

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INFORMÁTICA
VALPARAÍSO - CHILE



**UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA**

**“Desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo
real sobre la ubicación de personas en interiores en
distintos contextos: Caso GerioTracker”**

FELIPE ARTURO SALDAÑA ESCOBAR

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL EN INFORMÁTICA**

Profesor Guía: Raúl Monge

Profesor Correferente: Pedro Godoy

Marzo - 2026



CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título ☐ Tesis de Postgrado

Título del trabajo: Desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real sobre la ubicación de personas en interiores en distintos contextos: Caso GerioTracker

Nombre del candidato(a): Felipe Arturo Saldaña Escobar

Carrera / Grado: Ingeniería Civil Informática

Campus: Casa Central Departamento: Informática

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Raúl Monge Anwandter, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución.

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL (marcar una opción)

☒ El trabajo **NO contiene** información que amerite confidencialidad y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (**embargo**) por (**marcar una opción**):

☐ 6 meses ☐ 12 meses ☐ 2 años ☐ 3 años ☐ 5 años ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 9 de marzo 2026

Firma:

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 9 de marzo 2026

Firma:

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.



Desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real sobre la ubicación de personas en interiores en distintos contextos: Caso GerioTracker

Felipe Saldaña Escobar

felipe.saldanae@sansano.usm.cl

Profesor Guía: Raúl Monge Anwandter

Resumen:

Esta investigación se centró en el desarrollo de un sistema de monitoreo en tiempo real de la ubicación de personas en interiores de edificaciones, con una precisión superior a la que ofrece el sistema GPS en este tipo de entornos. Para ello, se evaluaron dos tecnologías principales: Ultra-WideBand (UWB), empleando trilateración; y Radio Frequency Identification (RFID), mediante el análisis de datos provenientes de lectores de etiquetas. Cada tecnología presentó ventajas específicas que permitieron satisfacer las necesidades de distintos contextos de uso, como los Establecimientos de Larga Estadía para Adultos Mayores (ELEAM), donde un sistema de monitoreo podría contribuir a mejorar la seguridad de los residentes y apoyar el trabajo de los cuidadores.

Palabras clave: Ultra-WideBand, Radio Frequency Identification, residencia de adultos mayores, monitoreo de ubicación.

1 Introducción

1.1 Contexto del trabajo

Los Establecimientos de Larga Estadía para Adultos Mayores (ELEAM) enfrentan diversos desafíos relacionados con el cuidado y supervisión de sus residentes. En particular, resulta fundamental poder conocer la ubicación de los adultos mayores dentro de las instalaciones, especialmente en casos donde los residentes presentan condiciones como demencia u otras enfermedades que pueden afectar su orientación o autonomía. La capacidad de monitorear la ubicación de los residentes en tiempo real puede contribuir a mejorar su seguridad y permitir una respuesta más rápida ante posibles incidentes.

En muchos casos, el monitoreo de los residentes dentro de estas instalaciones se realiza de manera manual, mediante rondas periódicas del personal de cuidado o supervisión directa. Sin embargo, este tipo de métodos puede resultar limitado en situaciones donde se requiere reaccionar rápidamente ante emergencias o detectar desplazamientos hacia zonas potencialmente peligrosas dentro del establecimiento.

En el contexto del proyecto GerioTracker, desarrollado previamente en la Feria de Software de la Universidad Técnica Federico Santa María, se exploró el uso de tecnologías de localización en interiores para abordar este problema. En dicho proyecto se implementó un sistema basado en la tecnología Ultra-Wideband (UWB), capaz de estimar la ubicación de una persona dentro de un edificio mediante técnicas de trilateración.

Si bien la tecnología UWB ofrece altos niveles de precisión en sistemas de localización en interiores, su implementación puede implicar costos de infraestructura y despliegue relativamente elevados. Por esta razón, surge el interés de evaluar otras alternativas tecnológicas que puedan ofrecer soluciones más simples o económicas dependiendo del contexto de uso. Entre estas alternativas se encuentra la tecnología Radio Frequency Identification (RFID), la cual permite detectar la presencia de dispositivos en zonas específicas mediante lectores de radiofrecuencia.



En este contexto, el presente trabajo busca analizar y comparar el uso de tecnologías UWB y RFID para sistemas de monitoreo de ubicación en interiores, con el fin de evaluar sus ventajas, limitaciones y posibles aplicaciones en entornos como los ELEAM.

1.2 Definición del problema

La seguridad y el monitoreo en tiempo real de personas en espacios interiores representan un desafío importante en entornos donde el posicionamiento es crítico, pero donde las tecnologías tradicionales de localización, como el sistema GPS, no funcionan con la precisión requerida. Esta situación se presenta en distintos contextos, tales como hospitales, centros de trabajo y especialmente en Establecimientos de Larga Estadía para Adultos Mayores (ELEAM). En estos lugares, contar con un sistema que permita conocer la ubicación de las personas en tiempo real puede contribuir significativamente a mejorar la seguridad de los residentes y facilitar el trabajo del personal de cuidado, permitiendo responder con mayor rapidez ante incidentes como caídas, desorientación o desplazamientos fuera de áreas permitidas.

Las soluciones basadas en GPS presentan limitaciones importantes en entornos interiores, ya que la señal satelital se debilita al atravesar estructuras como paredes o techos, lo que reduce considerablemente su precisión. Además, fenómenos como la reflexión y el rebote de las señales en superficies cerradas afectan la calidad de la medición, haciendo que el posicionamiento sea poco confiable en este tipo de escenarios. Debido a estas limitaciones, han surgido diversas tecnologías alternativas para la localización en interiores, entre las que destacan Ultra-Wideband (UWB) y Radio Frequency Identification (RFID).

La tecnología UWB permite estimar posiciones mediante técnicas como la trilateración, utilizando mediciones de distancia entre dispositivos conocidos como anclas y dispositivos móviles o tags (etiquetas). Por su parte, los sistemas RFID permiten detectar la presencia o paso de etiquetas electrónicas dentro del rango de lectura de antenas o lectores ubicados en puntos estratégicos. Ambas tecnologías ofrecen soluciones potenciales para la localización en interiores, aunque presentan distintos desafíos relacionados con la infraestructura necesaria, el consumo energético de los dispositivos y la escalabilidad del sistema en instalaciones de gran tamaño.

En este contexto, los avances en tecnologías asociadas al Internet of Things (IoT) han facilitado el desarrollo de sistemas de monitoreo basados en redes de sensores y dispositivos conectados. Estas tecnologías permiten integrar datos provenientes de múltiples dispositivos en tiempo real, lo que abre nuevas posibilidades para el desarrollo de sistemas de monitoreo de ubicación en interiores que sean más eficientes, escalables y adaptables a distintos entornos.

Los principales beneficiarios de este tipo de sistemas son los usuarios que requieren monitoreo dentro de instalaciones cerradas, como residentes de ELEAM, pacientes hospitalizados o trabajadores en entornos controlados. Asimismo, el personal encargado del cuidado o supervisión, como cuidadores, personal médico o personal de seguridad, se beneficia de herramientas que permitan conocer la ubicación de las personas en tiempo real y responder oportunamente ante situaciones de riesgo. Para que un sistema de localización en interiores sea viable en estos contextos, deben considerarse distintos factores técnicos. Entre ellos destacan la precisión de localización requerida, la frecuencia de actualización de los datos de posición, el consumo energético de los dispositivos portátiles utilizados por los usuarios y la complejidad de la infraestructura necesaria para implementar el sistema en distintos edificios. Además, debido a que se trata de información sensible relacionada con la ubicación de personas, también es necesario considerar aspectos de privacidad y seguridad en el manejo de los datos.

