academia y aplicación práctica en contextos complejos.

XI. CONCLUSIONES

- Se logró establecer una topología de red optimizada para cada nivel del CIT, considerando extensión, complejidad arquitectónica y cobertura mínima de trilateración. La planificación mediante simulación digital permitió garantizar que cada punto del espacio tuviera al menos tres anclas visibles, asegurando precisión en la localización. Este proceso evidencia que un diseño previo bien fundamentado es clave para minimizar errores en sistemas de posicionamiento interior.
- La instalación estratégica de los sensores, complementada con mediciones de campo mediante telémetro láser y análisis de señal, permitió ajustar ubicación y orientación de cada dispositivo para maximizar la estabilidad y reducir el error de localización. La calibración empírica confirmó que la precisión de la red depende tanto de la planificación teórica como de la adaptación a condiciones reales del entorno.
- La integración exitosa con la aplicación móvil permitió la activación de contenido de realidad aumentada en tiempo real según la posición del usuario. Esto demuestra la interoperabilidad efectiva entre hardware UWB y software de aplicaciones, validando la utilidad práctica de la red para experiencias inmersivas y aplicaciones interactivas dentro del edificio.
- Las pruebas realizadas en múltiples niveles y con usuarios reales mostraron que el sistema mantiene baja latencia, error de localización reducido y respuesta consistente en entornos con obstáculos y superficies reflectantes. Esto confirma la fiabilidad y escalabilidad del sistema, así como su capacidad de adaptación a distintas configuraciones arquitectónicas.
- La documentación completa, que incluye planos, mapas de sensores, tablas de calibración y resultados de pruebas, garantiza replicabilidad y mantenibilidad de la red. Este registro facilita futuras implementaciones en otras áreas del campus y contribuye a la trazabilidad y gestión de la infraestructura, transformando la red UWB en un sistema ciberfísico sostenible y extensible.

XII. RECOMENDACIONES

A partir de la experiencia obtenida durante el diseño, instalación y validación de la red de sensores UWB en el edificio CIT, se plantean las siguientes recomendaciones orientadas a garantizar la continuidad operativa, la precisión del sistema y su potencial de expansión:

- Se recomienda mantener una documentación técnica actualizada sobre la ubicación, calibración y estado operativo de cada sensor. Dado que los espacios del CIT pueden sufrir modificaciones estructurales o redistribuciones periódicas, es fundamental realizar inspecciones y recalibraciones regulares para conservar la correspondencia entre los planos digitales y la configuración física de la red.
- Dado que los sensores UWB operan mediante transmisión por pulsos de alta frecuencia, su consumo energético es considerablemente mayor que el de otros dispositivos inalámbricos. Por ello, se recomienda monitorear constantemente la carga y respuesta de los sensores, estableciendo un plan de mantenimiento que contemple el reemplazo de las baterías AA cada 3 a 6 meses, según el nivel de uso y la intensidad de transmisión detectada. Esta medida previene la pérdida de precisión y garantiza la continuidad del servicio.
- Considerando las limitaciones del SDK de Estimote al manejar múltiples sensores simultáneamente, se sugiere dividir cada nivel del edificio en subzonas o planos independientes, de manera que la aplicación procese únicamente los sensores activos dentro del área en uso. Esto reduce la sobrecarga, mejora la latencia y contribuye a la estabilidad general del sistema.
- Implementar un proceso de evaluación continua que registre métricas como error promedio de localización, intensidad de señal y latencia de respuesta. Estos datos permitirán detectar oportunamente desviaciones o degradaciones del rendimiento y ajustar parámetros de calibración, filtrado o potencia de transmisión cuando sea necesario.
- Es recomendable mantenerse al tanto de las posibles actualizaciones de los estándares UWB (por ejemplo, IEEE 802.15.4z y sus futuras extensiones) y de la documentación técnica publicada por Estimote u otros fabricantes. Esto permitirá asegurar la compatibilidad del sistema con nuevas versiones del hardware, mejorar el rendimiento y mantener una infraestructura basada en tecnologías de última generación.
- Aprovechando el diseño modular de la red, se recomienda su expansión progresiva hacia otros niveles del CIT y posteriormente hacia distintos edificios del campus. Esta estrategia permitiría consolidar un ecosistema de localización inteligente con aplicaciones

potenciales en orientación, monitoreo de flujo de personas y experiencias inmersivas dentro de la universidad.

