

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 Ramirez 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



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 Ramirez Herrera para optar al grado académico de Licenciatura en ingeniería en Ciencias de la Computación y Tecnologías de la Información.

Guatemala,

2025

1. Resumen

El presente protocolo propone 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. **Se utilizarán filtros de Kalman y un sniffer UWB SP32 para analizar la calidad de la señal y ajustar parámetros que mejoren la precisión del sistema en tiempo real.**

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.

2. Introducción

La localización en interiores y su integración con tecnologías inmersivas representa uno de los campos de mayor crecimiento en innovación aplicada. En entornos universitarios, donde la orientación y la experiencia del visitante son clave, implementar soluciones tecnológicas avanzadas permite no solo mejorar procesos logísticos, sino también proyectar una imagen institucional moderna y alineada con la transformación digital.

El presente trabajo se enmarca en el megaproyecto del sistema de recorrido virtual con realidad aumentada (AR) para el Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la Universidad del Valle de Guatemala (UVG), una iniciativa que busca ofrecer una experiencia interactiva y precisa para estudiantes, visitantes y personal del campus. A partir de las fases previas del proyecto —enfocadas en interfaces móviles y pruebas piloto de tecnologías de posicionamiento como BLE y UWB— esta nueva etapa aborda la ejecución práctica de una solución integral basada en sensores Ultra-Wideband (UWB).

A lo largo de este proceso, se realizó un levantamiento físico del entorno mediante mediciones con telémetros y cintas métricas, permitiendo construir un sistema de coordenadas cartesianas por nivel. Estos datos fueron digitalizados en planos vectoriales utilizando AutoCAD, sentando las bases para el diseño estratégico de la red de sensores. Se validó también que la señal UWB tiene un patrón de propagación cónico con apertura de 120°, lo que corrigió representaciones erróneas en propuestas anteriores y permitió optimizar la colocación direccional de los sensores.

Como parte de la etapa de calibración, se utilizará un sniffer UWB (SP32) para capturar y analizar la calidad de las señales emitidas, validando el comportamiento real del sistema bajo condiciones arquitectónicas complejas. Los puntos de referencia seleccionados para pruebas de posicionamiento se eligieron estratégicamente en zonas clave del recorrido, como esquinas, pasillos principales y nodos de interés, priorizando visibilidad y cobertura efectiva para garantizar datos significativos.

Este protocolo describe el diseño, instalación, calibración y validación de una red funcional de sensores UWB que habilita, en la siguiente etapa, la activación de contenido AR contextualizado. La solución no solo cumple una función técnica, sino que se proyecta como un modelo replicable, con impacto directo en la experiencia del usuario y con posibilidades de escalarse a otros espacios académicos y culturales.

3. 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**

1. **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.
2. **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.
3. **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.
4. **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.
5. **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.

6. Antecedentes

En los últimos años, la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) ha promovido activamente la integración de tecnologías emergentes en sus procesos académicos y administrativos. Una de las iniciativas más representativas en esta línea ha sido el desarrollo de un sistema de recorrido virtual con realidad aumentada (AR) en el Centro de Innovación y Tecnología (CIT), orientado a mejorar la experiencia de orientación para estudiantes, visitantes y personal del campus.

Durante las fases iniciales del megaproyecto, se desarrollaron propuestas enfocadas principalmente en el diseño de interfaces móviles (UI/UX) y en la evaluación comparativa de tecnologías de posicionamiento en interiores (IPS), específicamente Bluetooth Low Energy (BLE) y Ultra-Wideband (UWB). Estos esfuerzos permitieron sentar las bases teóricas y prácticas del sistema, mediante pruebas piloto que demostraron la viabilidad del enfoque y el potencial de la tecnología UWB.

Uno de los proyectos más relevantes fue el de Pablo González (2024), quien implementó un prototipo funcional con sensores BLE y UWB en el CIT, midiendo la precisión y el error promedio de localización. Sus hallazgos evidenciaron que la tecnología UWB ofrecía una precisión significativamente superior (promedio de error del 2.42% en medición de distancia), frente a los errores elevados de BLE (más del 100% en muchos casos), atribuidos a interferencias y fluctuaciones del RSSI. Aunque los resultados fueron prometedores, el proyecto se vio limitado por la cantidad reducida de sensores disponibles, lo que restringió el área de cobertura y la robustez de las pruebas de campo.

Conscientes del potencial de esta tecnología y del impacto institucional que representa el proyecto, la Universidad del Valle de Guatemala realizó recientemente una inversión significativa en la adquisición de 60 sensores UWB, lo que habilita una nueva etapa del proyecto con posibilidades reales de despliegue a escala. Esta inversión estratégica permite diseñar una red de sensores robusta que cubra múltiples niveles del CIT, realizar calibraciones precisas, y validar el sistema de posicionamiento en condiciones reales de uso.

