

**TESIS DE PREGRADO**

Presented to:  
**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA**

Para obtener el título de:  
**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**ATLAS: TRACKING SYSTEM WITH INTEGRATED UWB AND BLUETOOTH**

Autor:  
**Santiago Sinisterra Arias**

Asesor Académico:  
**Alba Ávila**

**May 2025**

## Resumen Ejecutivo

### Objetivos y alcance

#### Objetivo general

Desarrollar, caracterizar y optimizar un sistema de rastreo compuesto por un par de dispositivos que integran tecnología BLE y UWB, diseñado para el seguimiento preciso y la monitorización personalizada de objetos.

#### Objetivos específicos

##### 1. Exploración de tecnología

Explorar la tecnología UWB para la implementación y optimización de detección, retroalimentación de identificación, conectividad y localización.

##### 2. Evaluación de funcionalidad

Evaluar la viabilidad de integrar múltiples funcionalidades, como tecnología de energía sostenible, inteligencia artificial, historial de localización, carga inalámbrica y un equilibrio entre consideraciones técnicas y prácticas, para garantizar una solución eficiente y funcional.

##### 3. Desarrollo de prototipo electrónico

Diseñar dispositivos que implementen las tecnologías y funcionalidades seleccionadas, priorizando el bajo consumo de energía y el rastreo preciso en tiempo real a través de UWB, asegurando al mismo tiempo la compatibilidad mediante BLE.

##### 4. Desarrollo de la interfaz de usuario

Desarrollar e implementar una interfaz gráfica de usuario acompañada de algoritmos que gestionen y muestren las funcionalidades del prototipo al usuario. Simultáneamente, el sistema será optimizado para equilibrar el procesamiento y el consumo de batería entre el dispositivo de rastreo y el dispositivo móvil.

##### 5. Pruebas y desarrollo

Realizar pruebas y recopilar datos de rendimiento del sistema en diferentes entornos para evaluar el cumplimiento de las funcionalidades diseñadas y analizar posibles mejoras para trabajos futuros.

### Alcance logrado

Para el desarrollo de la tesis se ha realizado una gran cantidad de investigación. Debido a la exploración de la tecnología a bajo nivel, hasta las características físicas de lo que se busca implementar, la selección de componentes y su integración, fue necesario comprender a profundidad cada una de las tecnologías involucradas.

Lo primero a resaltar es la exploración detallada de las tecnologías a implementar, lo que llevó a un entendimiento profundo de la carga inalámbrica, las tecnologías de baterías disponibles y las metodologías de administración de potencia para dispositivos de bajo consumo. También se estudiaron tecnologías de amplificación de audio, detección de movimiento con acelerómetros, NFC, y en especial todo lo relacionado con UWB, incluyendo su capa física y MAC para comprender su implementación en el posicionamiento de objetos. Además, se investigó Bluetooth, su funcionamiento con bajo consumo y sus paquetes, junto con las necesidades de antenas para todas estas tecnologías.

Luego, se analizó cómo estas tecnologías se aplican actualmente, ya que entenderlas a fondo es clave para seleccionar los componentes adecuados. Se consideró el estado del arte de todas las soluciones comerciales

actuales, viendo sus especificaciones dadas por las compañías correspondientes y fuentes secundarias donde se abrían los productos y disecaban los componentes que utilizaban para su funcionamiento.

Esto implicó identificar las opciones que permiten usarlas como se pretende, priorizando un tamaño mínimo para un dispositivo práctico, bajo consumo energético para eficiencia en la solución, y un costo accesible que facilite tanto el desarrollo de prototipos sin gastos excesivos como la posibilidad de futuros proyectos con una implementación optimizada a nivel comercial.

También se trabajó en la integración de todo lo investigado. Se seleccionaron los componentes y sus respectivos elementos pasivos y activos, y se diseñaron módulos de prueba en circuitos FR-4 de dos capas para validar su aplicación. Adicionalmente, se fabricaron dos placas de cuatro capas, necesarias para el correcto funcionamiento de antenas de alta frecuencia como Bluetooth y UWB. Estas integran el procesador y el chip UWB, aplicando todo lo aprendido sobre sus estándares y reglas de diseño de PCBs. El proceso de diseño fue iterativo, con múltiples versiones optimizadas mediante retroalimentación constante.

Paralelamente, se ha avanzado en la redacción del documento final, estructurándolo con índice y demás elementos bajo la guía de mi asesora de tesis.

En cuanto al trabajo futuro, considerando los tiempos de producción de PCBs y compras a través de la universidad, se adquirieron dos módulos específicos: el del procesador nRF52833 y el del chip UWB DWM3000, que son los mismos usados en los diseños. Con estos, durante la espera de la adquisición de componentes e impresión de los diseños de cuatro capas, se trabajará en el desarrollo del código, enfocándose en la implementación de SPI para la comunicación entre el procesador y el chip UWB, Bluetooth para la conexión con un dispositivo móvil, y una aplicación en Android para recibir la información generada por el sistema.

Con el código desarrollado, se espera recibir los componentes en cuanto se complete una versión funcional para probar los módulos, cuyas placas ya están impresas, y verificar su funcionamiento. Esto permitirá avanzar hacia la última versión de las dos placas, integrando todo lo mencionado anteriormente. La impresión de estas se realizará externamente, y los componentes necesarios ya fueron considerados en la adquisición única de materiales planeada.

El último paso será la aplicación del sistema, la validación de su funcionamiento y las pruebas con personas, todo conforme a los protocolos ya establecidos.

## Introducción

La creciente dependencia de los objetos personales portátiles y la cantidad de estos que lleva cada persona genera a la necesidad de el rastreo eficiente de estos. Desde elementos esenciales como billeteras, llaves y teléfonos hasta herramientas especializadas y activos de valor, la pérdida o extravío de estos representa un inconveniente significativo y una pérdida económica. Aunque los dispositivos de rastreo buscan mitigar este problema, las soluciones actuales presentan limitaciones en precisión, accesibilidad e integración de funcionalidades.

Las tecnologías comerciales de rastreo, en interiores resaltando **Bluetooth Low Energy (BLE)** y **Ultra-Wideband (UWB)**, ofrecen ventajas distintas para la localización. BLE proporciona conectividad fiable y ampliamente compatible, mientras que UWB permite una localización de alta precisión mediante métodos como **Time of Flight (ToF)** y **Angle of Arrival (AoA)**. A pesar de la precisión que ofrece UWB, su integración en dispositivos de consumo sigue siendo limitada debido a restricciones de hardware, exclusividad de marca y costos elevados.

Esta tesis pretende mejorar la accesibilidad y la precisión en la localización al implementar la conectividad de bluetooth y la precisión de UWB. La solución propuesta trabaja en superar las limitaciones actuales mediante el diseño de un dispositivo compacto y de bajo consumo energético. Además, se explora la integración de **carga inalámbrica** para mayor comodidad y autonomía, **generación de sonido** para ayudar en la localización auditiva, y un **acelerómetro** para optimizar el consumo de energía y habilitar funciones basadas en el movimiento. También se considera el desarrollo de una aplicación móvil intuitiva para mejorar la interacción y gestión del dispositivo.

La investigación y el desarrollo de este proyecto implican una exploración detallada de las tecnologías de rastreo, el diseño de prototipos, la evaluación de funcionalidades y pruebas en entornos reales. A través de este trabajo, se busca contribuir al avance de soluciones de rastreo de alta precisión que sean accesibles, rentables y adecuadas para diversas aplicaciones, principalmente la seguridad de objetos personales.

## Marco teórico

### Carga inalámbrica

#### *Principio de Inducción Magnética*

La carga inalámbrica se basa en la inducción magnética, donde una bobina transmisora (**L1**) genera un campo magnético alterno que induce un voltaje en una bobina receptora (**L2**) cercana. La eficiencia de la transferencia de energía depende de dos factores:

- **Factor de calidad (Q):** Determinado por la inductancia, la frecuencia y la resistencia de la bobina, con valores típicos alrededor de 100.
- **Factor de acoplamiento (k):** Depende de la alineación y distancia entre las bobinas, con valores usualmente entre 0.3 y 0.6.