La implementación de un sistema de monitoreo de ubicación en interiores puede generar impactos relevantes tanto en la seguridad de los usuarios como en la eficiencia de las instituciones que lo utilizan. Por una parte, permite aumentar la seguridad y calidad de vida de los usuarios finales al facilitar la detección temprana de situaciones de riesgo. Por otra parte, mejora la capacidad de respuesta del personal encargado del cuidado o

supervisión, al disponer de información actualizada sobre la ubicación de las personas dentro de las instalaciones. Finalmente, a largo plazo, estos sistemas pueden contribuir a optimizar los recursos de los establecimientos, reduciendo la necesidad de supervisión constante y facilitando la gestión de protocolos de emergencia.

1.3 Objetivos del trabajo

Objetivo general:

Implementar y evaluar prototipos de sistemas de monitoreo de ubicación de personas en interiores utilizando tecnologías UWB y RFID, con el objetivo de analizar su desempeño y determinar en qué escenarios resulta más conveniente utilizar cada una según las características del entorno y las necesidades de los usuarios.

Objetivos específicos:

1. Examinar la relevancia de diversos factores clave en sistemas de monitoreo de ubicación en interiores, incluyendo la rapidez de actualización de información, facilidad de uso, costos, precisión y escalabilidad, en el contexto de distintas aplicaciones.
2. Diseñar e implementar pruebas experimentales para evaluar el rendimiento de los sistemas basados en **UWB** y **RFID** en distintos escenarios de interiores, recopilando datos sobre precisión, estabilidad de la señal y cobertura en condiciones variables.
3. Comparar las tecnologías **UWB** y **RFID** en función de las características evaluadas, resaltando sus ventajas y limitaciones para determinar cuál es más conveniente en cada contexto de aplicación específico.

Complejidad del problema como un desafío de ingeniería:

- Desafíos técnicos de precisión y escalabilidad: Desarrollar un sistema que mantenga una alta precisión y sea escalable a diferentes edificios y entornos interiores es una tarea que implica una gran capacidad de diseño y ajuste de la infraestructura.
- Interoperabilidad de tecnologías: La integración de UWB y RFID, considerando las limitaciones propias de cada tecnología, requiere un sistema capaz de combinar ambas para mejorar la fiabilidad y precisión.
- Consideraciones de privacidad y seguridad de la información: Implementar este sistema implica manejar datos sensibles y exige soluciones de ingeniería para proteger la información de los usuarios.
- Adaptación a diversos contextos: El sistema debe ser adaptable a distintos tipos de establecimientos y contextos, desde ELEAM hasta oficinas, requiriendo diseños modulares y flexibles.

1.4 Organización del informe

El informe del trabajo desarrollado, se organiza en seis capítulos, los cuales abordan progresivamente el contexto del problema, los fundamentos teóricos, la metodología aplicada y los resultados obtenidos.

En el Capítulo 1 se introduce el contexto del trabajo, se presenta la definición del problema y se establecen los objetivos que guían el desarrollo de la investigación.

El Capítulo 2 corresponde al marco teórico, donde se presentan los conceptos y fundamentos necesarios para comprender el problema abordado y las tecnologías utilizadas. En particular, se describen los principios de funcionamiento de Ultra-Wideband (UWB) y Radio Frequency Identification (RFID), junto con los conceptos asociados al cálculo de posición y al procesamiento de datos.



En el Capítulo 3 se desarrolla el estado del arte, donde se revisan trabajos y enfoques relevantes relacionados con la localización de personas en interiores, analizando sus principales aportes, limitaciones y la brecha que esta memoria busca abordar mediante la comparación e implementación de soluciones basadas en UWB y RFID.

El Capítulo 4 describe la metodología utilizada, detallando el diseño e implementación de los sistemas propuestos, la arquitectura de hardware y software empleada, así como las estrategias de validación y pruebas definidas para evaluar el desempeño de ambas tecnologías.

En el Capítulo 5 se presentan los resultados obtenidos y su análisis, incluyendo las mediciones registradas durante las pruebas experimentales con los sistemas basados en UWB y RFID, junto con una comparación de su desempeño utilizando las métricas definidas en la metodología.

Finalmente, el Capítulo 6 presenta las conclusiones del trabajo, donde se discuten los principales hallazgos de la investigación, las limitaciones del sistema desarrollado, sus contribuciones y posibles líneas de trabajo futuro.

2 Marco Teórico

El presente capítulo expone los fundamentos conceptuales y técnicos que sustentan el desarrollo de los sistemas de localización implementados. Se abordan las tecnologías utilizadas, los principios matemáticos de cálculo de distancias y los mecanismos de comunicación empleados.

2.1 Ultra Wideband (UWB)

La tecnología Ultra Wideband (UWB) se basa en la transmisión de pulsos de radiofrecuencia de muy corta duración y con un ancho de banda superior a 500 MHz. A diferencia de otras tecnologías de localización inalámbrica como WiFi o Bluetooth, UWB ofrece una mayor precisión en la medición de distancias debido a su capacidad para estimar tiempos de vuelo con alta resolución temporal [1].

2.1.1 Medición de distancias con UWB

El cálculo de la distancia entre un *tag* y un ancla se fundamenta en la medición del tiempo que tarda una señal en propagarse entre ambos dispositivos (*time-of-flight*). La distancia se obtiene como:

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad (1)$$

Donde:

- d = distancia entre los dispositivos
- c = velocidad de la luz (3×10^8 m/s)
- Δt = tiempo medido de ida y vuelta de la señal

En la práctica, los módulos DW1000 implementan protocolos de *two-way ranging*, en los que el intercambio de mensajes permite calcular Δt compensando retardos internos de hardware [2].

2.1.2 Trilateración

Una vez obtenidas las distancias a varias anclas con posición conocida, es posible determinar la posición del *tag* mediante trilateración. Para un sistema bidimensional con tres anclas, se plantea el siguiente sistema:

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 = d_1^2 \quad (2)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 = d_2^2 \quad (3)$$

$$(x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = d_3^2 \quad (4)$$

donde (x_i, y_i) corresponden a las coordenadas de las anclas y d_i son las distancias medidas. La solución del sistema permite obtener la posición estimada (x, y) del *tag*. Para mejorar la robustez, se pueden emplear más de tres anclas y aplicar algoritmos de optimización como mínimos cuadrados.

2.2 Identificadores por Radiofrecuencia (RFID)

La tecnología RFID permite la identificación automática de objetos y personas mediante el uso de etiquetas (*tags*) y lectores. Se basa en la emisión de un campo electromagnético por parte de la antena lectora, el cual energiza a los *tags* pasivos cercanos, permitiéndoles responder con su identificador único [3].

2.2.1 Tipos de RFID

En el presente trabajo se utiliza UHF RFID, ya que permite cubrir áreas de paso como accesos y habitaciones.

- LF (Low Frequency, ~125 kHz): corto alcance, bajo costo.
- HF (High Frequency, 13.56 MHz): alcance de hasta 1 metro, común en tarjetas de acceso.
- UHF (Ultra High Frequency, 860–960 MHz): mayor alcance (3–6 m), ideal para monitoreo en interiores.

En el presente trabajo se utiliza UHF RFID, ya que permite cubrir áreas de paso como accesos y habitaciones.

2.2.2 Identificación mediante EPC y RSI

Cada *tag* posee un Electronic Product Code (EPC) único, que es leído por la antena y enviado al sistema central. Adicionalmente, la lectura incluye un indicador de potencia de señal recibida (RSSI, Received Signal Strength Indicator), que puede utilizarse como referencia secundaria de proximidad, aunque con menor precisión que UWB.

2.3 Comunicación inalámbrica en ESP32

El ESP32 es un microcontrolador con capacidad de conexión WiFi, ampliamente utilizado en aplicaciones IoT.

En el contexto de esta memoria cumple dos roles principales:

- Conexión de dispositivos a la red local o a la nube.
- Transmisión de datos en formato JSON hacia el servidor de procesamiento, utilizando protocolos como WebSockets o HTTP.



