

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California).

La investigación fue financiada por el SECIHTI (Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos de Autor.

**Centro de Investigación Científica y de Educación  
Superior de Ensenada, Baja California**



---

**Maestría en Ciencias  
en Electrónica y Telecomunicaciones  
con orientación en Telecomunicaciones**

---

**Diseño de una red inalámbrica multsaltos basada en el  
estándar IEEE 802.15.4z (UWB) para la localización de  
contenedores.**

Tesis  
para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Elvis Alfredo Fernández Padrón**

Ensenada, Baja California, México  
2025

Tesis defendida por  
**Elvis Alfredo Fernández Padrón**

y aprobada por el siguiente Comité

**Dr. Salvador Villarreal Reyes**  
Codirector de tesis

**Msc. Shiro Tadasuky Kaishi Romero**  
Codirector de tesis

**Dr. Gabriel Alejandro Galaviz Mosqueda**

**Dr. Heriberto Márquez Becerra**



**Dra. María del Carmen Maya Sánchez**  
Coordinadora del Posgrado en Electrónica y  
Telecomunicaciones

**Dra. Ana Denise Re Araujo**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Elvis Alfredo Fernández Padrón** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias en Electrónica y Telecomunicaciones con orientación en Telecomunicaciones.

### **Diseño de una red inalámbrica multsaltos basada en el estándar IEEE 802.15.4z para la localización de contenedores**

Resumen aprobado por:

Dr. Salvador Villarreal Reyes  
**Codirector de tesis**

Msc. Shiro Tadasuky Kaishi Romero  
**Codirector de tesis**

En la actualidad, las comunicaciones inalámbricas se basan en diversas tecnologías que ofrecen distintas características en cuanto a alcance, velocidad de transmisión, consumo energético y aplicaciones. Una de sus aplicaciones más relevantes son los sistemas de localización en tiempo real (RTLS), especialmente útil en áreas logísticas como puertos, donde el seguimiento preciso de contenedores es crucial para la eficiencia operativa. Los sistemas tradicionales como el GPS enfrentan limitaciones en estos entornos debido a estructuras de gran escala, zonas sin cobertura satelital y movimientos complejos de mercancías. Por ello, esta investigación propone una red inalámbrica de sensores multsalto que permita implementar un RTLS eficiente para la localización de contenedores. Esta investigación se centra en el diseño de una red inalámbrica de sensores multsalto basada en dispositivos que operan bajo el estándar IEEE 802.15.4z, capaces de medir distancias respecto a nodos fijos y transmitir esa información mediante múltiples saltos hacia un sistema central. Se diseñó un protocolo de acceso al medio utilizando la técnica TDMA, que evita colisiones durante la transmisión y permite la sincronización global de los dispositivos, así como el registro de contenedores en zonas de cobertura. Además, se realizó una evaluación de varios protocolos de enrutamiento popularmente utilizados en este tipo de redes, para de esta manera hacer una recomendación de adopción de estrategia de enrutamiento basándose en los resultados de las métricas de desempeño obtenidas en los escenarios de simulación. Se realizó la validación experimental del protocolo MAC diseñado y los resultados de simulación arrojan que el protocolo de Enrutamiento Ad-hoc por Vector de Distancia Bajo Demanda (AODV) es la mejor opción entre los protocolos evaluados.

**Palabras clave:** localización de contenedores, IEEE 802.15.4z, WSN, RTLS, TDMA, OMNeT++

Abstract of the thesis presented by **Elvis Alfredo Fernández Padrón** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Electronics and Telecommunications with orientation in Telecommunications

**Design of a multi-hop wireless network based on IEEE 802.15.4z standard for container localization**

Abstract approved by:

Dr. Salvador Villarreal Reyes  
**Thesis Codirector**

MSc. Shiro Tadasuky Kaishi Romero  
**Thesis Codirector**

Currently, wireless communications are enabled by a wide variety of technologies, each offering different characteristics in terms of transmission ranges, data rates, energy consumption, and specific applications. There is a wide variety of applications in which wireless communication technologies are being used, among which Real-Time Location Systems (RTLS) have become quite relevant in recent years. Precise container localization in large logistics areas is a critical challenge for operational efficiency of maritime port zones that cannot rely on traditional solutions such as the Global Positioning System (GPS). This is so because port zones present significant challenges characterized by large-scale infrastructure, shadow zones for satellite coverage, and complex movements of cargo containers. This research focuses on designing a multi-hop wireless sensor network that enables the operation of an RTLS for localization of containers. The work includes defining the network architecture formed by devices working under the IEEE 802.15.4z standard. The network is designed to enable distance measurements from each container to fixed position nodes used as geographic references. Then, the measurements are transmitted through the network towards a central system by means of multiple wireless hops. The central system stores and can further process the container positions. A medium access mechanism based on the Time Division Multiple Access (TDMA) technique was designed to avoid collisions during transmissions, which included a procedure for global device synchronization and container registration in ranging coverage areas. Additionally, an evaluation of several routing protocols commonly used in this type of networks was conducted to provide a routing strategy adoption recommendation, based on performance metrics obtained from simulation scenarios. Experimental validation of the designed MAC protocol was performed, and simulation results show that the Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) routing strategy is the best option among the evaluated protocols.

**Keywords:** container localization, IEEE 802.15.4z, WSN, RTLS, TDMA, OMNeT++

## **Dedicatoria**

*A mi abuela Carmita que descanse en paz.*

## Agradecimientos

Al **Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE)** y a la **Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI)**, por el financiamiento otorgado a esta investigación.

A toda mi familia, en especial a mi madre **Xiomara**, mi padre **Elvis** y mi hermana **Lislaura**, por el apoyo incondicional que siempre me han brindado, por creer en mí y acompañarme en cada paso de mi vida.

A mi querida esposa **Meily**, por darle alegría a mi existencia y motivarme siempre a seguir adelante.

Al Dr. **Salvador Villarreal**, por ser un gran tutor y abrirme las puertas del laboratorio **ARTS**, donde adquirí valiosos conocimientos y crecí como profesional.

A **Enrique y Eduardo**, por su compañerismo y por el tiempo dedicado cuando necesité su ayuda.

Al M.Sc. **Shiro Tadasuky Kaishi Romero**, por su amistad y su constante dedicación a este trabajo de tesis.

A los integrantes de mi comité de tesis, Dr. **Alejandro Galaviz Mosqueda** y Dr. **Heriberto Márquez Becerra**, por el tiempo invertido en este proyecto, por sus atinadas observaciones y por sus valiosas contribuciones que fortalecieron el desarrollo de esta investigación.

A todos los amigos que estuvieron presentes durante este camino, gracias por su apoyo y compañía.

## Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	x
Lista de tablas .....	xii
<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	1
1.2 Planteamiento del problema .....	6
1.3 Objetivos .....	7
1.3.1 Objetivo general.....	7
1.3.2 Objetivos específicos.....	7
1.4 Metodología .....	7
1.5 Organización de la tesis.....	9
<b>Capítulo 2. Redes inalámbricas de sensores y tecnología UWB .....</b>	<b>10</b>
2.1 Redes inalámbricas de sensores .....	11
2.2 Tecnologías populares para el despliegue de WSNs en aplicaciones de localización.....	11
2.2.1 LoRa.....	12
2.2.2 Sigfox.....	12
2.2.3 <i>Bluetooth</i> de bajo consumo de energía .....	13
2.2.4 WiFi.....	13
2.2.5 UWB.....	14
2.3 Paradigma de redes ad-hoc para redes inalámbricas de sensores .....	14
2.3.1 Redes centralizadas vs redes Ad Hoc .....	15

2.3.2	Técnicas de acceso al medio para redes inalámbricas Ad Hoc .....	16
2.3.3	Estrategias de enrutamiento para redes inalámbricas ad hoc.....	17
2.3.3.1	Protocolos basados en resolución de rutas bajo demanda .....	18
2.3.3.2	Protocolos proactivos.....	20
2.3.3.3	Protocolos de <i>flooding</i> .....	21
2.4	Tecnología UWB.....	23
2.4.1	Capa física.....	23
2.4.2	Capa MAC.....	28
2.4.3	Evolución de la estandarización de UWB.....	29
2.5	Conclusiones parciales .....	31
<b>Capítulo 3.    Sistemas de localización en exteriores .....</b>		<b>33</b>
3.1	Técnicas para la determinación de distancia .....	34
3.1.1	Determinación del ángulo de arribo (AoA) .....	34
3.1.2	Determinación del tiempo de arribo (ToA) .....	35
3.1.3	Determinación de la diferencia entre los tiempos de arribo (TDoA).....	35
3.1.4	La indicación de la fuerza de la señal recibida (RSSI) .....	36
3.2	Tecnologías de posicionamiento en exteriores.....	37
3.2.1	Sistema de posicionamiento basado en GPS .....	37
3.2.2	Sistema de posicionamiento basado en Bluetooth.....	38
3.2.3	Sistema de posicionamiento basado en RFID .....	39
3.2.4	Sistema de posicionamiento basado en UWB .....	40
3.3	Algoritmos de posicionamiento .....	41
3.3.1	Triangulación .....	41
3.3.2	Trilateración .....	42
3.3.3	Proximidad .....	43
3.4	Conclusiones parciales .....	45
<b>Capítulo 4.    Propuesta de MAC y <i>ranging</i>.....</b>		<b>46</b>

4.1	Características del escenario.....	46
4.2	Arquitectura y topología de red propuesta .....	47
4.3	Actividades de <i>ranging</i> .....	49
4.3.1	Selección de la técnica de <i>ranging</i> a utilizar.....	49
4.3.2	Algoritmo de cálculo de posicionamiento a utilizar .....	51
4.4	Diseño del protocolo de control de acceso al medio (MAC).....	52
4.4.1	Selección de la técnica de acceso al medio.....	52
4.4.2	Propuesta de protocolo para el control de acceso al medio .....	53
4.4.2.1	Supertrama diseñada para el control de acceso al medio .....	54
4.4.3	Funcionamiento del protocolo.....	55
4.4.3.1	Sincronización global.....	56
4.4.3.2	Áreas de cobertura para actividades de <i>ranging</i> .....	57
4.4.3.3	Proceso de acceso a la red .....	59
4.4.3.4	DS-TWR para <i>ranging</i> .....	60
4.4.4	Estructura de los paquetes del protocolo de acceso al medio .....	61
4.4.4.1	Estructura del paquete de sincronización global .....	63
4.4.4.2	Estructura de los paquetes de <i>ranging</i> . .....	65
4.4.4.3	Paquetes de asociación .....	66
4.4.4.4	Paquetes de DS-TWR.....	67
4.4.4.5	Duración de la etapa de sincronía local, acceso a la red y <i>ranging</i> .....	69
4.5	Diseño de capa MAC para la etapa de enrutamiento de la información.....	70
4.5.1	Etapa de enrutamiento de la información .....	70
4.5.2	Estructura de los paquetes de enrutamiento .....	71
4.5.3	Perfil de tráfico.....	73
4.6	Discusión del diseño de MAC y <i>ranging</i> .....	74
<b>Capítulo 5. Evaluación experimental y resultados.....</b>		<b>76</b>
5.1	Selección del módulo de radio UWB.....	76

5.1.1	Discusión módulo de radio UWB.....	78
5.2	Selección del sistema de procesamiento .....	78
5.3	Implementación de la etapa de sincronización global.....	80
5.3.1	Descripción técnica de la implementación .....	80
5.3.2	Resultados del experimento de validación de la etapa de sincronización global.....	82
5.4	Etapa de acceso a la red y <i>ranging</i> .....	83
5.4.1	Descripción de la implementación de acceso a la red y <i>ranging</i> .....	83
5.5	Enrutamiento de la información .....	84
5.5.1	Simulador OMNET++ .....	85
5.5.2	Framework Inetmanet.....	85
5.5.3	Parámetros de la simulación .....	86
5.5.4	Métricas.....	89
5.5.5	Resultados de la simulación .....	90
5.6	Conclusiones de la evaluación experimental y resultados de la simulación.....	93
<b>Capítulo 6.</b>	<b>Conclusiones y trabajo futuro.....</b>	<b>95</b>
6.1	Introducción .....	95
6.2	Conclusiones.....	96
6.2.1	Sobre diseño e implementación del protocolo MAC y la etapa de <i>ranging</i> .....	96
6.2.2	Sobre las simulaciones realizadas para la evaluación de los protocolos de enrutamiento propuestos .....	97
6.3	Trabajo futuro .....	98
<b>Literatura citada .....</b>	<b>.....</b>	<b>99</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Modelo de referencia OSI .....	3
2. Intercambio de paquetes de control AODV .....	19
3. Espectro de tecnologías de comunicaciones inalámbricas populares .....	24
4. Esquema de modulación de la información en IR-UWB .....	26
5. Estructura del paquete de capa física IEEE 802.15.4z .....	26
6. Estructura de una trama de capa MAC .....	28
7. Cálculo de distancia mediante AoA .....	34
8. Cálculo de distancia mediante ToA .....	35
9. Cálculo de distancia mediante TDoA .....	36
10. Existencia de múltiples puntos de intersección usando triangulación (Wang et al., 2013) .....	42
11. Disposición de los nodos en el escenario .....	47
12. Disposición geométrica de los nodos anclas en un segmento de la red .....	48
13. Intercambio de mensajes durante la ejecución de la técnica TWR .....	50
14. Estructura de la supertrama y duración de sus segmentos .....	54
15. Estructura de un segmento de acceso a la red .....	54
16. Propagación del valor de reloj global .....	56
17. Separación espectral de las áreas de operación de ranging .....	58
18. Segmento de red luego de aplicar separación temporal en áreas de cobertura operando en el mismo canal .....	59
19. Proceso de asociación de lado del tag .....	60
20. DS-TWR optimizada .....	61
21. Estructura básica de un paquete de capa física .....	62

22. Estructura del encabezado de capa física del paquete IEEE 802.15.4z en la parte superior y IEEE 802.15.8 en la parte inferior .....	62
23. Formato de una trama de capa MAC .....	63
24. Formato del paquete de sincronización global .....	64
25. Mecanismo de sincronización local.....	65
26. Formato de paquete de sincronización local .....	66
27. Formato de paquete de solicitud de asociación (superior) y formato de paquete de respuesta de asociación (inferior) .....	67
28. Formato de los paquetes de ranging para encuesta (superior), respuesta (intermedio) y final (inferior) .....	68
29. Distribución de un intervalo de tiempo designado para intercambio de mensaje de ranging ....	69
30. Duración de la etapa de sincronía local, acceso a la red y ranging.....	69
31. Disposición de las ranuras de transmisión en la red .....	71
32. Estructura de paquete de capa MAC .....	72
33. Estructura de una ranura de tiempo para la etapa de enrutamiento .....	72
34. Campos de las tablas de datos con información de los contenedores.....	73
35. Esquema para el esparcimiento de un valor de RTC actualizado .....	81
36. Captura de los valores de RTC obtenidos durante varias supertramas de funcionamiento del mecanismo .....	82
37. Error de sincronización en los experimentos.....	82
38. Resultados del experimento para la validación del proceso de asociación.....	83
39. Tablas de datos referentes a hasta 4 nodos tipo tag .....	84
40. Distribución geográfica de los nodos de la red.....	87
41. Tasa de paquetes entregados (PDR) .....	90
42. Sobrecarga del protocolo MAC .....	91
43. Comparación entre la cantidad de paquetes de control generado por cada protocolo .....	92
44. Latencia promedio .....	93

## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Canales de operación UWB HRP. ....	25
2. Resumen de características claves de los estándares.....	31
3. Comparación entre varias técnicas para las mediciones de distancia.....	51
4. Ocupación espectral de los canales 5 y 9.....	57
5. Demora de transmisión de los paquetes usados para ranging.....	68
6. Parámetros definidos para el intercambio de mensajes de ranging .....	69
7. Datos para el cálculo del tiempo de ranura de transmisión .....	72
8. Revisión de los principales fabricantes y chips que soportan el estándar IEEE 802.15.4z. ....	76
9. Características fundamentales de la tarjeta de evaluación NUCLEO-L4R5ZI.....	79
10. Parámetros de configuración de la red funcionando con OLSR como estrategia de enrutamiento. .....	88

# Capítulo 1. Introducción

---

## 1.1 Antecedentes

El transporte marítimo global ha experimentado un crecimiento exponencial en las últimas décadas, consolidándose como la columna vertebral del comercio internacional, con aproximadamente el 80% del comercio mundial realizándose a través de rutas oceánicas (D.-S. Kim & Tran-Dang, 2019; Lorenc et al., 2023; Schuh et al., 2022; Yau et al., 2020). Este dinamismo en el tráfico marítimo ha impulsado la necesidad de desarrollar tecnologías innovadoras que mejoren la eficiencia y precisión en la gestión de contenedores y operaciones portuarias.

La complejidad logística de los puertos modernos exige soluciones tecnológicas avanzadas que superen las limitaciones de los sistemas tradicionales de localización. Las tecnologías de geolocalización como el sistema global de posicionamiento (GPS, por sus siglas del inglés, *Global Positioning System*) han sido históricamente la base para el seguimiento de mercancías. Sin embargo, estas tecnologías presentan desafíos significativos en entornos portuarios caracterizados por infraestructuras de gran escala, zonas de sombra de cobertura satelital y movimientos complejos de los contenedores de mercancías. En respuesta a estos retos, la industria marítima está adoptando sistemas de localización en tiempo real (RTLS, por sus siglas del inglés, *Real-Time Location Systems*) que utilizan diversas tecnologías como identificación por radio frecuencia (RFID, por sus siglas del inglés, *Radio Frequency Identification*), Bluetooth, y banda ultra ancha (UWB, por sus siglas del inglés, *Ultra-Wideband*). Estas innovaciones no solo permiten una identificación y seguimiento más preciso de los contenedores, sino que también transforman radicalmente la gestión logística portuaria, reduciendo errores, optimizando operaciones y minimizando la intervención humana en procesos de seguimiento y localización (Yau et al., 2020).

Por ejemplo, Kim & Tran-Dang, (2019) en su investigación plantean un sistema formado por contenedores inteligentes. Estos contenedores tienen nodos embebidos con capacidad de formar una red inalámbrica de sensores (WSN, por sus siglas del inglés, *Wireless Sensor Network*) dinámicamente junto a los demás contenedores con los que forma una pila sobre un palet que contiene un nodo de la red que actúa como puerta de enlace y coordinador de esta. El objetivo del sistema es posibilitar la identificación y ubicación de los contenedores individuales que conforman la pila y de esta manera aportar información que puede ser utilizada en la trazabilidad y control del proceso de transporte y almacenamiento de los contenedores,

así como ganar en eficiencia en los procesos de acople y desacople de las pilas de contenedores. La comunicación en estas WSN se basa en radios operando en las bandas de 2.4 GHz bajo el estándar IEEE 802.15.4.

Por otro lado, sistemas como el presentado por Lorenc et al., (2023) apuestan por *Bluetooth* como tecnología para ser usada en aplicaciones de logística. Este trabajo utiliza *Bluetooth* de bajo consumo de energía (BLE, por sus siglas del inglés, *Bluetooth Low Energy*) como solución para un sistema de posicionamiento enfocado en escenarios de logística industrial. En este trabajo se desarrolló el diseño propietario del transmisor que estarían utilizando y las pruebas realizadas determinaron que el sistema sufría de fuertes interferencias causadas por otros dispositivos, metal, contenedores de agua y otros factores propios de un ambiente industrial. Aun así, lograron validar el sistema ya que el procesamiento adecuado de los datos, como la aplicación del filtro de Kalman sobre las mediciones puede estabilizar el efecto de estos objetos en el escenario sobre las mediciones de indicador de intensidad de la señal recibida (RSSI, por sus siglas del inglés, *Received Signal Strength Indicator*) y por ende sobre la precisión de la localización.

Si bien las redes inalámbricas han experimentado un auge significativo gracias a tecnologías como Wifi, Bluetooth, comunicaciones celulares entre otras, de acuerdo con Schuh et al., (2022) en los últimos tiempos ha resurgido un gran interés en los sistemas que utilicen la tecnología UWB. Esta tecnología se caracteriza por emitir radiaciones electromagnéticas con un ancho de banda fraccional mayor al 20% o con un ancho de banda total superior a 500 MHz. Estándares como IEEE 802.15.4a (ahora conocido como IEEE 802.15.4) e IEEE 802.15.4z se basan en la versión de UWB conocida como radio por impulsos (IR-UWB) (Sedlacek et al., 2019).

Los estándares mencionados especifican características de la capa física y de acceso al medio para esta tecnología, dejando el resto de las capas del modelo de referencia de interconexión de sistemas abiertos (OSI, por sus siglas en inglés) al desarrollador. En la Figura 1 se muestran las capas o niveles que componen el modelo de referencia OSI.

Una de las razones que ha impulsado este renovado interés en UWB es su capacidad para ofrecer localización precisa de objetos y personas, con mediciones en el orden de centímetros. Esta precisión ha llevado al desarrollo de aplicaciones comerciales, como los *AirTags* de *Apple*, que utilizan UWB basado en el estándar 802.15.4z.



**Figura 1.** Modelo de referencia OSI

A pesar de sus capacidades prometedoras, la implementación de UWB en redes inalámbricas todavía no se ha estandarizado por completo, especialmente en la capa de acceso al medio (MAC), lo que ha llevado a diferentes enfoques entre los fabricantes de circuitos integrados. Actualmente, los estándares permiten que los implementadores definan la MAC, lo que también ha dado lugar a diversas implementaciones de UWB en redes.

En este contexto, surge un área de oportunidad que consiste en diseñar una WSN multsalto funcionando bajo el estándar IEEE 802.15.4z como base de un RTLS para la localización de contenedores. Es posible mencionar investigaciones que son un precedente para este trabajo de tesis como la de Son et al., (2010) en la que se plantea un sistema con un modelo centralizado basado en comunicaciones UWB, donde una entidad es la encargada de controlar las operaciones dentro de la red. Este sistema está compuesto por etiquetas electrónicas (también conocidas por el término en inglés *tags*) colocados en la maquinaria que se desea localizar, lectores colocados en posiciones estratégicas para obtener las mediciones de distancia necesarias y el sistema central. El sistema central y los nodos tipo lectores colocados en el escenario cuentan con conexión cableada gracias a una red de área local existente, de manera que los comandos para la realización de actividades de *ranging* y los reportes de distancia no serán intercambiados usando las comunicaciones de radiofrecuencia. Por otro lado, las actividades de *ranging*, las cuales ocurren inalámbricamente, emplean un mecanismo de *token pass* para evitar colisiones en las transmisiones del conjunto de dispositivos que participa en esta etapa, tal conjunto es designado por el sistema central. El protocolo incluye un procedimiento que se lleva a cabo cuando el sistema central detecta que no tiene un conjunto de lectores suficientemente grande para que aporte la cantidad de mediciones de distancia necesarias para determinar la posición del *tag*. Este procedimiento implica pasar el *token* de actividades de *ranging* a otros *tags* en el área y de ese modo alcanzar el número de mediciones necesarias para resolver la posición del *tag* objetivo. El RTLS funciona sobre el estándar IEEE 802.15.4a y fue diseñado para resolver el problema de las zonas de silencio que existen en los ambientes de logística de puertos que

dificultan el posicionamiento de equipo de carga en dicha área. Según las simulaciones y experimentos realizados este sistema logró cumplir los requerimientos de errores de localización en ambientes de logística, pero pierde en dinamismo debido al control centralizado que propone el diseño para el acceso al medio de los dispositivos, además de no explotar al máximo las capacidades de los radios IEEE 802.15.4a debido a que utiliza otras tecnologías para intercambiar información de control de la red.