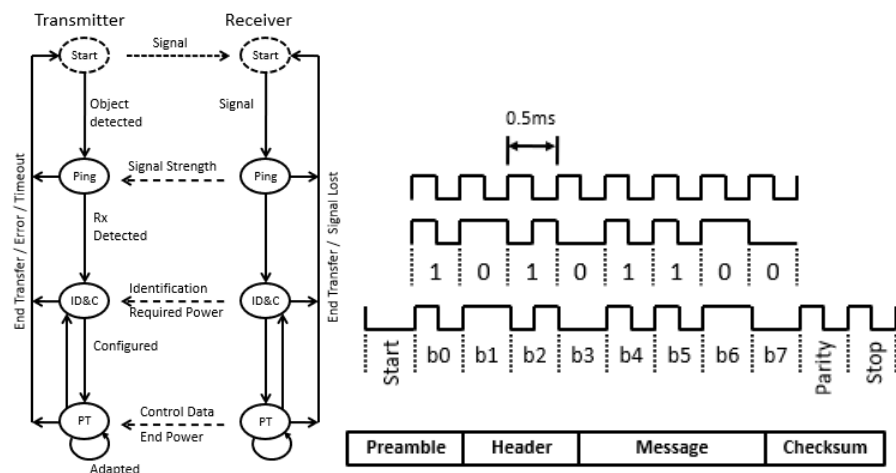
La eficiencia se calcula con la fórmula:

$$\eta = \frac{k^2 Q_1 Q_2}{1 + k^2 Q_1 Q_2}$$

## Carga Inalámbrica Qi

La tecnología **Qi** permite la transferencia de hasta **5W** a pocos milímetros de distancia mediante inducción magnética. El sistema se compone de:

- **Conversión de energía:** El transmisor convierte la electricidad en un campo magnético, y el receptor lo transforma nuevamente en energía eléctrica.
- **Control:** El receptor regula la carga de la batería, mientras que el transmisor ajusta la potencia transferida.
- **Comunicación:** El receptor envía señales de control mediante **modulación de carga** (2 Kbit/s) para optimizar la transferencia.



Diagramas detallando etapas de comunicación y encriptación en carga inalámbrica Qi

## Etapas de Comunicación y Control

1. **Inicio:** El transmisor emite una señal y detecta la presencia de un objeto.
2. **Ping:** El receptor responde, confirmando su presencia.
3. **Identificación y Configuración:** El receptor solicita energía y el transmisor se configura para la transferencia.
4. **Transferencia de Energía:** El receptor envía datos de control continuamente, y el transmisor ajusta la potencia.

## Medidas de Seguridad del Estándar WPC Qi v1.1

Los dispositivos Qi incluyen protecciones contra **objetos extraños, sobrecalentamiento, sobretensión y sobrecorriente** para garantizar un funcionamiento seguro.

[8][9][10]

## Tecnologías de Baterías

### Baterías de Ión-Litio (Li-Ion) vs. Polímero de Litio (Li-Po)

Ambas son populares en aplicaciones recargables, pero su elección depende del uso específico. En este proyecto, el **factor de forma** fue la variable más influyente.

- **Li-Ion:** Usa un electrolito líquido y está encapsulada en una carcasa rígida de aluminio o acero.
- **Li-Po:** Usa un electrolito en gel o polímero sólido, lo que permite un diseño más delgado, ligero y flexible en comparación con Li-Ion.

Por su construcción, **Li-Po es más adecuada para aplicaciones con limitaciones de espacio.**

#### *Capacidad, Tasa de Descarga y Seguridad*

##### Consideraciones de Seguridad

- **Sobrevoltaje y sobrecarga:** No debe superar el voltaje de corte de carga (4.2V por celda) para evitar descomposición del electrolito y sobrecalentamiento.
- **Subvoltaje y sobredescarga:** No debe caer por debajo de 2.5V por celda, ya que puede dañar la batería.
- **Temperatura:** La carga debe realizarse entre **0°C y 45°C**.
- **Daño físico:** Las Li-Po son más frágiles debido a su encapsulado delgado.

##### Capacidad y Energía

- **Capacidad:** Medida en **mAh**.
- **Energía:**  $E = V \times \text{Capacidad}$  (en **Wh**).
- **Ciclo de vida:** Se degradan con el tiempo, por lo que deben cargarse y descargarse según especificaciones del fabricante.

#### *Carga y Descarga*

##### Corriente de Carga

- Se mide en **C-Rate** (relación con la capacidad de la batería).
- Normalmente se carga entre **0.5C y 1C** para optimizar durabilidad.
- Carga rápida ( $>1C$ ) genera más calor y acelera la degradación.
- Se usa un perfil **CC-CV** (Corriente Constante - Voltaje Constante):
  - **Fase CC:** Carga a corriente constante (ej. 1C).
  - **Fase CV:** Al llegar a **4.2V/celda**, la corriente disminuye hasta carga completa.

##### Corriente de Descarga

- Normalmente entre **0.2C y 1C** para mantener eficiencia.
- Descargas  $>1C$  generan más calor y aceleran la pérdida de capacidad.
- Descargas profundas ( $<2.5V/celda$ ) pueden causar cortocircuitos internos y fallos.

##### Autodescarga

- Pierden **2-5% de carga por mes** en condiciones óptimas (**15-25°C** y carga entre 30-80%).

Por lo que se considera que, **Li-Po es ideal para dispositivos compactos**, pero requiere mayor cuidado en su manejo y protección.

## Gestión de Energía y PMIC

### *Gestión de Batería y Eficiencia*

El **PMIC (Power Management IC)** controla las necesidades energéticas del sistema. Normalmente incluye:

- **Cargador de batería** (recibe energía de USB o carga inalámbrica).
- **Reguladores de voltaje**, como Buck DC/DC, para generar múltiples salidas de voltaje.
- **Protocolos de optimización** para mejorar el consumo y la eficiencia.

### *Algoritmos de Carga*

#### Carga CC-CV (Corriente Constante - Voltaje Constante)

1. **Fase CC:** Se aplica una corriente constante **hasta** que la batería alcanza su voltaje de terminación.
2. **Fase CV:** Una vez alcanzado el voltaje de 4.2V por celda (para celdas de 3.7V), la corriente disminuye gradualmente hasta que la carga se completa.
3. **Finalización:** La carga se detiene cuando la corriente cae por debajo de un umbral predefinido (~10% de la corriente máxima).

#### Carga Trickle

Si el voltaje de la batería es muy bajo (<3.0V), se aplica una pre-carga de baja corriente para evitar daños antes de la carga completa.

### *Gestión de Ruta de Energía (Power Path Management)*

- Alterna automáticamente entre batería y energía externa sin interrupción.
- Permite carga y operación del sistema simultáneamente, asegurando un funcionamiento continuo.

### *Consideraciones de Seguridad*

#### Carga Segura

- Se pueden establecer límites de **voltaje de terminación** y **corriente de carga** según la batería utilizada.

[16]

#### Estándar JEITA

- Define perfiles de carga basados en **temperatura** para evitar degradación y mejorar seguridad.
- Se implementa generalmente con un **termistor NTC** para monitorear la temperatura de la batería.

El **PMIC optimiza la carga, consumo y seguridad del sistema**, garantizando una gestión eficiente de la batería.

[17]

## Amplificadores de Audio

### *Tipos de Amplificadores de Audio*

Existen varios tipos de amplificadores de audio según su topología de circuito, eficiencia y procesamiento de señal:

Clase	Descripción	Eficiencia	Distorsión	Aplicaciones Típicas
<b>Clase A</b>	Conducción constante de corriente.	~20-30%	Baja	Audio Hi-Fi, equipos de estudio
<b>Clase B</b>	Dos transistores, cada uno maneja media onda.	~50-70%	Distorsión por cruce	Sistemas de altavoces antiguos
<b>Clase AB</b>	Híbrido entre A y B, reduce distorsión.	~50-70%	Menor distorsión por cruce	Audio Hi-Fi, amplificadores de autos
<b>Clase D</b>	Usa PWM para alta eficiencia.	~80-95%	Dependiente	Dispositivos a batería
<b>Clase G &amp; H</b>	Usa rieles de potencia dinámicos para eficiencia.	~70-85%	Baja	Sistemas de audio de alta potencia

Tabla de clases de amplificadores de audio

[19]

### *Elección del Amplificador*

Dado que el objetivo principal es **producir un sonido fuerte con bajo consumo de energía**, la mejor opción es un **amplificador Clase D**, debido a su **alta eficiencia (85-95%)** y mínima disipación de calor.

A diferencia de los amplificadores de Clase A, B o AB, que desperdician gran parte de la energía en forma de calor, **los amplificadores Clase D utilizan modulación por ancho de pulso (PWM) y transistores de conmutación**, asegurando que la mayor parte de la energía de entrada se convierta en salida de audio.