- Se sugiere explorar la incorporación de sensores BLE de nueva generación, WiFi RTT o sistemas de visión computarizada para reforzar la precisión en zonas donde las señales UWB puedan verse afectadas por reflexiones o interferencias estructurales.
- Además del uso de UWB, se recomienda aprovechar las capacidades de NFC (Near Field Communication) y BLE (Bluetooth Low Energy) para desarrollar proyectos complementarios dentro del ecosistema tecnológico de la universidad.
- Por ejemplo, podría implementarse un sistema de acceso inteligente a laboratorios o aulas donde los estudiantes ingresen escaneando su credencial NFC o detectando su presencia mediante BLE. Esto no solo agilizaría el control de acceso, sino que también permitiría registrar asistencia, optimizar el uso de espacios y fortalecer la seguridad institucional.
- Es fundamental que el personal y los estudiantes involucrados en el mantenimiento del sistema reciban capacitación continua sobre calibración, instalación y diagnóstico de sensores, asegurando la sostenibilidad del proyecto a largo plazo y su escalabilidad futura.
- Finalmente, se recomienda aprovechar la infraestructura instalada como un entorno experimental para proyectos de investigación y docencia en áreas como sistemas embebidos, redes inalámbricas, análisis espacial y realidad aumentada, fortaleciendo el vínculo entre la ingeniería aplicada y la investigación universitaria.

XIII. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Estimote. (2020). *UWB Location Beacons Developer Documentation*. Estimote Inc. <https://developer.estimote.com/uwb/>
- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M., & Al-Khalifa, H. (2016). Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. *Sensors*, 16(5), 707.
- Bahl, P., & Padmanabhan, V. N. (2000). RADAR: An in-building RF-based user location and tracking system. *IEEE INFOCOM*.
- Farid, Z., Nordin, R., & Ismail, M. (2013). Recent advances in wireless indoor localization techniques and system. *Journal of Computer Networks and Communications*.
- Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. (2007). Survey of Wireless Indoor Positioning Techniques and Systems. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*.
- Liu, Y., Ma, H., & Wang, Q. (2020). High-Precision Indoor Positioning Based on Wi-Fi and UWB Fusion. *Sensors*, 20(18), 5273.
- Wu, C., Yang, Z., & Liu, Y. (2017). Smartphones-based Crowdsourcing for Indoor Localization. *IEEE Transactions on Mobile Computing*.
- Yassin, A., Nasser, Y., Awad, M., & others (2017). Recent advances in indoor localization: A survey on theoretical approaches and applications. *Computer Networks*.
- Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. (2019). A Survey of Indoor Localization Systems and Technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*.
- Dardari, D., Closas, P., & Djuric, P. M. (2015). Indoor tracking: Theory, methods, and technologies. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(4), 1263–1278. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2395733>
- Misra, P., & Enge, P. (2011). *Global Positioning System: Signals, Measurements, and Performance* (2nd ed.). Ganga-Jamuna Press.
- IEEE. (2020). *IEEE 802.15.4z™-2020: Enhanced Ultra-Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques*. <https://standards.ieee.org/ieee/802.15.4z/10374/>
- Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M., & Al-Khalifa, H. (2016). Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. *Sensors*, 16(5), 707. <https://doi.org/10.3390/s16050707>
- Decawave. (2020). Understanding Angle of Arrival (AoA) and Time Difference of Arrival (TDoA) in UWB Systems. Decawave Ltd.

Faragher, R., & Harle, R. (2014). An Analysis of the Accuracy of Bluetooth Low Energy for Indoor Positioning Applications. Proceedings of the 27th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS+ 2014), 201–210.

Faragher, R., & Harle, R. (2015). Location fingerprinting with Bluetooth Low Energy beacons. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 33(11), 2418–2428. <https://doi.org/10.1109/JSAC.2015.2430281>

Mekikis, P.-V., Antonopoulos, A., Lalos, A. S., Alonso, L., & Verikoukis, C. (2020). Wireless indoor localization: A survey of techniques, challenges, and trends. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22(4), 2637–2670. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3005026>

Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 21(3), 2568–2599. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>

Bensky, A. (2016). *Wireless positioning technologies and applications* (2nd ed.). Artech House.

Dardari, D., Closas, P., & Djuric, P. M. (2015). Indoor tracking: Theory, methods, and technologies. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 64(4), 1263–1278. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2395733>

Groves, P. D. (2013). *Principles of GNSS, inertial, and multisensor integrated navigation systems* (2nd ed.). Artech House.