Luego, Cho et al., (2012) presenta los resultados del despliegue del sistema mencionado anteriormente en la terminal portuaria de Hutchison en la ciudad de Busan, Corea del Sur. Fueron un total de 118 dispositivos los instalados, entre lectores y *tags*, los que permitieron generar en tiempo real las rutas tomadas por el equipo que se movía por la terminal. Se logró además un alto grado de precisión en la estimación de posicionamiento gracias al uso de filtro de Kalman sobre los datos obtenidos por el sistema, pero sigue presentando limitaciones en cuanto a dinamismo de la red.

Por otro lado, Valiollahi et al., (2024) presenta un análisis de la precisión de la localización entre RTLSs para ambientes industriales, se trata del estudio probabilístico de la información de localización obtenida a través de un sistema UWB y la información extraída de un sistema de visión por computadora (CV, por sus siglas del inglés, *Computer vision*). Los dos sistemas mencionados anteriormente calculan la posición del tag móvil y la representan en coordenadas cartesianas, dichas mediciones muestran que ambos sistemas cumplen con los requerimientos de un RTLS para ambientes industriales y permiten plantear un sistema compuesto donde el método principal de posicionamiento sea a través de los dispositivos UWB y el método de CV sería utilizado como respaldo en caso de mal funcionamiento de los *tags* UWB.

Haciendo una observación de los sistemas mencionados anteriormente y de otros sistemas encontrados en la literatura es posible afirmar que: en la actualidad, muchas de las soluciones que utilizan UWB para funciones de localización emplean conceptos híbridos para la obtención de información sobre la distancia entre nodos (UWB) y el intercambio de información entre estos. En muchos de estos sistemas los radios UWB permanecen encendidos solo cuando se realizan rutinas de determinación de localización y las demás tareas, como pueden ser la sincronización de la red, la negociación de ranuras de tiempo, entre otras, son realizados por otros radios (BLE, Wifi, sub-GHz, etc.).

Un ejemplo de aplicación que tiene sus bases en este concepto es la presentada por (Macoir et al., 2019) donde se emplea un radio sub-GHz, uno UWB y un enfoque que utiliza los conceptos del mecanismo de acceso al medio por división de tiempo (TDMA, por sus siglas en inglés) para establecer sincronización sólo cuando es necesario llevar a cabo una secuencia de determinación de distancia. Si ese es el caso, se

programa una pequeña supertrama TDMA (suficiente para un solo intercambio de localización) que tiene una relevancia local solamente. En esta solución tanto la determinación de los nodos que están en rango local de interés, como la sincronización de estos para efectuar la comunicación en sus determinadas ranuras de tiempo corre a cuenta del radio sub-GHz.

Por otro lado, Van Herbruggen et al., (2019) en su investigación propone una plataforma de hardware que emplea UWB y una red troncal de largo alcance también basada en tecnología de inalámbrica en los sub-GHz.

Otra implementación de este concepto es mostrada por Brunacci et al., (2022), donde se emplea UWB para resolver las cuestiones de localización de los nodos, pero en esta ocasión se emplea BLE para la adquisición de datos. La literatura consultada fundamenta el uso de las soluciones híbridas como las mencionadas anteriormente con la diferencia en cuanto a gasto energético que existe entre los transceptores UWB y los de las demás tecnologías, principalmente para aplicaciones de muy bajas tasas de transmisión de datos, y como un intento de resolver cuestiones, como el acceso al medio, para sistemas de determinación de localización en interiores basados en UWB. Ninguno de los autores citados planteó la posibilidad de emplear únicamente UWB para la implementación de sus sistemas, por lo que no contemplaron las potencialidades de esta tecnología de ofrecer altas tasas de transmisión de datos y de esta manera potenciar sus sistemas con una mayor capacidad de intercambio de información junto con las funcionalidades bien conocidas de UWB para determinar la distancia entre nodos.

Trabajos como el de Mohammadmoradi et al., (2019) aprovechan las potencialidades de UWB para incluir la información que debe ser intercambiada entre los nodos UWB para el proceso de estimación de distancia en el tráfico existente en la red inalámbrica funcionando exclusivamente con radios IEEE 802.15.4a. Para la validación de la propuesta realizaron pruebas en ambiente de laboratorio donde nodos que manejaban tráfico UDP, enrutado usando el protocolo de enrutamiento para redes inalámbricas de bajo consumo de energía (RPL, por sus siglas del inglés, *Routing Protocol for Low-Power and Lossy Networks*) y controlando el acceso inalámbrico con el protocolo Aloha.

Por otro lado, D. Kim et al., (2022) apostó por utilizar la distancia entre nodos como métrica del protocolo de enrutamiento y de esta manera reducir la sobrecarga del protocolo, en entorno de redes 3D. La investigación se basó en los resultados de las simulaciones realizadas para corroborar su hipótesis de que el conocimiento geográfico de la red, obtenido gracias al procedimiento de *ranging* realizado mediante UWB, posibilita una mayor eficiencia de protocolos de enrutamiento como RPL, aumentando la tasa

efectiva de descubrimiento de rutas y reduciendo los paquetes de control intercambiados y los saltos inalámbricos necesarios para el descubrimiento de estas.

También se puede mencionar la investigación de Shan et al., (2022) donde se diseñó un protocolo para la realización simultánea de la comunicación inalámbrica de datos y estimación de distancia dentro de un enjambre de robots. Este protocolo consistió en un período de transmisión pseudoaleatorio y adaptativo, basado en el nivel de urgencia de información de distancia entre robots y la interrelación con un protocolo de capa de enrutamiento como OLSR.

Para el desarrollo de este trabajo de tesis se plantea diseñar un protocolo de acceso al medio adaptado al sistema UWB, con el objetivo de proponer un RTLS para la localización de contenedores funcionando con los transceptores UWB disponibles actualmente. En particular, se estudiará la factibilidad de desplegar redes multisalto donde los nodos utilicen transceptores basados en el estándar IEEE 802.15.4z para UWB (como el DW3000 de la empresa Qorvo). Como parte del estudio, se evaluará mediante simulación el desempeño de algoritmos de enrutamiento ad-hoc como AODV, OLSR o *flooding*. A partir del análisis de resultados se podrá determinar qué problemas afectan el desempeño de la red y se podrán proponer posibles soluciones a nivel capa MAC y protocolo de enrutamiento que permitan el establecimiento efectivo de redes multisalto utilizando transceptores IEEE 802.15.4z.

Además, resulta novedosa la inclusión de chips más modernos que ya soportan el estándar mencionado. Se espera que esto prolongue la vida útil de los dispositivos portátiles que los incorporan, ya que el nuevo transceptor presenta una reducción en el consumo de energía de casi 50% durante las mediciones en tiempo real, alcanzando un valor promedio de 55 mW (Polonelli et al., 2022).

## **1.2 Planteamiento del problema**

La localización precisa de contenedores en grandes áreas logísticas es un desafío crítico para la eficiencia operativa. Este trabajo aborda el problema mediante el diseño de una red inalámbrica multisalto basada en el estándar IEEE 802.15.4z (UWB), con la innovación de utilizar un único transceptor por nodo para realizar tanto las funciones de localización como de comunicación en red.

## 1.3 Objetivos

### 1.3.1 Objetivo general

Diseñar una red inalámbrica de sensores multisalto basada en el estándar IEEE 802.15.4z (UWB) para la localización de contenedores en el área de almacenamiento.

### 1.3.2 Objetivos específicos

- Estudiar, proponer y programar un mecanismo de acceso al medio factible de utilizarse en un sistema embebido que cuente con un transceptor IEEE 802.15.4z.
- Diseñar y validar una cama de pruebas consistente en múltiples nodos IEEE 802.15.4z.
- Evaluar el desempeño de una red a un solo salto en la cama de pruebas.
- Estudiar y proponer algoritmos de enrutamiento multisalto que sean factibles de funcionar adecuadamente en el sistema propuesto.
- Evaluar mediante simulación los algoritmos de enrutamiento multisalto propuestos.
- Hacer recomendaciones de diseño con base en los resultados obtenidos.

## 1.4 Metodología

- 1. Estudiar, proponer y programar un mecanismo de acceso al medio factible de utilizarse en un sistema embebido que cuente con un transceptor IEEE 802.15.4z.**

En esta parte del trabajo se realizó un estudio de las características de IEEE 802.15.4z así como de los protocolos de acceso al medio típicamente utilizado para aplicaciones de posicionamiento y transferencia de datos con UWB. Una vez realizada la revisión de literatura necesaria para obtener información valiosa sobre los elementos mencionados se procedió a diseñar un mecanismo de acceso al medio para utilizar en el RTLS para contenedores usando dispositivos de comunicaciones inalámbricas operando bajo las especificaciones del estándar mencionado.

## **2. Diseñar y validar una cama de pruebas consistente en múltiples nodos IEEE 802.15.4z**

Para esta etapa, con el objetivo de validar el diseño realizado se implementó el mecanismo de acceso al medio planteado en los sistemas embebidos seleccionados para la aplicación planteada. De esta manera se realizó la validación experimental del diseño.

## **3. Evaluar el desempeño de una red a un solo salto en la cama de pruebas.**

Se evaluó la eficacia de las comunicaciones entre dispositivos, más allá de las actividades de *ranging*. Se realizaron configuraciones y definieron estrategias que permitirían el mejor desempeño de los dispositivos IEEE 802.15.4z en tareas de transferencia de datos.

## **3. Estudiar y proponer algoritmos de enrutamiento multisalto que sean factibles de funcionar adecuadamente en el sistema propuesto**

Se realizó un estudio de la bibliografía relacionada con los protocolos de enrutamiento factibles de emplear en aplicaciones de redes inalámbricas de sensores y que funcionara con el mecanismo de acceso al medio propuesto.

## **4. Evaluar mediante simulación los algoritmos de enrutamiento multisalto propuestos**

Se realizó la evaluación mediante simulación de los algoritmos de enrutamiento seleccionados, con el objetivo de comparar métricas (tales como la tasa de entrega de paquetes, el tiempo de demora y la sobrecarga del protocolo de enrutamiento) que permitan realizar una propuesta de protocolo de enrutamiento a ser utilizado en el sistema basada en el que tuvo mejor desempeño en esta etapa.

## **5. Hacer recomendaciones de diseño con base en los resultados obtenidos**

Se realizó una propuesta de protocolo de enrutamiento a utilizar en el sistema teniendo en cuenta en el resultado de las simulaciones realizadas de la red inalámbrica multsaltos basada en el estándar IEEE 802.15.4z.

## 1.5 Organización de la tesis

En el Capítulo 2 se describen conceptos sobre las WSNs y se hace un repaso de las tecnologías inalámbricas que son actualmente utilizadas en aplicaciones que se basan en este tipo de redes. Además, se hace un análisis de los mecanismos de acceso al medio y técnicas de enrutamiento comúnmente utilizadas en los entornos de redes ad hoc. Luego se presentan las características fundamentales de la tecnología UWB que la hacen una solución factible de adoptar para el escenario de aplicación planteado.

En el Capítulo 3 se hace una revisión de las técnicas de determinación de distancia más adoptadas actualmente, así como las tecnologías inalámbricas empleadas en sistemas de posicionamiento en exteriores. Además, se mencionan los algoritmos de posicionamiento más populares y que puedan funcionar en un RTLS para la localización de contenedores.

En el Capítulo 4 se presenta el diseño del mecanismo de acceso al medio propuesto, comenzando por la selección de la técnica de medición de distancia y el algoritmo para el cálculo de posicionamiento que tienen gran importancia en las actividades de *ranging*. Luego se define el modelo de mecanismo de acceso al medio, apoyándose de la revisión literaria realizada. Más adelante se comentan las características del escenario y la arquitectura y topología de la red que se está proponiendo y se prosigue con los detalles de protocolo diseñado en materia de acceso a la red, funcionamiento general del mismo y la estructura de los datos que será utilizada.

En el Capítulo 5 se detallan las características del mecanismo de acceso al medio para la etapa de enrutamiento de la información, la estructura de los paquetes de datos y el perfil de tráfico que maneja una red de las dimensiones mencionadas.

En el Capítulo 6 se muestra todo el proceso implementación y resultados de la etapa de validación experimental del diseño, así como el trabajo de simulación realizado para evaluar las diferentes opciones de protocolos de enrutamiento que se consideraron y sus respectivos resultados, los cuales fueron expresados mediante métricas de desempeño para facilitar la selección del protocolo a utilizar.

## Capítulo 2. Redes inalámbricas de sensores y tecnología UWB

---

Los sistemas de localización pueden estar basados en diferentes tecnologías para la realización de las mediciones de distancia o estimación de posición necesarias. Se pueden mencionar sistemas basados en sensores infrarrojos, dispositivos ultrasónicos o que emplean sonido audible, sistemas ópticos y de visión por computadora, sistemas basados en el uso de radiofrecuencia (RF, por sus siglas del inglés, *Radio frequency*), sistemas híbridos, entre otros.

En este contexto, los sistemas basados en el uso de RF presentan varias ventajas, como su capacidad de penetrar obstáculos, su flexibilidad en diferentes entornos y la posibilidad del establecimiento de comunicaciones inalámbricas que permiten transmitir información más allá del área inmediata de detección. Esta característica es crucial, ya que permite que los datos de localización sean accesibles y utilizables en ubicaciones remotas, ampliando significativamente el rango y la utilidad del sistema. El sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas del inglés, *Global Positioning System*) es el método más ampliamente utilizado para determinar la posición de objetos o personas en exteriores. Su popularidad se debe a su cobertura global, precisión y la amplia disponibilidad de receptores GPS en dispositivos móviles y otros equipos. Este sistema tiene limitaciones significativas en entornos interiores o urbanos densamente construidos, donde las señales de los satélites pueden bloquearse o reflejarse por estructuras, lo que provoca una pérdida de precisión o incluso la imposibilidad de una ubicación (Shen et al., 2022). Otra limitante de su adopción como método universal de posicionamiento es que, para que esa información de ubicación trascienda y pueda ser utilizada por otros servicios o aplicaciones remotos, debe transmitirse con una tecnología de comunicación adicional, puesto que el GPS por sí solo es un sistema pasivo de recepción que permite a un dispositivo determinar su propia ubicación, pero no proporciona un medio para comunicar esta información a otros sistemas o usuarios remotos.

En la actualidad, las comunicaciones inalámbricas están sustentadas en una gran variedad de tecnologías, donde destacan algunas como Wi-Fi, Bluetooth, ZigBee o las redes celulares. Cada una ofrece características diferentes en cuanto a alcance, velocidad de transmisión, consumo de energía y aplicaciones específicas.

Otra tecnología que ha retomado protagonismo tanto en la academia como en la industria es la banda ultra-ancha (UWB, por sus siglas del inglés). Este renovado interés está sustentado por las ya conocidas capacidades de un transceptor funcionando bajo las especificaciones de UWB de determinar la distancia

existente hasta otro transceptor en igualdad de condiciones con una resolución de centímetros y con buena inmunidad a los errores de medición producidos por las pérdidas por multitrayectorias.

## 2.1 Redes inalámbricas de sensors

Para el desarrollo de este trabajo es primordial conocer que las redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés, *Wireless Sensor Network*) representan una tecnología innovadora con un amplio espectro de aplicaciones en diversos escenarios como pueden ser monitoreo ambiental, aplicaciones médicas, agricultura de precisión, control del clima en interiores, detección de incendios, entre otras. Desde la respuesta a emergencias y el seguimiento ambiental hasta la detección de terremotos e inundaciones, pasando por misiones de seguridad y mucho más, estas redes han demostrado su versatilidad y eficacia. Una WSN es una red distribuida compuesta por múltiples sensores de bajo costo y consumo energético que se comunican de forma inalámbrica cuya arquitectura puede integrar nodos con funciones avanzadas, como estaciones base o nodos coordinadores, que actúan como puntos de recolección y procesamiento de datos, facilitando la transmisión de información hacia sistemas de control centralizados o la nube (Kaur et al., 2019).

La preferencia por las WSN se debe en gran medida a su facilidad de instalación y a su capacidad para coordinarse oportunamente con otros sensores en entornos de red dinámicos. Sin embargo, es importante señalar que los nodos sensores tienen limitaciones en cuanto a capacidad, energía, rango de detección y poder computacional. Un aspecto crucial que considerar es que un nodo sensor aislado tiene una capacidad limitada para recopilar información en relación con las aplicaciones de su dominio. Por esta razón, se requiere un gran número de sensores para formar una WSN efectiva. Esta configuración en red permite superar las limitaciones individuales de los sensores y crear un sistema de monitoreo y recopilación de datos más robusto y completo.

## 2.2 Tecnologías populares para el despliegue de WSNs en aplicaciones de localización

Las características de las WSNs vistas anteriormente y las aplicaciones para las que están pensadas llevan a considerar que las tecnologías de comunicaciones inalámbricas han sido el motor principal para el auge

de las WSN puesto que, entre otros avances, han experimentado un rápido desarrollo en las últimas décadas, impulsadas por la creciente demanda de mayor conectividad y el auge del Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés, *Internet of Things*). Este apartado se centra en las tecnologías inalámbricas más relevantes que se han adaptado o diseñado específicamente para su uso en redes ad hoc, examinando sus características técnicas y su aplicabilidad en sistemas de localización.

### 2.2.1 LoRa

La tecnología LoRa (LoRa, por sus siglas del inglés, *Long Range*) se basa en la modulación de espectro ensanchado para el establecimiento de las comunicaciones. Opera en bandas de frecuencia sub-GHz, típicamente 868 MHz en Europa y 915 MHz en América del Norte. Como indica su nombre, esta tecnología tiene un gran alcance de comunicaciones, con valores de entre 12 y 20 km en áreas rurales y de entre 2 y 5 km en entornos urbanos (Rawat et al., 2020). Estos rangos de transmisión se logran sacrificando la tasa de datos que soporta la tecnología, que varía de 0.3 kbps a 50 kbps, dependiendo del factor de dispersión, pero posibilita que los dispositivos operando en esta red, alimentados por baterías duren hasta 10 años. Aunque LoRa no fue diseñada específicamente para localización, se puede utilizar para determinar la ubicación aproximada de dispositivos mediante técnicas de triangulación basadas en indicador de intensidad de señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés) o determinación de tiempo de vuelo (ToF, por sus siglas en inglés), con una precisión típica de 20-200 metros, dependiendo del entorno y la densidad de dispositivos.

### 2.2.2 Sigfox

Otra de las tecnologías de comunicaciones inalámbricas utilizadas para el establecimiento de redes Ad Hoc es Sigfox, esta es una tecnología de Red de Área Amplia de Baja Potencia (LPWAN, por sus siglas del inglés, *Low-Power Wide-Area Network*) que utiliza modulación por desplazamiento de fase binaria diferencial (DBPSK, por sus siglas del inglés, *Differential Binary Phase-Shift Keying*) en banda estrecha operando en las bandas de 868 MHz en Europa, 902 MHz en EE. UU. Se denomina de banda estrecha debido a que emplea solamente 100 Hz como ancho de banda para las comunicaciones. Las redes que operan sobre esta tecnología alcanzan rangos de enlaces de hasta 40 km en áreas rurales y de entre 3 y 10 km en entornos urbanos (Mekki et al., 2018). Igual que LoRa y en comparación con tecnologías como Wifi y Bluetooth, la tasa de datos alcanzada es baja, 100 bps en el enlace de subida y 600 bps en el de bajada, por lo que es

una tecnología adoptada por aplicaciones que requieren intercambiar mensajes diarios. Sigfox ofrece capacidades de localización basadas en la triangulación de señales de sus estaciones base, con una precisión típica de 1-10 km, lo que la hace más adecuada para seguimiento de activos a gran escala que para localización precisa.

### 2.2.3 *Bluetooth* de bajo consumo de energía

***Bluetooth de bajo consumo de energía*** (BLE, por sus siglas del inglés) es una variante de bajo consumo del estándar *Bluetooth* clásico, diseñada para aplicaciones Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés). Opera en la banda de radio industriales, científicas y médicas (ISM, por sus siglas del inglés) de 2.4 GHz. Típicamente se logran rangos de transmisión de hasta 100 metros y se cuenta con tasas de transmisión de datos de hasta 2 Mbps dependiendo de la versión. Las características mencionadas posibilitan que esta tecnología sea utilizada tanto en redes con topología punto a punto como topología de malla, y que pueda ser considerada para aplicaciones que necesitan bajos valores de latencia y consumo de energía de los dispositivos (De Raeve et al., 2022). BLE se usa en sistemas de localización en interiores, usando balizas para determinar la ubicación de dispositivos. La precisión típica es de 1-5 metros, aunque puede mejorar con técnicas avanzadas como AoA (Angle of Arrival) introducidas en *Bluetooth* 5.1.

### 2.2.4 WiFi

Basada en los estándares IEEE 802.11, Wi-Fi es una de estas tecnologías inalámbricas que no apuestan por rangos de transmisión demasiado grandes. Sus características varían según el estándar específico (a/b/g/n/ac/ax), pero generalmente operan en las bandas ISM de 2.4 GHz y 5 GHz. El alcance de las comunicaciones puede ser de entre 20 y 50 metros en interiores, hasta 100 metros en exteriores. Para transferir datos mediante WiFi a una mayor distancia, es común utilizar redes móviles ad hoc (MANETs, por sus siglas del inglés), que proporcionan una red sin infraestructura que puede usarse para la comunicación a largo alcance (Nourildean et al., 2023). Los dispositivos que trabajan con esta tecnología pueden alcanzar tasas de datos de hasta 11 Mbps (802.11b) o hasta varios Gbps (802.11ax), utilizando anchos de banda en sus canales de comunicación de entre 20 hasta 160 MHz. Wi-Fi se ha adaptado para sistemas de localización en interiores utilizando técnicas como *fingerprinting* y triangulación. La precisión típica es de 2-15 metros, dependiendo del número de puntos de acceso y la complejidad del entorno.

### 2.2.5 UWB

UWB también es una tecnología de comunicación de corto alcance que utiliza señales de banda ancha. En este caso se opera en el segmento del espectro correspondiente a las frecuencias de 3.1 hasta 10.6 GHz, utilizando un ancho de banda mayor a 500 MHz en sus canales de comunicación (Haapala et al., 2020). Los dispositivos que trabajan bajo los estándares más modernos logran transmitir información hasta 100 metros a tasas de datos estables de hasta 6.8 Mbps. UWB destaca en aplicaciones de localización de alta precisión, especialmente en entornos complejos. Su capacidad para determinar distancias con precisión de centímetros, las buenas tasas de transmisión de datos que maneja y el bajo consumo de energía la hacen ideal para aplicaciones que requieren localización precisa en tiempo real.

Cada tecnología ofrece un conjunto de características adecuadas para diferentes escenarios de redes ad hoc y aplicaciones de localización. La elección entre ellas dependerá de factores como el alcance requerido, la precisión de localización necesaria, el consumo de energía, la tasa de datos, y las condiciones específicas del entorno de implementación. La tendencia actual apunta hacia soluciones híbridas que combinan múltiples tecnologías para aprovechar las fortalezas de cada una y superar sus limitaciones individuales.