### *Elección del Transductor*

Para los amplificadores Clase D, el mejor transductor es un **buzzer piezoeléctrico** debido a:

- **Bajo consumo energético** con alta salida de sonido.
- **Funcionamiento basado en un disco cerámico piezoeléctrico**, que se deforma con el voltaje aplicado para generar sonido.
- **Tamaño pequeño y peso ligero**, ideal para dispositivos alimentados por batería.

La combinación de un **amplificador Clase D con un buzzer piezoeléctrico** es la opción más eficiente para lograr un sonido potente con el menor consumo de energía.

[17][18]



## Detección de Movimiento con Acelerómetros

### *Principios de los Acelerómetros MEMS*

Los acelerómetros MEMS detectan el movimiento mediante diferentes principios físicos:

- **Acelerómetros capacitivos:** Miden cambios en la capacitancia debido al desplazamiento de una masa de prueba.
- **Acelerómetros piezoresistivos:** Utilizan elementos resistivos que se deforman bajo aceleración, alterando su resistencia.
- **Acelerómetros piezoeléctricos:** Generan un voltaje cuando se aplica una tensión mecánica a un material piezoeléctrico.
- **Acelerómetros térmicos:** Detectan cambios en la distribución del calor dentro de una cámara cuando ocurre una aceleración.

### *Aplicaciones de Detección de Movimiento de Bajo Consumo*

Para aplicaciones de bajo consumo, los acelerómetros pueden utilizarse para **ahorrar energía**, minimizando funciones cuando el rastreador permanece inmóvil durante períodos prolongados. Esto contribuye a una mayor autonomía de la batería.

### *Procesamiento de Señal*

Una vez recopilados los datos de aceleración, se aplican varias técnicas de procesamiento:

- **Filtrado:** Se pueden emplear filtros pasa-bajos, pasa-altos o de banda para eliminar ruido.
- **Muestreo:** Se digitaliza la señal para su análisis.
- **Extracción de características:** Se detectan patrones de movimiento o se reconocen gestos en función de los datos procesados.

[20]

## Near Field Communication (NFC)

### *Principios de Funcionamiento*

NFC es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance que opera a **13.56 MHz**, permitiendo el intercambio de datos entre dispositivos situados a pocos centímetros de distancia. Se basa en **inducción electromagnética**, similar a la carga inalámbrica, pero se extiende desde la tecnología RFID para **procesos de identificación de corta duración**.

El **dispositivo iniciador (activo)** genera un **campo magnético alterno** mediante su bobina de inductancia. El **dispositivo objetivo (pasivo)** capta esta energía y la utiliza para alimentarse.

El iniciador modula el campo magnético usando **ASK (Amplitude Shift Keying)** para codificar datos y transmitirlos a velocidades de **106 kbps a 848 kbps**. El receptor **demodula y decodifica** la señal para recuperar la información.

### *Modos de Operación de NFC*

- **Modo Lector/Escritor:** Lee o escribe datos en una etiqueta NFC.
- **Modo Peer-to-Peer:** Dos dispositivos NFC intercambian datos directamente.

- **Modo de Emulación de Tarjeta:** Un dispositivo NFC actúa como una tarjeta sin contacto.

#### Estándares y Tipos de NFC

Existen **4 tipos de comunicación NFC**, cada uno con distintas características:

NFC Tipo	Estándar	Modulación	Velocidad de Transferencia	Requerimiento de Energía	Seguridad	Casos de Uso
<b>NFC-A</b>	ISO/IEC 14443 Tipo A	ASK 100%	106 – 848 kbps	Pasivo (inducción)	UID básico + cifrado opcional	Tarjetas de transporte (MIFARE), autenticación básica
<b>NFC-B</b>	ISO/IEC 14443 Tipo B	ASK 10%	106 – 848 kbps	Pasivo (inducción)	Seguridad avanzada (ID gubernamentales, pasaportes)	Pasaportes, identificación segura
<b>NFC-F</b>	JIS X 6319-4 (FeliCa)	ASK 100%	212 – 424 kbps	Pasivo (inducción)	Autenticación y cifrado rápidos	Tarjetas de tránsito en Japón (Suica, PASMO), pagos sin contacto
<b>NFC-V</b>	ISO/IEC 15693 (Vicinity)	ASK 10%	Hasta 26 kbps	Pasivo (rango extendido hasta 1m)	Seguridad limitada	Gestión de inventario, rastreo logístico

Tabla de tipos de comunicaciones NFC

#### Tipos de Etiquetas NFC

Las etiquetas NFC se clasifican en **5 tipos principales** según su estándar, capacidad de memoria y nivel de seguridad:

Tipo	Estándar	Memoria	Velocidad de Lectura	Lectura/Escritura	Seguridad	Fuente de Energía	Casos de Uso
<b>Tipo 1</b>	ISO 14443-A	96B – 2KB	106 kbps	Sí	Sin cifrado	Pasivo (inducción)	Almacenamiento de URLs, tareas simples
<b>Tipo 2</b>	ISO 14443-A	48B – 2KB	106 kbps	Sí	Cifrado opcional	Pasivo	Tarjetas de transporte, almacenamiento de pequeños datos
<b>Tipo 3</b>	JIS X 6319-4	1KB+	212 – 424 kbps	Sí	Cifrado fuerte	Pasivo	Pagos y tránsito basados en FeliCa

Tip o	Estándar	Memoria	Velocidad de Lectura	Lectura/Escrit ura	Seguridad	Fuente de Energía	Casos de Uso
Tip o 4	ISO 14443- A/B	Hasta 32KB	106 – 848 kbps	No (preconfigurad o)	Autenticación segura (MIFARE DESFire)	Pasivo	Sistemas de pago y banca segura
Tip o 5	ISO 15693	Hasta 64KB	26 kbps	Sí	Seguridad limitada	Pasivo (rango extendido ~1m)	Inventario y logística

Tabla de tipos de etiquetas NFC

### Selección Óptima para el Tracker

Para una **conexión con smartphones con bajo consumo, compatibilidad estandarizada y autenticación eficiente**, la mejor opción es **NFC-A con una etiqueta Tipo 2**.

[21]

### Fundamentos de UWB

UWB es una tecnología que destaca por su amplio rango de frecuencias y pulsos extremadamente cortos debido a las altas frecuencias en las que opera.

El Ultra-Wideband (UWB) es una tecnología de comunicación inalámbrica que utiliza un espectro de frecuencias muy amplio para transmitir datos a corta distancia con alta precisión. Esta funcionalidad lo hace altamente eficiente para estimación precisa de distancia (ranging) y ángulo entre dispositivos, siendo ideal para posicionamiento en interiores, seguimiento de activos y control de acceso seguro.

Características clave:

- **Rango de frecuencia:** 3.1 GHz a 10.6 GHz
- **Baja potencia:**  $> -41.3$  dB/MHz
- **Ancho de banda alto:**  $\geq 500$  MHz o ancho de banda fraccional  $> 20\%$ .
- **Pulsos cortos:** Las señales UWB están compuestas por pulsos de corta duración (nanosegundos).

Alto ancho de banda

Las amplias bandas de frecuencia de UWB ( $\geq 500$  MHz) permiten pulsos extremadamente cortos, lo que reduce el retardo y mejora la resolución de rango al minimizar la interferencia por multitrayecto, causada por reflexiones en paredes y objetos.

Al distribuir su potencia en un amplio espectro, la interferencia de tecnologías de banda estrecha como Wi-Fi o Bluetooth afecta solo una pequeña parte de la señal. Su baja densidad espectral de potencia ( $-41.3$  dBm/MHz) la hace difícil de detectar, ya que se asemeja al ruido para la mayoría de los receptores. Además, bloquearla sería ineficiente, pues requeriría interferir un rango de frecuencias muy amplio.

Para garantizar la detección, UWB emplea pulsos cortos en intervalos específicos con patrones predefinidos, combinados con esquemas de codificación como **PPM (Modulación por Posición de Pulso)** o **PAM (Modulación por Amplitud de Pulso)**.

## Canales UWB

Al operar en un amplio rango de frecuencias, se divide en canales según el estándar, asignando al menos 500 MHz para cumplir con las regulaciones. Hay **13 canales** con frecuencias centrales que van desde 3.993 GHz hasta 9.987 GHz, divididos en:

- **Canales de baja frecuencia (3.1–5 GHz):** Mayor penetración en obstáculos y mayor alcance, pero con alta interferencia de Wi-Fi (2.4 GHz, 5 GHz). Usados en entornos industriales y almacenes con obstáculos.
- **Canales de media frecuencia (6–7 GHz):** Mejor equilibrio entre alcance, precisión e interferencia. Usados en sistemas de posicionamiento UWB comerciales para localización en interiores.
- **Canales de alta frecuencia (8–10 GHz):** Máxima precisión pero menor alcance debido a la atenuación de la señal. Muy resistentes a interferencias, pero con disponibilidad regulatoria limitada. Usados en robótica de alta precisión o realidad aumentada (AR).