Wang, Y., Yang, X., Zhao, Y., Liu, Y., & Cuthbert, L. (2013). Bluetooth positioning using RSSI and trilateration. Wireless Personal Communications, 70(4), 1625–1639. <https://doi.org/10.1007/s11277-012-0751-6>

Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M., & Al-Khalifa, H. (2016). Ultra Wideband Indoor Positioning Technologies: Analysis and Recent Advances. Sensors, 16(5), 707. <https://doi.org/10.3390/s16050707>

Azuma, R. T. (1997). A Survey of Augmented Reality. Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 6(4), 355–385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>

Billinghurst, M., Clark, A., & Lee, G. (2015). A Survey of Augmented Reality. Foundations and Trends in Human–Computer Interaction, 8(2–3), 73–272. <https://doi.org/10.1561/1100000049>

Höllerer, T., & Feiner, S. (2004). Mobile Augmented Reality. In H. Karimi & A. Hammad (Eds.), Telegeoinformatics: Location-Based Computing and Services (pp. 221–260). CRC Press.

MacGougan, G., Lachapelle, G., & Cannon, M. E. (2020). Trends and challenges in indoor positioning. IEEE Communications Magazine, 58(10), 52–58. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2020.3015018>

Mekikis, P.-V., Antonopoulos, A., Lalos, A. S., Alonso, L., & Verikoukis, C. (2020). Wireless indoor localization: A survey of techniques, challenges, and trends. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 22(4), 2637–2670. <https://doi.org/10.1109/COMST.2020.3005026>

Rauschnabel, P. A., Felix, R., & Hinsch, C. (2022). Augmented reality marketing: How to enhance consumer experiences through technology. *Business Horizons*, 65(1), 117–128. <https://doi.org/10.1016/j.bushor.2021.07.007>

Zhu, J., Owen, C. B., Li, H., & Lee, J. (2015). Personalized in-building navigation using mobile augmented reality. Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Consumer Electronics (ICCE), 178–179. <https://doi.org/10.1109/ICCE.2015.7066319>

Marvelmind Robotics. (s. f.). *Ultra-wideband (UWB) indoor positioning system*. Recuperado de <https://marvelmind.com/download/uwb/>

Qorvo. (2025, marzo 24). Qorvo advances indoor navigation with UWB technology. Qorvo Design Hub. Recuperado de <https://www.qorvo.com/design-hub/blog/qorvo-advances-indoor-navigation-with-uwb-technology>

Santoro, L., Nardello, M., Brunelli, D., & Fontanelli, D. (2021). Scale up to infinity: The UWB indoor Global Positioning System. *arXiv*. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/2112.01950>

Zhao, W., Goudar, A., & Schoellig, A. P. (2022). Finding the right place: Sensor placement for UWB Time Difference of Arrival localization in cluttered indoor environments. *arXiv*. Recuperado de <https://arxiv.org/abs/2204.04508>

Alarifi, A., Al-Salman, A., Alsaleh, M., Alnafessah, A., Al-Hadhrami, S., Al-Ammar, M., & Al-Khalifa, H. (2016). Ultra Wideband indoor positioning technologies: Analysis and recent advances. *Sensors*, 16(5), 707.

López, D., Martínez, J., & Herrera, P. (2020). Procedimientos de calibración en sistemas de localización de alta precisión. *Revista Iberoamericana de Ingeniería Electrónica*, 11(3), 55–68

Márquez, J., Hernández, L., & Rivera, P. (2021). Herramientas de medición para calibración de sensores de posicionamiento en interiores. *Revista Latinoamericana de Tecnología*, 9(1), 33–49

Pérez, R., & Morales, C. (2021). Validación y documentación en redes de sensores inalámbricos para posicionamiento preciso. *IEEE Latin America Transactions*, 19(5), 870–879.