## 2.3 Paradigma de redes ad-hoc para redes inalámbricas de sensores

Las tecnologías mencionadas en el apartado anterior forman parte de las denominadas Redes de Área Local Inalámbricas (WLAN, por sus siglas en inglés). Estas conectan dos o más nodos móviles directamente a través de un canal inalámbrico o mediante una estación base cableada. Esta versatilidad permite que las WLAN se adapten a diversas necesidades y configuraciones. Existen dos modos principales de operación en las redes inalámbricas. El primer modo, conocido como modo con infraestructura, funciona en presencia de una estación base, donde todas las comunicaciones pasan a través de un punto de acceso centralizado. Este enfoque es aplicado en redes celulares tradicionales y es común en entornos corporativos o domésticos donde se requiere un control centralizado y una gestión más sencilla de la red. El segundo modo, denominado modo ad hoc, opera en ausencia de una estación base, permitiendo que los nodos se comuniquen directamente entre sí sin necesidad de una estación base centralizada.

Este concepto de red descentralizada generalmente define redes de múltiples saltos. Las principales características de estas redes son la descentralización, la ausencia de infraestructura, la autoorganización,

la flexibilidad en la creación de redes y la topología dinámica. En estas redes, los nodos son responsables no solo de transmitir su propio tráfico generado, sino también de reenviar paquetes provenientes de otros nodos (K. Khan et al., 2020) Además, los nodos colaboran para llevar a cabo sus tareas. Esto es adecuado para los requisitos de comunicación y creación de redes en escenarios de gran escala espacial.

Estas características hacen que las redes ad hoc sean útiles en operaciones de rescate y emergencia, redes militares tácticas, redes de sensores inalámbricos, comunicaciones rurales o remotas, y eventos temporales como conferencias o festivales. Sin embargo, las redes ad hoc también presentan varios desafíos técnicos que deben abordarse para garantizar su eficacia.

Entre estos desafíos está el enrutamiento dinámico, donde los nodos deben descubrir rutas y reenviar paquetes de manera eficiente en una topología cambiante. La gestión de energía también es crucial, ya que muchos dispositivos en redes ad hoc funcionan con baterías, lo que requiere estrategias de eficiencia energética. La seguridad es otro aspecto fundamental, pues la naturaleza descentralizada de estas redes plantea nuevos retos en términos de autenticación y protección contra ataques.

### 2.3.1 Redes centralizadas vs redes Ad Hoc

Las redes centralizadas se caracterizan por su estructura jerárquica, con un punto central de control que gestiona el flujo de datos y la conectividad. Este controlador obtiene la información del estado global de la red (el estado de los enlaces, longitudes de las colas, etc.) y resuelve un problema de optimización global, cuyas salidas son las decisiones de control en cada intervalo. Si bien los protocolos centralizados generalmente logran un alto rendimiento en términos de capacidad de procesamiento, la viabilidad computacional del problema de optimización global es cuestionada, especialmente cuando las redes crecen en tamaño (Jiao et al., 2016). Esta configuración ofrece un control preciso y una administración simplificada, ideal para entornos empresariales estables donde la seguridad y la consistencia son primordiales.

Por otro lado, las redes Ad Hoc presentan una topología dinámica y descentralizada, donde los dispositivos se conectan directamente entre sí sin depender de una infraestructura fija. Esta flexibilidad las hace especialmente útiles en situaciones de emergencia o entornos cambiantes. En los modelos distribuidos, cada nodo de la red puede tomar decisiones locales de control de enrutamiento y programación utilizando la información del estado de la red a su disposición. Esta información puede ser el estado global completo

de la red o simplemente información local. Sin embargo, surgen varios problemas, como el de tener información de estado inconsistente y desincronizada en diferentes nodos, y surge el problema de la gran sobrecarga de comunicación si se necesita información del estado global en algunos nodos. Las versiones distribuidas abordan el desafío de escalabilidad de los protocolos centralizados en términos de la información de estado requerida y la sobrecarga de comunicación de control.

La escalabilidad y la robustez difieren significativamente entre ambos modelos. Las redes centralizadas pueden enfrentar cuellos de botella al crecer, mientras que las Ad Hoc se adaptan más fácilmente a la expansión. Sin embargo, las redes Ad Hoc presentan desafíos en términos de gestión de energía y coordinación entre nodos. En cuanto a seguridad, las redes centralizadas ofrecen un control más directo, pero son vulnerables a fallos en puntos críticos. Las redes Ad Hoc, por su parte, son más resilientes ante fallos individuales, pero requieren protocolos de seguridad distribuidos más complejos.

A medida que evoluciona la tecnología, ambos enfoques continúan desarrollándose, con tendencias hacia la integración de elementos centralizados y descentralizados para aprovechar lo mejor de ambos mundos en función de las necesidades específicas de cada aplicación.

### 2.3.2 Técnicas de acceso al medio para redes inalámbricas Ad Hoc

En las redes inalámbricas Ad Hoc, el acceso al medio compartido es un desafío crucial debido a la naturaleza descentralizada y dinámica de estas redes.

Una de las técnicas más utilizadas es el acceso múltiple por censado de portadora con evitación de colisiones (CSMA/CA, por sus siglas del inglés). En este método, los dispositivos escuchan el canal antes de transmitir para detectar si está ocupado. Si el canal está libre, el dispositivo espera un tiempo aleatorio antes de transmitir, reduciendo así la probabilidad de colisiones. Si el canal está ocupado, el dispositivo pospone su transmisión y espera un tiempo aleatorio antes de volver a intentarlo (Achroufene et al., 2021). CSMA/CA también implementa mecanismos como solicitud para transmitir y listo para transmitir (RTS/CTS, por sus siglas del inglés) para mitigar el problema del nodo oculto, donde dos nodos que no pueden detectarse mutuamente intentan transmitir simultáneamente a un tercer nodo.

Otra técnica importante es el acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, por sus siglas del inglés), donde el tiempo se divide en ranuras asignadas a cada dispositivo de la red. Cada nodo tiene permiso para

transmitir solo durante su ranura de tiempo asignada, lo que elimina las colisiones, pero requiere una sincronización precisa entre los dispositivos. TDMA es eficiente en términos de uso de energía, ya que los nodos pueden entrar en modo de bajo consumo durante las ranuras que no les corresponden. Sin embargo, puede ser menos flexible en redes con tráfico variable o topología cambiante (Islam et al., 2020).

Los protocolos basados en reserva son otra categoría de técnicas de acceso al medio. En estos protocolos, los nodos reservan tiempo de transmisión con antelación, generalmente mediante un intercambio de mensajes de control. Esto reduce las colisiones y puede ser eficiente para el tráfico periódico o de tiempo real. No obstante, puede resultar menos eficiente para tráfico esporádico o en ráfagas, ya que el tiempo reservado podría desperdiciarse si un nodo no tiene datos para transmitir (Mosavat-Jahromi et al., 2021).

Finalmente, los protocolos híbridos combinan diferentes técnicas para adaptarse a diversas condiciones de red. Por ejemplo, un protocolo podría utilizar CSMA/CA para tráfico de datos general y TDMA para tráfico prioritario o de tiempo real. Estos enfoques buscan equilibrar la eficiencia, la flexibilidad y la equidad en el acceso al medio, adaptándose a las cambiantes condiciones de las redes Ad Hoc (Boukerche & Zhou, 2020).

Cada una de estas técnicas tiene sus propias ventajas y desafíos, y la elección de la más adecuada dependerá de factores como el tamaño de la red, los requisitos de tráfico, las limitaciones de energía y la movilidad de los nodos. La investigación en este campo continúa buscando soluciones que optimicen el rendimiento y la eficiencia energética en las redes inalámbricas Ad Hoc.

### 2.3.3 Estrategias de enrutamiento para redes inalámbricas ad hoc

Los métodos de enrutamiento para redes Ad hoc pueden dividirse en tres categorías principales: el método proactivo, el método reactivo y las técnicas de inundación (*flooding*).

El método de enrutamiento proactivo utiliza una tabla de enrutamiento para determinar la ruta hacia todos los nodos de la red. Los nodos se actualizan regularmente con información de enrutamiento sobre la arquitectura de la red y el estado de los enlaces para refrescar la tabla de enrutamiento. Este enfoque permite una rápida selección de rutas, pero requiere un mayor consumo de recursos para mantener las tablas actualizadas.

Por otro lado, el método de enrutamiento reactivo, también conocido como método de enrutamiento bajo demanda, solo determina la ruta desde el nodo fuente hasta el nodo destino cuando es necesario transferir paquetes. Este enfoque reduce la sobrecarga de mantener rutas que no se utilizan, pero puede introducir un retraso inicial al establecer una nueva ruta.

Las técnicas de inundación o *flooding* representan un tercer enfoque de enrutamiento en redes Ad hoc. En este método, cuando un nodo necesita enviar un paquete a un destino para el cual no tiene una ruta conocida, transmite el paquete a todos sus vecinos. Estos, a su vez, retransmiten el paquete a todos sus vecinos, y así sucesivamente, hasta que el paquete alcanza su destino o se alcanza un número máximo de saltos. Aunque simple y robusto, especialmente en redes con alta movilidad, el *flooding* puede generar una cantidad significativa de tráfico redundante y congestión en la red.

### 2.3.3.1 Protocolos basados en resolución de rutas bajo demanda

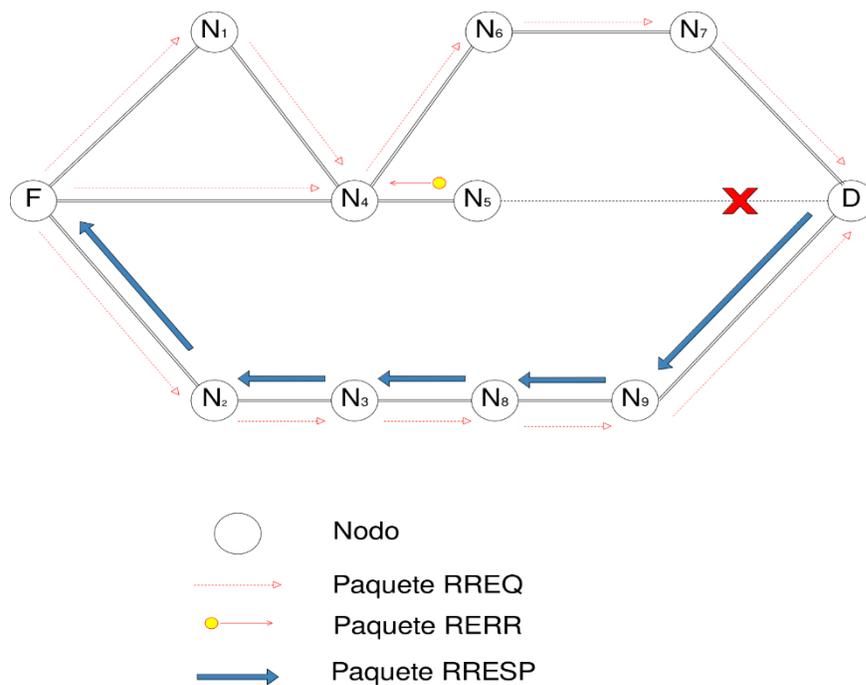
De acuerdo con el método de enrutamiento reactivo o bajo demanda, un protocolo de enrutamiento tradicional, bien conocido es el de vector distancia bajo demanda para redes ad hoc (AODV, por sus siglas del inglés) (Yin et al., 2022).

Un esquema del proceso de búsqueda de ruta en este protocolo se muestra en la Figura 2, el nodo que tiene información para enviar comienza con el envío de paquetes de solicitud de ruta (RREQ, por sus siglas del inglés) hacia todos los nodos de la red. Estos paquetes RREQ se propagan a través de los nodos intermedios de la red hasta llegar al nodo destino. Cuando el nodo destino, o un nodo intermedio que conoce una ruta hacia el destino, recibe un paquete RREQ, responde con un paquete de respuesta de ruta (RREP, por sus siglas del inglés) que se envía de vuelta al nodo fuente. Una vez que el nodo fuente recibe el paquete RREP, se establece la ruta y puede comenzar la transferencia de datos (Das et al., 2003).

Es importante destacar que, además del procedimiento de búsqueda de ruta, los protocolos de enrutamiento bajo demanda también cuentan con procedimientos de mantenimiento de ruta. Estos procedimientos utilizan paquetes de error de ruta (RERR, por sus siglas del inglés) para notificar a los nodos sobre enlaces rotos o rutas que ya no son válidas. Cuando un nodo detecta un enlace roto, envía un paquete RERR a los nodos que estaban utilizando esa ruta, permitiéndoles iniciar una nueva búsqueda de ruta si es necesario.

Este algoritmo de enrutamiento bajo demanda tiene la ventaja de ser eficiente en términos de energía y recursos. Esto se debe a que solo busca y mantiene rutas cuando es necesario, en lugar de mantener constantemente información sobre toda la topología de la red. Esta característica es particularmente beneficiosa en redes Ad hoc, donde los dispositivos a menudo tienen recursos limitados y la conservación de energía es crucial.

Sin embargo, este protocolo enfrenta un desafío importante: la adaptación a escenarios con diferentes densidades de nodos. En redes con alta densidad de nodos, la inundación de paquetes RREQ puede llevar a una sobrecarga significativa de la red, un fenómeno conocido como "tormenta de transmisiones". Por otro lado, en redes con baja densidad de nodos, puede ser difícil encontrar rutas estables, lo que resulta en frecuentes fallos de ruta y necesidad de redescubrimiento.



**Figura 2.** Intercambio de paquetes de control AODV

Para abordar este desafío, se han propuesto diversas modificaciones y mejoras a los protocolos tradicionales. Algunas de estas incluyen:

- Técnicas de control de inundación: Limitan la propagación de paquetes RREQ basándose en diversos criterios como la distancia, la densidad local de nodos, o la probabilidad.

- Enrutamiento jerárquico: Organiza la red en *clusters* o zonas para reducir el alcance de las inundaciones y mejorar la escalabilidad.
- Enrutamiento basado en la posición: Utiliza información de localización para dirigir las búsquedas de ruta de manera más eficiente.
- Enrutamiento multitrayectoria: Descubre y mantiene múltiples rutas entre origen y destino para mejorar la robustez y el equilibrio de carga.
- Enrutamiento basado en métricas de calidad: Considera factores como la calidad del enlace, la energía restante de los nodos, o la congestión para seleccionar rutas más estables y eficientes.

Estas mejoras buscan optimizar el rendimiento de los protocolos de enrutamiento bajo demanda en diversos escenarios, manteniendo sus ventajas de eficiencia energética y de recursos, mientras se adaptan mejor a las características dinámicas de las redes Ad hoc.

### 2.3.3.2 Protocolos proactivos

Un protocolo de enrutamiento proactivo típico es el protocolo de enrutamiento de estado de enlace optimizado (OLSR, por sus siglas en inglés). Este se basa en el uso de una tabla de enrutamiento la cual permite determinar las rutas a todos los nodos de la red. Sin embargo, las actualizaciones continuas de la tabla de enrutamiento pueden afectar significativamente el rendimiento del sistema. Este es uno de los principales desafíos de los protocolos proactivos, ya que mantener información actualizada sobre toda la topología de la red puede consumir una cantidad considerable de ancho de banda y recursos de procesamiento.

El protocolo de enrutamiento OLSR es una mejora del protocolo de enrutamiento de estado de enlace para transmisión multisalto. Utiliza mecanismos para optimizar su funcionamiento como el envío periódico de paquetes "*hello*" a los nodos vecinos. Estos paquetes permiten a cada nodo descubrir sus vecinos inmediatos y mantener información actualizada sobre la conectividad local.

Además, se intercambian paquetes de control de topología (TC, por sus siglas del inglés) con todos los dispositivos de la red con el objetivo de que esta información de conectividad local trascienda y pueda ser utilizada para el establecimiento de rutas. Estos paquetes son enviados por los nodos relés multipunto (MPR, por sus siglas del inglés) los cuales son un subconjunto de nodos seleccionados estratégicamente para reducir la sobrecarga de las transmisiones dirigidas hacia toda la red. Cuando se tiene la información

topológica, OLSR usa el algoritmo de Dijkstra para calcular las rutas óptimas a todos los destinos (Gupta et al., 2021).

La selección de MPRs es un proceso crucial en OLSR. Cada nodo selecciona un conjunto de sus vecinos como MPRs de tal manera que todos los nodos a dos saltos de distancia sean alcanzables a través de al menos uno de estos MPRs. Este enfoque reduce significativamente el número de retransmisiones necesarias para difundir un mensaje en toda la red, en comparación con un mecanismo de inundación puro.

Pero la limitación principal de OLSR es que ocupa muchos recursos de red debido a el mantenimiento constante de tablas de enrutamiento, requiere un intercambio regular de información de estado de enlace. Además, las rutas a todos los destinos se recalculan periódicamente, lo que puede ser computacionalmente intensivo, al igual que almacenar la información topológica en cada nodo puede ser significativo en redes grandes.

Para abordar estas limitaciones, se han propuesto varias extensiones y modificaciones de OLSR:

- OLSR-ETX: Incorpora la métrica de Tiempo de Transmisión Esperado para mejorar la selección de rutas en entornos con enlaces de calidad variable.
- MP-OLSR: Una versión multitrayecto que descubre y mantiene múltiples rutas para mejorar la robustez y el equilibrio de carga.
- OLSR-MDC: Incorpora técnicas de codificación de red para mejorar la eficiencia de la transmisión de datos.
- HOLSR: Una versión jerárquica de OLSR para mejorar la escalabilidad en redes muy grandes.

### 2.3.3.3 Protocolos de *flooding*

Los protocolos de inundación o *flooding* representan uno de los mecanismos más fundamentales en las redes de comunicación, caracterizándose por su simplicidad y robustez en la disseminación de información. En su forma más básica, el *flooding* consiste en que cada nodo de la red que recibe un mensaje lo retransmite a todos sus vecinos, excepto al nodo del cual recibió originalmente el mensaje, generando así una propagación expansiva de la información a través de toda la red (F. Khan et al., 2021).

El funcionamiento del *flooding* se sustenta en un principio de redundancia inherente, donde los mensajes viajan por múltiples caminos simultáneamente. Esta característica, aunque puede parecer ineficiente en términos de consumo de recursos de red, garantiza que la información alcanzará su destino siempre que exista al menos una ruta viable entre el origen y el destino. La naturaleza distributiva del *flooding* lo hace particularmente resiliente a fallos en la red, ya que la pérdida de algunos nodos o enlaces no compromete necesariamente la entrega exitosa del mensaje.

Para evitar que los mensajes circulen indefinidamente en la red, los protocolos de *flooding* implementan diversos mecanismos de control. Uno de los más comunes es la inclusión de un contador de saltos o TTL (Time To Live) que se decrementa cada vez que el mensaje pasa por un nodo. Cuando este contador llega a cero, el mensaje se descarta. Adicionalmente, los nodos suelen mantener un registro de los mensajes ya procesados mediante identificadores únicos, evitando así su retransmisión redundante y la formación de bucles infinitos.

El *flooding* encuentra aplicación en diversos contextos dentro de las redes de comunicación. Es especialmente útil en la fase de descubrimiento de rutas de protocolos de enrutamiento, donde se necesita explorar la topología de la red para encontrar caminos óptimos. También resulta factible en redes móviles ad-hoc (MANETs) donde la topología cambia frecuentemente y se requiere una adaptación rápida a nuevas configuraciones de red. Sin embargo, su uso debe ser cuidadosamente valorado debido al considerable consumo de ancho de banda y recursos de procesamiento que puede generar.

La eficiencia del *flooding* puede mejorarse mediante variantes más sofisticadas del protocolo básico. Por ejemplo, algunas implementaciones utilizan técnicas probabilísticas donde los nodos retransmiten mensajes solo con cierta probabilidad, reduciendo así la carga en la red mientras mantienen un alto grado de fiabilidad en la entrega. Otras variantes emplean información sobre la topología de la red para realizar retransmisiones más selectivas, optimizando el balance entre cobertura y eficiencia.

El impacto del *flooding* en el rendimiento de la red puede ser significativo, especialmente en redes grandes o densamente conectadas. La llamada "tormenta de broadcast" es un fenómeno común donde la proliferación excesiva de mensajes puede saturar los recursos de red y degradar su rendimiento global. Por esta razón, el diseño e implementación de protocolos de *flooding* debe considerar cuidadosamente el contexto específico de aplicación y las características de la red subyacente.

## 2.4 Tecnología UWB

Dentro de las tecnologías mencionadas en el apartado anterior destaca UWB, debido a la precisión de centímetros que se puede alcanzar utilizándose para determinar distancia entre dispositivos y las buenas características de comunicación inalámbrica que tiene.

Esta tecnología fue planteada desde el inicio mismo de las comunicaciones por radiofrecuencia allá por los años 1896, pero no fue hasta los 1960 y 1970 que surgieron las primeras aplicaciones y patentes para las comunicaciones de banda ultra ancha. Entre estas podemos mencionar a Gerald Ross y Kenneth Robbins quienes obtuvieron patentes que fueron pioneras en el uso de señales UWB en comunicaciones y radar en 1972 (Pirch et al., 2020). Sin embargo, la pobre estandarización y los pocos avances en la fabricación de transceptores impidieron que UWB fuera ampliamente adoptada por la industria y la electrónica de consumo.

El resurgimiento de UWB ha sido impulsado por avances en la fabricación de semiconductores que han hecho posible la producción de chips UWB más pequeños, eficientes y asequibles, así como la constante actualización de los estándares y regulaciones que posibilitan sus mejoras y la coexistencia con otras tecnologías. UWB se volvió más común cuando Apple lanzó su iPhone 11 con su chip UWB U1 en 2019. Un mes después, se fundó el Consorcio FiRa para promover y estandarizar UWB para un alcance fino con el compromiso de fomentar la adopción generalizada de aplicaciones impulsadas por UWB. Esto ha abierto nuevas posibilidades para su aplicación en diversos campos, como localización y seguimiento en interiores de alta precisión, sistemas de prevención de colisiones en vehículos autónomos, comunicaciones seguras de corto alcance, aplicaciones de realidad aumentada y virtual que requieren posicionamiento preciso, y en el IoT para aplicaciones que necesitan localización precisa y baja latencia.

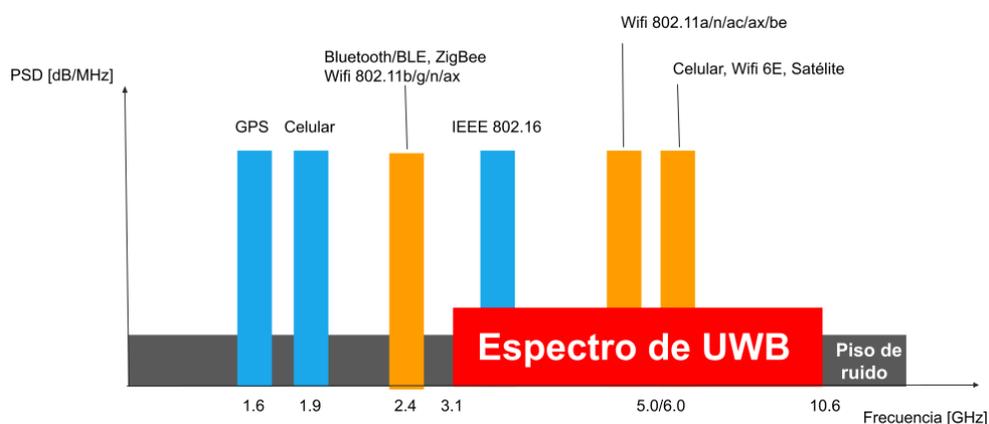
La combinación de estas capacidades hace de UWB una tecnología prometedora para complementar y, en algunos casos, superar las limitaciones de otras tecnologías inalámbricas en aplicaciones específicas, especialmente aquellas que requieren alta precisión en la determinación de distancias y posiciones.