La continuidad del proyecto ya no se limita al desarrollo de software o diseño de interfaz, sino que implica el diseño, instalación, calibración y validación de una red física de sensores UWB, lo cual representa una evolución significativa en su alcance. Este nuevo enfoque busca consolidar una solución tecnológica integral, escalable y replicable en otros espacios del campus o incluso en otras instituciones educativas.

Así, el presente trabajo se plantea como una fase avanzada y determinante del sistema de recorrido virtual, enfocada en convertir una idea conceptual en una infraestructura funcional, con capacidad para integrarse plenamente con aplicaciones móviles en tiempo real, ofrecer experiencias inmersivas con realidad aumentada, y consolidar a la UVG como una institución pionera en la implementación de tecnologías de localización en entornos educativos.

Durante la revisión de documentos y propuestas de fases anteriores del megaproyecto, se identificó un error conceptual en la representación de la señal de los sensores UWB. En uno de los diagramas,

la señal se mostraba con una **forma circular** en torno al sensor, lo cual no refleja con precisión el comportamiento real de esta tecnología. A través de pruebas prácticas y análisis de documentación técnica oficial, se determinó que la señal UWB tiene en realidad una **forma cónica con una apertura aproximada de 120°**, similar al campo de visión humano. Esta corrección fue fundamental para redefinir la estrategia de ubicación de los sensores, ya que permitió optimizar la cobertura direccional y evitar zonas de sombra o interferencia innecesarias en el diseño de la red.

7. Justificación

El Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la Universidad del Valle de Guatemala representa uno de los espacios más emblemáticos y complejos dentro del campus, no solo por su arquitectura moderna y distribución física, sino también por su papel central en eventos institucionales, ferias estudiantiles, visitas académicas y actividades de bienvenida. La experiencia de quienes recorren el CIT por primera vez es clave para transmitir el valor académico y tecnológico que la universidad busca proyectar. Sin embargo, los métodos actuales de recorridos guiados, que dependen en su mayoría de personal voluntario o guías humanos, presentan limitaciones claras: baja escalabilidad, variabilidad en la calidad de la experiencia, y una alta demanda logística.

En este contexto, el proyecto se propone no solamente como una solución digital, sino como una propuesta tecnológicamente avanzada, basada en el diseño, instalación y calibración de una red física de sensores Ultra-Wideband (UWB). A diferencia de aproximaciones anteriores centradas únicamente en el desarrollo de interfaces móviles o simulaciones de posicionamiento, esta iniciativa plantea una solución integral que parte desde la infraestructura de localización en tiempo real.

El uso de sensores UWB se justifica por su capacidad de ofrecer una precisión de posicionamiento centimétrica en entornos interiores, superando ampliamente tecnologías tradicionales como Bluetooth Low Energy (BLE), Wi-Fi o GPS, que presentan errores significativos bajo condiciones de multipath o en espacios cerrados. La red de sensores diseñada en este proyecto permitirá determinar la ubicación del usuario dentro del CIT con alta precisión, lo cual es esencial para que el sistema pueda activar contenido en realidad aumentada (AR) justo en el momento y lugar adecuado.

Adicionalmente, este trabajo contribuye al conocimiento aplicado de tecnologías emergentes, al abordar la calibración y validación en campo de una red de sensores reales, algo poco explorado en proyectos de grado a nivel local. La experiencia adquirida en la selección de puntos de instalación, el ajuste de parámetros, la interpretación de errores de señal, y la sincronización con una aplicación AR puede ser replicable y escalable a otros espacios del campus o incluso a otras instituciones educativas, culturales o corporativas.

Esta solución no solo mejora la experiencia de los recorridos institucionales, sino que también proyecta a la UVG como una institución líder en la aplicación práctica de tecnologías de vanguardia. La implementación de un sistema de recorrido autónomo e inmersivo, habilitado por una red de sensores físicos, demuestra cómo la ingeniería en ciencias de la computación y tecnologías de la información puede resolver problemas concretos con impacto inmediato en la operación, percepción y posicionamiento de una universidad moderna.

Finalmente, este proyecto trasciende el alcance académico tradicional, ya que sienta las bases para otras aplicaciones posibles: desde asistencia para personas con discapacidad hasta recorridos interactivos personalizados según perfil del visitante. La infraestructura UWB diseñada también puede integrarse con futuras iniciativas en domótica, navegación indoor o simulaciones colaborativas, convirtiendo este trabajo en un pilar fundacional para ecosistemas inteligentes dentro del campus.

8. Alcance y Limitaciones

6.1 Alcance del Proyecto

El presente trabajo de graduación 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 profesional 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 inmediato. 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.