Rashid, M., Ali, K., & Khan, S. (2020). Performance evaluation of UWB-based indoor positioning systems under angular and distance constraints. *Sensors*, 20(14), 3981. <https://doi.org/10.3390/s20143981>

Zhang, Q., Li, Y., & Sun, W. (2022). Accuracy assessment and error analysis of ultra-wideband indoor positioning systems. *IEEE Access*, 10, 27642–27656. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3159015>

Azuma, R. T. (2017). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385. MIT Press. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>

Liu, X., Zhan, W., & Lu, H. (2020). Indoor positioning technologies and their applications: A survey. *Journal of Sensor and Actuator Networks*, 9(3), 1–23. <https://doi.org/10.3390/jsan9030036>

Mautz, R. (2012). Indoor positioning technologies. ETH Zurich, Department of Civil, Environmental and Geomatic Engineering. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-007313554>

Rahman, A., Hassan, M., & Karim, R. (2021). Understanding software development kits (SDKs) and their role in modern app development. *International Journal of Computer Applications*, 183(18), 15–22.

Li, X., Wang, J., & Chen, Y. (2021). Real-time synchronization in mobile augmented reality systems for indoor navigation. *IEEE Access*, 9, 182542–182558. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120543>

Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568–2599. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>

Estimote, Inc. (2024). Estimote UWB SDK for Android. Estimote Developer Portal. Recuperado de <https://developer.estimote.com/>

Estimote, Inc. (2024). Estimote UWB SDK for iOS (GitHub repository). Recuperado de <https://github.com/Estimote/iOS-Estimote-UWB-SDK>

Estimote, Inc. (2024). Estimote UWB SDK for Android (GitHub repository). Recuperado de <https://github.com/Estimote/Android-Estimote-UWB-SDK>

Google LLC. (2024). ARCore developer guide. Recuperado de <https://developers.google.com/ar>

Apple Inc. (2024). ARKit developer documentation. Recuperado de <https://developer.apple.com/augmented-reality/>

MQTT Organization. (2023). MQTT Protocol Technical Overview. Recuperado de <https://mqtt.org/>

Flutter Team (Google). (2024). Flutter: Build for iOS and Android from a single codebase. Recuperado de <https://flutter.dev/>

Meta Platforms, Inc. (2024). React Native Documentation. Recuperado de <https://reactnative.dev/>

Unity Technologies. (2024). Unity Manual – AR Foundation Overview. Recuperado de <https://docs.unity3d.com/Manual/com.unity.xr.arfoundation.html>

Azuma, R. T. (2017). A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 6(4), 355–385. <https://doi.org/10.1162/pres.1997.6.4.355>

Bohme, M., Reuter, C., & Leicht, F. (2020). Indoor positioning systems in healthcare: A review. *Journal of Medical Systems*, 44(7), 1–15. <https://doi.org/10.1007/s10916-020-01594-6>

Chang, Y.-S., Chen, H.-M., & Lee, C.-Y. (2018). Augmented reality guide for cultural heritage and museums. *International Journal of Human-Computer Studies*, 111, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2017.11.007>

Li, X., Wang, J., & Chen, Y. (2021). Real-time synchronization in mobile augmented reality systems for indoor navigation. *IEEE Access*, 9, 182542–182558. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3120543>

Mautz, R. (2012). Indoor positioning technologies. ETH Zürich. <https://doi.org/10.3929/ethz-a-007313554>

Wang, J., Yang, Q., & Xu, F. (2019). Indoor positioning and augmented reality in retail: Enhancing customer experience. *Journal of Retailing and Consumer Services*, 49, 126–134. <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2019.03.009>

Zafari, F., Gkelias, A., & Leung, K. K. (2019). A survey of indoor localization systems and technologies. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 21(3), 2568–2599. <https://doi.org/10.1109/COMST.2019.2911558>

Shokri, R., Theodorakopoulos, G., Troncoso, C., Hubaux, J.-P., & Le Boudec, J.-Y. (2015). Protecting location privacy: Optimal strategy against localization attacks. *Proceedings of the 2015 ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*, 101–112. <https://doi.org/10.1145/2810103.2813689>

Zhang, K., Ni, J., Yang, K., Liang, X., Ren, J., & Shen, X. (2020). Security and privacy in smart cities: Challenges and solutions. *IEEE Communications Magazine*, 58(1), 57–63. <https://doi.org/10.1109/MCOM.001.1900531>

DecaWave. (2018). DW1000 User Manual. DecaWave Ltd. <https://www.decawave.com/product/dw1000/>

DecaWave. (2021). DW3000 UWB Transceiver Data Sheet. DecaWave Ltd. <https://www.decawave.com/product/dw3000/>

IEEE. (2020). IEEE Standard 802.15.4z-2020: Enhanced Ultra-Wideband (UWB) Physical Layers. IEEE Standards Association. https://standards.ieee.org/standard/802_15_4z-2020.html

Estimote, Inc. (2024). Estimote UWB SDK for Android and iOS. Estimote Developer Portal. <https://developer.estimote.com/>

Vasudevan, V., Locher, T., & Finkenzeller, M. (2022). Sniffer design for ultra-wideband indoor localization systems. *Sensors*, 22(4), 1456. <https://doi.org/10.3390/s22041456>

Al-Fuqaha, A., Guizani, M., Mohammadi, M., Aledhari, M., & Ayyash, M. (2015). Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 17(4), 2347–2376.