### 2.4.1 Capa física

La capa física de UWB se distingue por su uso de señales de muy corta duración y amplio espectro de frecuencia, exactamente más de 500 MHz por canal de comunicaciones. Estas señales deben operar

dentro de la banda de frecuencia limitada de 3.1 a 10.6 GHz, con una densidad de potencia máxima de  $-41.3$  dBm/MHz (Coppens et al., 2022). Esta restricción de potencia es impulsada por entidades como la Comisión Federal de Comunicaciones (FCC) de los Estados Unidos y es crucial para minimizar la interferencia con otros sistemas de comunicación que operan en bandas de frecuencia adyacentes. La Figura 3 permite comparar visualmente UWB y otras tecnologías según el uso del espectro y densidad espectral de potencia.

Para hacer uso del espectro en UWB se definen canales de comunicación, estos canales se definen según una frecuencia central y un ancho de banda asignado. La Tabla 1 muestra los canales sobre los cuales puede trabajar un dispositivo con un transceptor UWB.



**Figura 3.** Espectro de tecnologías de comunicaciones inalámbricas populares

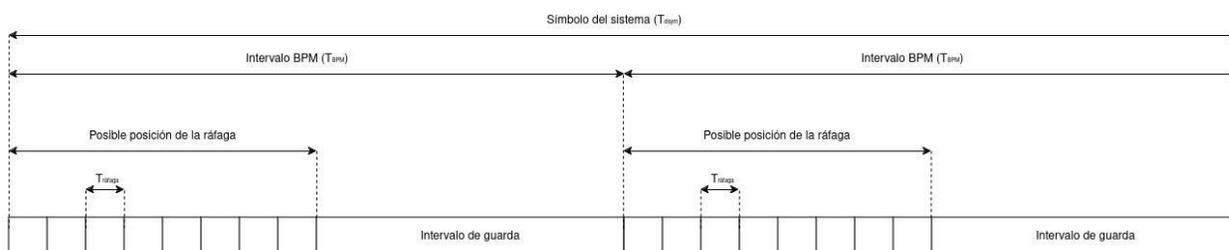
UWB utiliza ráfagas de pulsos extremadamente estrechos, típicamente de 2 nanosegundos de duración, para transmitir la información. Estos pulsos son codificados y dispersos a través del ancho de banda disponible. La naturaleza de estos pulsos cortos confiere a UWB ventajas como una alta resolución temporal que permite medir con precisión el tiempo de llegada de las señales (Villarreal-Reyes & Edwards, 2007).

Otras ventajas son la resistencia al desvanecimiento por multirayecto debido a que los pulsos cortos son menos susceptibles a la interferencia destructiva y la baja probabilidad de interceptación puesto que la baja densidad espectral de potencia hace que las señales UWB sean difíciles de detectar.

**Tabla 1.** Canales de operación UWB HRP.

<b>Número del canal</b>	<b>Frecuencia Central (MHz)</b>	<b>Ancho de banda (MHz)</b>
0	499.2	499.2
1	3494.4	499.2
2	3993.6	499.2
3	4992.8	499.2
4	5492	1331.2
5	4992.8	499.2
6	6988.8	499.2
7	6489.6	1081.6
8	7448.0	499.2
9	7987.2	499.2
10	8486.4	499.2
11	7987.4	1331.2
12	8985.6	499.2
13	9494.8	499.2
14	9984.0	499.2
15	9484.8	1354.97

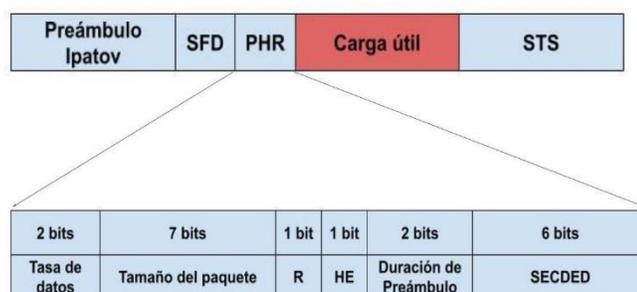
La Figura 4 muestra cómo la información es modulada combinando los esquemas de modulación por posicionamiento de la ráfaga (BPM, por sus siglas en inglés) y modulación por la polarización de los pulsos (BPSK, por sus siglas del inglés), donde tanto la posición de la ráfaga como la polarización de los pulsos que integran la ráfaga son utilizados para representar la información que se desea transmitir (Sedlacek et al., 2019).



**Figura 4.** Esquema de modulación de la información en IR-UWB

Entendiendo el esquema de la Figura 4 se puede agregar que en UWB, un bit se transmite utilizando un tren de pulsos y a velocidad a la que se envían estos pulsos es un parámetro del sistema UWB que se denomina Frecuencia de Repetición de Pulsos (PRF, por sus siglas en inglés).

La estructura de un paquete de información a nivel de capa física es como se muestra en la Figura 5, donde se puede observar que está integrada por un preámbulo, un delimitador de inicio de trama, un encabezado de capa física, la sección de carga útil de capa física y puede o no tener otro preámbulo llamado secuencia de marca de tiempo codificada cuya posición además es variable dentro de la trama (LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, 2020).



**Figura 5.** Estructura del paquete de capa física IEEE 802.15.4z

La secuencia de preámbulo Ipatov en UWB se construye a partir de un código ternario que utiliza un alfabeto de 1, 0 y -1, donde 1 representa un pulso positivo, -1 un pulso negativo y 0 la ausencia de pulso. Cada canal tiene un mínimo de dos códigos compatibles, elegidos para tener un bajo factor de correlación cruzada entre sí, lo que permite que múltiples dispositivos operen simultáneamente en el mismo canal sin interferencias. Este código se dispersa y el símbolo resultante se repite un número de veces, parámetro conocido como Repeticiones de Símbolo de Preámbulo (PSR, por sus siglas en inglés). Esta estructura del preámbulo es fundamental para la sincronización y la detección de señales en sistemas UWB,

contribuyendo a su robustez y eficiencia en entornos de comunicación complejos (Villarreal-Reyes et al., 2005).

Por otro lado, el delimitador de Inicio de trama (SFD, por sus siglas en inglés) en UWB señala el final del preámbulo y el comienzo preciso del cambio al encabezado de la capa física (PHR, por sus siglas en inglés). Este elemento es crucial para el marcado de tiempo, al momento de su recepción es usado para marcar la llegada de toda la trama y, por lo tanto, es esencial para el rendimiento en la medición de distancias. Estos códigos pueden ser de dos tipos un código corto con una longitud de 8 y un código largo con una longitud de 64, y no son más que símbolos de preámbulo. Además, el SFD indica al receptor que debe cambiar a la modulación BPM-BPSK para recibir los datos subsiguientes. El SFD mantiene la misma tasa base que el preámbulo Ipatov, contribuyendo así a la estructura robusta y flexible de los paquetes UWB, lo que permite una sincronización precisa y una detección eficiente de la señal en diversos escenarios de comunicación.

Como se observa en la Figura 5, luego de los campos mencionados sigue el de encabezado de la capa física en UWB se transmite a 850 kbps para todas las tasas de datos iguales o superiores a 850 kbps, y a 110 kbps para la tasa de datos de 110 kbps. Los bits de información se modulan mediante una combinación de modulación BPM-BPSK, donde BPM significa modulación por posición de ráfaga. El PHR contiene varios campos importantes: el campo de tasa de datos y el de la longitud de trama indican la velocidad de transmisión y la longitud del campo de carga útil de la capa física, este último cuenta con 7 bits permitiendo así hasta 128 bytes; el campo de *ranging* se establece en uno si la trama se utiliza para medición de distancias; el campo de Duración del Preámbulo representa la longitud en símbolos de preámbulo Ipatov; y el campo de corrección de error único y detección de doble de error (SECDED, por sus siglas en inglés) es un código de bloque Hamming simple que permite la corrección de un solo error y la detección de dos errores en el receptor. Esta estructura detallada del PHR proporciona la información necesaria para la decodificación correcta de los datos y el funcionamiento preciso del sistema UWB (Sedlacek et al., 2019).

Luego, el campo de carga útil de la capa física tras modular la información con los esquemas mencionados se transmite a la tasa de datos especificada en el encabezado de la capa física.

La secuencia de preámbulo Ipatov ofrece un grado limitado de seguridad a la comunicación UWB ya que a pesar de que es necesario que dos dispositivos que intenten comunicarse estén usando el mismo código de preámbulo Ipatov, el conjunto de códigos elegibles no es muy vasto, para mejorar este aspecto se introdujo el segmento de secuencia de marca de tiempo codificada (STS, por sus siglas en inglés) el cual es

básicamente una secuencia de pulsos generada utilizando el algoritmo AES-128, que se añade a la estructura de trama de la capa física UWB. Solo el receptor que conoce la semilla correcta podrá generar su propia secuencia, y la correlación cruzada con la secuencia recibida sin manipular superará un cierto umbral de coincidencia (Villarreal-Reyes & Edwards, 2008). Esta característica permite la estimación de la respuesta al impulso del canal (CIR, por sus siglas en inglés), que se utiliza para detectar ataques maliciosos y aumentar la integridad y precisión de las mediciones de distancia realizadas. La implementación del STS en la estructura de la trama UWB proporciona una capa adicional de seguridad y fiabilidad, crucial para aplicaciones que requieren alta precisión en la medición de distancias y resistencia a interferencias maliciosas.

#### 2.4.2 Capa MAC

La capa MAC es una de las dos subcapas que conforman la capa de enlace de datos del modelo OSI. Esta capa define protocolos que permiten que diferentes sistemas UWB utilicen el mismo canal.

La trama MAC llena la parte de carga útil de la trama PHY UWB y se compone de un encabezado, seguido de una carga útil de longitud variable, y finaliza con una secuencia de comprobación de trama (FCS, por sus siglas en inglés) basada en un control de redundancia cíclica (CRC, por sus siglas en inglés), utilizada para detectar errores de transmisión. El encabezado MAC, que se usa para identificar una trama, incluye varios componentes, como la dirección de destino, que se utiliza para filtrar las tramas dirigidas al receptor (LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society, 2020). La Figura 6 muestra la estructura de trama MAC comentada.

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	2 u 8 Bytes	2 Bytes	2 u 8 Bytes	variable	variable	2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	ID de red de destino	Dirección de destino	ID de red de fuente	Dirección de fuente	Encabezado de seguridad	Carga útil	FCS

**Figura 6.** Estructura de una trama de capa MAC

El campo de control de la trama es un campo de 16 bits que inicia todas las tramas IEEE 802.15.4/4z. Este campo tiene como propósito indicar el tipo de trama y cuáles componentes forman parte del encabezado MAC. El campo de control de la trama se compone de los siguientes subcampos:

- El campo tipo de trama define el tipo de trama utilizando 3 bits. Los posibles tipos de trama son: *beacon*, datos, reconocimiento, comando MAC, multipropósito y fragmento.
- El campo Seguridad habilitada indica si el campo de encabezado de seguridad auxiliar se utiliza en el encabezado MAC, utilizando 1 bit.
- El campo trama pendiente define si el remitente tiene más datos para el receptor.
- El campo solicitud de reconocimiento utiliza 1 bit para indicar si el receptor necesita reconocer la trama recibida.
- El campo de compresión del ID de la red utiliza 1 bit para indicar si la trama MAC contiene solo uno de los campos identificadores de red, aunque estén presentes las direcciones de origen y destino en la trama MAC.
- El campo modo de direccionamiento de destino indica la presencia y el tamaño de la dirección de destino utilizando 2 bits.
- El campo versión de la trama se usa para especificar el número de versión de la trama. Esto es necesario porque la trama fue modificada en la versión 2003 del estándar IEEE 802.15.4.
- El campo modo de direccionamiento de origen se utiliza para indicar la presencia y el tamaño de la dirección de origen, utilizando 2 bits.

Por las propiedades físicas de UWB, hay que analizar que esquemas de acceso múltiple pueden utilizarse para trabajar con esta tecnología. Aunque está establecido un formato de trama MAC para ser utilizado en los sistemas UWB, la falta de consenso sobre cuáles son los mejores esquemas de acceso múltiple para estos y la inexistencia de un estándar que cubra este aspecto han llevado a que se utilicen esquemas propietarios. Algunos proveedores de chips dejan la implementación de la capa MAC al sistema microprocesador del host que controla el chip mientras que las empresas que venden sistemas UWB completos implementan una capa MAC propietaria que no se divulga públicamente. Esto significa que la compatibilidad del esquema de acceso múltiple sólo es posible si los desarrolladores de sistemas UWB comparten el esquema que utilizan.

### 2.4.3 Evolución de la estandarización de UWB

La norma IEEE 802.15.4 fue desarrollada por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE, por sus siglas en inglés) que define las características de las redes inalámbricas de área personal de bajas tasas de transferencia de datos (LR WPANs, por sus siglas en inglés). Se diseñó para proporcionar una plataforma de comunicación de baja potencia y bajo costo, especialmente para dispositivos y sensores inalámbricos

con requisitos de energía limitados y para aplicaciones que contarían con una capacidad de intercambio de información menor a 250 kbps, un rango de comunicación relativamente corto (sobre los 70 metros) y configuraciones de red sencillas (soporta topologías de red de estrella, árbol o malla).

El estándar IEEE 802.15.4 define la capa física (PHY, por sus siglas en inglés) y la capa de acceso al medio (MAC) para las redes inalámbricas de área personal (WPANs, por sus siglas en inglés). Establece las especificaciones técnicas para la comunicación inalámbrica de bajas potencia y tasa de datos. Luego surge el estándar IEEE 802.15.4a el cual añadió soporte para comunicaciones UWB, permitiendo aplicaciones que requieren alta precisión de localización y transmisión de datos de alta velocidad. Esta fue la primera estandarización de UWB y permitió que UWB se comunique de forma no licenciada en el rango de frecuencia dado con una densidad espectral de potencia muy estricta de  $-41.3$  dBm / MHz, introduciendo la nueva capa física (PHY) de UWB en el estándar ya existente de WPAN para lograr una mejor eficiencia energética y una alta tasa de transferencia de datos (Karapistoli et al., 2010).

Como evolución del estándar mencionado anteriormente surge el IEEE 802.15.4z. El objetivo del nuevo estándar 4z es permitir una nueva clase de dispositivos que puedan ser utilizados para un acceso seguro basado en capacidades de localización. Las principales características de estos dispositivos son un consumo de energía ultra bajo e interoperabilidad entre fabricantes (Sedlacek et al., 2019). La idea es implementar un esquema básico de localización basado en el Tiempo de Vuelo de Ida y Vuelta con un tiempo de procesamiento fijo para la capa física de UWB de baja tasa de repetición de pulso (LRP, por sus siglas en inglés), como una enmienda al estándar original. Para lograrlo el estándar proporciona marcas de tiempo confiables y robustas para medir con precisión la distancia entre dispositivos.

Otra forma en la que este estándar aumenta la seguridad de aplicaciones que usan UWB es reduciendo el tiempo de las transmisiones en el aire mediante el aumento de las tasas de transmisión y de las tasas de repetición de pulsos. Estas modificaciones en la capa física de UWB también representan una mayor duración de la batería, una menor interferencia entre dispositivos y una ventana de tiempo más pequeña para posibles ataques (Coppens et al., 2022). En la Tabla 2 que se presenta a continuación se resumen algunas características de cada uno de estos estándares.

**Tabla 2.** Resumen de características claves de los estándares.

<b>Aspectos</b>	<b>IEEE 802.15.4</b>	<b>IEEE 802.15.4a</b>	<b>IEEE 802.15.4z</b>
Descripción	Es un estándar para comunicaciones inalámbricas de corto alcance	Primera estandarización de UWB	Incluye mejoras a la capa física de UWB. Define dos modos de operación: el de altas tasa de repetición de pulsos (HRP, por sus siglas del inglés) y el de bajas tasas de repetición de pulsos (LRP)
Rango de frecuencias	Permite operar en varias bandas de frecuencia incluyendo 868 MHz, 915 MHz y 2.4 GHz	Define 16 canales de operación que van desde los 250 MHz hasta los 10.162 GHz	Define 16 canales de operación que van desde los 250 MHz hasta los 10.162 GHz
Funciones de localización	No define funciones de localización	Soporta funciones de localización de alta precisión	Soporta funciones de localización de alta precisión
Tasas de transferencia de datos	Las velocidades de datos típicas van desde 20 kbps hasta los 250 kbps	Modos de operación con tasas de datos de 0.11, 0.85, 6.81 y 27.24 Mbps	Hasta 10 Mbps para LPR y hasta 27.24 Mbps para HRP

## 2.5 Conclusiones parciales

Como se ha podido observar actualmente se considera una gran variedad de tecnologías que son utilizadas para el establecimiento de redes inalámbricas de sensores, dentro de las cuales destaca UWB debido a su capacidad de operar al mismo tiempo con otras tecnologías inalámbricas sin causar interferencias, las buenas tasas de transmisión de datos que se pueden alcanzar y el buen desempeño de estos dispositivos cuando se enfrentan a escenarios propensos a ocasionar pérdidas por multitrayectorias.

Del análisis realizado en este capítulo se puede manifestar que a pesar de que las aplicaciones de WSN pueden adoptar diversas estrategias para controlar el acceso al medio, dadas las características de UWB como la baja densidad espectral de potencia que maneja debido a fuertes regulaciones, para su adopción en aplicaciones de WSN es necesario realizar un estudio de la literatura para luego hacer recomendaciones de diseño.

En cuanto a las técnicas de enrutamiento mencionadas es necesario destacar que cada método tiene sus ventajas y desventajas. Los métodos proactivos ofrecen baja latencia en la selección de rutas, pero requieren un mantenimiento constante. Los métodos reactivos son más eficientes en términos de recursos, pero pueden introducir retrasos. Las técnicas de *flooding* son simples y efectivas en redes dinámicas, pero pueden sobrecargar la red. La elección del método más adecuado dependerá de las características específicas de la red Ad hoc, como su tamaño, la movilidad de los nodos y los requisitos de la aplicación. Por lo tanto, es necesario realizar una evaluación de estas estrategias, en este caso mediante simulación para determinar cuál se ajusta más a las características del escenario, tecnologías y procedimientos que serán utilizadas en el sistema propuesto.

## Capítulo 3. Sistemas de localización en exteriores

---

En la era digital actual, los sistemas de localización se han convertido en una parte integral de nuestro entorno cotidiano. Estos varían ampliamente en su complejidad y aplicación, y han revolucionado la forma en que interactuamos con el mundo que nos rodea. Desde la navegación personal hasta la optimización de redes de sensores, la tecnología de localización desempeña un papel crucial en numerosos aspectos de la vida moderna.

La proliferación de estos dispositivos con capacidades de localización se debe, en gran medida, a la diversidad de sus aplicaciones y a los diferentes requisitos de rendimiento que cada una de ellas demanda. Por ejemplo, mientras que un sistema de navegación para automóviles requiere una precisión de varios metros, una aplicación industrial puede necesitar una exactitud milimétrica. Esta variabilidad en los requisitos ha impulsado el desarrollo de una amplia gama de tecnologías de localización, cada una adaptada a necesidades específicas.

La heterogeneidad de las tecnologías de localización es tal que se pueden clasificar en varios campos, algunas clasificaciones son:

- Infrarrojo
- Ultrasonido o Sonido audible
- Campo magnético
- Óptica y visión
- Radiofrecuencia (RF, por sus siglas del inglés)
- Sistemas híbridos

Cada categoría emplea principios físicos diferentes para determinar la ubicación, lo que resulta en soluciones adaptadas a distintos entornos y requisitos. Los sistemas híbridos, en particular, combinan múltiples tecnologías para superar las limitaciones individuales y ofrecer soluciones más robustas y versátiles.

Este trabajo se centra en los sistemas de posicionamiento basados en RF ya que tienen los beneficios de que su señal es capaz de penetrar paredes y obstáculos, lo que conduce a un área de cobertura más amplia, además de reutilizar infraestructuras de RF existentes, resultando en una reducción relativa de costos. En

las siguientes secciones, se abundará sobre las técnicas de mediciones de distancia, las tecnologías utilizadas en sistemas de posicionamiento y los algoritmos de localización más empleados por estos.

### 3.1 Técnicas para la determinación de distancia

Los sistemas de posicionamiento pueden clasificarse según las mediciones de señal y/o las técnicas que emplean. Estas clasificaciones se basan fundamentalmente en las propiedades de la señal, que consisten en parámetros geométricos como el ángulo, la velocidad de propagación y otras características de la señal utilizadas para medir la posición de un objeto mediante cálculos específicos. Aunque existen diversos métodos de medición de señales, las técnicas más prevalentes en la actualidad son: ángulo de llegada (AOA, por sus siglas en inglés), tiempo de llegada (TOA, por sus siglas en inglés), diferencia en el tiempo de llegada (TDOA, por sus siglas en inglés) e indicación de la intensidad de la señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés). Cada una de estas técnicas aprovecha diferentes propiedades de las señales para determinar la ubicación, ofreciendo ventajas y desafíos únicos dependiendo del entorno de aplicación y los requisitos de precisión (Kaur et al., 2019).

#### 3.1.1 Determinación del ángulo de arribo (AoA)

El método AoA se basa en calcular el ángulo y la distancia relativa entre dos o más puntos de referencia mediante la intersección de líneas de dirección entre estos puntos. Este cálculo se utiliza para estimar y determinar la posición de un transmisor, y la información obtenida se aplica en tareas de rastreo o navegación. Con el método AOA, es posible determinar una posición con pocos sensores, ya sea en un espacio bidimensional (2D) o tridimensional (3D). Sin embargo, este método requiere de hardware que tiende a ser complejo y costoso.

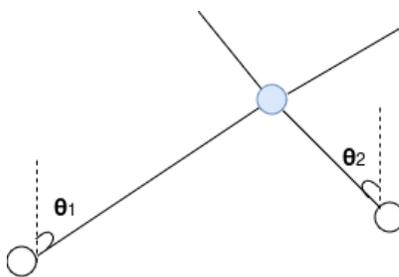
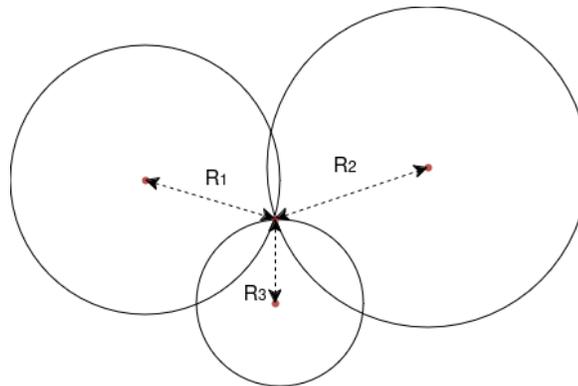


Figura 7. Cálculo de distancia mediante AoA

En la Figura 7 se ilustra como el método AoA utiliza los ángulos de arribo para resolver la posición de la fuente de señal. Dado que la estimación de AOA requiere que los anclajes estén equipados con grandes arreglos de antenas y un procesamiento de señales complicado, esta combinación convencional hace que la red de sensores inalámbricos (WSN) sea más compleja (Le et al., 2020).

### 3.1.2 Determinación del tiempo de arribo (ToA)

La determinación del tiempo de arribo (ToA, por sus siglas en inglés) es un método de localización basado principalmente en la distancia, a diferencia de la medición del ángulo de llegada (AOA) que se basa en ángulos. El ToA, también conocido como Tiempo de Vuelo (ToF), mide el tiempo que tarda una señal en llegar desde un transmisor fijo a un receptor, siendo el transmisor el punto de referencia (Zhao et al., 2021). Aunque el ToF considera el receptor como punto de referencia, ambos conceptos son esencialmente equivalentes, ya que el tiempo medido es el mismo.