A continuación, se detallan los principales alcances del proyecto:

- **Levantamiento físico del entorno arquitectónico del CIT:** Se realizará un análisis detallado de los pasillos de cada nivel del edificio mediante el uso de herramientas de medición como telémetros láser y cintas métricas. Esta información servirá como base para generar planos técnicos precisos en AutoCAD, en formato de coordenadas cartesianas (X, Y), lo cual permitirá definir la ubicación exacta de cada sensor en relación con la estructura del edificio.
- **Diseño técnico de la red de sensores UWB:** A partir de los planos generados, se diseñará la topología de red considerando principios de trilateración, cobertura cónica de 120° por sensor y visibilidad entre dispositivos. Se buscará que cada punto de interés dentro del recorrido esté cubierto por al menos tres sensores activos, permitiendo un cálculo preciso de ubicación. Se realizarán simulaciones digitales de cobertura para ajustar el diseño en función de la arquitectura y evitar zonas de sombra.
- **Instalación física de sensores UWB:** Se llevará a cabo la instalación física de los sensores en puntos estratégicos definidos por el diseño, utilizando estructuras existentes como columnas y muros. Cada sensor será registrado con su identificador único (UUID),

coordenadas cartesianas, nivel del edificio y descripción del punto estructural cercano. Esta información será central para el mapeo lógico del sistema.

- **Calibración del sistema mediante puntos de control reales:** Se seleccionaron distintos puntos de control distribuidos de forma estratégica a lo largo del recorrido en todos los niveles involucrados. En cada punto se compararon distancias reales, medidas con telémetro, con las distancias estimadas por el sistema UWB. Además, se aplicaron filtros de procesamiento de señal como Kalman y media móvil para reducir el ruido y mejorar la estabilidad del posicionamiento.
- **Análisis y validación de señales mediante sniffer UWB:** Se realizó un sniffer SP32 UWB para analizar en tiempo real la propagación de las señales en entornos reales del CIT. Este análisis permitió identificar interferencias, evaluar la propagación vertical entre niveles y ajustar parámetros en la configuración del sistema.
- **Entrega operativa de al menos dos niveles del CIT con sistema funcional:** Se completó la instalación, calibración y validación de la red UWB en los distintos niveles del edificio, los cuales quedarán completamente habilitados para su uso real. Esto significa que cualquier persona con la aplicación móvil podrá navegar por esos niveles y activar contenido digital basado en su ubicación, sin necesidad de intervención adicional del equipo de desarrollo.
- **Documentación técnica integral del sistema:** Como parte de los entregables, se incluyó un compendio técnico con toda la información relevante del proyecto: planos detallados, tablas de coordenadas, mapeo de sensores, resultados de calibración, métricas de error, registros de pruebas, recomendaciones para mantenimiento y propuestas de expansión.

Este trabajo tiene una visión aplicada, no especulativa. Se entrega una infraestructura robusta, funcional y comprobada, que no solo servirá para demostración académica, sino que podrá ser utilizada inmediatamente para actividades institucionales como ferias, visitas guiadas, recorridos de inducción o demostraciones tecnológicas dentro del CIT.

6.2 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.
- **Restricciones de tiempo académico:** El desarrollo del proyecto está sujeto a un cronograma establecido por el ciclo académico, lo que limita la cantidad de iteraciones de prueba, ajustes finos y experimentación adicional que podrían haberse realizado en un contexto abierto o de largo plazo. Aun así, se prioriza la funcionalidad real sobre la perfección teórica.
- **Dependencia de recursos técnicos y logísticos:** El proyecto depende de la disponibilidad continua de sensores UWB, herramientas de medición (telémetros), software especializado (AutoCAD, hojas de cálculo), acceso físico a las instalaciones del CIT y la funcionalidad del sniffer SP32. 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.

9. Marco Teórico

1. Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS)

Los Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS) son soluciones tecnológicas diseñadas para determinar la ubicación precisa de personas u objetos dentro de espacios cerrados, donde las señales de GPS tradicionales son ineficaces. Estos sistemas utilizan diversas tecnologías, como Wi-Fi, Bluetooth Low Energy (BLE), Ultra-Wideband (UWB), sensores iniciales y señales acústicas, para proporcionar información de ubicación con una precisión que puede alcanzar hasta 2 cm en entornos controlados.

Las aplicaciones de los IPS son amplias, incluyendo la navegación en aeropuertos, hospitales, centros comerciales y campus universitarios, así como el seguimiento de activos en entornos industriales.

2. Limitaciones del GPS y la necesidad de IPS

El sistema de posicionamiento global (GPS) es altamente efectivo en espacios abiertos, pero su precisión disminuye significativamente en entornos interiores debido a la atenuación y reflexión de las señales satelitales por estructuras como paredes y techos. Esta limitación ha impulsado el desarrollo de tecnologías alternativas de posicionamiento en interiores, como los IPS, que utilizan señales de radiofrecuencia, sensores inerciales y otras técnicas para proporcionar ubicaciones precisas en entornos cerrados.