Balaguer, C., Hernández, A., & Pérez, R. (2016). Domótica y automatización de edificios inteligentes. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.

Karnouskos, S. (2011). Smart cities and the internet of things: An integrative perspective. In 2011 7th International Conference on Intelligent Environments (pp. 145–152). IEEE

- Nguyen, T., & Han, S. (2022). Smart campus solutions using indoor positioning and IoT integration. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 13, 1091–1107.
- Wang, C., Wang, C., & Xu, H. (2020). A survey on smart home systems. *Journal of Network and Computer Applications*, 150, 102466.
- Khronos Group. (2022). FBX file format overview. Khronos Group.
- Autodesk. (2021a). Inventor 2021 User Guide. Autodesk Inc.
- Autodesk. (2021b). AutoCAD 2021 User Guide. Autodesk Inc.
- Unity Technologies. (2020). Unity User Manual: Importing Models and Assets. Unity Technologies.
- Balaguer, C., Hernández, A., & Pérez, R. (2016). Domótica y automatización de edificios inteligentes. Editorial Universidad Politécnica de Valencia.
- Müller, T., Reindl, L., & Schindelhauer, C. (2022). Performance Evaluation of UWB Indoor Localization Systems under Multipath Conditions. *Sensors*, 22(14), 5184. <https://doi.org/10.3390/s22145184>
- Decawave. (2020). DW3000 User Manual: IEEE 802.15.4z UWB Transceiver. Qorvo Inc.
- Estimote. (2023). Estimote UWB Beacons SDK Documentation. Estimote Developers.
- Makerfabs. (2022). ESP32 UWB with DW3000 Technical Guide. Makerfabs Documentation Center.
- IEEE. (2020). IEEE Standard 802.15.4z™—2020: Enhanced Impulse Radio Ultra Wideband (IR-UWB) PHYs and MACs for Ranging. Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- O'Driscoll, C., & Keating, D. (2021). Secure Ranging and Time of Flight in UWB Systems. *Journal of Positioning Systems and Navigation*, 14(3), 112–128.

XIV. ANEXOS

Especificaciones técnicas ESP32

Figura 18. Arduino

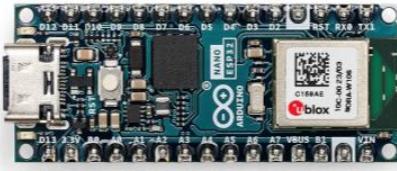


Tabla	Nombre: Arduino Nano® ESP32 con cabezales
SKU	ABX00083
Microcontrolador	u-blox® NORA-W106 (ESP32-S3)
Conecotor USB	USB-C®
Pines	<ul style="list-style-type: none"> Pin LED incorporado: 13 Pines LED RGB incorporados: 14-16 Pines de E/S digitales: 14 Pines de entrada analógica: 8 Pines PWM: 5 Interrupciones externas: Todos los pines digitales
Conectividad	<ul style="list-style-type: none"> Wi-Fi®: u-blox® NORA-W106 (ESP32-S3) Bluetooth®: u-blox® Bluetooth®: u-blox® NORA-W106 (ESP32-S3)
Comunicación	<ul style="list-style-type: none"> UART: 2x I2C: 1x, A4 (SDA), A5 (SCL) SPI: D11 (COPI), D12 (CIPO), D13 (SCK). Usar cualquier GPIO para Chip Select (CS)
Poder	<ul style="list-style-type: none"> Voltaje de E/S: 3,3 V Voltaje de entrada (nominal): 6-21 V Fuente de corriente por pin de E/S: 40 mA Corriente de sumidero por pin de E/S: 28 mA
Velocidad de reloj	Procesador: hasta 240 MHz
Memoria	<ul style="list-style-type: none"> ROM: 384 kB SRAM: 512 kB Flash externo: 128 Mbit (16 MB)
Dimensiones	Ancho: 18 mm Largo: 45 mm