El formato JSON (JavaScript Object Notation) es ampliamente utilizado por su simplicidad y compatibilidad. Un ejemplo de mensaje enviado por un dispositivo es:

```
{
  "status": "medida realizada",
  "idTag": 1000,
  "links": [
    {"A": "1786", "R": 2.5, "I": -70},
    {"A": "1787", "R": 3.1, "I": -68}
  ]
}
```

2.4 Procesamiento de señales y filtros estadísticos

Las mediciones obtenidas tanto en UWB como en RFID están sujetas a ruido y fluctuaciones debido a reflexiones, interferencias o lecturas parciales. Para mitigar estos efectos se aplican filtros estadísticos simples:

- Promedio móvil: Suaviza la serie de datos calculando la media de los últimos N valores.
- Mediana móvil: Reduce la influencia de valores atípicos al tomar la mediana de los últimos N valores.

Estos filtros permiten obtener posiciones más estables y confiables, sin introducir gran complejidad computacional en los dispositivos.

3 Estado del Arte

3.1 Discusión bibliográfica y brecha abordada

La localización de personas en interiores constituye un desafío relevante debido a la limitada efectividad del GPS en espacios cerrados y a la necesidad de contar con información de ubicación confiable en contextos como hospitales, empresas y, especialmente, Establecimientos de Larga Estadía para Adultos Mayores (ELEAM). En estos entornos, disponer de un sistema de monitoreo permite apoyar la supervisión de residentes, registrar movimientos y advertir eventos críticos, lo que se vuelve particularmente pertinente considerando las dificultades operativas y regulatorias descritas en reportajes recientes sobre ELEAM [4]

Dentro de las alternativas tecnológicas para localización *indoor*, destacan dos enfoques: (i) tecnologías orientadas a estimación de coordenadas (p. ej., UWB con trilateración), y (ii) tecnologías orientadas a detección de presencia o transición por zonas (p. ej., RFID en pórticos). Ambas aproximaciones se diferencian en precisión, complejidad de despliegue, costo y escalabilidad, lo cual justifica evaluarlas bajo un marco comparativo.

1) Trilateración y estimación de posición:

- a) La trilateración es una técnica ampliamente utilizada para estimar la posición de un dispositivo móvil a partir de distancias medidas hacia puntos de referencia fijos (anclas). Un reporte de referencia [5] describe el fundamento geométrico del método y el uso de mínimos cuadrados para enfrentar el carácter ruidoso de las mediciones, permitiendo estimar coordenadas en un plano incluso cuando las distancias presentan error. Este enfoque es especialmente relevante para sistemas UWB, donde el objetivo no es solo detectar presencia, sino obtener una posición continua (x, y) dentro del inmueble.
- b) A su vez en [6] discuten estrategias para mejorar la confiabilidad de la estimación, abordando escenarios donde la ubicación exacta de anclas no está completamente definida y proponiendo procedimientos que, aunque validados principalmente por simulación, ilustran la importancia del preprocesamiento y la robustez del algoritmo de posicionamiento.

- 2) UWB para localización en interiores:
 - a) Ultra-WideBand (UWB) se ha posicionado como una tecnología atractiva para localización *indoor* debido a su capacidad de estimar distancias con alta precisión, en comparación con otras tecnologías basadas en intensidad de señal. [1] presentan los principios fundamentales de UWB, incluyendo su potencial para aplicaciones de posicionamiento y comunicaciones, destacando ventajas asociadas al uso de pulsos de banda ultra ancha y a su desempeño en entornos complejos.
 - b) Sin embargo, la literatura también reconoce que el rendimiento real depende del procesamiento aplicado a las mediciones. [2] analizan algoritmos de rastreo en interiores y concluyen que enfoques como filtros de partícula pueden ofrecer buen rendimiento, aunque introducen supuestos y complejidad adicionales. Esto con el objetivo de mantener un equilibrio entre precisión y costo computacional, lo que abre espacio a enfoques más simples (por ejemplo, filtrado estadístico y validación de rangos) cuando los recursos del dispositivo o la arquitectura del sistema son limitados.
- 3) RFID para detección por zonas y control de acceso:
 - a) RFID se utiliza ampliamente en trazabilidad, control de acceso e identificación automática. [3] entrega una introducción a RFID activo y pasivo, destacando fortalezas relacionadas con costo y facilidad de despliegue, además de desafíos asociados a privacidad y lectura confiable en distintos escenarios. A diferencia de UWB, el uso de RFID en localización *indoor* suele implementarse como **detección de eventos**: la ubicación se interpreta en función del último punto de lectura (por ejemplo, una puerta o pórtico), en lugar de estimar coordenadas continuas.
 - b) Este paradigma resulta especialmente conveniente cuando el objetivo operativo es determinar la zona en la cual se encuentra una persona (habitación/pasillo/entrada), reduciendo la complejidad del sistema y facilitando la escalabilidad mediante la incorporación de pórticos adicionales. No obstante, se deben considerar problemas típicos como lecturas duplicadas, pérdidas de lectura por orientación del tag o variaciones del RSSI, lo que obliga a definir criterios de validación y reglas de filtrado en el backend.

3.2 Síntesis y brecha abordada por esta memoria

A partir de la revisión bibliográfica, se observa que UWB tiende a ser preferido cuando se requiere mayor precisión espacial y actualización frecuente de coordenadas, mientras que RFID es particularmente útil cuando basta con identificar transiciones entre zonas o controlar accesos con infraestructura relativamente simple. Sin embargo, una parte importante de la literatura revisada se enfoca en una sola tecnología o en validaciones por simulación, lo cual dificulta una comparación directa bajo un mismo marco de evaluación.

En este contexto, la presente memoria aborda la brecha mediante el desarrollo e implementación de dos sistemas independientes (UWB y RFID) orientados a resolver la misma problemática de monitoreo *indoor*, y propone un esquema experimental para medir desempeño en condiciones reales. Esto permite comparar ventajas y limitaciones de cada tecnología y discutir su conveniencia según el contexto de aplicación, particularmente en escenarios como ELEAM donde la seguridad, la trazabilidad y la facilidad de despliegue son criterios relevantes.



4 Desarrollo de la solución

4.1 Descripción general de los sistemas propuestos

El presente trabajo contempla el desarrollo y la evaluación de dos sistemas independientes de monitoreo en interiores, cada uno basado en una tecnología distinta: Radio Frequency Identification (RFID) y Ultra-WideBand (UWB). Ambos sistemas buscan resolver la misma problemática, a saber: la localización en tiempo real de personas en espacios cerrados, pero lo hacen mediante enfoques técnicos diferentes. La implementación de ambos permite analizar sus características, ventajas y limitaciones, y compararlas bajo escenarios comunes de uso.

El sistema basado en RFID emplea etiquetas portadas por los usuarios y antenas lectoras ubicadas en puntos estratégicos de paso. Su principio de funcionamiento consiste en la detección de eventos de proximidad: cuando una persona atraviesa el rango de una antena, ésta registra la presencia y transmite dicha información al servidor central. De esta manera, se logra determinar la ubicación aproximada del usuario en términos de zonas o áreas específicas del entorno monitoreado.

En contraste, el sistema basado en UWB utiliza nodos portátiles (*tags*) que se comunican con anclas fijas desplegadas en el espacio. Mediante la medición de tiempos de vuelo de las señales (*Time of Flight*) o diferencias de tiempo de llegada (*Time Difference of Arrival*), es posible calcular la distancia entre *tag* y anclas, y con ello aplicar algoritmos de trilateración para obtener coordenadas en dos o tres dimensiones con una precisión considerablemente superior a la de RFID.

A pesar de ser sistemas conceptualmente distintos, ambos comparten un mismo esquema de funcionamiento general compuesto por tres niveles:

- Captura de datos, realizada por las antenas RFID o las anclas UWB.
- Procesamiento y transmisión, a cargo de los microcontroladores ESP32, responsables de enviar la información hacia un servidor mediante comunicación inalámbrica.
- Gestión y visualización, efectuada en un servidor central y en una aplicación cliente, donde se almacenan, procesan y despliegan los datos de ubicación en tiempo real.