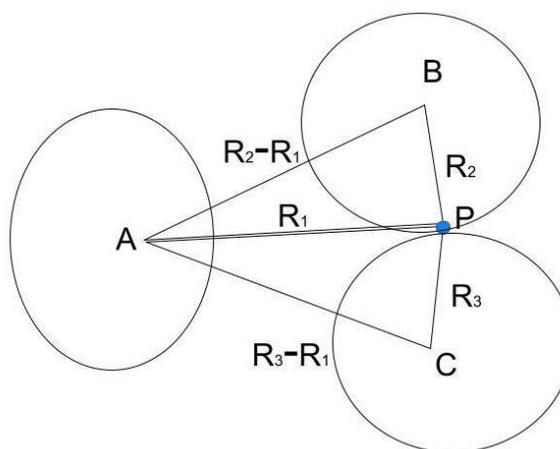
**Figura 8.** Cálculo de distancia mediante ToA

El ToA utiliza el tiempo absoluto de llegada al receptor, lo que permite calcular directamente la distancia entre el transmisor y el receptor, facilitando así la determinación de la posición como se puede observar en la Figura 8. Esta técnica ofrece una alta precisión, pero a costa de una mayor complejidad del hardware.

### 3.1.3 Determinación de la diferencia entre los tiempos de arribo (TDoA)

La determinación de la diferencia entre los tiempos de arribo (TDoA, por sus siglas en inglés) es una técnica de localización que, al igual que el ToA, se basa en la distancia. Este método se desarrolló para abordar la

limitación de complejidad de hardware asociada al ToA, logrando mantener un alto nivel de precisión. El TDoA determina la posición relativa de un transmisor móvil midiendo la diferencia en el tiempo de propagación de la señal entre el transmisor y múltiples puntos de referencia o sensores como se puede observar en la Figura 9. En esencia, el TDoA calcula la diferencia en los tiempos de llegada en dos sensores distintos, eliminando así la necesidad de conocer el momento exacto en que se transmitió la señal. Esta mejora respecto al ToA evita la necesidad de modificar el transmisor para medir el tiempo absoluto de llegada. A pesar de las muchas técnicas disponibles, es un desafío lograr la resolución de nanosegundos necesaria para una precisión de rango a nivel de centímetros en nodos de sensores de bajo costo y bajo consumo de energía (Vashistha & Law, 2021).



**Figura 9.** Cálculo de distancia mediante TDoA

### 3.1.4 La indicación de la fuerza de la señal recibida (RSSI)

La indicación de la fuerza de la señal recibida (RSSI, por sus siglas en inglés) es un parámetro fundamental en las comunicaciones inalámbricas y los sistemas de posicionamiento. A diferencia de las métricas basadas en ángulos o distancias, el RSSI mide el nivel de potencia de la señal recibida en una infraestructura de radio. Esta medida puede utilizarse para estimar la distancia entre dispositivos móviles, lo que la convierte en una herramienta valiosa para diversas aplicaciones.

El enfoque RSSI se basa en el principio de que las señales transmitidas experimentan una atenuación a medida que se propagan por el espacio. Al medir esta reducción o pérdida de la intensidad de la señal, es posible calcular la distancia aproximada entre el transmisor y el receptor. Cuanto mayor sea el valor de RSSI, mejor será la calidad de la señal, lo que indica una menor distancia entre los dispositivos.

Un sistema de localización basado en RSSI, es simple, de bajo costo, con bajo consumo de energía y no requiere hardware adicional. Sin embargo, la tecnología de localización basada en RSSI está fuertemente influenciada por el entorno, las estructuras y otras circunstancias, lo que puede provocar errores de posicionamiento. En estos espacios, donde es difícil obtener una línea de visión directa (LOS, por sus siglas en inglés) entre los dispositivos, la precisión del RSSI puede verse afectada significativamente. Fenómenos como la propagación multirrayecto y el efecto sombra pueden distorsionar las mediciones, lo que resulta en estimaciones de distancia menos precisas (Sinha & Ashwini, 2021).

## **3.2 Tecnologías de posicionamiento en exteriores**

Las tecnologías de posicionamiento en exteriores han experimentado un desarrollo significativo en las últimas décadas, ofreciendo una variedad de soluciones para la localización y seguimiento de personas y objetos. Entre estas tecnologías, los sistemas de posicionamiento por radiofrecuencia destacan por su versatilidad y eficacia. Estos sistemas utilizan señales e infraestructuras de RF para determinar la posición con fines de seguimiento y navegación. La diversidad de enfoques dentro de esta categoría incluye sistemas basados en detección de proximidad, medición de RSSI, AoA, ToF y TDoA. Cada método emplea técnicas de triangulación, trilateración o huella digital para calcular la posición. Además, los sistemas de posicionamiento RF se subdividen en tecnologías específicas como Bluetooth, UWB, WSN, WLAN, identificación por radiofrecuencia (RFID, por sus siglas del inglés) y el sistema de posicionamiento global (GPS, por sus siglas del inglés). Cada una de estas tecnologías presenta fortalezas y limitaciones únicas, que serán analizadas en detalle en las siguientes secciones de este capítulo, proporcionando una visión completa del panorama actual de las tecnologías de posicionamiento en exteriores.

### **3.2.1 Sistema de posicionamiento basado en GPS**

El GPS es una tecnología de navegación por satélite que proporciona información de ubicación y tiempo en cualquier condición climática, en cualquier parte del mundo, siempre que haya una línea de visión sin obstrucciones a cuatro o más satélites GPS. El posicionamiento ocurre mediante un proceso de trilateración. Los satélites GPS, que orbitan la Tierra a unos 20,200 km de altitud, transmiten señales con información sobre su posición y el tiempo exacto de transmisión. El receptor GPS en tierra captura estas señales de múltiples satélites y calcula la diferencia de tiempo entre la transmisión y la recepción. Conociendo la velocidad de propagación de las señales (la velocidad de la luz) y el tiempo de viaje, el

receptor puede determinar su distancia a cada satélite. Con al menos cuatro satélites, el receptor puede triangular su posición tridimensional (latitud, longitud y altitud) con gran precisión (Pallier et al., 2021).

El sistema GPS opera en la banda L del espectro electromagnético, específicamente en las frecuencias L1 (1575.42 MHz) y L2 (1227.60 MHz). Los satélites transmiten señales moduladas con códigos pseudoaleatorios únicos, lo que permite a los receptores distinguir entre diferentes satélites. La precisión del GPS estándar para usuarios civiles suele ser de unos 5 metros en condiciones óptimas, aunque puede variar según factores como la geometría de los satélites, las condiciones atmosféricas y la calidad del receptor. Los receptores GPS modernos a menudo incorporan tecnologías complementarias como Sistema de Aumentación de Área Amplia (WAAS, por sus siglas del inglés) o EGNOS en Europa, que pueden mejorar la precisión a menos de 3 metros. Además, técnicas avanzadas como el GPS diferencial (DGPS) o el GPS cinemático en tiempo real (RTK-GPS, por sus siglas del inglés) pueden lograr precisiones del orden de los centímetros, aunque generalmente requieren equipos más especializados y costosos. Una consideración importante para el uso de GPS en aplicaciones de WSN es el consumo de potencia que representa para un dispositivo tener encendido el receptor GPS, aproximadamente 100 mW, lo que lo hace poco recomendable para aplicaciones de este tipo especialmente cuando se necesita que la vida útil de los dispositivos sea lo más larga posible (Pallier et al., 2021).

### 3.2.2 Sistema de posicionamiento basado en Bluetooth

El sistema de posicionamiento basado en *Bluetooth* es una innovadora aplicación de esta tecnología inalámbrica, originalmente diseñada para el intercambio de datos a corta distancia y redes personales inalámbricas (WPAN). Este sistema utiliza sensores *Bluetooth* fijos, conectados a una red de área local (LAN), para localizar y rastrear objetos y personas dentro de edificios, proporcionando información de posición en tiempo real para usuarios de dispositivos de radio y teléfonos móviles. El funcionamiento se basa en la capacidad de los dispositivos *Bluetooth* de conectarse a estos sensores cuando están dentro de su alcance. Una vez establecida la conexión, el sensor comunica el ID del dispositivo a un servidor central a través de una WLAN. El servidor entonces calcula la posición del dispositivo y envía esta información a la aplicación que se ejecuta en el dispositivo móvil. En algunos casos, el cálculo de la posición también puede realizarse directamente en el dispositivo móvil, lo que mejora la privacidad del usuario.

Una de las principales ventajas de utilizar *Bluetooth* en sistemas de posicionamiento radica en su alta seguridad, bajo costo, bajo consumo de energía y tamaño reducido, lo que lo hace ideal para

implementaciones en interiores (Sun et al., 2021). Sin embargo, es importante señalar que el proceso de descubrimiento de dispositivos en los métodos de posicionamiento basados en *Bluetooth* es inherentemente lento. Esta limitación afecta significativamente el posicionamiento en tiempo real, la precisión y el rendimiento general del sistema. Como resultado, a pesar de sus ventajas, la tecnología *Bluetooth* puede no ser la opción más adecuada para aplicaciones que requieren un seguimiento y navegación de alta precisión y respuesta rápida. Esta desventaja ha llevado a los investigadores y desarrolladores a buscar soluciones para mejorar la velocidad de descubrimiento o a considerar tecnologías alternativas para casos de uso que demandan un posicionamiento más ágil y preciso.

### 3.2.3 Sistema de posicionamiento basado en RFID

El sistema de posicionamiento basado en identificación por radiofrecuencia (RFID, por sus siglas del inglés) es una tecnología de identificación automática que utiliza comunicación inalámbrica por radiofrecuencia entre lectores RFID y etiquetas RFID para fines de seguimiento. En este sistema, el lector RFID consulta y lee datos de las etiquetas, mientras que las etiquetas responden con la identificación única o la información almacenada en ellas. Las etiquetas RFID se clasifican en dos tipos: activas y pasivas. Las etiquetas activas son transceptores alimentados por baterías y, por lo tanto, tienen un rango de transmisión más amplio, lo que reduce el número de etiquetas necesarias para una instalación. Por otro lado, las etiquetas pasivas tienen un rango de transmisión más corto porque no utilizan batería; obtienen su energía de la señal del lector antes de poder responder con información (Landaluce et al., 2020).

Un sistema de posicionamiento basado en RFID utiliza el lector, las etiquetas y un servidor para el cálculo de la posición. Este sistema determina la posición, así como la orientación o estimación de la pose de una persona u objeto, utilizando un lector RFID a través de ondas de radio. En el sistema de posicionamiento activo, las etiquetas activas se montan dentro del edificio, mientras que el lector es móvil. Esta configuración permite una mayor flexibilidad y precisión en el seguimiento de objetos o personas en movimiento dentro de un espacio definido. La capacidad de las etiquetas activas para transmitir señales a mayores distancias facilita la cobertura de áreas más amplias con menos puntos de lectura, lo que puede resultar en una implementación más eficiente y económica en espacios grandes. Sin embargo, el uso de etiquetas activas también implica consideraciones adicionales, como la gestión de la vida útil de las baterías y el mantenimiento periódico de las etiquetas.

### 3.2.4 Sistema de posicionamiento basado en UWB

El sistema de posicionamiento basado en UWB tiene la ventaja de la robusta resistencia a los efectos de la falta de línea de visión directa (NLOS, por sus siglas del inglés) y la propagación multitrayecto que pueden estar presente durante la comunicación. Esto gracias al algoritmo analizador de impulsos del canal (CIA, por sus siglas en inglés) que se ejecuta en los transceptores UWB, el cual opera sobre la correlación acumulada de la secuencia de símbolos del preámbulo  $I_{patov}$  y/o la correlación acumulada de la secuencia de símbolos del campo STS. Este algoritmo hace posible determinar si la señal recibida es proveniente del haz principal de la transmisión o es una componente multitrayecto de la misma (Lakshmi et al., 2024).

Además, debido a su gran ancho de banda, UWB ha sido implementada en una variedad de aplicaciones y tecnologías de posicionamiento. Los sistemas de posicionamiento UWB se pueden clasificar en pasivos y activos. El sistema pasivo utiliza la reflexión de señales, sin necesidad de una etiqueta UWB adherida, para determinar la posición de una persona u objeto mediante el principio del radar. Cuando una persona se mueve dentro de una habitación con transmisores y receptores UWB instalados en posiciones conocidas, su cuerpo refleja las señales emitidas por los transmisores. Los receptores captan estas señales reflejadas y estiman la posición de la persona utilizando técnicas de tiempo de llegada (TOA), diferencia en el tiempo de llegada (TDOA) y trilateración.

Por otro lado, el sistema de posicionamiento UWB activo utiliza etiquetas UWB alimentadas por baterías. Este sistema consta de sensores UWB fijos, etiquetas UWB activas móviles, un controlador de software central y una WLAN. El sistema localiza y rastrea objetivos mediante la transmisión de pulsos UWB ultracortos desde las etiquetas activas a los sensores UWB fijos. Los sensores envían la información recopilada a través de WLAN a la plataforma de software, que analiza, calcula y muestra la posición de las etiquetas UWB en tiempo real. Comúnmente se emplea una WLAN que ofrezca al sistema ya sea el uso de una infraestructura de red existente o capacidad de transmisión de la información a grandes distancias. Pero las características de UWB mencionadas y otras como la flexibilidad de instalación, altas tasas de transmisión de datos, alto poder de penetración, bajo consumo de energía y poco efecto de interferencia permiten considerar que el sistema pueda estar formado por dispositivos que cuenten solamente con el transceptor UWB y aun así sea posible realizar las mediciones de distancia y enviar los datos recolectados hasta el sistema central de la aplicación. Además, el uso de más sensores UWB y su colocación estratégica puede resultar en una mayor área de cobertura, seguimiento en tiempo real, mejor precisión de posicionamiento y reducción del efecto de las degradaciones de la señal.

### 3.3 Algoritmos de posicionamiento

Los algoritmos de posicionamiento son componentes fundamentales en los sistemas de localización modernos, desempeñando un papel crucial en la determinación precisa de la ubicación de objetos o personas. Estos algoritmos son los encargados de traducir las propiedades de las señales registradas en distancias y ángulos, para luego calcular la posición real del objetivo. Por ejemplo, cuando se estima la distancia entre un objeto y puntos de referencia conocidos, el algoritmo procesa esta información para determinar la ubicación exacta del objeto en el espacio. La eficacia de estos algoritmos depende en gran medida de la precisión de los valores de las propiedades de la señal recopilados, ya que cualquier error en estos datos puede propagarse y afectar la exactitud del posicionamiento final.

Es importante destacar que cada algoritmo de posicionamiento tiene sus propias fortalezas y debilidades. Por esta razón, una estrategia común para mejorar la precisión y el rendimiento general del sistema es la implementación simultánea de múltiples tipos de algoritmos. Esta aproximación permite compensar las limitaciones individuales de cada método y aprovechar sus respectivas ventajas. Entre las principales técnicas algorítmicas utilizadas en el posicionamiento se encuentran la triangulación, la trilateración, la detección de proximidad y el análisis de escena o huella digital. Cada una de estas técnicas aplica diferentes propiedades de señal y principios matemáticos para calcular la posición, adaptándose a diversas condiciones y requisitos de los sistemas de localización. La elección y combinación adecuada de estos algoritmos es crucial para desarrollar sistemas de posicionamiento robustos y precisos en una amplia gama de aplicaciones y entornos.

#### 3.3.1 Triangulación

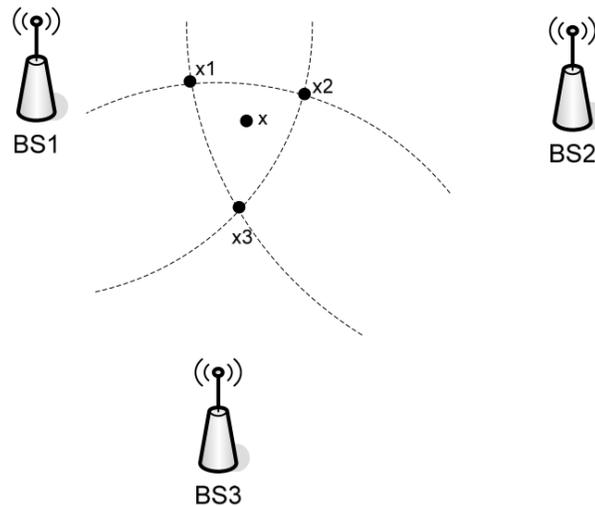
La triangulación, también conocida como angulación, es un método geométrico utilizado para determinar la posición de un objeto o punto desconocido utilizando las propiedades de los triángulos. Este algoritmo se basa en la medición de ángulos relativos a dos o más puntos de referencia conocidos. En esencia, la posición del objetivo se encuentra en la intersección de dos o más líneas de dirección angular, un proceso conocido como localización por dirección.

El método de posicionamiento basado en triangulación es una técnica ampliamente estudiada. Este método crea círculos centrados en los puntos de acceso, donde el radio de cada círculo se determina por la intensidad de la señal medida del dispositivo móvil, o el tiempo transcurrido en la transmisión de la

señal entre el punto de acceso y el dispositivo móvil. Surge un punto de intersección cuando hay tres o más puntos de acceso dentro de un cierto rango, y este punto de intersección proporciona la ubicación estimada del dispositivo móvil y es posible calcularlo matemáticamente mediante trigonometría.

En situaciones prácticas, especialmente cuando se trabaja en áreas de cobertura más amplias con múltiples puntos de referencia, la determinación de la posición puede contener errores que pueden disminuir la precisión. Estos errores pueden surgir debido a varios factores, como imprecisiones en la medición de los ángulos, interferencias en la señal, o incluso por la curvatura de la Tierra en distancias muy grandes. Por ejemplo, en la Figura 10, hay tres puntos de intersección. La estimación final de la posición del punto  $x$  será el promedio de las coordenadas de los puntos de intersección  $x_1$ ,  $x_2$  y  $x_3$ .

A pesar de estos posibles inconvenientes, la triangulación sigue siendo una técnica valiosa y ampliamente utilizada en diversos campos, desde la navegación y la topografía hasta la localización de dispositivos móviles y sistemas de posicionamiento global. La clave para maximizar su eficacia radica en la precisión de las mediciones angulares y en la correcta selección y distribución de los puntos de referencia.



**Figura 10.** Existencia de múltiples puntos de intersección usando triangulación (Wang et al., 2013)

### 3.3.2 Trilateración

La trilateración, al igual que la triangulación, utiliza las propiedades geométricas de los triángulos para estimar la posición de un objeto objetivo. Sin embargo, existe una diferencia fundamental en su enfoque.

Mientras que la triangulación se basa en mediciones angulares, la trilateración utiliza mediciones de distancia relativas a tres puntos de referencia conocidos para determinar la posición (Chen et al., 2023).

En el proceso de trilateración, se mide la distancia desde el objetivo a cada uno de los tres puntos de referencia. Estas mediciones crean tres esferas imaginarias, cada una con su centro en un punto de referencia y su radio igual a la distancia medida. La intersección de estas tres esferas proporciona la ubicación precisa del objeto objetivo. Es importante destacar que existe una variante llamada multilateración, que sigue un principio similar, pero utiliza cuatro o más puntos de referencia, lo que puede mejorar la precisión y la robustez del cálculo de posición.

La precisión de la trilateración depende en gran medida de la calidad de la señal recibida y de las condiciones ambientales. Factores como la interferencia electromagnética, obstáculos físicos, errores en la medición del tiempo de llegada de las señales, o incluso las condiciones atmosféricas pueden afectar la exactitud de las mediciones de distancia. Por lo tanto, para obtener resultados óptimos, es crucial contar con equipos de medición precisos y tener en cuenta las posibles fuentes de error en el entorno.

La trilateración tiene aplicaciones en diversos campos, siendo uno de los más notables el sistema de posicionamiento global. En el GPS, los satélites actúan como puntos de referencia, emitiendo señales que son captadas por los receptores en la Tierra. El receptor calcula su distancia a varios satélites y utiliza estos datos para determinar su posición mediante trilateración. Otros usos incluyen la localización de teléfonos móviles en redes celulares, sistemas de navegación en interiores, y aplicaciones en robótica y vehículos autónomos.

Pese a los desafíos que pueden surgir por las condiciones ambientales y la calidad de la señal, la trilateración sigue siendo un método robusto y ampliamente utilizado para determinar posiciones. Su eficacia, combinada con su relativa simplicidad conceptual, la convierte en una herramienta invaluable en nuestra era de tecnología de localización avanzada.

### 3.3.3 Proximidad

El algoritmo de proximidad es un método de localización que difiere significativamente de la triangulación y la trilateración. A diferencia de estos últimos, el algoritmo de proximidad no proporciona una estimación

absoluta o relativa de la posición. En su lugar, ofrece información de proximidad, indicando simplemente que un objeto está cerca de un punto de referencia conocido.

Para implementar este sistema, se utiliza una red de antenas o lectores con posiciones conocidas. Cuando un dispositivo móvil se detecta en movimiento, la antena más cercana se utiliza para calcular su posición aproximada. Sin embargo, si el dispositivo móvil es detectado por más de una antena, el sistema selecciona la antena que recibe la señal más fuerte para determinar la ubicación. Este enfoque se basa en la suposición de que la señal más fuerte probablemente proviene de la antena más cercana al dispositivo.

Una de las ventajas del algoritmo de proximidad es su versatilidad en cuanto a las tecnologías que puede utilizar. Se aplica comúnmente en sistemas que emplean infrarrojos, identificación por radiofrecuencia y *Bluetooth* (Buffi et al., 2021). Además, una característica atractiva de este método es que requiere poco esfuerzo de calibración en comparación con otros algoritmos de localización más complejos.

Sin embargo, el algoritmo de proximidad tiene sus limitaciones. Para lograr una cobertura amplia y confiable, es necesario desplegar una gran cantidad de lectores o antenas en el área de interés. Esta necesidad de una mayor distribución de lectores puede llevar a una mayor complejidad del sistema y a costos más elevados. La alta concentración de lectores no solo aumenta los gastos de implementación y mantenimiento, sino que también puede complicar la gestión y la integración del sistema.

La precisión del algoritmo de proximidad es generalmente menor que la de los métodos de triangulación o trilateración. Solo puede proporcionar una ubicación aproximada basada en la zona de cobertura de la antena más cercana o fuerte, en lugar de un punto preciso en el espacio.

A pesar de estas limitaciones, el algoritmo de proximidad sigue siendo útil en muchos escenarios, especialmente en entornos interiores donde las tecnologías como GPS no funcionan bien. Su simplicidad y facilidad de implementación lo hacen atractivo para aplicaciones como el seguimiento de inventario en almacenes, la localización de personal en hospitales o la navegación en centros comerciales. La elección entre este método y otros algoritmos de localización dependerá de los requisitos específicos de precisión, cobertura y costo de cada aplicación particular.