3. Tecnologías de Localización: BLE vs. UWB

3.1 Bluetooth Low Energy (BLE)

BLE es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance y bajo consumo energético, ampliamente utilizada en dispositivos móviles. En sistemas de posicionamiento, BLE estima la ubicación basándose en la intensidad de la señal recibida (RSSI). Sin embargo, su precisión es limitada, con errores típicos de 5 a 10 metros, debido a interferencias y obstáculos en el entorno.

3.2 Ultra-Wideband (UWB)

UWB es una tecnología de radiofrecuencia que opera en un amplio espectro de frecuencias (3.1 a 10.6 GHz), transmitiendo pulsos de corta duración. Esta característica permite obtener mediciones de distancia con alta precisión, incluso en entornos con obstáculos o interferencias. UWB puede alcanzar precisiones de localización de hasta 10 cm, superando significativamente a BLE en aplicaciones que requieren alta exactitud.

La señal UWB representa una forma cónica en la manera en la que se propaga con una apertura aproximada a los 120° que es la misma a la visión humana.

Además, UWB es menos susceptible a interferencias y ofrece una mayor seguridad en la transmisión de datos, lo que la hace adecuada para aplicaciones críticas en entornos industriales y de seguridad.

4. Algoritmos de Localización: Trilateración y Filtrado

La trilateración es una técnica matemática utilizada para determinar la posición de un punto en función de su distancia a tres o más puntos de referencia conocidos. En sistemas de posicionamiento, se utiliza para calcular la ubicación de un dispositivo móvil basándose en las distancias medidas a varias sensores o anclas. La precisión de la trilateración depende de la exactitud de las mediciones de distancia y de la geometría de la disposición de los sensores.

Para mejorar la precisión, se pueden aplicar técnicas de filtrado, como el filtro de Kalman, que permite reducir el ruido y las fluctuaciones en las mediciones.

5. Realidad Aumentada (AR) Basada en Localización

La Realidad Aumentada (AR) basada en localización es una tecnología que superpone contenido digital sobre el entorno físico, utilizando la ubicación del usuario para activar y posicionar la información virtual. Esta tecnología se ha utilizado en aplicaciones como juegos (por ejemplo, Pokémon GO), turismo, educación y navegación en interiores.

Para lograr una experiencia AR coherente y precisa, es fundamental contar con un sistema de posicionamiento que proporcione información de ubicación en tiempo real y con alta precisión. La integración de UWB con AR permite activar contenido digital en ubicaciones específicas dentro de un edificio, mejorando la interactividad y la inmersión del usuario.

6. Diseño de Redes UWB en Espacios Cerrados

El diseño de una red UWB efectiva en interiores requiere una planificación cuidadosa para garantizar una cobertura completa y precisa. Esto incluye:

Ubicación estratégica de anclas: Colocar los sensores UWB en posiciones que maximicen la cobertura y minimicen las zonas muertas.

Calibración del sistema: Utilizar herramientas como telémetros láser y cintas métricas para medir distancias reales y ajustar las posiciones de los sensores en consecuencia.

Consideración de obstáculos: Tener en cuenta la presencia de paredes, muebles y otras estructuras que puedan afectar la propagación de las señales UWB.

Pruebas de campo: Realizar pruebas en el entorno real para validar la precisión del sistema y hacer ajustes según sea necesario.

7. Calibración y Validación del Sistema

Después de la instalación de la red UWB, es crucial realizar una calibración y validación exhaustivas para asegurar la precisión del sistema. Esto implica:

Mediciones de referencia: Comparar las ubicaciones estimadas por el sistema con mediciones de referencia obtenidas mediante métodos precisos, como el uso de telémetros láser.

Análisis de errores: Calcular métricas como el error cuadrático medio (RMSE) para cuantificar la precisión del sistema.

Ajuste de parámetros: Modificar configuraciones del sistema, como la potencia de transmisión y los algoritmos de filtrado, para mejorar la precisión.

Documentación de resultados: Registrar los resultados de las pruebas y las configuraciones utilizadas para futuras referencias y mantenimiento del sistema.

8. Integración con Aplicaciones Móviles

Para ofrecer una experiencia de usuario fluida, el sistema de posicionamiento debe integrarse con aplicaciones móviles que presenten la información de ubicación y contenido AR. Esto implica:

Desarrollo de interfaces de usuario: Crear interfaces intuitivas que muestren la ubicación del usuario y el contenido AR de manera clara.

Sincronización de datos: Asegurar que los datos de ubicación se transmitan en tiempo real a la aplicación móvil.

Compatibilidad multiplataforma: Desarrollar aplicaciones que funcionen en diferentes sistemas operativos móviles, como iOS y Android.

Pruebas de usabilidad: Realizar pruebas con usuarios reales para identificar y corregir problemas de usabilidad.

9. Aplicaciones Reales y Proyección

La combinación de sistemas de posicionamiento en interiores y realidad aumentada tiene un amplio rango de aplicaciones prácticas, incluyendo:

Educación: Facilitar recorridos virtuales interactivos en campus universitarios para nuevos estudiantes.