Implementación en Arduino IDE Wifi Sniffer

Figura 19. Implementacion de WiFi Sniffer

```
wifi_sniffer.ino
88     0x1f, 0x1f, 0x00, 0x00, 0x44, 0x00, 0x00, 0x15, 0x11, 0x23, 0x02, 0x00, 0x00, 0x15, 0xff,
89     0x1f, 0x1f, 0x00, 0x00, 0x04, 0x01, 0x00, 0x00, 0x11, 0x23, 0x01, 0x10, 0x00, 0x00, 0x15, 0xff,
90     0x1f, 0x1f, 0x00, 0x00, 0x04, 0x00, 0x00, 0x3c, 0x11, 0x13, 0x07, 0x1c, 0x00, 0x00, 0x15, 0xff,
91     0x1f, 0x1f, 0x00, 0x00, 0x04, 0x00, 0x00, 0x05, 0x11, 0x13, 0x07, 0x1c, 0x00, 0x00, 0x15, 0xff,
92     0x1f, 0x1f, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x05, 0x01, 0x80, 0x08, 0x02, 0x00, 0x00, 0x15, 0xff,
93     0x1f, 0x1f, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x00, 0x24, 0x01, 0x10, 0x05, 0x08, 0x02, 0x00, 0x00, 0x15, 0xff,
94     0x1f, 0x1f, 0x00, 0x15, 0xff,
95     0x1f, 0x1f, 0x00, 0x15, 0xff
96 };
97
98 const unsigned char jack [] PROGMEM = {
99     0xff, 0xff,
100    0xff, 0xff,
101    0xff, 0xff,
102    0xff, 0xff,
103    0xff, 0xff,
104    0xff, 0xff,
105    0xff, 0xff,
106    0xff, 0xff,
107    0xff, 0xff,
108    0xff, 0xff,
109    0xff, 0xff,
110    0xff, 0xff,
111    0xff, 0xff,
112    0xff, 0xff,
113    0xff, 0xff,
114    0xff, 0xff,
115    0xff, 0xff,
116    0xff, 0xff,
117    0xff, 0xff,
118    0xff, 0xff,
119    0xff, 0xff,
120    0xff, 0xff,
121    0xff, 0xff,
122    0xff, 0xff,
123    0xff, 0xff,
124    0xff, 0xff,
125    0xff, 0xff,
126    0xff, 0xff,
127    0xff, 0xff,
128    0xff, 0xff,
129    0xff, 0xff,
130    0xff, 0xff,
131    0x00, 0x00
132
133 //wifi_sniffer.ino
134
135 void showWelcomeMessage() {
136     oled.clearBuffer();
137     oled.drawXBMP(0, 0, 128, 64, uvg_logo); // Mostrar logo UVG
138     oled.sendBuffer();
139     delay(2000);
140
141     oled.clearBuffer();
142     oled.drawXBMP(0, 0, 128, 64, jack); // Mostrar logo Jack
143     oled.sendBuffer();
144     delay(2000);
145
146     oled.clearBuffer();
147     oled.setFont(u8g2_font_6x10_tr);
148     oled.drawString(0, 20, "Bienvenido al Sniffer");
149     oled.drawString(0, 35, "AR UVG TOUR");
150     oled.drawString(0, 50, "UMB Packet Listener");
151     oled.sendBuffer();
152     delay(2500);
153 }
154
155 void setup() {
156     pinMode(LED_PIN, OUTPUT);
157     digitalWrite(LED_PIN, LOW);
158
159     Serial.begin(115200);
160     delay(1000);
161
162     Wire.begin(8, 9);
163     oled.begin();
164     oled.setFont(u8g2_font_6x10_tr);
165
166     showWelcomeMessage();
167
168     if (!DW.begin(PIN_SS, PIN IRQ, PIN_RST)) {
169         oled.clearBuffer();
170         oled.drawString(0, 30, "Error al iniciar wifi sniffer");
171         oled.sendBuffer();
172         while (1);
173     }
174
175     DW.setDeviceAddress(1);
176     DW.setNetworkId(10);
177     DW.setAntennaDelay(16436);
178 }
```

```

wifi_sniffer.ino

208     DW.newReceive();
209     DW.receivePermanently(true); // Sniffer mode
210
211     oled.clearBuffer();
212     oled.drawString(0, 20, "Sniffer UWB Activo");
213     oled.drawString(0, 40, "Esperando paquetes...");
214     oled.sendBuffer();
215 }
216
217 void loop() {
218     if (DW.isReceiveDone()) {
219         int len = DW.getDataLength();
220         byte data[len];
221         DW.getData(data, len);
222
223         digitalWrite(LED_PIN, HIGH);
224         delay(50);
225         digitalWrite(LED_PIN, LOW);
226
227         Serial.print("Paquete UWB recibido: ");
228         Serial.print(len);
229         Serial.println(" bytes");
230         Serial.print("Contenido (hex): ");
231         for (int i = 0; i < len; i++) {
232             Serial.print(data[i], HEX);
233             Serial.print(" ");
234         }
235         Serial.println();
236
237         // Mostran primeros bytes en OLED
238         oled.clearBuffer();
239         oled.setFont(u8g2_font_5x7_tr);
240         oled.drawString(0, 10, "Paquete UWB capturado");
241         oled.drawString(0, 25, ("Tam: " + String(len) + " bytes").c_str());
242         oled.drawString(0, 40, "Bytes:");
243
244         for (int i = 0; i < min(len, 8); i++) {
245             char hexChar[4];
246             sprintf(hexChar, "%02X", data[i]);
247             oled.drawString(5 + (i * 14), 55, hexChar);
248         }
249
250         oled.sendBuffer();
251
252     DW.newReceive(); // Listo para el siguiente
253 }
254 }
```