### 3.4 Conclusiones parciales

La revisión literaria realizada en este capítulo ha permitido identificar que existen una gran variedad de elementos que son considerados para el diseño de sistemas de localización en escenarios de exteriores actualmente. Por ejemplo, las soluciones basadas en el uso de radiofrecuencias son muy populares para sistemas de localización debido a la relativa independencia que presentan a obstáculos u oclusiones en el escenario de implementación. La elección de una técnica particular o la combinación de varias para la determinación de distancia entre dispositivos con capacidades de comunicación inalámbrica depende de factores como la infraestructura disponible, las condiciones ambientales, la precisión requerida y las limitaciones energéticas de los dispositivos involucrados. Dentro de las tecnologías inalámbricas usualmente implementadas destaca UWB, puesto que muestra una robusta resistencia a los efectos de la falta de línea de visión directa (NLOS, por sus siglas del inglés) y la propagación multitrayecto que pueden estar presente durante la determinación de distancias o la comunicación.

Por otro lado, fue posible observar que cada uno de los algoritmos para el cálculo de posicionamiento mencionados utiliza diferentes propiedades de señal y principios matemáticos para calcular la posición, adaptándose a diversas condiciones y requisitos de los sistemas de localización. La elección y combinación adecuada de estos algoritmos es crucial para desarrollar sistemas de posicionamiento robustos y precisos en una amplia gama de aplicaciones y entornos.

## Capítulo 4. Propuesta de MAC y *ranging*

---

En este capítulo se abordan las cuestiones de diseño del protocolo de acceso al medio que posibilitan el correcto desempeño de los dispositivos durante el proceso de *ranging*, así como la forma en que se resuelven los requerimientos que exige el escenario planteado, específicamente la técnica de acceso múltiple al canal radio, la arquitectura que se plantea y el funcionamiento del protocolo propuesto.

### 4.1 Características del escenario

La investigación realizada sustenta el diseño del sistema de localización para el escenario planteado el cual consiste, tal como se indica en el título de este trabajo de tesis, en un patio de contenedores, específicamente el área de almacenamiento donde se apilan los contenedores hasta su salida. Aspectos importantes para tener en cuenta son la capacidad de almacenamiento de un patio de contenedores, la cual depende del tamaño y la altura máxima de apilamiento permitida y la flexibilidad operativa, la cual está relacionada con la capacidad de manejar diferentes tipos de contenedores, como contenedores estándar, refrigerados, tanques y especiales.

Debido a la diversidad en las características del escenario para el presente trabajo se utiliza una aproximación que consiste en un patio de contenedores con un área de almacenamiento de 566.4 m de largo y 345.8 m de ancho aproximadamente, una capacidad de apilamiento de 6 contenedores por posición y un solo tipo de contenedor, tratándose de un contenedor estándar con dimensiones de 12.192 m de largo, 2.438 m de ancho y 2.591 m de altura.

Para los cálculos de cobertura dentro del escenario, hay que considerar una separación de 22 m entre grupos consecutivos de contenedores, y la existencia de calles de unos 9 m de ancho que permiten el acceso al transporte de carga. La Figura 11 ilustra la estructura física del escenario mencionado anteriormente.

Se plantea el escenario de manera tal que la señal UWB no atraviese las pilas de contenedores del patio de almacenamiento. Aquellos contenedores que encuentran línea de vista entre ellos y están dispuestos verticalmente pueden tener conectividad con hasta 6 nodos en su área de cobertura, como es posible apreciar en la Figura 11 donde el círculo azul que rodea al nodo número 3 engloba los demás nodos con

los que este interactúa necesitando un solo salto inalámbrico. El nodo número 95 corresponde al resumidero de información del sistema, este es el destino de todos los datos de los contenedores recopilados en la red.

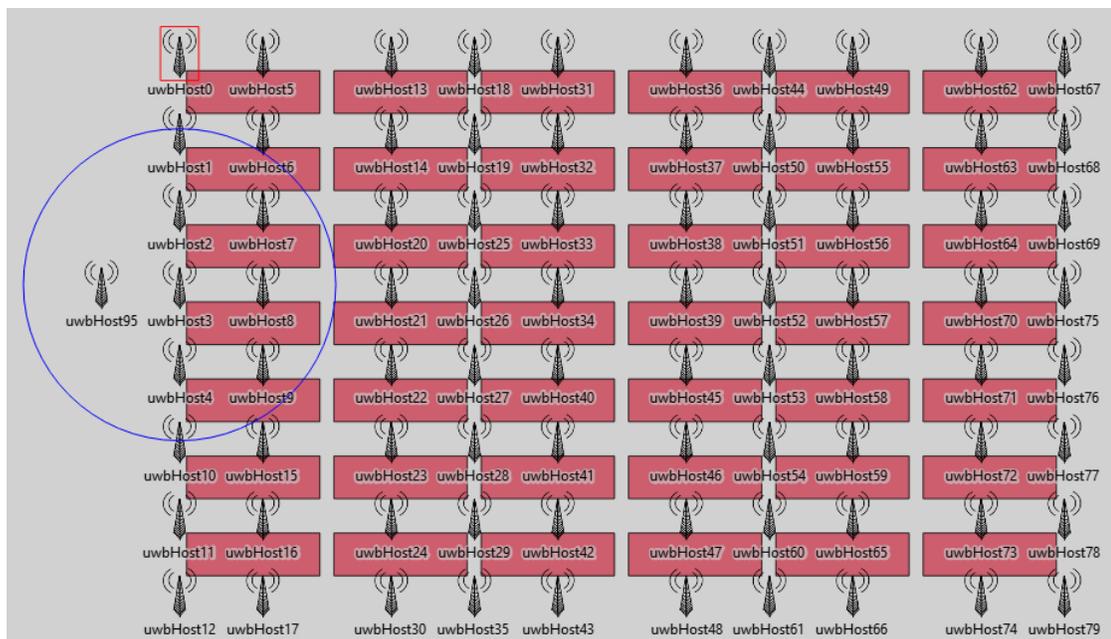
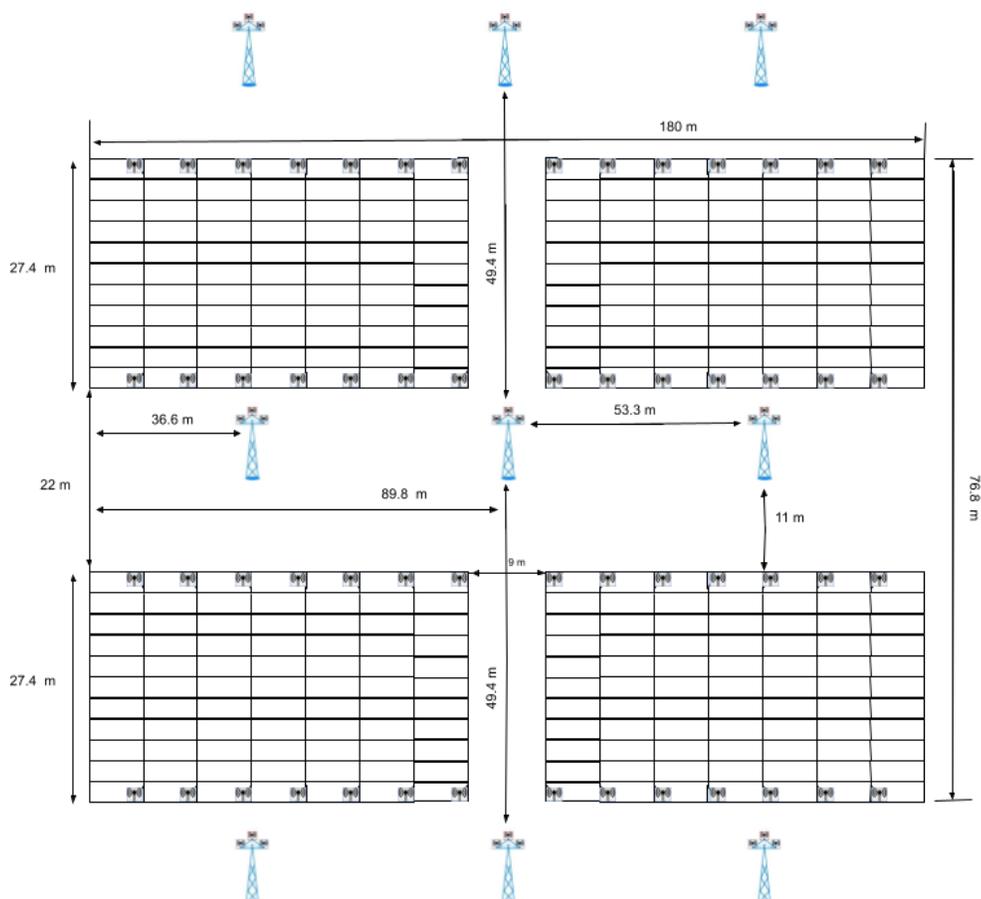


Figura 11. Disposición de los nodos en el escenario

## 4.2 Arquitectura y topología de red propuesta

Considerando el problema que se quiere resolver con esta tesis y las características del escenario planteado, se propone una topología de red basada en nodos tipo ancla con una posición fija y bien conocida, distribuidos por los pasillos y calles que conforman el área de almacenamiento de la terminal de contenedores. Estas anclas ofrecen cobertura inalámbrica a un conjunto de nodos colocados en las puertas de los contenedores.

La Figura 12 muestra la distribución de los nodos anclas que conforman la red, los cuales no son más que dispositivos de funcionalidad completa, lo que significa que se ven involucrados en tareas de enrutamiento de información y rutinas de control, mientras que los que se encuentran en los contenedores son dispositivos de funcionalidades reducidas. Estos últimos estarán conformados por el sistema de procesamiento seleccionado en el apartado 5.2, el módulo IEEE 802.15.4.z y el módulo de baterías.



**Figura 12.** Disposición geométrica de los nodos anclas en un segmento de la red

Por otro lado, los nodos tipo ancla estarán conectados a una línea de alimentación eléctrica y conformados por un arreglo de 3 dispositivos con el hardware mencionado para aportar las mediciones de distancia suficientes necesaria para localizar los contenedores. Para el diseño de estos nodos que conforman la infraestructura fija de la red se toma en cuenta las consideraciones adoptadas por Ge & Shen, (2022), quienes establecieron que para *ranging*, la distancia entre elementos del arreglo debería ser al menos el doble de la longitud de onda a la cual se está operando. La relación entre la distancia entre elementos del arreglo ( $L$ ) y la frecuencia de operación ( $f$ ) se puede obtener aplicando la fórmula siguiente:

$$L(m) = \frac{2 \times c}{f} \quad (1)$$

Aplicando (1) y teniendo en cuenta que de los dos canales de comunicaciones en los que opera la red, el canal 5 es el que maneja señales con mayor longitud de onda se considera la frecuencia 5990.4 MHz para

el diseño del arreglo. De esta manera se obtiene que los elementos del arreglo deben estar separados al menos 10 cm, uno de otro.

Con la distribución de nodos planteada se propone una topología tipo malla, donde el flujo de información hacia el sistema central puede tener varias rutas a través de la red. Para lograr esta topología se distribuyeron los nodos de manera que solo los que están dispuestos consecutivamente estén en rango de comunicación. Por otro lado, según Laadung et al., (2022) para que las rutinas de *ranging* sean efectivas en exteriores debe existir una distancia de aproximadamente de 30 metros entre dispositivos. Atendiendo las consideraciones anteriores se diseñó la disposición de elementos en el escenario que se muestra en la Figura 12. Se considera una capacidad de agrupación de contenedores tal que los arreglos de estos puedan estar formados por 11 contenedores de largo y 7 contenedores de ancho, asumiendo además la posibilidad de apilar hasta 6 contenedores en cada posición.

### **4.3 Actividades de *ranging***

Una parte fundamental del sistema de posicionamiento de contenedores al que se desea contribuir con este trabajo es la relacionada con la determinación de distancia entre dispositivos con transceptores IEEE 802.15.4z. Por esa razón, en este apartado se define la técnica de *ranging* que se propone realizar y el algoritmo de posicionamiento que debe ejecutarse en el sistema central de la aplicación.

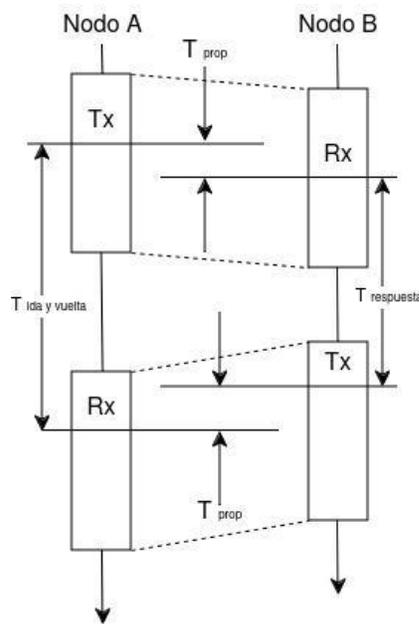
#### **4.3.1 Selección de la técnica de ranging a utilizar**

Fue elegida la técnica de medición de distancia basada en los valores de tiempo de arribo de las señales (ToA, por sus siglas del inglés, *Time of Arrival*). Se tomó esa decisión puesto que, en primer lugar, la técnica ToA ofrece un equilibrio favorable entre precisión y complejidad de implementación. A diferencia de la técnica de ángulo de arribo (AoA, por sus siglas del inglés, *Angle of Arrival*) que requiere que los dispositivos tengan múltiples antenas para poder detectar el ángulo de incidencia de la radiación, ToA puede funcionar con una configuración de antena única más simple.

Por otro lado, aunque la técnica diferencia entre arribos (TDoA, por sus siglas del inglés, *Time Difference of Arrival*), puede ofrecer una alta precisión, especialmente en sistemas de banda ultra ancha (UWB, por sus siglas del inglés), presenta desafíos significativos en cuanto a sincronización. Para lograr mediciones

con resolución de centímetros, TDoA en UWB requiere una sincronía de picosegundos entre los relojes de los transceptores de los dispositivos. Esta necesidad de sincronización tan precisa añade una complejidad considerable al sistema, lo que puede hacerlo menos práctico para muchas aplicaciones.

Finalmente, en comparación con la técnica que utiliza indicadores de intensidad de la señal recibida (RSSI, por sus siglas del inglés), ToA proporciona mediciones de distancia más precisas y confiables. Esto debido a que la técnica que utiliza RSSI es susceptible a variaciones debido a factores ambientales y obstáculos, lo que puede afectar significativamente la precisión de las mediciones de distancia. ToA, al basarse en el tiempo de propagación de la señal, es menos susceptible a estas variaciones y, por lo tanto, ofrece resultados más consistentes en diversos entornos.



**Figura 13.** Intercambio de mensajes durante la ejecución de la técnica TWR

Específicamente se plantea una técnica popularmente empleada por los sistemas UWB conocida como determinación de distancia en dos sentidos (TWR, por sus siglas del inglés, *Two-Way Ranging*). Esta técnica funciona mediante el intercambio de paquetes entre dos dispositivos: un iniciador envía un paquete a un respondedor, que a su vez devuelve una respuesta. El iniciador mide el tiempo total de este viaje de ida y vuelta de los mensajes, y utiliza esta información para calcular la distancia entre ambos. En la Figura 13 se muestra un esquema que representa los tiempos necesarios para el cálculo de distancia y la posición que ocupan en una línea de tiempo del intercambio de mensajes entre dispositivos.

La fórmula básica considera el tiempo total, resta el retardo de procesamiento y utiliza la velocidad de la luz ( $c$ ) para determinar la distancia, como se indica en las ecuaciones siguientes:

$$t_{prop}(s) = \frac{T_{ida\ y\ vuelta} - T_{respuesta}}{2c} \quad (2)$$

$$D(m) = \frac{c}{t_{prop}} \quad (3)$$

La Tabla 3 muestra una comparación entre las técnicas mencionadas, de donde se induce que TWR tiene menores requerimientos respecto a hardware y complejidad computacional además de una excelente precisión en las mediciones de distancia lo cual motiva su adopción en este proyecto.

**Tabla 3.** Comparación entre varias técnicas para las mediciones de distancia

Técnica	AoA	TDoA	RSSI	TWR
Múltiples antenas	Requerido	No Requerido	No Requerido	No Requerido
Sincronización precisa	No Requerido	Requerido	No Requerido	No Requerido
Precisión de las mediciones	Muy Buena	Muy Buena	Buena	Muy Buena

#### 4.3.2 Algoritmo de cálculo de posicionamiento a utilizar

Una vez seleccionada la técnica de *ranging* se procedió a elegir el algoritmo de cálculo de posicionamiento por trilateración sobre otros como triangulación y proximidad debido a su eficacia y precisión en la determinación de la ubicación de un objeto o dispositivo. La trilateración utiliza las distancias medidas desde tres o más puntos de referencia conocidos para calcular la posición exacta del objetivo. Este método es particularmente ventajoso cuando se combina con técnicas de medición de distancia precisas como ToA. A diferencia de la triangulación, que requiere información angular y puede ser más susceptible a errores en entornos con obstáculos, la trilateración se basa únicamente en distancias, lo que la hace más robusta y versátil en diversos escenarios. Además, en comparación con los métodos de proximidad, que solo proporcionan una estimación aproximada basada en la cercanía a un punto de referencia, la trilateración ofrece una localización mucho más precisa y cuantificable. Esta combinación de precisión,

versatilidad y compatibilidad con sistemas de medición de distancia avanzados como GPS, hace de la trilateración la opción preferida para muchas aplicaciones de posicionamiento de alta precisión.

#### **4.4 Diseño del protocolo de control de acceso al medio (MAC)**

Una vez definidas las técnicas y algoritmos para el *ranging*, es necesario determinar la forma en que los dispositivos accederán al espectro electromagnético para que las comunicaciones se desarrollen de manera eficaz y eficiente durante la operación del sistema. En los apartados siguientes se determina que técnica de acceso al medio se ajusta más a las características de un sistema de comunicaciones basado en UWB y se presenta el protocolo de control de acceso al medio diseñado sobre la base de esa elección.

##### **4.4.1 Selección de la técnica de acceso al medio**

De acuerdo con la revisión de literatura realizada, aunque para la versión del estándar que se emplea en este trabajo (IEEE 802.15.4z) las estructuras de trama MAC están estandarizadas, la implementación del esquema de acceso múltiple y la técnica de localización es en su mayoría propietaria. Sin embargo, los proveedores de chips, como Qorvo y NXP, dejan la implementación de la capa MAC y la técnica de localización al sistema de microprocesador que controla el chip. Lo comentado anteriormente conduce a que para el desarrollo de este trabajo de tesis es necesario incorporar un mecanismo de acceso al medio que permita el intercambio eficiente de información cuidando puntos clave como la escalabilidad y bajo consumo de energía.

Para las transmisiones UWB, el enfoque tradicional de acceso múltiple por sensado de portadora y evasión de colisiones (CSMA/CA, por sus siglas en inglés) en el estándar IEEE 802.15.4 no es utilizable, puesto que no es muy factible la detección de portadora en una señal UWB debido a que como se observa en la investigación de Kok et al., (2015) la baja potencia de transmisión de la señal UWB (regularmente -40 dBm) se encuentra incluso por debajo del nivel de ruido de fondo. Por otro lado, en la actualización del estándar (IEEE 802.15.4a) no se descarta la utilización de una variante CSMA/CA que utiliza ranuras de tiempo para su funcionamiento, esto como una opción para abordar escenarios de alta densidad de nodos y alto tráfico como menciona Karapistoli et al., (2010) en su revisión de la versión del estándar mencionado. Estos autores en su revisión también destacan que el estándar IEEE 802.15.4a considera el uso del protocolo Aloha. Este protocolo transmite datos con un retardo aleatorio tan pronto como los datos están

disponibles. Esta decisión se basó en la robustez frente a interferencias multiusuario (MUI, por sus siglas en inglés, *Multiple users interference*) garantizada por la capa física de UWB, lo que permite que el enfoque Aloha proporcione un rendimiento satisfactorio en redes medianas y ligeramente cargadas, evitando el retraso adicional de acceso debido a la fase de evitación de colisiones de CSMA/CA. Pero trabajos como los realizados por Tiemann et al., (2016) comentan que el enfoque de Aloha no es un enfoque escalable, ya que la presencia de múltiples nodos en el escenario resultará en fallos debido a las colisiones de paquetes, de acuerdo con la utilización máxima del canal que ofrece este protocolo la cual es igual a 0.186, lo que significa que solo el 18,6% del tiempo puede ser utilizado para comunicaciones exitosas y libres de colisiones.

Por otro lado, Ridolfi et al., (2018) demostraron que con la técnica de localización diferencia de tiempo de arribo (TDoA, por sus siglas en inglés), el mecanismo de acceso múltiple por división de tiempo (TDMA, por sus siglas en inglés) y paquetes cortos, UWB es capaz de acomodar recursos para miles de usuarios por segundo, lo que constituye una solución altamente escalable en cuestiones de localización. De igual forma, Legrand et al., (2003) y Tiemann et al., (2019) utilizan TDMA en sus propuestas de manera que cada nodo recibe un intervalo de tiempo dedicado en el que tiene derechos de acceso exclusivos para realizar una secuencia de localización con los nodos ancla, lo que elimina la posibilidad de una colisión.

Las cuestiones claves que condujeron a la elección de TDMA como la base del protocolo de acceso múltiple diseñado para el sistema de localización de contenedores, objetivo de estudio de este trabajo de tesis, fueron: lo poco viable que se vuelve aplicar la técnica CSMA/CA debido a la baja densidad espectral de potencia que maneja UWB en sus transmisiones y el pésimo desempeño de Aloha en escenarios de alta densidad de dispositivos que necesitan acceder al medio. Además, la posibilidad que ofrece TDMA de realizar las rutinas de determinación de distancia y comunicaciones con un muy bajo riesgo de colisiones, hace que esta técnica sea prometedora para alcanzar un buen desempeño en el funcionamiento del sistema.

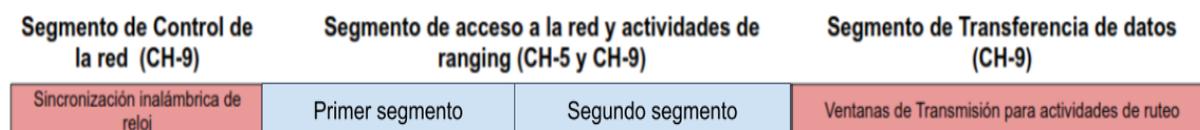
#### 4.4.2 Propuesta de protocolo para el control de acceso al medio

Una vez seleccionada la técnica de acceso al medio, se comentarán las características del protocolo de capa MAC propuesto. Este se trata de un protocolo híbrido basado en TDMA donde los dispositivos que acceden al medio para transmitir lo hacen en un instante de tiempo preasignado asegurando que no ocurran colisiones entre transmisiones de diferentes dispositivos.

Para formular el protocolo es necesario contar con una referencia de tiempo global entre los nodos de la red y la conformación de una super trama para garantizar el acceso al medio de los participantes de la comunicación. Este protocolo se clasifica como híbrido porque incluye una etapa donde los dispositivos que están entrando a la red solicitan formar parte de esta durante un período de acceso basado en contención y existe otros momentos durante el funcionamiento de la red donde los dispositivos tienen garantizados los derechos de transmitir sin peligro de colisiones con las transmisiones de los demás integrantes de la red.

#### 4.4.2.1 Supertrama diseñada para el control de acceso al medio

El protocolo para el control de acceso al medio que se diseñó tiene sus bases en la definición de una supertrama la que determina el comportamiento de los nodos de la red en cada una de las etapas de operación del sistema. La estructura de esta supertrama es indicada en la Figura 14.