Los canales más utilizados son el **Canal 5 (6.488 GHz)** y el **Canal 9 (7.987 GHz)**.

[22]

## Especificaciones de antenas UWB

Una antena UWB debe cubrir al menos 500 MHz para calificar como UWB, tener baja dispersión para no distorsionar los pulsos y mantener su forma para un posicionamiento preciso. Requiere radiación omnidireccional para posicionamiento en interiores y alta eficiencia de radiación para minimizar pérdidas de energía.

Tipo de antena	Descripción	Ventajas	Aplicaciones comunes
<b>Monopolo</b>	Elemento radiante único, diseño compacto.	Simple, ancho de banda amplio, tamaño pequeño.	Dispositivos UWB portátiles, wearables.
<b>Dipolo</b>	Dos elementos conductores, radiación omnidireccional.	Ancho de banda ajustable, rendimiento confiable.	Comunicación UWB, seguimiento.
<b>Planar</b>	Antenas basadas en parches de microcinta.	Fácil integración, sintonizable para UWB.	IoT, sistemas UWB compactos.
<b>Slot</b>	Ranuras cortadas en superficies conductoras.	Amplio rango de frecuencias, compacta.	Filtrado de interferencias en UWB.
<b>Vivaldi</b>	Diseño de ranura cónica, alta ganancia.	Gran ancho de banda, direccional, alta sensibilidad.	Radar, UWB de alta precisión.
<b>Flexible</b>	Materiales flexibles.	Se adapta a superficies, ligera.	Wearables UWB, textiles inteligentes.

Tabla de tipos de antenas comunes

Las **antenas de chip** suelen ser monopolo o planares por su viabilidad en diseños compactos.

[22]

Característica	Significado	Valor óptimo
<b>Frecuencia de operación (GHz)</b>	Rango donde la antena opera eficientemente.	3.1–10.6 GHz (con frecuencia central optimizada).
<b>Pérdida de retorno (dB)</b>	Reflexión de señal por desajuste de impedancia.	< -10 dB (ideal).
<b>Eficiencia (%)</b>	Potencia radiada vs. potencia de entrada.	> 70% para UWB.
<b>Ganancia máxima (dBi)</b>	Concentración de potencia en una dirección.	3–7 dBi (balance entre alcance y cobertura omnidireccional).
<b>Relación axial máxima (dB)</b>	Polarización circular (baja = mejor).	≤ 3 dB (polarización circular), ≥ 6 dB (lineal).
<b>Propiedades de radiación</b>	Patrón de radiación (direccional u omnidireccional).	Omnidireccional para aplicaciones generales.
<b>Polarización</b>	Orientación de las ondas electromagnéticas.	Lineal (común) o circular (aplicaciones complejas).
<b>Impedancia (Ω)</b>	Resistencia presentada a las señales.	50 Ω (estándar en RF).
<b>Potencia máxima de entrada (W)</b>	Máxima potencia soportada antes de dañarse.	Suficiente para UWB (bajo consumo).
<b>ROE (Relación de onda estacionaria)</b>	Coincidencia de impedancia.	≤ 2:1 (ideal ≈1).
<b>Factor de fidelidad</b>	Preservación de la forma del pulso UWB.	Cercano a 1 (mínima distorsión).

Tabla de factores considerados para el diseño de antenas

Implicaciones de un arreglo de dos antenas para PDoA

Usar dos antenas mejora la confiabilidad y permite un **PDoA (Phase Difference of Arrival)** adecuado. La separación entre antenas depende de la longitud de onda ( $\lambda$ ), calculada como:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

Donde:

- $c$  = velocidad de la luz ( $3 \times 10^8$  m/s).
- $f$  = frecuencia (Hz).

La **separación máxima** entre antenas es la mitad de la longitud de onda ( $\lambda/2$ ) para estimación precisa de ángulo en PDoA:

Canal	Frecuencia (GHz)	Longitud de onda ( $\lambda$ ) (cm)	Separación máxima ( $\lambda/2$ ) (cm)
5	6.4896	4.6195	$\leq 2.3098$
9	7.9872	3.7534	$\leq 1.8767$

Tabla de separación máxima entre antenas para PDoA dependiendo de la frecuencia

## Capa Física (PHY)

Técnicas de modulación:

- **Modulación por Posición de Pulso (PPM):** Codifica datos variando la posición de los pulsos en el tiempo.
- **Modulación por Amplitud de Pulso (PAM):** Codifica datos variando la amplitud de los pulsos.
- **Modulación por Desplazamiento de Fase Binaria (BPSK):** Codifica datos variando la fase de los pulsos ( $0^\circ$  o  $180^\circ$ ).
- **Modulación por Encendido-Apagado (OOK):** Codifica datos con presencia/ausencia de señal.
- **Modulación por Frecuencia Binaria Pulsada (PBFSK):** Codifica datos alternando entre dos frecuencias con pulsos cortos.

Modelo de canal UWB:

- **Multitrayecto:** Los pulsos cortos permiten resolver componentes individuales de señales reflejadas.
- **Pérdida de trayectoria:** Modelada como:

$$PL(d) = PL0 + 10n \log_{10} \left( \frac{d}{d0} \right) + X_\sigma$$

Donde:

- $PL(d)$ : Pérdida a distancia  $d$ .
- $PL0$ : Pérdida a distancia de referencia  $d0$ .
- $n$ : Exponente de pérdida (varía según el entorno).
- $X_\sigma$ : Efecto de sombra (variable aleatoria gaussiana).

Servicios PHY:

- Capacidades de ranging.
- Estructura de trama (PPDU).
- Corrección de errores (FEC).
- Timestamping.
- Selección dinámica de canal.
- Eficiencia energética.

Estructuras estándar en la capa física:

*PHY UWB HRP (Alta Tasa de Pulso):*

- Optimizado para alta velocidad de datos.
- Incluye campos como **Short Header**, **Payload** y **Physical Header**.
- Técnicas avanzadas de modulación.
- Múltiples tasas de datos y control de potencia.

*PHY UWB LRP (Baja Tasa de Pulso):*

- Enfocado en eficiencia energética.
- Estructura de trama con **SHR**, **preámbulo** y **PHR**.

- Robustez contra interferencias.
- Ideal para dispositivos con batería.

## Capa de Control de Acceso al Medio (MAC)

Mecanismos de acceso al canal:

- **Dispositivos de Rango Mejorado (ERDEV):** Usan puntos de emisión fijos ("ranging beacons") para sincronización y configuración.
- **Elemento de Información de Descriptor de Rango (RD IE):** Define los intervalos en los que operan los beacons.

Transmisión, recepción y ACK:

- **Transmisión:** Datos encapsulados en tramas MAC (RFRAME para ranging).
- **Recepción:** Detección de señales y generación de ACK.
- **Confirmación (ACK):** Indica recepción exitosa.

Métodos de ranging:

### 1. Tiempo de Vuelo (ToF):

$$ToF = T_{prop} = \frac{d}{c}$$

- $T_{prop}$  = Tiempo de propagación de señal UWB (segundos)
- $d$  = Distancia entre emisor y receptor (metros)
- $c$  = Velocidad de la luz ( $\approx 3 \times 10^8$  m/s)
- Calcula distancia basada en el tiempo de ida y vuelta de la señal.

### 2. Diferencia de Fase de Llegada (PDoA):

$$\Delta\phi = \frac{2\pi d_1}{\lambda}$$

- $\Delta\phi$  = Diferencia de fase (radianes)
- $d_1$  = Distancia extra que viaja la señal entre las antenas (metros)
- $\lambda$  = Longitud de onda de la señal UWB utilizada (metros)

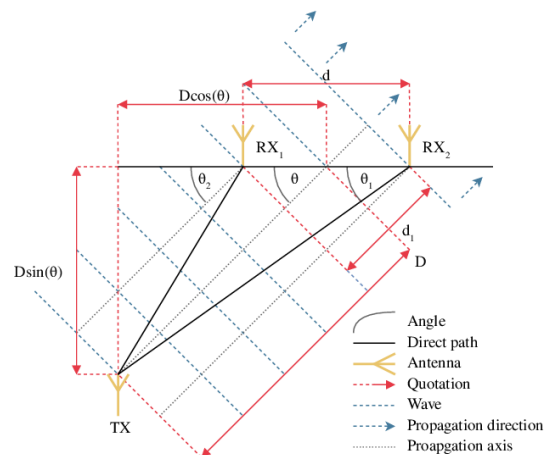


Diagrama de configuración de antenas para PDoA

- Determina ángulo de llegada (AoA) usando múltiples antenas.
- ### 3. Ranging Bidireccional (SS-TWR y DS-TWR):
- **SS-TWR:** Una vuelta (menos preciso).
  - **DS-TWR:** Dos vueltas (mayor precisión, compensa diferencia de relojes).