Turismo: Ofrecer guías virtuales en museos y sitios históricos que proporcionen información contextual en tiempo real.

Retail: Mejorar la experiencia de compra en tiendas mediante promociones y productos destacados según la ubicación del cliente.

Salud: Rastrear equipos médicos y personal en hospitales para mejorar la eficiencia operativa.

Estas aplicaciones demuestran el potencial de las tecnologías de posicionamiento y AR para transformar la interacción de las personas con su entorno físico.

10. Consideraciones Éticas y de Privacidad

La implementación de sistemas de posicionamiento y AR también plantea consideraciones éticas y de privacidad, como:

Consentimiento del usuario: Asegurar que los usuarios estén informados y den su consentimiento para la recopilación y uso de sus datos de ubicación.

Seguridad de los datos: Proteger los datos de ubicación contra accesos no autorizados y posibles brechas de seguridad.

Transparencia: Informar claramente a los usuarios sobre cómo se recopilan, utilizan y almacenan sus datos de ubicación.

Cumplimiento legal: Adherirse a las leyes y regulaciones locales e internacionales relacionadas con la privacidad y protección de datos.

10. Metodología

La metodología de este proyecto se basa en una ejecución técnica dividida en cinco grandes fases: levantamiento del entorno, diseño de red, instalación y calibración de sensores UWB, medición y validación experimental, y documentación de resultados. Todo se realiza en el contexto físico del Centro de Innovación y Tecnología (CIT) de la UVG.

Fase 1: Análisis físico del entorno

1.1. Reconocimiento espacial del CIT

- Recorrido completo de los niveles del CIT para identificar zonas estratégicas de cobertura.
- Documentación de materiales (concreto, vidrio, estructuras metálicas) que puedan afectar la propagación UWB.

1.2. Mediciones con telémetro láser

- Uso de telémetro digital para medir distancias reales entre esquinas, pasillos y puntos de referencia.
- Registro de coordenadas absolutas para generar un plano de referencia del entorno.

1.3. Elaboración de mapa base

Con base en las mediciones obtenidas mediante telémetro láser y cintas métricas, se elaborarán planos detallados de cada nivel del CIT utilizando **AutoCAD**. Esta herramienta permitirá representar con precisión la distribución física del entorno, incluyendo esquinas, columnas, pasillos y puntos de interés.

Los planos serán diseñados como sistemas de coordenadas cartesianas (X, Y), lo cual permite asignar a cada sensor UWB una ubicación específica basada en medidas reales. Esta representación espacial será utilizada como base para la planificación de la red de sensores, permitiendo que cada nivel del edificio funcione como un plano de referencia sobre el cual se posicionarán los sensores de forma estratégica, considerando cobertura, visibilidad y precisión del sistema.

1.4. Validación con medición manual

Durante el recorrido por los distintos niveles del CIT, se realizarán mediciones físicas utilizando telémetros láser y cintas métricas. Estas mediciones permiten identificar con precisión las distancias reales entre referencias estructurales clave, como esquinas, accesos, columnas y zonas de circulación. Los datos obtenidos fueron fundamentales para establecer un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y) para cada nivel, lo que permite representar el entorno como un plano bidimensional de referencia. Esta representación servirá como base para la asignación de coordenadas a cada sensor UWB, vinculando su ubicación física con una ubicación lógica dentro del sistema de posicionamiento.

Fase 2: Diseño de la red de sensores UWB

El diseño de la red de sensores es un paso crucial para garantizar la precisión del sistema de posicionamiento y la cobertura completa del recorrido. Esta fase se enfoca en aplicar principios geométricos y técnicos que aseguren una correcta disposición espacial de los sensores UWB.

2.1. Criterios de diseño

Se aplicarán principios de trilateración, donde cada punto del recorrido deberá estar cubierto simultáneamente por al menos tres sensores visibles. Esto permite calcular de forma precisa la posición del usuario mediante la intersección de señales de distancia. Se tomarán en cuenta las limitaciones estructurales del edificio, así como la cobertura efectiva estimada de cada sensor UWB, que en interiores alcanza aproximadamente entre 20 y 25 metros en condiciones óptimas.

2.2. Distribución teórica de los sensores

A partir de los planos generados en AutoCAD y la información de materiales que pueden interferir con las señales, se realizará una distribución inicial de los sensores. Se utilizarán los 60 sensores UWB disponibles, priorizando zonas estratégicas como entradas principales, intersecciones de pasillos, accesos a laboratorios y otros puntos críticos en el recorrido. La ubicación de cada sensor será registrada con coordenadas (X, Y), manteniendo una distancia mínima entre ellos para asegurar solapamiento efectivo sin generar interferencias.