**Figura 14.** Estructura de la supertrama y duración de sus segmentos

Luego en la Figura 15 puede observarse la composición de un segmento utilizado para el acceso a la red y las actividades de ranging dentro de la supertrama, la cual está compuesta por un intervalo de sincronización, un período de contención en el que se lleva a cabo el proceso de acceso de los nuevos dispositivos a la red y un período en el cual tiene lugar el intercambio de mensajes que resulta en la determinación de la distancia a la que se encuentra el dispositivo colocado en un contenedor.



**Figura 15.** Estructura de un segmento de acceso a la red

La duración y procedimientos por realizar en cada segmento de la supertrama serán explicados en los apartados siguientes.

### 4.4.3 Funcionamiento del protocolo

El sistema de posicionamiento para contenedores planteado basa su funcionamiento en un proceso de asociación realizado a la entrada del contenedor al patio de almacenamiento. Este proceso consiste en aprovechar el sistema tradicional de identificación de contenedores para la posterior identificación inalámbrica del contenedor.

Para lograr la interoperabilidad entre dispositivos se utilizan direcciones únicas para identificar sus interfaces de red. Las direcciones consisten en un identificador único extendido de 64 bits (EUI-64, por sus siglas del inglés) son ampliamente utilizados para la identificación de interfaces de red y otros dispositivos electrónicos en diversos protocolos de comunicación. Estas direcciones se caracterizan por su longitud de 64 bits (8 bytes) y se expresan generalmente en notación hexadecimal, dividida en 8 grupos de 2 dígitos hexadecimales separados por guiones. El estándar IEEE 802-2014, define el formato y uso de direcciones EUI-64, la estructura de estas se divide en dos partes principales: los 24 bits iniciales, que constituyen el Identificador de Organización Único (OUI, por sus siglas del inglés), y los 40 bits restantes, que forman el identificador de extensión asignado por el fabricante (*IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture*, 2014).

El proceso de solicitud y asignación de estas direcciones comienza con la petición de un OUI la Autoridad de Registro de IEEE (IEEE-RA, por sus siglas del inglés) por parte de las organizaciones interesadas. Esta solicitud implica el pago de una tarifa y la provisión de información sobre la empresa y el uso previsto del OUI. Una vez aprobada la solicitud, el IEEE-RA asigna un OUI único de 24 bits a la organización, que luego se utiliza como base para generar las direcciones EUI-64 completas. La organización tiene la responsabilidad de asignar los 40 bits restantes a sus dispositivos, asegurándose de que cada combinación sea única dentro de su espacio de direcciones. Debido a su naturaleza única y persistente, las direcciones EUI-64 pueden plantear problemas de privacidad. Por eso, algunos sistemas implementan mecanismos para generar identificadores temporales o aleatorios basados en EUI-64, especialmente en contextos de redes públicas, para proteger la privacidad de usuarios y dispositivos.

El proceso de asociación involucra llevar un registro en el sistema central de la aplicación que relacione el código identificador del contenedor que está entrando por primera vez al patio de contenedores con la dirección EUI-64 del dispositivo inalámbrico UWB que se adhiere al contenedor como requerimiento para poder ser localizado en un área bajo la cobertura de un nodo de la infraestructura fija de la red. De esta

manera al recibir información del dispositivo inalámbrico se traduce como información relativa del contenedor asociado.

#### 4.4.3.1 Sincronización global

La supertrama inicia con un período de sincronización que consiste en la propagación del reloj de tiempo real (RTC, por sus siglas del inglés, *Real-Time Clock*) del sistema central por toda la red, consiguiendo así una referencia de tiempo global. Para ello se propone un acercamiento similar al de (Zhang et al., 2024) donde establecen niveles de jerarquía entre los nodos ancla para evitar que durante la retransmisión de los valores de reloj del sistema ocurra colisión de paquetes.



Figura 16. Propagación del valor de reloj global

Una vez asignada la jerarquía, de forma tal que dispositivos con el nivel jerárquico más bajo no retransmitan la información, se programa una demora de retransmisión en los dispositivos para evitar colisiones durante la transmisión. Durante este período de demora de retransmisión (abreviado DR) el nodo actualiza su valor de RTC para que no pierda validez. El valor de DR será definido en apartados posteriores. En la Figura 16 se señala a los dispositivos de mayor jerarquía con un rectángulo verde y

además se muestra los valores en unidades de DR en los que cada dispositivo tiene permitido realizar la retransmisión de la información de sincronización tomando como referencia el instante en que el sistema central transmite su valor de RTC. El mecanismo está diseñado para tener una duración máxima de dieciocho veces un período DR o sea, la última retransmisión tendrá lugar 18 unidades de DR después de la primera transmisión. Siguiendo el proceso mencionado, una vez que el sistema central (uwbHost95) transmite su valor de RTC y es recibido por los dispositivos en su rango de comunicaciones (uwbHost2, uwbHost3 y uwbHost4) estos últimos transmiten el valor de RTC actualizado 3 unidades de DR después de recibirlo para el caso de uwbHost3 y 4 unidades de DR después en caso de uwbHost2 y uwbHost4. De esta manera, aunque las transmisiones de uwbHost2 y uwbHost4 coinciden temporalmente no existe colisión ya que los rangos de transmisión no coinciden si se toma como referencia el punto de vista del receptor, por ejemplo, uwbHost7 no se encuentra en rango de transmisión de uwbHost4 por lo que actualizará su RTC con la información recibida desde uwbHost2 solamente.

#### 4.4.3.2 Áreas de cobertura para actividades de ranging

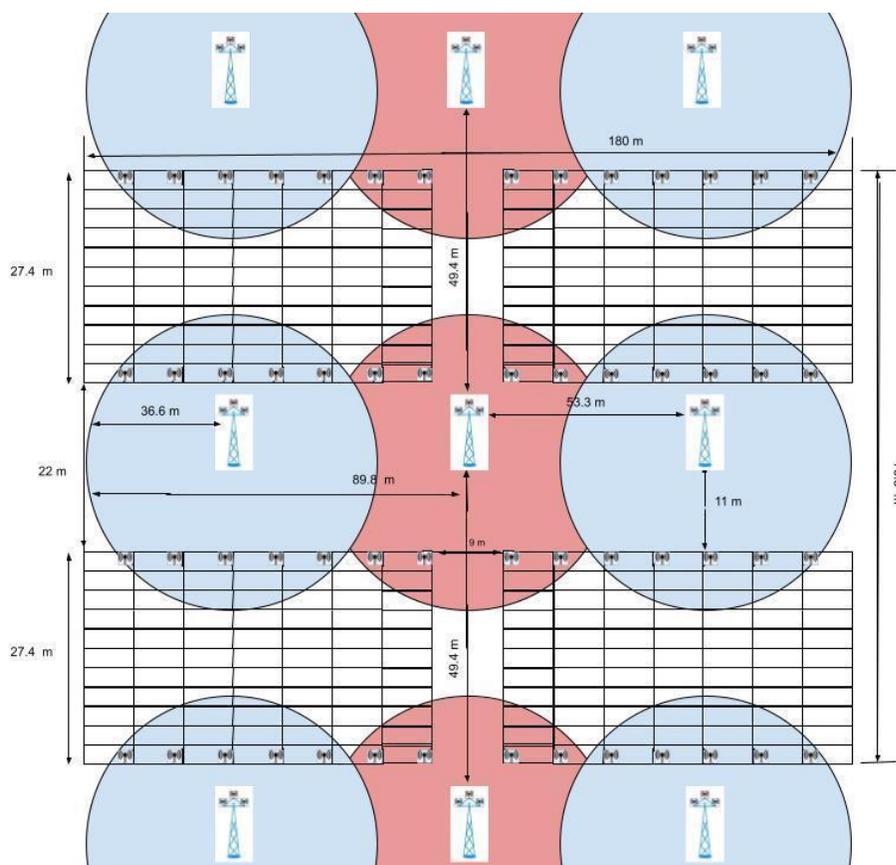
El protocolo diseñado define que para esta etapa la red estará operando en dos canales de comunicaciones de UWB, el canal 5 y el canal 9, ambos con un ancho de banda de 499.2 MHz. Esto para que zonas de cobertura consecutivas puedan trabajar a la vez sin peligro de que interfieran una con la otra. En la Tabla 4 se puede observar la ocupación espectral de los canales empleados.

**Tabla 4.** Ocupación espectral de los canales 5 y 9

Canal	Frecuencia Inicial (MHz)	Frecuencia Central (MHz)	Frecuencia Final (MHz)
5	5990.4	6489.6	6988.8
9	7488	7987.2	8486.4

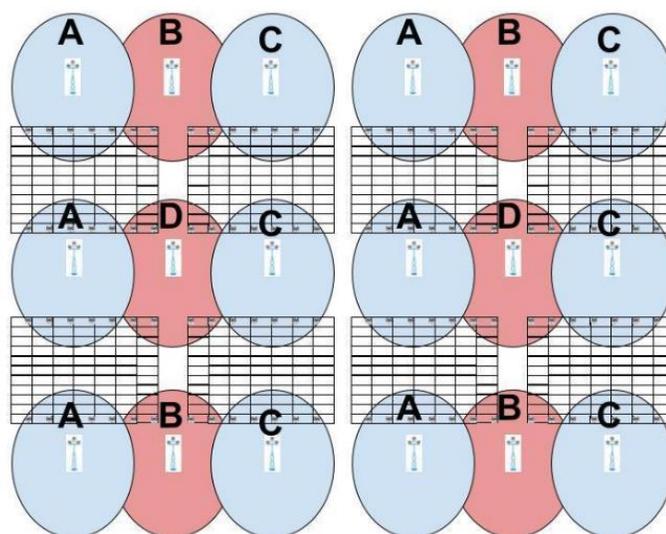
La Figura 17 muestra cómo se logra la separación espectral de las zonas de cobertura inalámbrica, siendo las zonas pintadas de azul zonas que operan sobre el canal de operación 5 y las pintadas de rojo son las que usan el canal 9.

Aun así, existe posibilidad de ocurrencia de colisiones entre dispositivos operando en el canal 9 y entre nodos trabajando en el canal 5 luego de que se expande el segmento de red representado en la Figura 17 para completar el diseño sobre todo el escenario planteado. Por eso se definió una separación temporal en la operación de estos dispositivos que todavía pueden provocar colisiones de información.



**Figura 17.** Separación espectral de las áreas de operación de ranging

La Figura 18 ilustra cómo se implementó la separación temporal, zonas etiquetadas como A y B coincidirán en tiempo, de la misma forma las zonas D y C también compartirán el medio de transmisión temporalmente, en ambos casos es posible gracias a que estas están usando canales diferentes. La operación de estos pares no será simultánea, A y B realizan sus actividades durante un segmento de tiempo y luego proceden C y D. La duración de estos períodos se analizará en los apartados siguientes.



**Figura 18.** Segmento de red luego de aplicar separación temporal en áreas de cobertura operando en el mismo canal

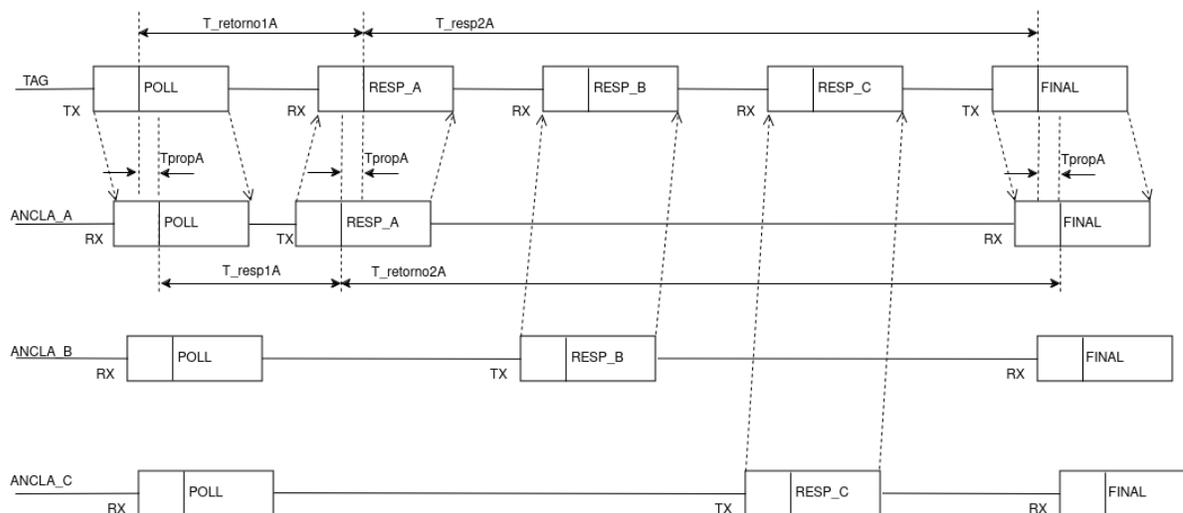
#### 4.4.3.3 Proceso de acceso a la red

Para el acceso a la red se diseñó una etapa donde los nodos (contenedores) que están ingresando por primera vez a la red o se encontraban en el área de cobertura de otra ancla, tienen la oportunidad de solicitar unirse a ésta. Dicho proceso tiene lugar después de que el ancla que ofrece servicio a la zona donde se encuentra el nodo en cuestión envía los mensajes de *beacon* para la sincronización local. Es en este momento que se cuenta con un período donde estos nodos que quieren ingresar a la red contendrán por el acceso al medio de manera aleatoria para enviar sus mensajes de solicitud de acceso a la red.

Luego de enviar su solicitud, estos nodos recibirán una respuesta de parte del dispositivo ancla en correspondencia con la capacidad de éste para aceptar más nodos. Estos mensajes incluyen el estado del proceso de asociación (asociación efectiva, asociación pendiente y asociación denegada) y la dirección que le fue otorgada al nodo. La dirección local asignada al nodo en el contenedor le indica el intervalo de tiempo en el que puede participar en las actividades de *ranging* sin peligro de colisiones con transmisiones de nodos bajo la misma área de cobertura. La Figura 19 muestra un diagrama de flujo del procedimiento que debe seguir un nodo incrustado a un contenedor para asociarse al nodo ancla dando servicio en el área donde se encuentra.



obtener el valor de distancia del *tag* respecto a tres referencias intercambiando solamente 5 mensajes, que en el caso de una rutina DS-TWR convencional sería necesario intercambiar 9 mensajes para conseguirlo.



**Figura 20.** DS-TWR optimizada

La Figura 20 muestra el procedimiento utilizado, siendo posible observar cómo el dispositivo colocado en el contenedor envía un mensaje de solicitud a todos los dispositivos en el ancla y espera una respuesta de cada uno de ellos para posteriormente enviar un mensaje final con las mediciones de tiempo necesarias para que cada integrante del ancla calcule la distancia relativa al *tag*. La duración de este procedimiento y de toda la etapa de *ranging* se determinará en apartados siguientes luego de analizar los formatos de paquetes requeridos para su funcionamiento.

#### 4.4.4 Estructura de los paquetes del protocolo de acceso al medio

Para el funcionamiento del sistema se diseñaron varios tipos de paquete dependiendo de las actividades que se estarían realizando. Respecto a la capa física se propone emplear dos estructuras de paquete diferente, una para ser utilizada durante el *ranging* y el acceso a la red, y otra para el intercambio de información entre nodos ancla. El paquete de capa física según el estándar IEEE 802.15.4z tiene la forma básica mostrada en la Figura 21 cuyos campos fueron explicados en la sección 2.4.1.



Figura 21. Estructura básica de un paquete de capa física

Partiendo de la figura anterior, para conseguir dos estructuras diferentes se modificó el encabezado de capa física (PHR, por sus siglas del inglés, *Physical Layer Header*), acorde con una opción presentada para UWB en el estándar 802.15.8. Esta modificación se observa en la Figura 22 y consiste en utilizar los bits de *ranging*, extensión de encabezado y uno de los bits de duración de preámbulo para el campo de tamaño de paquete y de esta manera se obtiene una carga útil de hasta 1024 bytes.

2 bits	7 bits	1 bit	1 bit	2 bits	6 bits
Tasa de datos	Tamaño del paquete	R	HE	Duración de Preámbulo	SECDED

2 bits	10 bits	1 bit	6 bits
Tasa de datos	Tamaño del paquete	Duración de Preámbulo	SECDED

Figura 22. Estructura del encabezado de capa física del paquete IEEE 802.15.4z en la parte superior y IEEE 802.15.8 en la parte inferior

La Figura 22 muestra el formato original del encabezado de capa física y la modificación mencionada. De esta manera se define una estructura de paquete básica para las actividades de *ranging* y el acceso a la red que cuenta con 127 bytes de carga útil y por otro lado una estructura de paquete destinada para el intercambio de información entre nodos ancla que permite hasta 1024 bytes de carga útil.

También se decidió que los parámetros de capa física fueran diferentes para los dos tipos de mensajes mencionados anteriormente, de manera que los mensajes de datos contarán con la longitud de preámbulo Ipatov mínima permitida (32 para el módulo DW3000) y no se les incluya el campo de STS, puesto que estos dos parámetros son cruciales para las actividades de *ranging*, pero para el intercambio de información causan una disminución del caudal eficaz del sistema.

Las modificaciones mencionadas anteriormente permiten reducir el *overhead* de capa física. Por ejemplo, los tiempos de transmisión de paquetes de *ranging* con una longitud de preámbulo Ipatov de 64 símbolos

representa 65.13  $\mu\text{s}$ , una longitud de preámbulo STS de 64 símbolos representa 64  $\mu\text{s}$ , la duración del SFD es de 8.14  $\mu\text{s}$  y el PHR transmitido a 850 kbps demora 22.35  $\mu\text{s}$ , esto hace un tiempo de transmisión de 159.62  $\mu\text{s}$  de información de protocolo de capa física. Por otro lado, los tiempos de transmisión de paquetes de datos con una longitud de preámbulo Ipatov de 32 símbolos representa 32.56  $\mu\text{s}$ , la duración del SFD es de 8.14  $\mu\text{s}$  y el PHR transmitido a 850 kbps demora 22.35  $\mu\text{s}$ , esto hace un tiempo de transmisión de 63.05  $\mu\text{s}$  de información de protocolo lo cual es una reducción considerable y que tiene un efecto positivo para el caudal eficaz del sistema.

Para dar formato a la capa MAC de los mensajes se siguió la estructura recomendada por el estándar IEEE 802.15.4 (2020) considerando además que el módulo UWB usado tiene funciones automatizadas para decodificar paquetes MAC que cumplen con la recomendación mencionada. La estructura básica de este paquete de capa MAC se ilustra en la Figura 23.

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	2 u 8 Bytes	2 Bytes	2 u 8 Bytes	variable	variable	2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	ID de red de destino	Dirección de destino	ID de red de fuente	Dirección de fuente	Encabezado de seguridad	Carga útil	FCS

**Figura 23.** Formato de una trama de capa MAC

Posteriormente, se definieron diferentes tipos de mensajes para cada etapa de operación del sistema considerando las necesidades y facilidades de cada una.

#### 4.4.4.1 Estructura del paquete de sincronización global

El formato del paquete utilizado para la propagación de la referencia de tiempo se muestra en la Figura 24 y sus características distintivas son:

- La ID de red de destino y la dirección de destino son valores de broadcast.
- La carga útil son 5 bytes utilizados para transportar las horas, los minutos y los segundos, cada uno ocupando un byte, y dos bytes para cuantificar las fracciones de segundo permitiendo una resolución de microsegundos.

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	5 Bytes	2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	ID de red de destino	Dirección de destino	ID de red de fuente	Dirección de fuente	Valor RTC	FCS

**Figura 24.** Formato del paquete de sincronización global

Se utilizan las ecuaciones siguientes para realizar los cálculos necesarios para completar el diseño de esta etapa.

$$t_{RTC}(S) = t_{fi} + \frac{RTC_{len}(bits)}{r(bps)} \quad (4)$$

$$t_{DR}(S) = t_{RTC} + 2xt_{guarda} + t_{prop} \quad (5)$$

Donde:

$t_{RTC}$  es el tiempo que demora la transmisión de un paquete de sincronía global.

$t_{fi}$  es el tiempo que demora la transmisión del encabezado de capa física.

$RTC_{len}$  es la tasa de transmisión de la carga útil del paquete.

$r$  es la tasa de transmisión de la carga útil del paquete.

$t_{DR}$  es la demora de transmisión de un paquete de sincronía global.

$t_{guarda}$  es un tiempo definido para evitar interferencia entre transmisiones de paquetes de sincronía global y se considera un 10 % de la duración de tRTC.

$t_{prop}$  se refiere a la demora de propagación de la señal electromagnética desde transmisor a receptor.

Considerando ese formato de paquete y una tasa de transmisión de datos de 6.8 Mbps correspondiente a la tasa de transferencia ofrecida por el transceptores IEEE 802.15.4z seleccionado en la sección 5.2, la demora de transmisión de la carga útil es de 21.176  $\mu$ s, si a este valor le sumamos una demora de propagación  $t_{prop}$  de 0.3  $\mu$ s, la duración del encabezado de capa física  $t_{fi}$  de 63.05  $\mu$ s para un paquete de datos y un período de guarda  $t_{guarda}$  equivalente al diez por ciento de la suma de los valores listados anteriormente, dispuesto antes y después de la transmisión se llega a un valor de 101.19  $\mu$ s, el cual es

definido como el valor de demora de retransmisión  $t_{DR}$  utilizado en el mecanismo de propagación de la referencia de tiempo global.

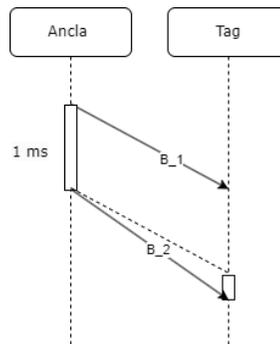
En vista al diseño del procedimiento mencionado en el apartado 4.4.3.1, al formato de paquete para la distribución de la información de sincronización global y a los cálculos realizados en esta sección, se obtiene que el tiempo mínimo requerido para completar el procedimiento es 18 veces el valor de demora de retransmisión  $t_{DR}$  calculado que resulta ser 1.82 ms, pero se incrementa a 4 ms para dar un margen para demoras de procesamiento de los dispositivos.

#### 4.4.4.2 Estructura de los paquetes de *ranging*.

Para la etapa de *ranging* se utilizaron varios tipos de mensajes que son los mensajes tipo *beacon*, los mensajes de asociación y los mensajes de *ranging*.

##### Paquete de sincronización local (*beacon*)

El paquete de *beacon* es enviado dos veces en el canal de operación para *ranging* del ancla, a un intervalo fijo de 1 milisegundo como se muestra en la Figura 25.



**Figura 25.** Mecanismo de sincronización local

Cada uno de los paquetes tiene un número de secuencia diferente, con la finalidad de que los nodos puedan estar bien sincronizados a pesar de que el tiempo de propagación es diferente para cada uno, esto a causa de la diferencia de sus distancias respecto al nodo ancla.

Las siguientes ecuaciones son utilizadas en el programa de los dispositivos para realizar los cálculos necesarios para sincronizar el inicio de la etapa de asociación y *ranging*.

$$t_{inicio}(s) = T - t_{prop} \quad (6)$$

$$T(s) = t_{B_2} - (t_{B_1} + 1 \text{ ms}) \quad (7)$$

El formato del mensaje de *beacon* se muestra en la Figura 26. Los campos de dirección e ID de red de fuente corresponden al nodo ancla y la dirección de destino es una dirección de broadcast.

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	Dirección de destino	ID de red de fuente	Dirección de fuente	FCS

**Figura 26.** Formato de paquete de sincronización local

Un milisegundo después de recibir el segundo paquete de *beacon*, previamente realizado el cálculo para compensar la demora de propagación, los nodos proceden a intercambiar los mensajes de asociación en caso de ser necesario y de *ranging* en sus respectivos intervalos de tiempo de transmisión garantizada.