Esta separación en dos sistemas permite realizar una evaluación comparativa bajo condiciones controladas, lo cual constituye el núcleo del presente trabajo. De este modo, se busca determinar en qué contextos resulta más apropiado utilizar RFID y en cuáles UWB ofrece un mayor valor agregado.

Además, ambos sistemas se despliegan con un **nodo de procesamiento en el borde (edge)** basado en **Raspberry Pi**, encargado de **agregar y procesar localmente** los datos recibidos desde los dispositivos (lectores RFID o anclas/tag UWB). Esta Pi ejecuta los **cálculos de posición** (por ejemplo, trilateración en el caso de UWB) y realiza validaciones básicas (filtros y control de calidad de mediciones). Posteriormente, la Pi **publica los resultados al servidor en la nube** (p. ej., AWS/Azure) mediante una **API segura** para su **almacenamiento, análisis y visualización** en tiempo real por parte de los usuarios autorizados. De esta forma, se reduce la latencia y se evita saturar el enlace de red con datos crudos.

4.2 Hardware Utilizado

Para implementar y evaluar los dos sistemas de localización en interiores se utilizaron diferentes conjuntos de dispositivos, correspondientes a cada tecnología considerada. En ambos casos, la plataforma de procesamiento central corresponde a un ESP32, seleccionado por su bajo costo, conectividad WiFi integrada, capacidad de procesamiento suficiente para manejar comunicaciones en tiempo real y facilidad de programación. Sobre esta base, se integraron los módulos de hardware específicos de cada tecnología.

4.2.1 Sistema UWB

El sistema basado en Ultra-Wideband (UWB) se implementó utilizando módulos de radiofrecuencia DW1000 integrados con microcontroladores ESP32, como los ofrecidos por Makerfabs. En este enfoque, cada usuario porta un *tag* UWB, mientras que en el entorno se instalan al menos tres anclas fijas en posiciones conocidas. Estas anclas reciben las señales emitidas por el *tag* y, a partir de la medición de distancias mediante técnicas de *Time of Flight* (ToF) o *Time Difference of Arrival* (TDoA), es posible aplicar algoritmos de trilateración para calcular la posición en dos dimensiones (X, Y).

La infraestructura se organiza en tres niveles:

- Captura de datos: *tags* portados por los usuarios envían pulsos UWB que son recibidos por las anclas.
- Procesamiento local: una Raspberry Pi recibe las mediciones desde las anclas, ejecuta los cálculos de trilateración y filtra los resultados para eliminar valores atípicos.
- Publicación en la nube: los resultados de ubicación se transmiten hacia un servidor externo (ej. AWS, Azure), donde se almacenan y visualizan en una aplicación cliente.

Este sistema presenta la ventaja de alcanzar una precisión en el orden de decenas de centímetros, lo que lo hace apropiado en contextos donde se requiere un posicionamiento más exacto, como los Establecimientos de Larga Estadía para Adultos Mayores (ELEAM) o entornos industriales con riesgos de seguridad.

4.2.2 Sistema RFID

El sistema alternativo se construyó en base a la tecnología Radio Frequency Identification (RFID). En este caso, los usuarios portan etiquetas RFID pasivas, que no requieren batería propia y se activan al entrar en el rango de acción de un lector RFID UHF con antena direccional.

Cuando una etiqueta se encuentra dentro de la zona de cobertura de una antena, el lector captura su identificador único y lo envía a la Raspberry Pi para su procesamiento. La Pi normaliza la información, añade marcas de tiempo y publica los eventos hacia el servidor en la nube mediante protocolos seguros (HTTPS o MQTT). En este sistema, la localización se obtiene en términos de zonas o puntos de control (ejemplo: pasillo, habitación, sala común), lo que resulta suficiente en escenarios donde no se requiere un posicionamiento exacto en coordenadas.

La infraestructura de RFID se compone de:

- Etiquetas pasivas: portadas por los usuarios, de bajo costo y fáciles de reemplazar.
- Lector RFID con antena: instalado en accesos o pasillos estratégicos para identificar el tránsito.
- Raspberry Pi: actúa como nodo Edge, procesando eventos y transmitiendo la información a la nube.

Si bien la precisión de RFID es menor que la de UWB, su costo reducido y su facilidad de instalación lo convierten en una alternativa viable para ELEAM u hospitales, donde lo relevante es conocer la ubicación por sectores o confirmar el paso por determinadas áreas.

4.2.3 Comparación de UWB y RFID

Para terminar con la comparación, a continuación, se presenta una tabla que comparaba ambas tecnologías según la información teórica.



Tabla 1: Comparación entre sistemas UWB y RFID utilizados en el proyecto

Característica	UWB (DW1000 + ESP32)	RFID (UHF pasivo + lector)
Precisión de localización	10–30 cm aprox. (dependiendo de entorno y número de anclas)	1–3 m aprox., determinada por zona de cobertura
Tipo de medición	Distancias a anclas y trilateración (coordenadas X,Y)	Detección de paso por antena (ubicación por áreas)
Alcance típico	10–50 m en interiores	0,5–3 m por antena
Consumo energético	Medio-alto (<i>tags</i> requieren batería recargable)	Muy bajo (etiquetas pasivas sin batería)
Costo de infraestructura	Alto (módulos UWB + instalación de anclas)	Bajo (lectores y antenas en puntos de paso)
Escalabilidad	Moderada: requiere calibración y despliegue de varias anclas	Alta: basta con instalar más antenas lectoras
Complejidad de instalación	Alta: se deben fijar anclas en posiciones conocidas y calibradas	Baja: instalación sencilla de lectores en accesos

4.3 Software y Arquitectura Lógica

El desarrollo del sistema contempla dos arquitecturas paralelas, diseñadas para abordar el problema de la localización en interiores desde tecnologías distintas: Ultra Wideband (UWB) y Radio Frequency Identification (RFID).

En ambos casos, la lógica del sistema se distribuye en tres niveles:

- Dispositivo de medición: elemento físico que obtiene información desde el entorno (distancias o lecturas de tags).
- Pasarela de procesamiento local (*gateway*): componente que concentra las lecturas, coordina a los dispositivos y asegura la comunicación con los sistemas de mayor nivel.
- Plataforma de procesamiento y visualización: software desplegado en una Raspberry Pi y un *backend* en la nube, que transforma las lecturas en posiciones y estados, los persiste en una base de datos y los expone en interfaces web/móvil.

A nivel general, la secuencia operativa es la siguiente:

- a) El dispositivo de medición genera lecturas periódicas (distancias UWB o identificadores RFID).
- b) Estas lecturas son transmitidas a la pasarela local, la cual asegura la sincronización entre múltiples dispositivos mediante protocolos de activación o rondas de sondeo.
- c) La Raspberry Pi recibe la información preprocesada, aplica algoritmos de filtrado y estimación (trilateración en UWB, detección de paso en RFID) y proyecta los datos sobre un plano indoor para obtener zonas nominales.
- d) Finalmente, la información se publica en el *backend* en la nube, donde se aplica lógica de negocio (alertas, zonas prohibidas, permanencias críticas) y se expone a las aplicaciones de monitoreo.

Se resume esta lógica multinivel, que es común a ambos sistemas:

- Nivel 1 (Edge): Tag UWB / Lector RFID.
- Nivel 2 (Gateway local): ESP32 (servidor WebSocket) en UWB, o cualquier lector RFID en el caso RFID.

- Nivel 3 (Procesamiento intermedio): Raspberry Pi como orquestador y primer punto de análisis, solo en sistema UWB.
- Nivel 4 (Backend y visualización): nube + app móvil/web.