2.3. Simulación digital de cobertura

Se usará software de diseño y hojas de cálculo vinculadas a los planos para simular el radio de acción teórico de cada sensor, representado como un cono de apertura de 120°. Esta simulación permitirá identificar zonas de sombra donde la cobertura no cumple con el criterio de trilateración. En base a este análisis, se harán ajustes continuamente en la posición de los sensores hasta alcanzar una distribución que garantice cobertura continua y sin superposiciones innecesarias.

Fase 3: Instalación e identificación de sensores

Una vez definido el diseño de red, se procederá con la instalación física de los sensores, asegurando su correcta identificación y mapeo con el entorno físico y lógico del sistema.

3.1. Montaje físico

Los sensores serán instalados en los puntos previamente definidos, siguiendo criterios de altura, orientación y fijación segura. Dependiendo del nivel y tipo de espacio, se colocarán en techos, muros o columnas, utilizando soportes o adhesivos industriales que aseguren estabilidad a largo plazo. La instalación considerará además evitar obstrucciones visibles directas que puedan interferir con la señal de los sensores.

3.2. Registro de identificadores

Cada sensor UWB posee un identificador único (UUID o ID de fábrica) que será registrado manualmente junto a su ubicación física. Se elaborará una tabla de mapeo detallada que incluya:

- ID del sensor
- Coordenadas reales (X, Y)
- Nivel del edificio
- Punto de referencia estructural cercano (columna, esquina, intersección)

Esta tabla será clave para que el sistema de posicionamiento asocie correctamente la señal recibida con la ubicación física del sensor correspondiente. Además, servirá como referencia para mantenimiento o recalibraciones futuras.

Fase 4: Calibración y validación de posicionamiento

4.1. Protocolo de calibración

Definición de 20 puntos de control distribuidos por el edificio donde se medirá la posición estimada.

En cada punto, se mide:

- Distancia real desde sensores más cercanos (telémetro)
- Distancia estimada por el sistema UWB

4.2. Cálculo de error

Cálculo de error absoluto y relativo en X, Y (y Z si aplica) para cada punto.

Ánalysis de precisión global: promedio de error, desviación estándar y zonas críticas.

4.3. Aplicación de filtros

Pruebas con filtros tipo Kalman o media móvil para mejorar la estabilidad de la posición reportada. Comparativa entre señal cruda y señal suavizada.

4.4. Evaluación del patrón de señal UWB

Se identificó que el patrón de propagación de los sensores UWB tiene forma cónica con un ángulo de apertura aproximado de 120°, similar al campo visual humano. Esta característica influye en la cobertura efectiva por sensor y se consideró al momento de ubicar los dispositivos para evitar solapamientos excesivos o zonas ciegas.

Además, se incorporará un **sniffer SP32 UWB** como herramienta auxiliar para capturar y analizar en tiempo real el comportamiento de las señales emitidas por los sensores UWB. Con este dispositivo se pretende obtener métricas adicionales sobre la calidad de la señal, la interferencia entre niveles y la propagación vertical de las ondas, lo cual permitirá afinar la calibración del sistema en espacios complejos del edificio.

Se continuará utilizando la distancia recomendada entre sensores documentada en trabajos previos, validando su aplicabilidad mediante pruebas prácticas y ajustando solo en caso de detectar errores significativos o zonas muertas durante la validación

4.5. Criterios de selección de puntos de control

Los 20 puntos de control utilizados durante la fase de calibración no fueron seleccionados al azar, sino con base en criterios estratégicos para asegurar una validación representativa y efectiva del sistema. Se priorizaron ubicaciones que ofrecieran una cobertura amplia de señal y que tuvieran relevancia dentro del recorrido real que hará el usuario.

Entre los principales criterios considerados se encuentran:

- **Puntos al fondo de pasillos**, especialmente junto a paredes laterales, donde los sensores pueden cubrir la mayor extensión lineal posible gracias a la apertura cónica de la señal UWB (120°).
- **Intersecciones y esquinas**, ya que estos puntos permiten validar el comportamiento del sistema al momento de que el usuario debe decidir entre girar o continuar recto, funcionando como nodos de navegación clave.
- **Referencias intermedias a lo largo del recorrido**, que sirven como puntos de parada o interés, útiles para la activación futura de contenido AR.
- **Lugares con buena visibilidad hacia sensores cercanos**, asegurando una trilateración confiable y estable en la medición.

Este enfoque de selección permitió obtener datos de calibración más realistas, alineados con el flujo natural del recorrido y con mayor relevancia funcional para el sistema.

Fase 5: Evaluación del sistema y documentación

En esta última fase se verificará el desempeño global del sistema instalado, evaluando tanto la cobertura como la precisión del posicionamiento, y se generará la documentación técnica del proyecto.

5.1. Evaluación técnica

La evaluación técnica consistirá en realizar pruebas funcionales sobre todo el recorrido guiado, utilizando dispositivos móviles o computadoras que se conecten con la red de sensores UWB. Se establecerán rutas de validación por cada nivel del edificio, y se recorrerán de forma controlada para medir la posición reportada por el sistema en distintos puntos.