Estructura de trama MAC:

- **Control de trama (2 bytes).**
- **Número de secuencia (1 byte).**
- **Direcciones (variable).**
- **Payload (datos).**
- **FCS (verificación de errores).**

Servicios MAC:

- **Gestión (MLME):**
  - MLME-RX-ENABLE/DISABLE: Habilita/deshabilita recepción.
  - MLME-DATA-REQUEST: Solicita transmisión.
  - MLME-RANGING-CALIBRATION: Calibración para ranging.
- **Datos (MCPS):**
  - MCPS-DATA.request/confirm/indication: Manejo de tramas de datos

[23][24][25][26]

#### 5.1.8. Bluetooth Low Energy (BLE)

Bluetooth es una tecnología de comunicación inalámbrica de corto alcance, diseñada para el intercambio de datos de manera segura, confiable y con bajo consumo de energía entre dos dispositivos. Opera en la banda ISM de 2.4GHz utilizando radiofrecuencia (RF) y sigue el estándar IEEE 802.15.1.

##### 5.1.8.1. Fundamentos de Bluetooth

Bluetooth se basa en los siguientes principios clave:

1. **Espectro de Frecuencia de Salto (FHSS)**
  - a. Bluetooth divide la banda de 2.4GHz en la que opera en 79 canales, que van desde 2.402GHz hasta 2.480GHz (cada uno con 1MHz de ancho).
  - b. Salta entre las frecuencias de operación 1600 veces por segundo de manera pseudoaleatoria, lo que mejora la seguridad y minimiza las interferencias al cambiar a canales con menor ruido.
2. **Arquitectura Maestro-Esclavo**
  - a. Los dispositivos Bluetooth forman una piconet, donde el dispositivo que inicia la comunicación es el maestro y el que responde es el esclavo.
  - b. Una sola piconet puede soportar hasta 7 esclavos activos.
3. **Comunicación Basada en Paquetes (Detalles del paquete para BLE)**
  - a. *Preamble*: Sincronización.
  - b. *Access Address*: Identifica la red.
  - c. *Protocol Data Unit (PDU)*: Contiene los datos principales del paquete.
  - d. *Cyclic Redundancy Check (CRC)*: Código de detección de errores para verificar la integridad de los datos.

##### 5.1.8.2. Pila de Protocolos de Bluetooth

Capa	Función
Capa de Radio	Maneja la transmisión física (modulación, salto de frecuencia).



Capa	Función
Capa Baseband	Define la estructura de paquetes, direccionamiento y sincronización.
Link Manager (LMP)	Administra el emparejamiento, autenticación y cifrado entre dispositivos.
Logical Link Control (L2CAP)	Maneja la fragmentación, reensamblaje y multiplexación de datos.
Capa de Aplicación (Perfiles)	Define casos de uso específicos (transferencia de archivos, audio, etc.).

#### 5.1.8.3. Proceso de Comunicación

1. **Descubrimiento de dispositivos**
  - a. El dispositivo maestro envía una consulta para detectar dispositivos Bluetooth cercanos.
  - b. El dispositivo esclavo responde con su dirección Bluetooth (BD\_ADDR) y su nombre.
2. **Emparejamiento y Autenticación**
  - a. Los dispositivos intercambian claves de cifrado para establecer una conexión segura.
  - b. Se aplican métodos de autenticación como códigos PIN, cifrado basado en ECDH (Secure Simple Pairing - SSP) y algoritmos de encriptación.
3. **Establecimiento de conexión**
  - a. Una vez enlazados y emparejados, los dispositivos negocian un canal de comunicación mediante L2CAP.
  - b. Definen los protocolos de transferencia de datos.
4. **Transmisión de datos**
  - a. Los datos se envían en paquetes utilizando multiplexación por división de tiempo (TDM).
  - b. Dependiendo de la configuración, los dispositivos pueden operar en modo asíncrono o síncrono.
5. **Terminación de conexión**
  - a. Cuando la comunicación finaliza, los dispositivos envían una solicitud de desconexión para liberar la conexión establecida.

#### 5.1.8.4. Versiones Destacadas de Bluetooth

Vale la pena resaltar la versión **Bluetooth 4.0**, ya que fue en esta versión donde se introdujo **Bluetooth Low Energy (BLE)**, permitiendo que Bluetooth pudiera utilizarse eficientemente en dispositivos de bajo consumo, como los *Bluetooth tags*.

De manera similar, la versión **Bluetooth 5.0** es la que estableció la base de la versión actualmente utilizada, con **mayor eficiencia energética, mayor velocidad de transferencia de datos en BLE** y un **rango máximo mucho más amplio**, alcanzando hasta **100 metros de distancia** en condiciones ideales.

[27][28][29]

## Objetivos y alcance

### Objetivo general

Desarrollar, caracterizar y optimizar un sistema de rastreo compuesto por un par de dispositivos que integran tecnología BLE y UWB, diseñado para el seguimiento preciso y la monitorización personalizada de objetos.

### Objetivos específicos

#### 1. Exploración de tecnología

Explorar la tecnología UWB para la implementación y optimización de detección, retroalimentación de identificación, conectividad y localización.

#### 2. Evaluación de funcionalidad

Evaluar la viabilidad de integrar múltiples funcionalidades, como tecnología de energía sostenible, inteligencia artificial, historial de localización, carga inalámbrica y un equilibrio entre consideraciones técnicas y prácticas, para garantizar una solución eficiente y funcional.

#### 3. Desarrollo de prototipo electrónico

Diseñar dispositivos que implementen las tecnologías y funcionalidades seleccionadas, priorizando el bajo consumo de energía y el rastreo preciso en tiempo real a través de UWB, asegurando al mismo tiempo la compatibilidad mediante BLE.

#### 4. Desarrollo de la interfaz de usuario

Desarrollar e implementar una interfaz gráfica de usuario acompañada de algoritmos que gestionen y muestren las funcionalidades del prototipo al usuario. Simultáneamente, el sistema será optimizado para equilibrar el procesamiento y el consumo de batería entre el dispositivo de rastreo y el dispositivo móvil.

#### 5. Pruebas y desarrollo

Realizar pruebas y recopilar datos de rendimiento del sistema en diferentes entornos para evaluar el cumplimiento de las funcionalidades diseñadas y analizar posibles mejoras para trabajos futuros.

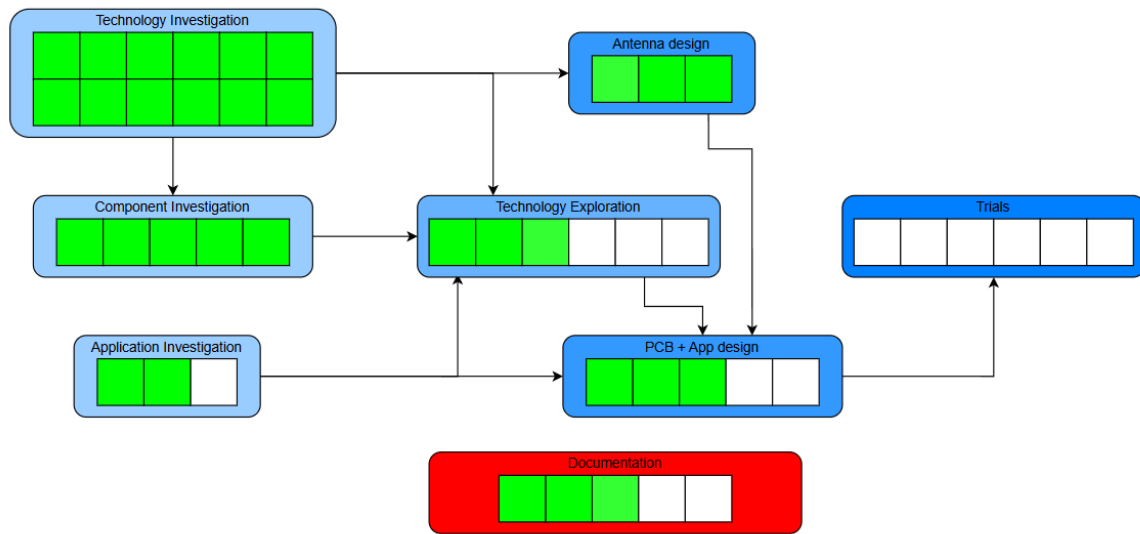
## Metodología

Considerando los objetivos del proyecto y el trabajo realizado, se presentará la metodología utilizada para crear un conjunto de dispositivos con las características mencionadas previamente.