La diferencia fundamental radica en el tipo de dato primario: mientras UWB entrega distancias a anclas que requieren cálculos geométricos de posición, RFID entrega eventos de detección (presencia/ausencia en una antena), que deben interpretarse en base a reglas de paso y cobertura.

En las siguientes secciones se detalla la implementación de cada uno de los sistemas.

4.3.1 Arquitectura UWB

La arquitectura basada en Ultra Wideband (UWB) se visualiza en la Figura 1, se compone de tres capas funcionales: (i) el tag UWB, que realiza las mediciones de distancia con anclas fijas; (ii) el gateway ESP32, que actúa como servidor WebSocket y coordina la comunicación de los tags; y (iii) la Raspberry Pi, que procesa las medidas, calcula posiciones y comunica los resultados al backend en la nube. En la Figura 1 se puede ver las conexiones entre los componentes.

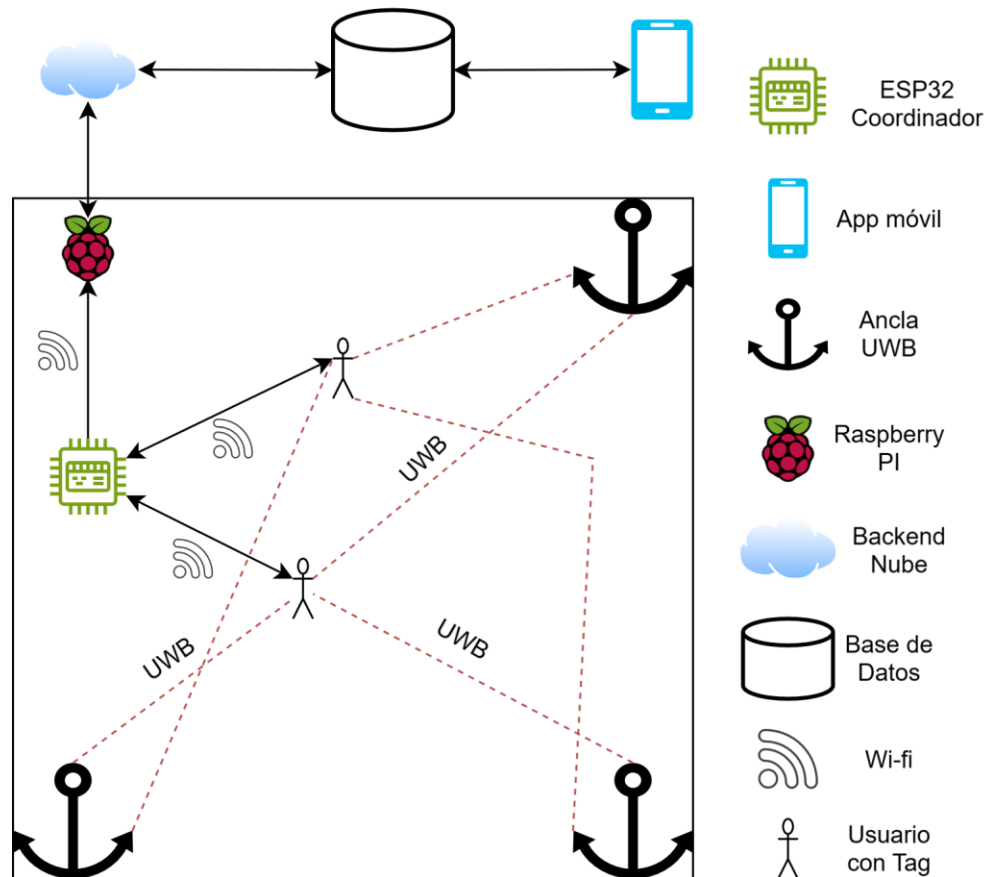


Figura 1. Arquitectura Sistema UWB



Tag UWB (ESP32 + DW1000)

Cada *tag* está compuesto por un ESP32 y un transceptor DW1000, programados en Arduino. Su lógica sigue los siguientes pasos:

- Inicialización de ranging: el DW1000 detecta las anclas visibles y establece sesiones de medición.
- Obtención de parámetros: en cada sesión se calcula la distancia estimada (R) y la potencia de señal recibida (I).
- Filtrado inicial: se descartan lecturas con valores no válidos (≤ 0 m o ≥ 20 m).
- Promediado por ancla: para cada ancla se promedian las lecturas acumuladas (R_media , I_media)

- Serialización en JSON: los resultados se empaquetan en un mensaje con formato:

```
{
  "status": "medida_realizada",
  "idTag": 1000,
  "links": [
    {"A": "1786", "R": 3.84, "I": -75.2},
    {"A": "1787", "R": 5.12, "I": -73.4}
  ]
}
```

- Transmisión a la pasarela: el mensaje se envía al gateway ESP32 mediante WebSocket. El tag permanece en reposo hasta recibir el comando "ACTIVACION", lo que evita colisiones con otros dispositivos.

Gateway ESP32 (servidor WebSocket)

El gateway funciona como servidor WebSocket en el puerto 81 y su tarea principal es coordinar múltiples tags de forma secuencial. Su comportamiento se resume en:

- Registro de clientes: cada tag que se conecta queda almacenado en `allClients` y en la cola `clientsQueue`.
- Activación secuencial: el servidor toma un cliente de la cola y le envía "ACTIVACION". Activa un `timeout` de 5 segundos.
- Recepción de medidas: si el tag responde con `status="medida_realizada"`, el servidor reenvía el mensaje a todos los demás clientes (incluyendo la Raspberry Pi).
- Gestión de fallos: si expira el `timeout`, el servidor libera el turno y continúa con el siguiente cliente.
- Recirculación de cola: cuando la cola queda vacía, se repuebla con todos los clientes conectados, permitiendo rondas sucesivas.

Este esquema garantiza que solo un tag mide a la vez, reduciendo la probabilidad de colisiones y estabilizando la frecuencia de muestreo.

Procesamiento en Raspberry Pi

La Raspberry Pi se conecta como cliente WebSocket del gateway ESP32 y cumple funciones críticas de cálculo y gestión:

- Recepción y validación: decodifica los mensajes JSON, convierte los valores a números y descarta lecturas inválidas.

- Trilateración 2D: a partir de las distancias a múltiples anclas, calcula las coordenadas (x,y) del tag mediante geometría de trilateración.
- Mapeo a zonas indoor: las coordenadas se proyectan a un plano discretizado almacenado en MapaV3.csv. Si el punto cae fuera de los límites, se clasifica como “Afuera”.
- Gestión de reglas: compara la ubicación con las zonas críticas definidas en el backend (ZONAS_PROHIBIDAS). Si un residente permanece más del tiempo máximo permitido, cambia el estado a “Zona crítica”.
- Integración con el backend: envía actualizaciones al servidor central mediante API REST (/tag, /update_status, /notification), asegurando persistencia y trazabilidad.

De esta manera, la Raspberry Pi actúa como pasarela inteligente que transforma mediciones en información contextual relevante.

Backend en la nube y visualización

El backend, desplegado en infraestructura en la nube (ej. AWS o Azure), cumple las siguientes funciones:

- Persistencia: almacenamiento en base de datos de posiciones y estados históricos.
- Gestión de reglas: aplicación de condiciones de permanencia y detección de eventos críticos.
- Notificaciones: emisión de alertas ante caídas o ingreso a zonas prohibidas.
- Visualización: interfaz web y móvil que permite monitorear en tiempo real la ubicación de cada residente en el plano del edificio.

Resumen de flujo de UWB

El flujo de datos en la arquitectura UWB se resume así:

- Medición en el tag: cálculo de distancias e intensidades a anclas.
- Transmisión al gateway: envío del JSON por WebSocket.
- Coordinación en el gateway ESP32: activación secuencial y reenvío de mensajes.
- Procesamiento en Raspberry Pi: trilateración, proyección a zonas y aplicación de reglas.
- Backend y visualización: persistencia en la nube y monitoreo en aplicaciones.