Durante las pruebas se verificará:

- Que cada punto del recorrido esté cubierto por al menos tres sensores activos.
- Que las posiciones estimadas se mantengan estables y dentro del margen de error aceptable (menor a 30 cm promedio).
- Que no existan zonas muertas, interferencias excesivas o saltos abruptos de posición.

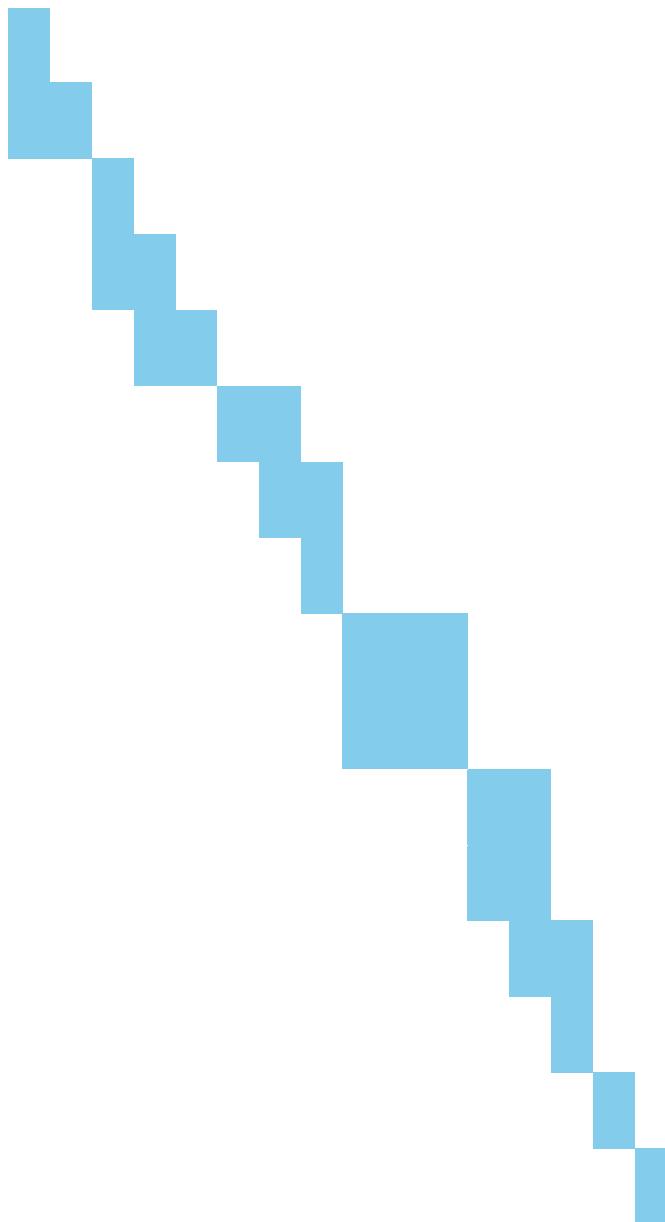
En los casos donde se detecten fallos en la cobertura o errores superiores al umbral, se hará una reevaluación del diseño de red para reubicar sensores o ajustar configuraciones.

Índice Preliminar

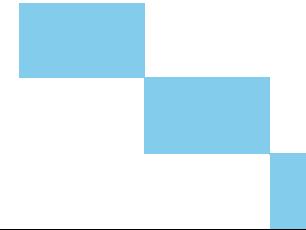
- 1. Resumen**
- 2. Introducción**
- 3. Objetivos**
 - 3.1. Objetivo General
 - 3.2. Objetivos Específicos
- 4. Antecedentes**
- 5. Justificación**
- 6. Alcance y Limitaciones**
 - 5.1. Alcance del proyecto
 - 5.2. Limitaciones técnicas y operativas
- 7. Marco Teórico**
 - 7.1. Sistemas de Posicionamiento en Interiores (IPS)
 - 7.2. Limitaciones del GPS y necesidad de IPS
 - 7.3. Tecnologías de localización: BLE vs UWB
 - 7.4. Algoritmos de localización: Trilateración y filtros
 - 7.5. Realidad Aumentada basada en localización
 - 7.6. Diseño de redes UWB en interiores
 - 7.7. Calibración y validación de sistemas UWB
 - 7.8. Integración con aplicaciones móviles
 - 7.9. Aplicaciones reales y proyección
 - 7.10. Consideraciones éticas y de privacidad
- 8. Metodología**
 - 8.1. Fase 1: Levantamiento físico del entorno
 - 8.2. Fase 2: Diseño de red de sensores UWB
 - 8.3. Fase 3: Instalación e identificación de sensores
 - 8.4. Fase 4: Calibración y validación de posicionamiento
 - 8.5. Fase 5: Evaluación del sistema y documentación