La metodología seguida comienza con una investigación enfocada en las tecnologías consideradas, los componentes disponibles y la aplicación que permitiría una interfaz adecuada. Luego, se lleva a cabo la exploración tecnológica, correspondiente al área de prototipado, en paralelo con la etapa de diseño para desarrollar un producto final listo para pruebas. A la par de todo este proceso, se espera completar la documentación en el presente documento.

El diagrama de bloques presentado en la Figura 9 muestra la arquitectura completa del sistema de rastreo. El sistema está compuesto por tres elementos básicos: el dispositivo del usuario, el emisor UWB y la etiqueta UWB.

## Methodology



La metodología comienza con una fase de investigación estructurada, abarcando tres aspectos clave: tecnología, componentes y aplicación.

1. **Investigación de Tecnología:** Se lleva a cabo un análisis de las tecnologías consideradas, profundizando en sus fundamentos y método de aplicación.
2. **Investigación de Componentes:** Una vez seleccionadas las tecnologías base, se analizan y eligen los componentes de hardware específicos, garantizando un rendimiento óptimo.
3. **Investigación de Aplicación:** Se determinan los requisitos del software y la interfaz de usuario, asegurando una aplicación intuitiva y funcional que se integre de manera eficiente con el hardware.

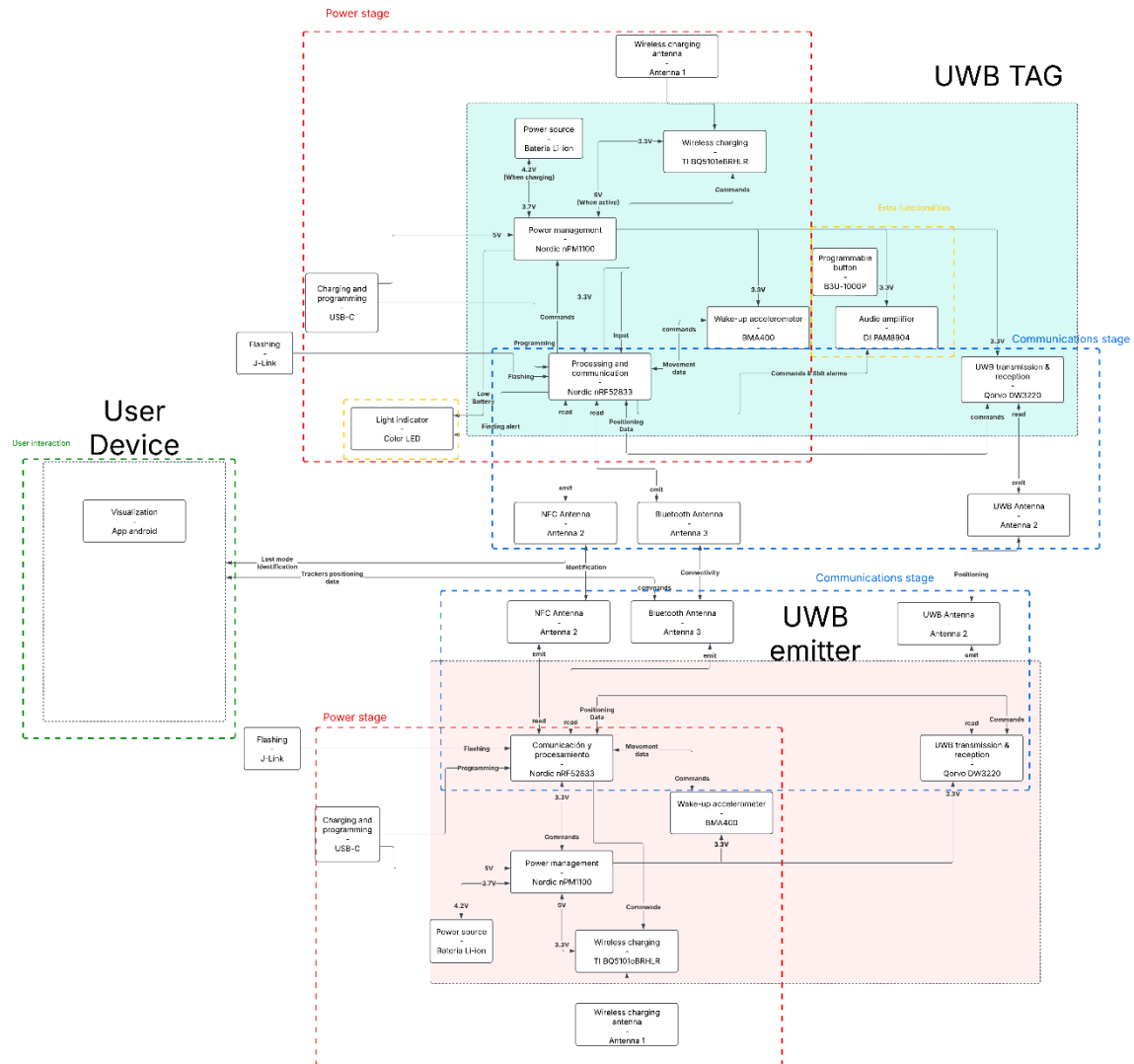
Tras la fase de investigación, se pasa a la **Exploración Tecnológica**, donde se realizan los primeros prototipos para validar la viabilidad de los componentes y tecnologías seleccionadas.

En paralelo, se desarrolla el **Diseño de Antena**, optimizando la transmisión y recepción de la señal UWB, bluetooth y NFC para garantizar una localización precisa, comunicación fiable y funcionalidades agregadas de forma correspondiente.

Una vez validados los elementos clave del diseño, se avanza a la fase de **Diseño de PCB y Aplicación**, donde se finaliza el diseño del circuito impreso y el desarrollo del software para obtener un prototipo completamente funcional.

La última etapa es la de **Pruebas**, donde el sistema se evalúa en escenarios reales para verificar su precisión, rendimiento y usabilidad. A partir de los resultados obtenidos, se realizan los ajustes o mejoras necesarias.

A lo largo de todo el proceso, se mantiene una **Documentación** continua para registrar de manera sistemática todos los hallazgos, diseños y desarrollos, facilitando futuras mejoras e iteraciones.



El diagrama de bloques presentado muestra la arquitectura completa del sistema de rastreo. El sistema está compuesto por tres elementos básicos: el dispositivo del usuario, el emisor UWB y la etiqueta UWB.

### Interacción con el usuario

Esta fase corresponde al dispositivo utilizado para mostrar toda la información de posicionamiento solicitada por el usuario, las funciones consideradas y la emisión de comandos hacia el emisor y las etiquetas, como la activación de sonido en una etiqueta específica, el modo de batería, entre otros.

### Etapas compartidas entre el tag UWB y el emisor UWB

Dado que algunos módulos se repiten en ambos dispositivos, se detallarán en conjunto y se resaltarán las diferencias cuando corresponda.

### *Etapas de alimentación*

Esta fase es la encargada de suministrar energía al dispositivo. Se centra en el circuito de gestión de energía (PMIC), que mantiene una comunicación constante con el procesador para proporcionar información sobre el estado de la batería y la carga. La alimentación se realiza a través de USB-C y carga inalámbrica, los cuales suministran energía al PMIC para cargar la batería de ion de litio.

**Consideraciones adicionales para la etiqueta UWB:** La etiqueta incluye una luz indicadora del estado de carga y batería baja.

### *Etapas de comunicación*

Esta fase gestiona la comunicación del dispositivo con otros, incluyendo las funcionalidades de NFC, UWB y Bluetooth, dependiendo del objetivo de la conexión.

**Consideraciones adicionales para el emisor UWB:** El emisor UWB también utiliza Bluetooth para comunicarse con el dispositivo del usuario.