Este diseño modular distribuye la carga computacional, asegura sincronización entre dispositivos y ofrece un flujo de información robusto desde la captura física hasta la visualización final.

4.3.2 Arquitectura RFID

El sistema RFID se plantea como una alternativa de menor complejidad al UWB (Figura 2). A diferencia de la trilateración UWB, RFID se basa en la detección de presencia: cuando un tag pasivo entra en el rango de una antena, se registra el ID único de esa antena. La asociación entre antena y zona se gestiona en el backend en la nube, lo que facilita cambiar la asignación de zonas sin reprogramar los dispositivos. En la Figura 2 se puede ver la conexión entre los componentes.

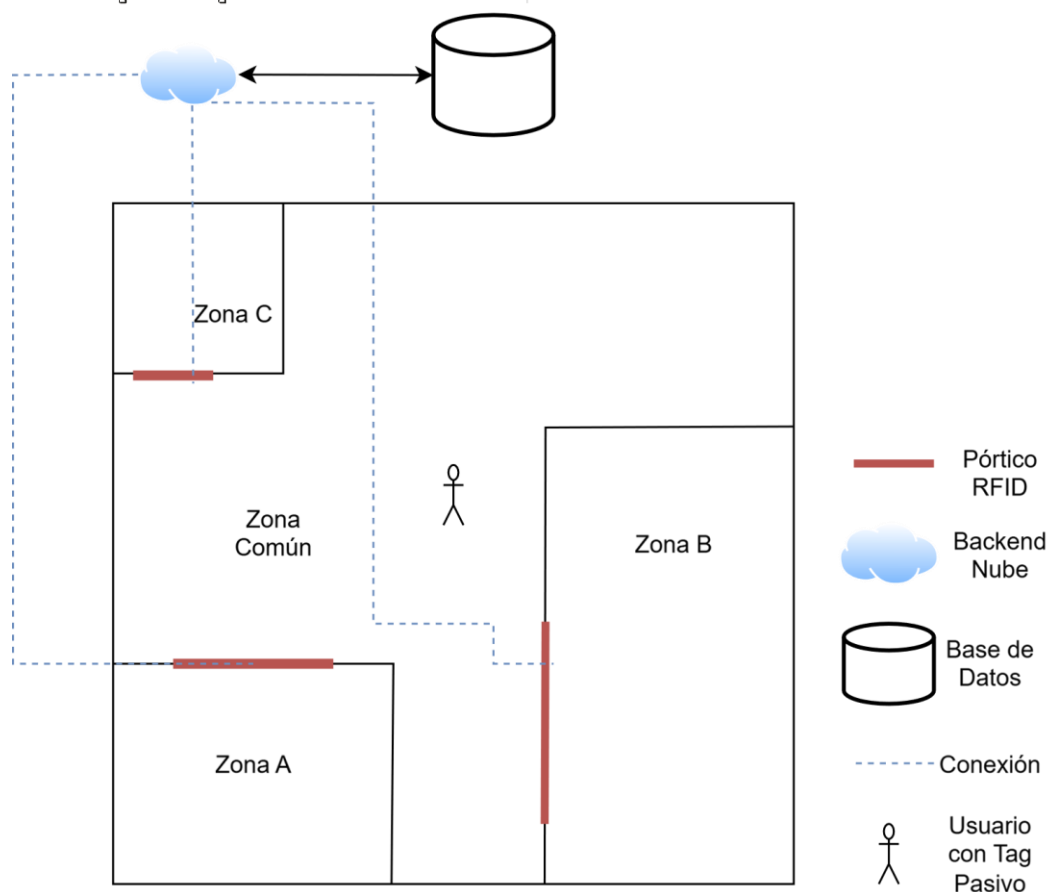


Figura 2. Arquitectura Sistema RFID

Captura de datos en el lector RFID

- Tags pasivos UHF portados por cada usuario.
- Antenas instaladas en accesos y zonas críticas, cada una con un identificador único (antenaId).
- Lector + ESP32: el ESP32 recibe la lectura (EPC, antennaId, RSSI, timestamp) y genera un mensaje JSON:

```
{
  "status": "lectura tag",
  "idTag": "E2003412012345678900",
  "antenaId": "ANT-001",
  "RSSI": -52.3,
  "ts": 1732475123
}
```

Publicación directa a la nube

El ESP32 transmite directamente al backend:

- Transporte seguro: HTTPS (REST) o MQTTs (TLS).
- Autenticación: token o certificado por dispositivo (consideración de producción).
- Gestión de red: reintentos y almacenamiento temporal si falla la conexión.

Procesamiento en el backend

El backend recibe el JSON y:

- Mapea `antenaId` → zona mediante una tabla de configuración en la base de datos.
- Actualiza la zona actual del usuario (p. ej., Comedor, Baño, Entrada).
- Aplica reglas de permanencia en zonas restringidas y genera alertas cuando corresponda.
- Persiste el historial de ubicaciones para trazabilidad.

Visualización

En la interfaz de monitoreo:

- Se muestra la última zona en la que se detectó cada usuario.
- Se resaltan los eventos críticos (tiempo en zonas prohibidas, salida al exterior).
- Se puede modificar la tabla de asignación antena → zona sin alterar los ESP32.

Resumen del flujo RFID

- Detección: antena capta el EPC del tag.
- Empaquetado: el ESP32 genera un JSON con `antenaId`.
- Transmisión: el ESP32 envía el JSON al backend.
- Procesamiento: el backend traduce `antenaId` a zona, aplica reglas y guarda eventos.
- Visualización: se actualiza el estado del usuario en tiempo real.

Estrategias de prueba y validación

Con el objetivo de evaluar la efectividad de los sistemas de localización propuestos (UWB y RFID), se definió una estrategia de pruebas orientada a medir precisión, cobertura, estabilidad y capacidad de detección de eventos críticos. Estas pruebas se diseñaron para ejecutarse en un entorno controlado dentro del inmueble seleccionado, simulando escenarios reales de uso.

5 Validación, pruebas y análisis de resultados

5.1 Metodología general de la validación

La validación de ambos sistemas seguirá los siguientes pasos comunes:

Definición de escenarios de pruebas

- Recorridos predefinidos dentro del inmueble.
- Permanencia en zonas críticas (ej. cocina, baño, salida).
- Simulación de entradas y salidas repetidas.

Registro de datos

- En el caso de UWB: coordenadas calculadas por trilateración y zona estimada.
- En el caso de RFID: antena detectada y zona asociada en backend.



Establecimiento de “realidad de terreno”

- Se utilizarán marcadores de referencia o registros manuales para establecer la ubicación real del usuario en cada momento.

Comparación y métricas

- Se comparará la ubicación estimada contra la ubicación real.
- Se calcularán métricas como error promedio, tiempo de detección.

5.1.1 Pruebas específicas para el sistema UWB

- Precisión espacial: Se evaluará el error en la estimación de coordenadas mediante trilateración, comparando con puntos de referencia conocidos.
- Estabilidad temporal: Se aplicarán filtros de suavizado (ej. mediana móvil) y se evaluará la reducción de variabilidad en lecturas consecutivas.
- Eventos críticos: Verificación de la detección de permanencia en zonas prohibidas y la transmisión correcta de alertas.

5.1.2 Pruebas específicas para el sistema RFID

- Tiempo de detección: Se medirá el tiempo desde que un usuario ingresa al rango de una antena hasta que se refleja el cambio en el *backend*.
- Fiabilidad de lecturas: Se evaluará la tasa de lecturas duplicadas, perdidas o intermitentes.
- Cobertura y sensibilidad: Validación del rango efectivo de cada antena y comportamiento en distintas orientaciones del tag.
- Gestión de transiciones: Comprobación de la correcta actualización de zona al pasar entre antenas cercanas.