11. Cronograma

| |
|--|
| Registro de IDs, coordenadas, nivel y orientación |
| Pruebas básicas de conectividad |
| Captura de señal con sniffer SP32 UWB |
| Validación de patrones de propagación |
| Reajuste físico si hay fallos de cobertura |
| Medición en puntos de control |
| Comparación con coordenadas reales |
| Aplicación de filtros: Kalman, media móvil, etc. |
| Análisis de errores, métricas de precisión, revisión de zonas críticas |
| Iteración y mejora del posicionamiento |
| Pruebas con usuarios reales (estudiantes o staff) |
| Registro de retroalimentación |
| Mejoras de posicionamiento o activación AR si aplica |
| Documentación técnica completa de red, calibración y pruebas |
| Redacción de resultados, anexos, planos, tablas y gráficos |
| Inicio de redacción del informe final |



| |
|---|
| Revisión del informe |
| Preparación de presentación de proyecto |
| Entrega final |



12. Bibliografia APA

- a. Estimote. (2020). *UWB Location Beacons Developer Documentation*. Estimote Inc.
<https://developer.estimote.com/uwb/>
- b. 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>
- c. 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>
- d. 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/>
- e. Welch, G., & Bishop, G. (2006). *An Introduction to the Kalman Filter*. University of North Carolina at Chapel Hill.
https://www.cs.unc.edu/~welch/media/pdf/kalman_intro.pdf
- f. Hightower, J., & Borriello, G. (2001). *Location systems for ubiquitous computing*. IEEE Computer, 34(8), 57–66. <https://doi.org/10.1109/2.940014>
- g. Zhang, Q., & Wang, Y. (2015). *Design and implementation of indoor positioning system based on UWB*. Proceedings of the 2015 International Conference on Computer Science and Mechanical Automation.
<https://doi.org/10.1109/CSMA.2015.125>
- h. Unity Technologies. (2023). *Unity Manual – AR Foundation Overview*.
<https://docs.unity3d.com/Packages/com.unity.xr.arfoundation@5.0/manual/index.html>

- i. OpenCV. (2024). *Kalman Filter — Introduction and Examples*.
https://docs.opencv.org/master/dc/d2c/tutorial_real_time_pose.html
- j. Google Developers. (2022). *ARCore Location-based Experiences*.
<https://developers.google.com/ar>
- k. Fontana, R. J., & Gunderson, S. J. (2002). *Ultra-wideband precision asset location system*. IEEE Conference on Ultra Wideband Systems and Technologies, 147–150. <https://doi.org/10.1109/UWBST.2002.1006361>
- l. Mazhar, F., Rizwan, M., & Khan, M. (2017). *Indoor positioning using sensor fusion in a UWB and BLE environment*. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 8(4), 349–356.
<https://doi.org/10.14569/IJACSA.2017.080451>
- m. Brena, R. F., García-Vázquez, J. P., Galván-Tejada, C. E., Muñoz-Rodríguez, D., Vargas-Rosales, C., & Fangmeyer, J. (2017). *Evolution of indoor positioning technologies: A survey*. Journal of Sensors, 2017, 2630413. <https://doi.org/10.1155/2017/2630413>
- n. Liu, H., Darabi, H., Banerjee, P., & Liu, J. (2007). *Survey of wireless indoor positioning techniques and systems*. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 37(6), 1067–1080.
<https://doi.org/10.1109/TSMCC.2007.905750>
- o. Van Haute, T., Lemic, F., Handziski, V., Wolisz, A., Moerman, I., & Poorter, E. D. (2016). *Performance analysis of multiple indoor positioning systems in a healthcare environment*. International Journal of Health Geographics, 15(1), 1–19. <https://doi.org/10.1186/s12942-016-0041-8>
- p. Milgram, P., & Kishino, F. (1994). *A taxonomy of mixed reality visual displays*. IEICE Transactions on Information and Systems, 77(12), 1321–1329.
- q. Wang, C., An, Z., Liu, Y., & Zhuang, W. (2021). *A robust UWB indoor positioning system based on TDOA and FDOA*. Sensors, 21(4), 1234. <https://doi.org/10.3390/s21041234>
- r. Zhang, S., Ni, L. M., & Zhang, Y. (2016). *A comparative study of trilateration and fingerprinting-based localization algorithms*. Proceedings of the 2016 IEEE 18th International Conference on High Performance Computing and Communications. <https://doi.org/10.1109/HPCC-SmartCity-DSS.2016.0072>
- s. Dardari, D., Conti, A., Ferner, U., Giorgetti, A., & Win, M. Z. (2009). *Ranging with ultrawide bandwidth signals in multipath environments*.

Proceedings of the IEEE, 97(2), 404–426.
<https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008846>

- t. Augmented Reality for Developers (1st ed.). (2017). P. E. Madsen & J. Nilsson. Packt Publishing.