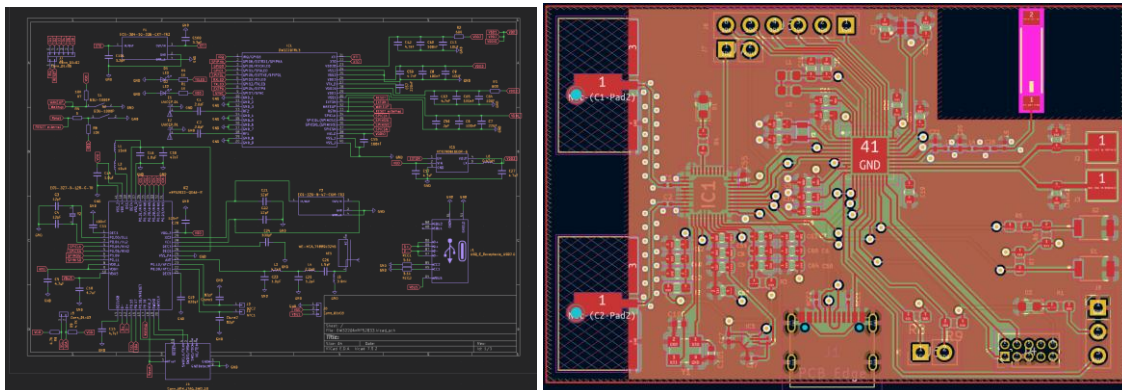
### *Funcionalidades adicionales*

Esta fase abarca las características extra de la etiqueta UWB, como el amplificador de sonido para alarmas acústicas, el botón programable y la luz indicadora para una alerta visual. Estas funciones adicionales permiten al usuario contar con más opciones para localizar sus objetos de manera eficiente.

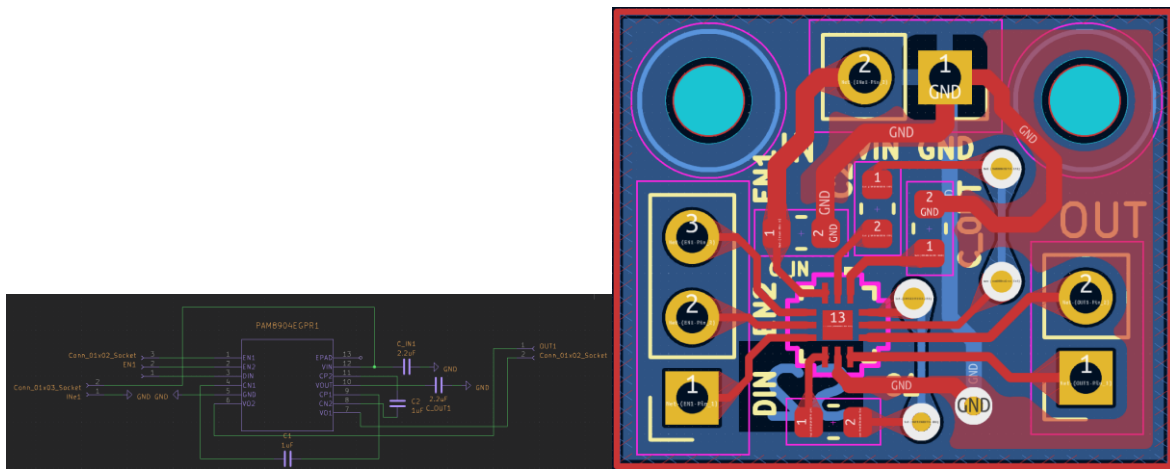
## Resultados

Los resultados se pueden ver reflejados en el aprendizaje necesario para la realización de los circuitos, por lo que primero que se considera de relevancia es el marco teórico previo, el cual encapsula todo lo que se tuvo que aprender para la realización de los diseños implementados. Pues estos reflejan en sí los resultados que no se pueden ver a primera vista y serán más detallados en el informe final. Que respecta a todas las decisiones de diseño de las PCBs, desde el sustrato, las capas, los caminos, vías, dimensiones, tamaños de los componentes, los componentes en sí con respecto al estado del arte y los disponibles actualmente, la implementación de los componentes, el estudio de la programación necesaria para cada uno y su integración entre ellos.

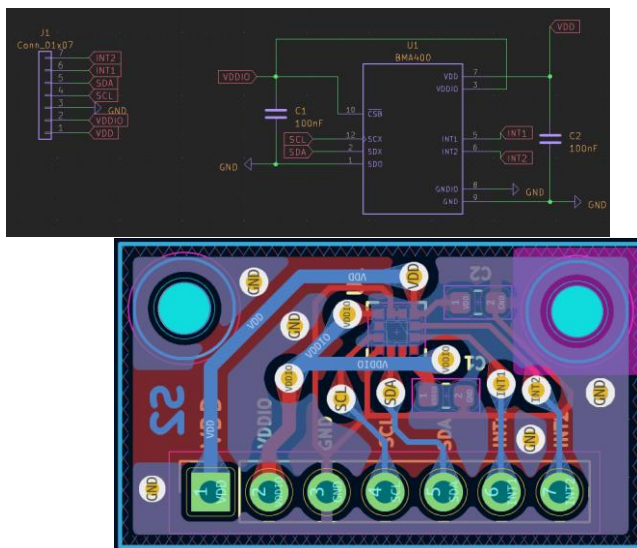
Considerando el formato de informe de avances se presenta principalmente los resultados que son reflejados en los circuitos a continuación:



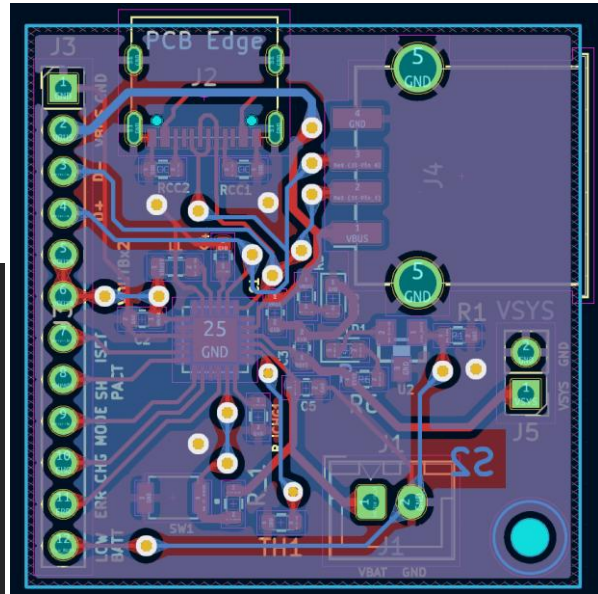
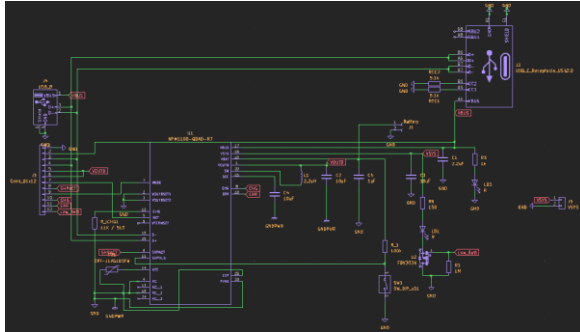
Esquemático y PCB de módulo de procesador nRF52833 y chip procesador de UWB DW3220 con diseño de antenas incluido



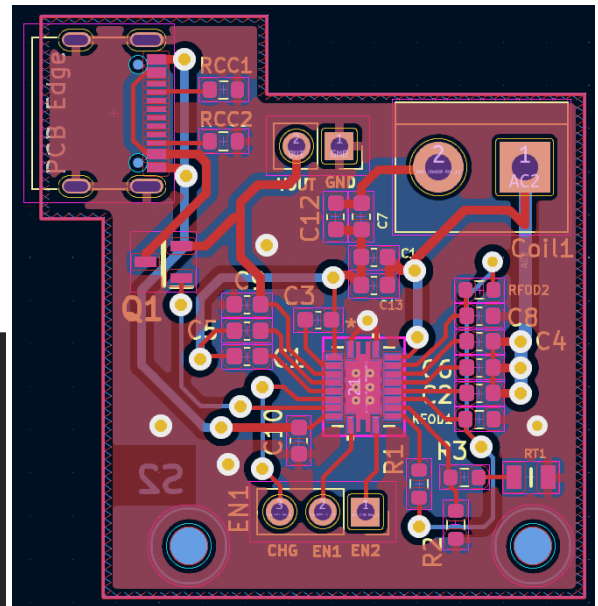
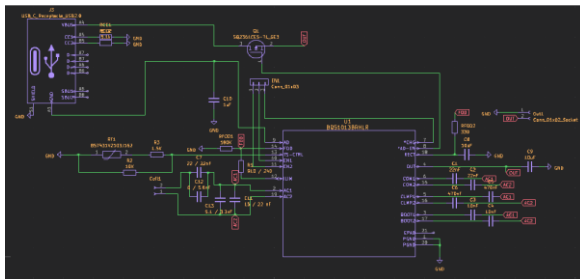
Esquemático y PCB de modulo de emision de sonido con chip PAM8904



Esquemático y PCB de modulo de deteccion de movimiento con aceletrometro BMA400



Esquemático y PCB de módulo PMIC con chip nPM1100 para manejo de potencia.