5.1.3 Criterios de aceptación

Para considerar el sistema como válido para el contexto experimental, se definirán los siguientes umbrales de desempeño:

- UWB: error medio ≤ 50 cm en áreas de cobertura, latencia de actualización ≤ 15 s.
- RFID: detección $\geq 90\%$ de las entradas/salidas, latencia de actualización ≤ 3 s.
- Ambos sistemas: generación de alertas críticas en ≤ 5 s desde la ocurrencia del evento.

5.2 Pruebas experimentales

Los experimentos y resultados presentados en esta sección fueron diseñados con el objetivo de dar respuesta a los objetivos específicos planteados en esta memoria. En particular, se busca evaluar el desempeño de los sistemas UWB y RFID en términos de precisión, tiempo de actualización y fiabilidad, así como analizar su adecuación a distintos contextos de aplicación en interiores.

5.2.1 Metodología de pruebas aplicadas en sistema UWB

Para la evaluación del sistema UWB se llevaron a cabo dos experimentos en entornos distintos.

En primer lugar, se instalaron cuatro anclas en el laboratorio de proyectos del Departamento de Informática de la UTFSM (campus Casa Central). Se definieron cuatro zonas interiores, de las cuales tres correspondían a espacios abiertos sin separación física y la cuarta estaba delimitada por una pared, mientras que el resto del espacio se consideró como exterior. Las zonas críticas configuradas fueron rotando durante las pruebas. Se dispuso de dos dispositivos tag portados por dos personas, y durante un período continuo de tres horas se registraron las ubicaciones estimadas. Los parámetros analizados fueron el **tiempo medio de actualización de posición** y el **número de lecturas clasificadas como erróneas** (distancias negativas o superiores a 30 m, descartadas en el preprocesamiento del *tag*).

En segundo lugar, se realizó una prueba de precisión en un entorno residencial, utilizando tres anclas y un único tag. El área considerada incluía el estar, comedor y entrada del primer piso de una vivienda. Se marcaron puntos de referencia específicos en un mapa del lugar, de manera de comparar la coordenada real del tag con la posición estimada por el sistema. Esta prueba permitió calcular el error medio de localización y evaluar el impacto de las condiciones del entorno en la exactitud del sistema.

5.2.2 Metodología de pruebas aplicas en sistema RFID

Para la evaluación del sistema basado en RFID se implementaron cuatro pórticos de lectura, cada uno equipado con un lector y antena UHF, ubicados en las puertas de acceso a cuatro habitaciones distintas. La disposición permitió monitorear de manera individual el ingreso y salida de personas desde un pasillo central que conectaba dichas habitaciones, definido como posición inicial o zona neutra del sistema.

Durante las pruebas, un conjunto de dispositivos tag RFID pasivos fueron portados por los participantes, quienes se desplazaban entre el pasillo y las habitaciones de manera controlada. Cada vez que un tag cruzaba el umbral de un pórtico, el sistema registraba el identificador único (EPC) del tag junto con la antena lectora que lo detectaba. Esta información era enviada al *backend* en la nube en formato JSON, donde se realizaba la asociación entre antena e identificación de zona.

El objetivo de estas pruebas fue analizar el tiempo de detección del sistema RFID, definido como el intervalo entre el ingreso del tag a la zona efectiva de lectura de una antena y el instante en que dicho evento queda reflejado en el sistema central, así como la fiabilidad de las detecciones, medida como el porcentaje de eventos correctamente registrados respecto al total de cruces realizados. Adicionalmente, se evaluó la robustez del sistema en situaciones de tránsito repetitivo y en la presencia simultánea de varios tags en el mismo pasillo, observando la ocurrencia de lecturas duplicadas (tasa de sobre detección) o eventuales pérdidas de detección.

5.3 Resultados de las pruebas

5.3.1 Resultados del sistema UWB

Tabla 2. Resultados sistema UWB

Tiempo medio actualización (s)	7.45
Lecturas válidas (%)	2.74
Lecturas erróneas (%)	97.26
Error medio de localización (cm)	21.1



5.3.2 Resultados del sistema RFID

Nº de detecciones esperadas	74
Nº de detecciones registradas	84
Fiabilidad (%)	100
Tasa de sobre detección (%)	13.5
Tiempo medio de detección (s)	0.756

5.4 Comparación entre sistema UWB y RFID

La presente sección tiene como objetivo contrastar los resultados obtenidos a partir de la implementación y evaluación experimental de los sistemas de posicionamiento basados en Ultra-Wideband (UWB) y Radio Frequency Identification (RFID). Dicha comparación se realiza considerando métricas relevantes para un sistema de monitoreo en interiores, tales como precisión espacial, tiempo de detección, fiabilidad de las mediciones y complejidad de implementación, permitiendo analizar las ventajas y limitaciones de cada tecnología en el contexto planteado por esta memoria.

5.4.1 Enfoque de la comparación

El sistema basado en UWB demostró una capacidad superior en términos de precisión espacial, permitiendo la estimación continua de coordenadas bidimensionales dentro del entorno monitoreado. A partir de la trilateración utilizando múltiples anclas, fue posible determinar la posición aproximada del tag en tiempo real, diferenciando zonas contiguas incluso en espacios sin separación física mediante muros.

En contraste, el sistema RFID implementado se basa en un modelo de detección discreta por eventos, donde la ubicación se infiere a partir del cruce de un tag por un pórtico asociado a una zona específica. En este caso, no se obtiene una posición continua, sino una transición entre áreas predefinidas. Si bien este enfoque resulta menos preciso en términos espaciales, es suficiente para aplicaciones donde interesa conocer el ingreso o salida de un usuario desde determinadas habitaciones o sectores.

5.4.2 Tiempo de detección y latencia

En el sistema UWB, el tiempo de actualización de la posición depende del ciclo de activación del tag, del número de mediciones acumuladas y del procesamiento posterior realizado en la Raspberry Pi. Esto implica una latencia mayor respecto a RFID, aunque consistente y controlada, adecuada para aplicaciones de seguimiento continuo.

Por su parte, el sistema RFID presentó tiempos de detección significativamente menores, ya que la lectura del tag ocurre de manera casi inmediata al ingresar al campo de la antena. No obstante, durante las pruebas se observaron lecturas duplicadas asociadas a un mismo cruce, producto del tiempo de permanencia del tag dentro del rango de lectura del pórtico.

En este sentido, el tiempo medio de detección en RFID se interpreta como el intervalo entre eventos de lectura sucesivos asociados a cruces reales, y no como un retardo negativo. Las detecciones anticipadas o duplicadas no corresponden a errores temporales, sino a fenómenos de sobre detección inherentes al comportamiento del sistema RFID sin filtrado temporal adicional.

5.4.3 Fiabilidad de detección y sobre detección en RFID

Desde el punto de vista de la fiabilidad, ambos sistemas lograron detectar los eventos esperados durante las pruebas. En particular, el sistema RFID alcanzó una fiabilidad de detección del 100 %, entendida como la capacidad de registrar al menos una lectura por cada cruce real esperado.

Sin embargo, se registró un número mayor de lecturas totales en comparación con los eventos esperados, lo que evidencia la presencia de detecciones duplicadas. Estas lecturas adicionales no se consideran fallas de detección, sino eventos de sobre-detección, los cuales pueden ser mitigados mediante técnicas de filtrado temporal, ventanas de validación o lógica de manejo de duplicación a nivel de software.

Este comportamiento refuerza la idea de que, en sistemas de monitoreo, resulta preferible detectar eventos redundantes antes que incurrir en pérdidas de detección, especialmente en contextos donde la seguridad del usuario es prioritaria

5.4.4 Variaciones del sistema RFID y mejoras propuestas

Durante el desarrollo del sistema RFID se exploraron configuraciones alternativas, tales como la utilización de doble pórtico por acceso, con el objetivo de mejorar la detección del flujo direccional del movimiento (ingreso o salida). Estas variaciones permiten inferir la dirección del desplazamiento del usuario, reduciendo ambigüedades en escenarios de tránsito frecuente.