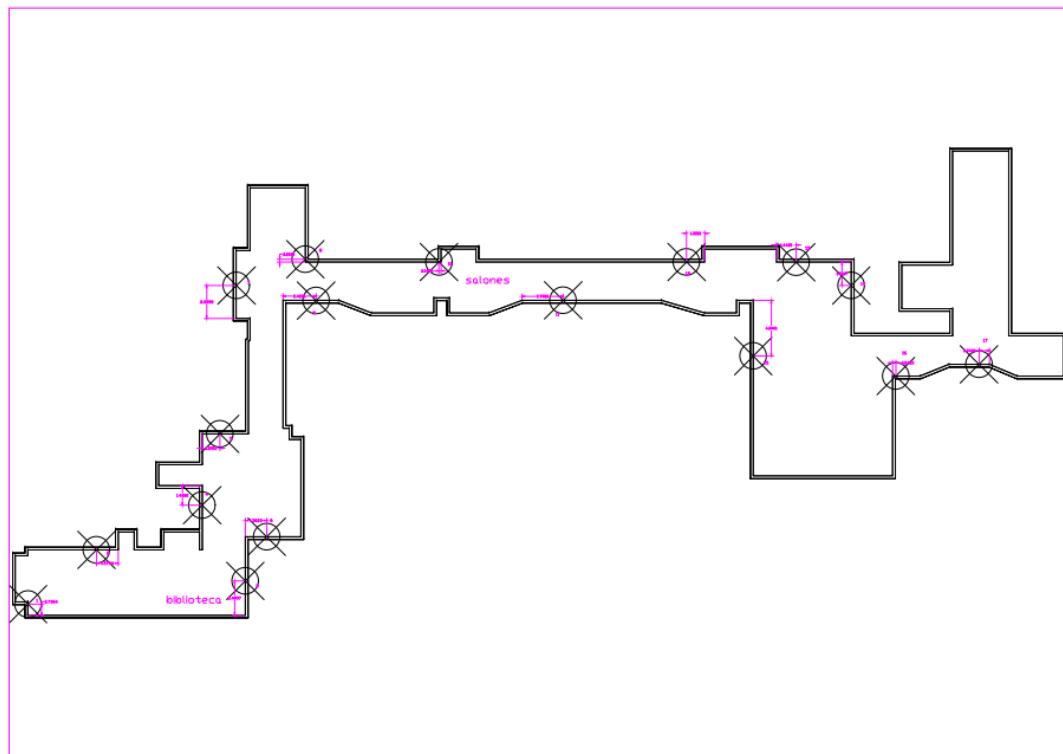
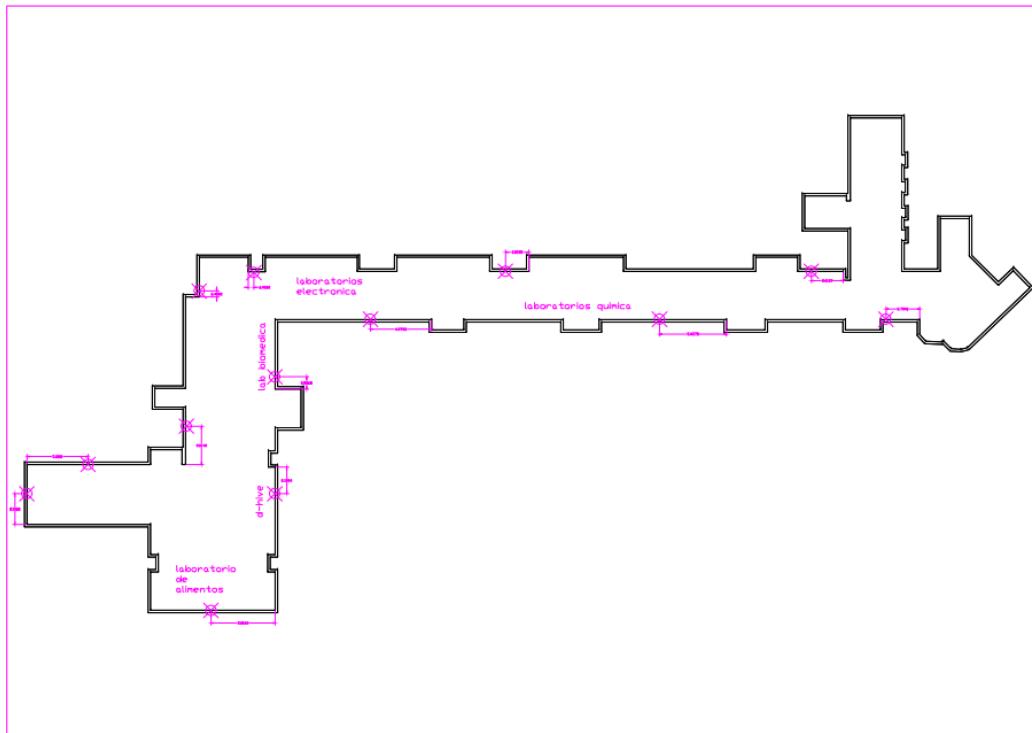
Figura 20. Código de inicialización del módulo DW3000 y asignación de pines en Arduino IDE.

```

1 |
2 #define DW3000_CS_PIN 4
3 #define DW3000_RST_PIN 27
4 #define DW3000_IRQ_PIN 34
5
6 #include <Arduino.h>
7 #include <SPI.h>
8
9 #include <dw3000.h>
10 #include <dw3000_port.h>
11 #include <dw3000_regs.h>
12 #include <dw3000_device_api.h>
13
14 // Pines para placa ESP32 UWB v1.0 de Makerfabs (config oficial datasheet)
15 static const int PIN_SS = 4; // CS (GPIO4)
16 static const int PIN_RST = 27; // RST (GPIO27)
17 static const int PIN_IRQ = 34; // IRQ (GPIO34 input-only)
18 static const int PIN_SCK = 18; // SCK (GPIO18 → VSPICLK)
19 static const int PIN_MISO = 19; // MISO (GPIO19 → VSPIQ)
20 static const int PIN_MOSI = 23; // MOSI (GPIO23 → VSPID)
21
22 // Sniffer básico
23 #define MAX_PACKET_LEN 1024
24 #define SNIFFER_CHANNEL 5 // Canal 5 (6.5 GHz)
25
```

Fuente: Elaboración propia

Planos por nivel con red de sensores



Organización y repositorios de Github

La siguiente organización de Github contiene los repositorios de las implementaciones de los distintos repositorios donde se almaceno toda la información de los planos y redes de sensores, archivos de autocad, inventor y modelos 3D, así como las implementaciones del sistema de gestión de sensores.

<https://github.com/AR-Tour-UVG>

<https://github.com/AR-Tour-UVG/CIT-Floor-Models>

<https://github.com/AR-Tour-UVG/Mapeo-Red-Sensores>

<https://github.com/AR-Tour-UVG/beacons-manager>

Sistema web de manejo de sensores

El sistema de manejo de sensores para la red de sensores por nivel esta hosteado en el siguiente link desplegado en vercel en el cual se utilizan crede:

<https://ar-tour-uvg-beacons-manager.vercel.app/>