Esquemático y PCB de módulo de carga inalámbrica con chip BQ5101eBRHLR

## Conclusiones

En conclusión, se podría decir que el proceso de aprendizaje ha sido algo bastante notorio al tener que aprender a profundidad de todas las tecnologías que se buscan implementar, aspecto que se refleja en cada decisión de diseño implementada. De igual manera, aunque aún falta una considerable parte del desarrollo, se considera que todo lo hecho previamente lleva a la actualidad en la que, lo que sigue, es la finalización de la impresión, acoplamiento de los diseños y experimentación.



Por lo que me encuentro muy determinado a seguir y aumentar el ritmo actual para poder finalizar con un producto que sea de mi gusto, o al menos que refleje todo el esfuerzo y aprendizaje que tuve en este desarrollo.

## Referencias

- [1] Lifesaver Technologies, "Statistics," [Online]. Available: <https://lifesavertechnologies.com/statistics>.
- [2] Spotypal, "Missing Items Facts & Statistics [Infographic]," [Online]. Available: <https://www.spotypal.com/blog/missing-items-facts-statistics-infographic/#>.
- [3] IKEA, "How Much Time Do We Spend Searching for Things Around the Home?," [Online]. Available: <https://www.ikea.com/es/en/ideas/how-much-time-do-we-spend-searching-for-things-around-the-home-pubec2a8ae0/>.
- [4] S. A. Broome, "Inside the booming world of the everyday carry subculture," *Glossy*, [Online]. Available: <https://www.glossy.co/fashion/inside-the-booming-world-of-the-everyday-carry-subculture/>. [Accessed: Feb. 17, 2025].
- [5] Everyday Carry, "About Everyday Carry," *Everyday Carry*, [Online]. Available: <https://everydaycarry.com/about/>. [Accessed: Feb. 17, 2025].
- [6] International Electrotechnical Commission, *IEC 60529: Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code)*, Geneva, Switzerland: IEC, 2013.
- [7] International Electrotechnical Commission, *IEC 60068: Environmental Testing*, Geneva, Switzerland: IEC, 2007.
- [8] Wireless Power Consortium, "Knowledge Base," [Online]. Available: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/knowledge-base/>.
- [9] Wireless Power Consortium, "How Qi Works," [Online]. Available: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/knowledge-base/magnetic-induction/how-qi-works/>.
- [10] Texas Instruments, "BQ51013B Datasheet," [Online]. Available: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq51013b.pdf>.
- [11] Nitecore Store, "Lithium-ion and Lithium-poly Batteries," [Online]. Available: <https://blog.nitecorestore.com/lithiumion-and-lithiumpoly-batteries.html>.
- [12] Grepow Blog, "Li-ion vs LiPo Battery for Long Range Flights," [Online]. Available: <https://www.grepow.com/blog/li-ion-vs-lipo-battery-for-long-range-flights.html>.
- [13] O. P. Kumar, P. Kumar, T. Ali, P. Kumar, and S. Vincent, "Ultrawideband Antennas: Growth and Evolution," *Micromachines*, vol. 13, no. 1, p. 60, Jan. 2021, doi: 10.3390/mi13010060.
- [14] W. Q. Malik and A. F. Molisch, "Ultrawideband Antenna Arrays and Directional Propagation Channels," in *Proc. 1st Eur. Conf. Antennas Propag. (EuCAP)*, Nice, France, Nov. 2006.
- [15] Japan Electronics and Information Technology Industries Association, "A Guide to the Safe Use of Lithium-Ion Secondary Cells in Notebook-Type Portable Computers," [Online]. Available: [https://home.jeita.or.jp/upload\\_file/20210407112651\\_JbDgUSWGiB.pdf](https://home.jeita.or.jp/upload_file/20210407112651_JbDgUSWGiB.pdf).
- [16] Infineon Technologies, "Battery management ICs," [Online]. Available: <https://www.infineon.com/cms/en/product/battery-management-ics/>.
- [17] Texas Instruments, *Class-D Audio Amplifiers: What, Why, and How?* Application Note, 2018.
- [18] Murata Manufacturing Co., *Piezoelectric Sound Components Application Manual*, 2020.



- [19] D. Self, *Audio Power Amplifier Design*, 6th ed. Focal Press, 2020.
- [20] Analog Devices, "MEMS Vibration Monitoring: Acceleration to Velocity," [Online]. Available: <https://www.analog.com/en/resources/analog-dialogue/articles/mems-vibration-monitoring-acceleration-to-velocity.html>.
- [21] ISO/IEC 14443-1:2018, *Identification cards — Contactless integrated circuit cards — Proximity cards — Part 1: Physical characteristics*, 2018.
- [22] IEEE Standards Association, *IEEE Std 802.15.4-2020*, 2020.
- [23] IEEE, *IEEE 802.15.4z-2020: Enhancements to the Ultra-Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques*, 2020.
- [24] Federal Communications Commission (FCC), *Revision of Part 15 of the Commission's Rules Regarding Ultra-Wideband Transmission Systems*, 2002.
- [25] A. F. Molisch, "Ultra-wideband propagation channels," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 2, pp. 353–371, Feb. 2005.
- [26] Qorvo, *APS006: Antenna Placement and Performance for Angle of Arrival (AoA) Applications*, 2020.
- [27] C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, "Overview and evaluation of Bluetooth Low Energy: An emerging low-power wireless technology," *Sensors*, vol. 12, no. 9, pp. 11734–11753, Sep. 2012, doi: [10.3390/s120911734](https://doi.org/10.3390/s120911734).
- [28] Bluetooth SIG, *Bluetooth Core Specification Version 5.0*, Dec. 2016. [Online]. Available: <https://www.bluetooth.com/specifications/specs/core-specification-5-0/>.
- [29] C. Gomez, J. Oller, and J. Paradells, "Overview and evaluation of Bluetooth Low Energy: An emerging low-power wireless technology," *Sensors (Basel, Switzerland)*, vol. 12, no. 9, pp. 11734–11753, Sep. 2012, doi: [10.3390/s120911734](https://doi.org/10.3390/s120911734).

## Autodiagnóstico

Teniendo en cuenta el diagrama de autodiagnóstico de riesgo de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de los Andes, se considera que los protocolos definidos tienen un riesgo mínimo.

El proyecto involucra investigación con seres humanos, pero no afecta de manera fisiológica, psicológica o social. No se realizarán pruebas invasivas o quirúrgicas, no se recopilará información de comunidades vulnerables y no se publicará información sensible de los sujetos de prueba.

No se ofrecerá ningún incentivo por la participación, ya que las pruebas del protocolo de usuario se llevarán a cabo únicamente con personas que participen de manera voluntaria y por buena voluntad. Estas pruebas se limitarán exclusivamente a la evaluación de la usabilidad del proyecto.

### Evaluación

solicitado (En un solo archivo .pdf).

Nombre del estudiante asesorado: Santiago Sinisterra

Título del proyecto: ATLAS: TRACKING SYSTEM WITH INTEGRATED UWB AND BLUETOOTH

¡Asesor!, por favor **encierre/subraye** la opción que mejor describa el ítem a evaluar:

<b>El seguimiento al desarrollo del proyecto se ha realizado</b>	De manera continua y efectiva	Moderado y suficiente X	Mínimo u Ocasional	Insuficiente	Nulo
<b>La apreciación general sobre el desarrollo del proyecto es</b>	Excelente. Estudiante autónomo, ordenado, con altas probabilidades de éxito	Muy Bueno. Se esperan resultados completos.	BuenoX	Regular	Malo
<b>Respecto al informe de avances presentado</b>	Es completo y claro. Acorde al trabajo desarrollado. X	Es bueno, pero no refleja completamente el verdadero avance del proyecto	Incompleto. Falta un mejor esfuerzo en la realización del informe.	Pobre	Malo

Observaciones:			
<b>Teniendo en cuenta el desarrollo actual del proyecto, se estima (sugiere):</b>	Sustentación exitosa en las fechas establecidas.X	Existen elementos de fuerza mayor que pueden justificar la consideración de la figura de <b>Pendiente.</b>	Dado el escaso avance podría considerarse el <b>Retiro</b> de la materia.

**Firma del asesor:** *Alba Avila*  
**Nombre del asesor:** Alba Avila  
**Fecha:**27032025