No obstante, dichas configuraciones no fueron consideradas como foco principal del presente trabajo, y los resultados asociados se presentan únicamente como referencia. Estas variantes se plantean como mejoras propuestas, ya que el objetivo central del sistema RFID fue evaluar su desempeño básico como tecnología de detección de presencia y transición entre zonas, más que optimizar exhaustivamente su comportamiento direccional.

5.4.5 Consideraciones técnicas y alcance del trabajo

Adicionalmente, se identifican posibles mejoras futuras relacionadas con el comportamiento físico del sistema RFID, tales como la selección de antenas con mayor directividad, el ajuste del patrón de radiación, la polarización y la potencia de transmisión, con el fin de aumentar la precisión espacial y reducir lecturas no deseadas.

Sin embargo, este tipo de optimizaciones corresponde principalmente al ámbito del diseño de radiofrecuencia y telecomunicaciones, por lo que se considera fuera del alcance de esta memoria. El trabajo desarrollado se enfoca en la implementación, integración y evaluación de los sistemas desde una perspectiva informática, priorizando el procesamiento de datos, la arquitectura del sistema y el análisis de resultados.

5.5 Discusión de resultados

En síntesis, el sistema UWB se presenta como una solución adecuada para aplicaciones que requieren alta precisión espacial y seguimiento continuo, a costa de una mayor complejidad de implementación y procesamiento. Por otro lado, el sistema RFID destaca por su simplicidad, bajo costo y rapidez de detección, siendo apropiado para escenarios donde basta con identificar transiciones entre zonas bien definidas.

La comparación realizada evidencia que ambas tecnologías no son excluyentes, sino complementarias, y su elección depende directamente de los requerimientos de precisión, costo y complejidad del sistema de monitoreo a implementar.



6 Conclusiones

El trabajo desarrollado permitió implementar y evaluar dos sistemas de localización en interiores basados en tecnologías UWB y RFID, aplicados a un entorno controlado y orientados al monitoreo de personas en espacios interiores. A partir de los resultados obtenidos, es posible identificar con claridad tanto los alcances como las limitaciones de las soluciones propuestas, así como las contribuciones que este trabajo realiza en el contexto de la informática aplicada a sistemas embebidos y de monitoreo.

En términos de alcance, el sistema UWB demostró ser capaz de entregar información de ubicación con un alto nivel de detalle espacial, permitiendo estimar coordenadas continuas dentro del área monitoreada y distinguir entre zonas sin separación física. Este comportamiento resulta especialmente relevante en aplicaciones donde se requiere precisión, como el seguimiento detallado de desplazamientos o la detección de permanencias prolongadas en zonas críticas. No obstante, su desempeño está condicionado por la correcta disposición de las anclas, la necesidad de filtrado de mediciones erróneas y una mayor complejidad tanto a nivel de hardware como de procesamiento.

Por su parte, el sistema basado en RFID presentó un alcance distinto, orientado a la detección de eventos discretos de cruce entre zonas. Los resultados muestran que esta tecnología es adecuada para aplicaciones donde no se requiere una localización continua, sino la identificación confiable de accesos o salidas. Entre sus limitaciones se encuentra la imposibilidad de determinar una posición exacta dentro de un recinto y la aparición de lecturas duplicadas, fenómeno que, si bien afecta métricas como el conteo bruto de eventos, no compromete la funcionalidad principal del sistema cuando es tratado adecuadamente a nivel de software.

Desde el punto de vista de las contribuciones, este trabajo presenta una implementación funcional y comparativa de ambas tecnologías bajo una misma arquitectura lógica, integrando dispositivos embebidos, procesamiento local y comunicación con un *backend* centralizado. Esta aproximación permite evaluar las tecnologías no solo desde un punto de vista teórico, sino también práctico, considerando aspectos como latencia, fiabilidad, escalabilidad y facilidad de integración. Asimismo, se demuestra que es posible construir soluciones de monitoreo en interiores utilizando hardware de bajo costo y herramientas ampliamente disponibles, lo que facilita su replicabilidad en otros contextos.

Las aplicaciones potenciales de los sistemas desarrollados incluyen el monitoreo de personas en residencias, centros asistenciales, laboratorios o edificios institucionales, donde resulta relevante conocer la ubicación o los desplazamientos de los usuarios sin recurrir a tecnologías invasivas. En este sentido, los resultados obtenidos pueden servir como base para proyectos de mayor escala o para la adopción de soluciones híbridas que combinen tecnologías según los requerimientos específicos del entorno.

En cuanto a trabajos futuros, se identifican diversas líneas de mejora y profundización. Entre ellas, la optimización del sistema RFID mediante configuraciones de doble pórtilo para mejorar la detección del sentido de desplazamiento, así como la exploración de ajustes a nivel de radiofrecuencia —como antenas más directivas o control del patrón de radiación, los cuales quedan fuera del alcance de esta memoria por corresponder al ámbito de telecomunicaciones. En el caso del sistema UWB, futuras investigaciones podrían centrarse en la mejora de los algoritmos de filtrado y en la evaluación del sistema en entornos más complejos o de mayor tamaño. Adicionalmente, se podrían integrar mecanismos avanzados de seguridad y autenticación para un eventual despliegue en contextos productivos.

Finalmente, desde una perspectiva personal y formativa, el desarrollo de esta memoria permitió profundizar en el diseño de sistemas distribuidos, la integración de hardware y software, y el análisis crítico de tecnologías emergentes aplicadas a problemas reales. El proceso de implementación, prueba y evaluación fortaleció competencias tanto técnicas como metodológicas, contribuyendo de manera significativa al aprendizaje y a la comprensión de los desafíos asociados al desarrollo de sistemas de monitoreo en tiempo real.



Agradecimientos

Agradezco en primer lugar al profesor Raúl Monge por su orientación, disponibilidad y apoyo constante durante el desarrollo de este trabajo. Asimismo, agradezco a mis amigos y compañeros de la universidad, en especial a Sebastián, Samuel, Jorge, Cristian, Bastián, Ismael, Claudio y Bruno, por el apoyo, la motivación y el trabajo colaborativo desarrollado a lo largo de los años, particularmente durante la Feria de Software, instancia que sirvió como base para esta memoria. Finalmente, agradezco profundamente a mis padres, Ximena y Francisco, por su apoyo incondicional, educación y confianza, sin los cuales este proceso formativo no habría sido posible.

Referencias

- [1] T. Tsang y E.-G. M.N, «Ultra-wideband (UWB) communications systems: an overview,» de *The 3rd International IEEE-NEWCAS Conference, 2005.*, Quebec, 2005.
- [2] J. Cholí, M. Eguizabal, A. Hernández-Solana y A. Valdovinos, «Comparison of Algorithms for UWB Indoor Location and Tracking Systems,» de *2011 IEEE 73rd Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, Budapest, 2011.
- [3] R. Want, «An introduction to RFID technology,» *IEEE Pervasive Computing (Volume: 5, Issue: 1, Jan.-March 2006)*, pp. 25-33, 2006.
- [4] M. Riveros, S. Alcalde, A. Espinoza W y A. Barreda, «Crisis en los ELEAM: Un llamado a repensar el cuidado del adulto mayor,» *Ciper*, 3 4 2024.
- [5] M. Pelka*, *Position Calculation with Least Squares based on Distance Measurements*, CoSA, 2015.
- [6] T. Ovatman y E. Teoman, «Trilateration in Indoor Positioning with an Uncertain Reference Point,» de *2019 IEEE 16th International Conference on Networking, Sensing and Control (ICNSC)*, Banff, 2019.
- [7] Thotro, «arduino-dw1000,» 2020. [En línea]. Available: <https://github.com/thotro/arduino-dw1000>. [Último acceso: 6 1 2026].