#### 4.4.4.3 Paquetes de asociación

Para el proceso de asociación se manejan tres tipos de formato de paquetes, para la solicitud, respuesta y reconocimiento. La Figura 27 muestra la estructura del paquete de solicitud de asociación, hay que destacar que en este caso la dirección de fuente es el identificador EUI-64 del dispositivo y la ID de red de fuente tiene un valor que indique que no está asociada a ninguna red válida. Por otro lado, las ID de red y dirección de destino corresponden a las del dispositivo del cual se recibió el mensaje de *beacon*. En la Figura 27 inferior se puede observar la estructura del paquete de respuesta, en este caso las direcciones e ID de red fuente corresponden al nodo tipo ancla y la dirección e ID de red de destino corresponden a las del nodo que envió la solicitud. Este paquete contiene además el estado del proceso de asociación: exitoso, pendiente o rechazado. En caso de ser exitoso el paquete contiene la dirección que se le asignó al nodo solicitante, la cual a su vez coincide con la ranura de tiempo en la cual este nodo tiene permiso de participar en las rutinas de *ranging* sin peligro de ocurrencia de colisiones de transmisiones con los demás dispositivos bajo la misma área de cobertura.

Considerando la demora de transmisión de estos mensajes y el tiempo de propagación de estos, se diseñó un intervalo de tiempo formado por 10 ranuras de 2 ms cada una, donde los dispositivos van a transmitir sus mensajes de solicitud y respuesta eligiendo una de estas ranuras de manera aleatoria. De esta manera, este proceso de asociación abarca 20 ms de tiempo de la supertrama.

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	8 Bytes	Carga útil 1 Byte	2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	ID de red de destino	Dirección de destino	ID de red de fuente	Dirección de fuente	ID de comando MAC	FCS

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	8 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	Carga útil 4 Bytes			2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	ID de red de destino	Dirección de destino	ID de red de fuente	Dirección de fuente	ID de comando MAC	Estado de la asociación	Dirección del nodo	FCS

**Figura 27.** Formato de paquete de solicitud de asociación (superior) y formato de paquete de respuesta de asociación (inferior)

#### 4.4.4.4 Paquetes de DS-TWR

Como se explicó en secciones anteriores, para la obtención de la distancia relativa del *tag* respecto a los tres dispositivos colocados en el ancla, debe haber intercambio de paquetes entre estos y así conseguir las marcas de tiempo necesarias para el cálculo de distancia.

En la Figura 28 se observa el formato de solicitud de *ranging*, este es un paquete de capa MAC al que gracias a configuraciones del campo de control de trama fue posible encapsular información como la ID de red y la dirección de destino, de esta manera el dispositivo que decodifica el mensaje entiende que la ID de red de destino es igual a la de fuente y que la dirección de destino corresponde a los dispositivos colocados en el ancla.

La imagen del medio en la Figura 28 muestra que el mensaje de respuesta de *ranging*, el cual debe ser enviado por cada uno de los dispositivos del ancla también realiza el encapsulamiento de la ID de red y en este caso si especifica la dirección de destino como la dirección del *tag* emisor de la solicitud además de llevar en la carga útil marcas de tiempo necesarias para que el *tag* realice sus propios cálculos de distancia, esta última función pensando en posibles actualizaciones del sistema que pudiesen incluir posicionamiento de contenedores al interior de grupos de contenedores.

Por último, la imagen del fondo en la Figura 28 identifica al mensaje final enviado por el *tag*, este paquete realiza la misma encapsulación de direccionamiento que el mensaje de solicitud y en la carga útil lleva las

marcas de tiempo obtenidas de cada una de las respuestas y la de la transmisión final para que los dispositivos en el ancla realicen el cálculo de la distancia.

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	ID de red de fuente	Dirección de fuente	FCS

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	2 Bytes	Carga útil 8 Bytes		2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	Dirección de destino	ID de red de fuente	Dirección de fuente	TS_S	TS_R	FCS

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	2 Bytes	Carga útil 16 Bytes				2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	ID de red de fuente	Dirección de fuente	TS_R_1	TS_R_2	TS_R_3	TS_F	FCS

**Figura 28.** Formato de los paquetes de ranging para encuesta (superior), respuesta (intermedio) y final (inferior)

El formato de los paquetes y los tiempos de una trama de capa física para *ranging* arrojan los resultados observados en la Tabla 5, la cual hace referencia al tiempo de transmisión de la información de cada mensaje.

**Tabla 5.** Demora de transmisión de los paquetes usados para ranging

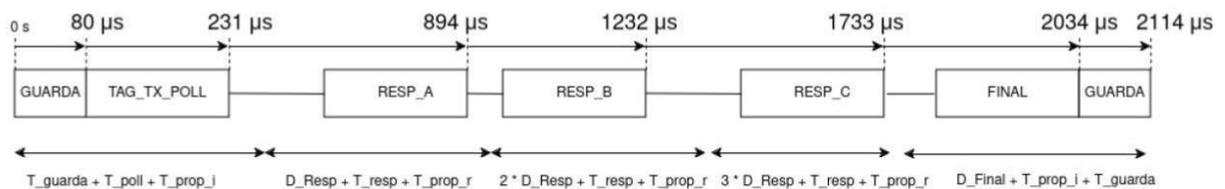
Tipo de paquete	Duración ( $\mu$ s)
Solicitud	150.6
Respuesta	162.35
Final	169.41

También fue necesario definir algunos parámetros para controlar el procedimiento del intercambio de mensajes, como son la demora del envío de respuesta, la demora de transmisión del mensaje final, un tiempo de guarda para evitar interferir con rutinas de *ranging* de otros *tags*. La Tabla 6 muestra los valores de los parámetros mencionados.

**Tabla 6.** Parámetros definidos para el intercambio de mensajes de ranging

Parámetro	Valor ( $\mu$ s)
Demora de respuesta	500
Demora de mensaje final	300
Tiempo de guarda	80

La Figura 29 muestra una línea de tiempo de la rutina de *ranging* de un nodo, la cual puede durar hasta 2.114 ms. Considerando que cada ancla dará servicio a un total de 96 contenedores se tiene que en cada supertrama se destinan 203 ms necesarios para que todos los nodos intercambian los mensajes de ranging necesarios.

**Figura 29.** Distribución de un intervalo de tiempo designado para intercambio de mensaje de ranging

#### 4.4.4.5 Duración de la etapa de sincronía local, acceso a la red y *ranging*

Los valores obtenidos en secciones anteriores nos permiten calcular la duración de esta etapa del sistema, la que de acuerdo con la Figura 30Figura 15 es igual a la suma de las demoras individuales de las etapas de sincronía local, acceso a la red y ranging, aproximadamente 225 ms. La suma incluye los 2 ms para la sincronización local definidos en la sección 4.4.4.2, los 20 ms que se destinaron para el acceso a la red según la sección 4.4.4.3 y 203 ms reservados para actividades de ranging durante cada supertrama de acuerdo con el cálculo realizado en la sección 4.4.4.4

**Figura 30.** Duración de la etapa de sincronía local, acceso a la red y ranging

## 4.5 Diseño de capa MAC para la etapa de enrutamiento de la información

En esta sección se describe la parte del mecanismo de acceso al medio diseñado que posibilita el establecimiento de las comunicaciones durante la etapa de enrutamiento de la información, así como la estructura de los paquetes que serán intercambiados por los nodos de la red y el perfil de tráfico de cada nodo considerando los datos de aplicación que este necesita enrutar durante su participación en el sistema de localización e identificación de contenedores.

### 4.5.1 Etapa de enrutamiento de la información

Una vez recolectada las mediciones de distancia es necesario hacer llegar dicha información junto a la de asociación, hacia el sistema central. El mecanismo de acceso al medio para esta etapa, basándose en la existencia de una sincronización global en la red gracias a procedimientos explicados en apartados anteriores, evita la ocurrencia de colisiones de información definiendo los instantes de tiempo en los que los dispositivos pueden transmitir.

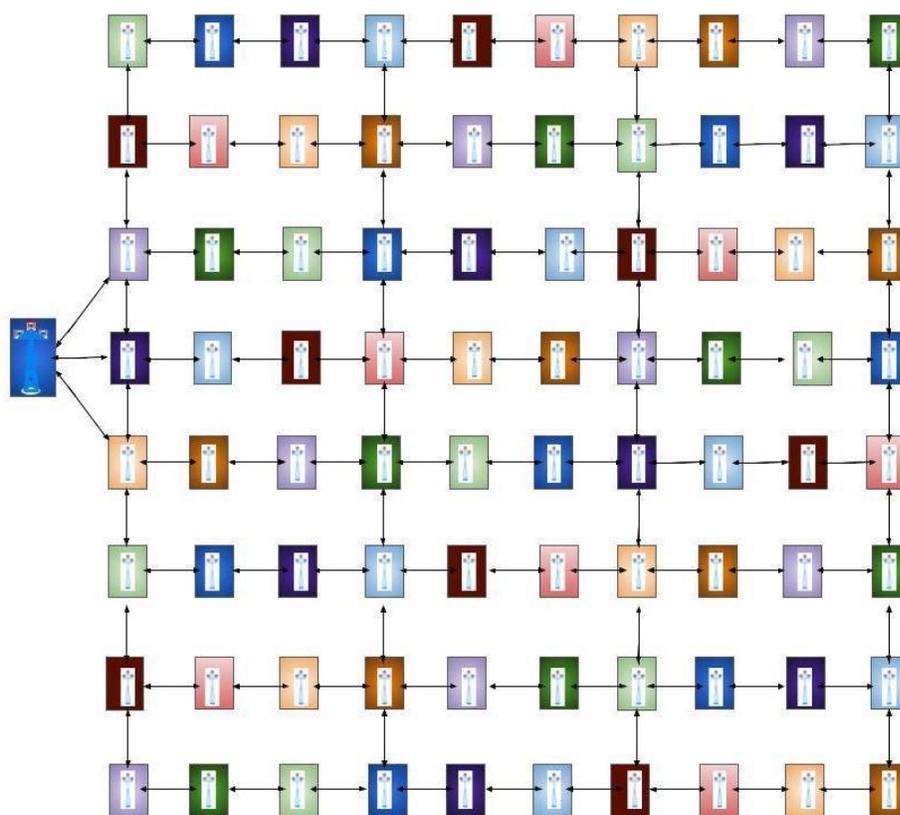
Considerando que los dispositivos tienen un alcance de transmisión de 100 m, y recordando la disposición de los nodos presentada en la Figura 12 se infiere que los nodos dispuestos en las columnas del escenario están en rango de comunicaciones con hasta seis nodos. En cambio, los nodos colocados en las filas solo tendrán conectividad con dos nodos con la misma disposición.

Por lo comentado anteriormente, se aplicó el método del coloreo a distancia-2 para definir 10 intervalos de tiempo que se configurarán en la red para evitar colisiones de información cuando los nodos intenten enrutar los datos colectados hacia el sistema central.

Este método consiste en asignar el número mínimo de colores a los nodos bajo la condición de que los nodos vecinos a dos saltos no deben tener el mismo color, donde los colores representan una unidad de recursos de comunicación (intervalo de tiempo, canal) (Abid et al., 2021). En la programación TDMA, el problema consiste en asignar intervalos de tiempo a los nodos para su transmisión de datos, asegurando que dos nodos vecinos no puedan transmitir en el mismo intervalo de tiempo y que un nodo no reciba información simultáneamente de más de un nodo. El número de intervalos de tiempo tiene un gran impacto en el rendimiento de la red, ya que un exceso de intervalos resulta en baja eficiencia, mientras que un número insuficiente de intervalos conduce a terribles colisiones. Cinco de estas ranuras son

necesarias para que dispositivos en las columnas puedan establecer comunicación a pesar de que se juntan varios en el mismo rango de comunicaciones y otros cinco son utilizados para evitar los casos en que no exista abundancia de contenedores en estas agrupaciones nodos en columnas consecutivas puedan encontrarse en rango de comunicaciones e interferirse entre ellos.

La Figura 31 muestra cómo se distribuyeron estos intervalos de tiempo por la red, se usaron colores para distinguir unos de otros. La duración de estos intervalos se definirá en los apartados siguientes cuando se analicen el formato de los paquetes de información que serán enrutados.



**Figura 31.** Disposición de las ranuras de transmisión en la red

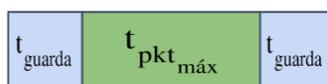
#### 4.5.2 Estructura de los paquetes de enrutamiento

Los paquetes utilizados en la etapa de enrutamiento de la información tienen un formato de paquete de datos de capa física y una estructura de capa de acceso al medio como la mencionada en apartados anteriores. La carga útil de estos contiene toda la información de distancia recolectada durante la etapa de *ranging* y la información de los dispositivos que fueron asociados a la red durante la última supertrama. La Figura 32 muestra un paquete de datos con máxima capacidad de carga útil.

2 Bytes	1 Byte	2 Bytes	2 u 8 Bytes	2 Bytes	2 u 8 Bytes	1011 Bytes	2 Bytes
Control de trama	Número de secuencia	ID de red de destino	Dirección de destino	ID de red de fuente	Dirección de fuente	Carga útil	FCS

**Figura 32.** Estructura de paquete de capa MAC

Considerando las características del paquete es posible diseñar los intervalos de tiempo necesarios para el mecanismo de acceso al medio que será implementado en la etapa de enrutamiento de la información cuya estructura básica se puede observar en la Figura 33.



**Figura 33.** Estructura de una ranura de tiempo para la etapa de enrutamiento

La duración de una ranura para la transmisión de un paquete de datos se define por la ecuación siguiente:

$$t_{ranura} = t_{fi} + \frac{Pkt_{len}(bits)}{r(bps)} + 2Xt_{guarda} \quad (8)$$

Para la definición de la duración de estas ranuras se consideró un paquete de datos que emplea toda la capacidad de carga útil de capa física disponible, por lo que la demora de transmisión de este paquete es de 1.205 ms aproximadamente, si a este valor se le suma el *overhead* de protocolo de capa física y se utilizan tiempos de guarda para evitar el solapamiento de la información se obtiene un valor de 2 ms para cada intervalo de transmisión. La Tabla 7 agrupa los datos utilizados para el cálculo descrito anteriormente.

**Tabla 7.** Datos para el cálculo del tiempo de ranura de transmisión

Parámetro	Valor
Carga útil	1024 bytes
Tasa de transmisión	6.8 Mbps
<i>Overhead</i> de protocolo de capa física	63.05 $\mu$ s
Porcentaje correspondiente al tiempo de guarda	30% de la duración del paquete

### 4.5.3 Perfil de tráfico

Una vez recopilada la información de *ranging* y de asociación durante la primera etapa de la supertrama, el nodo tipo ancla actualiza su tabla de mediciones para su posterior empaquetado en los mensajes de capa de enrutamiento mencionados en el apartado anterior. La Figura 34 muestra cómo está conformada la información enviada en estos paquetes de enrutamiento. Se trata de una entrada de la tabla mantenida por los dispositivos ancla que contienen la dirección de red del *tag* y los tres valores de distancia relativa que mantiene con las referencias en el ancla, de igual manera es necesario enviar la dirección de red asignada a los nodos que se asociaron durante la última supertrama que no es más que la dirección EUI-64 y dicha dirección de red.

2 Bytes	8 Bytes	4 Bytes	4 Bytes	4 Bytes
Dirección del nodo	Dirección EUI -64	Distancia Referencia 1	Distancia Referencia 2	Distancia Referencia 3

**Figura 34.** Campos de las tablas de datos con información de los contenedores.

La información de *ranging* para una red trabajando a máxima capacidad de diseño genera 1344 Bytes de información cada minuto, 14 bytes por 96 *tags*, cifra que sobrepasa la carga útil que ofrece la capa física del estándar por lo que es necesario enviar dos paquetes y en cada uno además incluir información de asociación (direcciones EUI-64 de dispositivos que se unieron durante la última supertrama) si es necesario. Por este motivo se propone enviar dos paquetes de 700 bytes por supertrama, cada uno conteniendo la mitad de la información de la tabla y pudiendo acomodar información de asociación de hasta 5 contenedores por supertrama, esta cantidad es considerable teniendo en cuenta que acomodar los contenedores en el área de almacenamiento toma algo de tiempo y este paquete tendría la información de todos los contenedores que se unieron al área de cobertura del nodo ancla durante el último minuto transcurrido .

$$\text{Tráfico}(bps) = \frac{\text{Info generada}(bits)}{T_{\text{generación}}(s)} \quad (9)$$

Donde:

*Tráfico(bps)* es el tráfico generado por cada nodo ancla.

$Info_{generada}(bits)$  equivale a la cantidad de información generada por cada nodo ancla que va a ser enviada por la red.

$T_{generación}(s)$  se refiere al período de generación de información

Aplicando (9) es posible obtener una tasa de generación de tráfico por nodo de 186.67 bps y una tasa de generación de tráfico por cada nodo ancla en la red de 14.93 kbps. Estos valores fueron tomados en cuenta para la evaluación de los protocolos que son realizados en secciones posteriores.

#### 4.6 Discusión del diseño de MAC y ranging

Luego del estudio realizado en el Capítulo 3. se determinó que serían adoptadas la técnica ToA para la determinación de distancia entre dispositivos de la red y el algoritmo de trilateración para el posterior cálculo de posicionamiento de los contenedores realizado en el nodo central del sistema. La principal motivación de la elección de la técnica ToA es que esta ofrece un equilibrio favorable entre precisión y complejidad de implementación como se menciona en la sección 4.3.1. De igual manera, se eligió el algoritmo de cálculo de posicionamiento por trilateración debido a su eficacia y precisión en la determinación de la ubicación de un objeto o dispositivo.

La revisión bibliográfica realizada en el apartado 4.4.1 permitió determinar qué técnica de control de acceso al medio es más factible de utilizar acorde con las características de UWB. Gracias a ese análisis se definió TDMA como la base del funcionamiento del control de acceso al medio en el sistema y para terminar el diseño de esta etapa se definió la asignación de ranuras de transmisión reservadas entre los dispositivos de la red mediante el método del coloreo a distancia-2 para resolver problemas de colisiones y conflictos propios de redes inalámbricas descentralizadas.

Por otro lado, se plantearon las dimensiones del escenario de tal forma que existiera un área de cobertura para *ranging* de 30 metros proveída por la infraestructura fija colocada y de una manera tal que pudiese ser replicada la arquitectura presentada para dar servicio de posicionamiento en un área de mayores dimensiones. Este protocolo está basado en la existencia de una referencia de tiempo global entre los nodos de la red y en la conformación de una super trama para garantizar el acceso al medio de los participantes de la comunicación. Este protocolo es una solución híbrida que incluye una etapa donde los dispositivos que están entrando a la red solicitan formar parte de esta durante un período de acceso

basado en contención y otro período libre de contención concebido para el envío de información de localización de los contenedores hacia el nodo central del sistema.

Los esfuerzos por evitar colisión de información durante transmisiones inalámbricas para actividades de *ranging* se materializan en las secciones 4.4.3.2 y 4.4.3.3 donde se define primero una etapa de sincronización local y luego un proceso de registro que determina el momento en el tiempo que tiene asignado un contenedor para participar en actividades de *ranging*. Posteriormente, se definió una versión optimizada del proceso de intercambio de mensajes para la determinación de distancia entre dispositivos y los formatos de los paquetes de esta etapa lo que posibilita completar el diseño de la supertrama en cuanto a duración de los procedimientos.

Considerando exitoso el establecimiento de la sincronización global en la red, se aplicó el método del coloreo a distancia-2 para definir 10 intervalos de tiempo que se configurarán en la red para que no existan colisiones de información cuando los nodos intenten enrutar los datos colectados hacia el sistema central. Cinco de estos intervalos son necesarios para que dispositivos en las columnas puedan establecer comunicación a pesar de que se juntan varios en el mismo rango de comunicaciones y otros cinco son utilizados para evitar los casos en que no exista abundancia de contenedores en estas agrupaciones nodos en columnas consecutivas puedan encontrarse en rango de comunicaciones e interferirse entre ellos. Luego de definido el formato del paquete de datos a utilizar, se establecieron intervalos de guarda para contribuir a evitar posibles colisiones provocadas por problemas de sincronización entre los nodos en esta etapa de transferencia de información. Así mismo se realizó el cálculo del perfil de tráfico del sistema, obteniendo una tasa de generación de tráfico por nodo de 186.67 bps y una tasa de generación de tráfico de información de aplicación en la red de 14.93 kbps.

## Capítulo 5. Evaluación experimental y resultados

---

Una vez finalizada la propuesta de la capa MAC, el trabajo continúa con el proceso de validación de la red inalámbrica multisalto, mediante la implementación experimental del mecanismo de acceso al medio en sistemas embebidos y la simulación de varios protocolos de enrutamiento trabajando en conjunto con el protocolo de capa MAC presentado en este documento. En este capítulo se presenta todo el trabajo realizado para llevar a cabo este proceso de validación, actividad que involucra la elección del módulo de radio IEEE 802.15.4z y el sistema de procesamiento que integrarán los nodos de la red. Los detalles de implementación del algoritmo de sincronización global y de las rutinas de *ranging* también son presentados en este capítulo.

### 5.1 Selección del módulo de radio UWB

Para iniciar con esta implementación, primero se eligió el módulo de radio UWB. Durante este proceso de selección se definió que la característica básica que debía cumplir un módulo era que debía soportar el estándar IEEE 802.15.4z y opere en modo HRP. Partiendo de ese requerimiento se realizó una búsqueda de los principales fabricantes de dispositivos UWB, tal como se muestra en la Tabla 8 que resume las características que contribuyeron al proceso de selección.

**Tabla 8.** Revisión de los principales fabricantes y chips que soportan el estándar IEEE 802.15.4z.

Fabricante o diseñador	Chip	Canales soportados	MAC	PHR IEEE 802.15.4z
Qorvo	Familia DW3000	5, 9	Se deja al implementador	si
NXP	SR040/SR150	5, 9	Se deja al implementador	no
Imec	ULP IR-UWB Chip	5, 6, 8, 9	Propietario	si

Basándose en la Tabla 8 se decidió optar por un chip de Qorvo puesto que este puede operar en canales de comunicación que le posibilitan la interoperabilidad con otros chips, permite la programación de diferentes técnicas de acceso al medio y los métodos de enlace de datos de capa MAC, y es compatible con la opción de PHR definida en el estándar IEEE 802.15.4z la cual ofrece una configuración capaz de dotar al paquete de datos de capa física de una sección de carga útil de hasta 1024 bytes la cual es significativamente mayor que la permitida por la configuración básica del PHR (128 bytes).

Luego fue necesario definir la plataforma de desarrollo de hardware que sería utilizada para la implementación de las funcionalidades del módulo UWB DW3000 de Qorvo. A continuación, se muestran dispositivos preseleccionados de entre varios productos que ofrece el fabricante.

### **EVBDWM3000**

El DWM3000EVB de Qorvo es una placa de desarrollo compatible factor de forma de Arduino, diseñado para la evaluación del módulo de banda ultra ancha (UWB) DWM3000, para su uso en un sistema escalable de localización en tiempo real (RTLS). Esta puede utilizarse con el microcontrolador de elección del implementador puesto que el factor de forma Arduino es compatible con muchos proveedores de MCU, incluidos *STMicroelectronics*, *Nordic Semiconductor* y más.

El DWM3000EVB está diseñado para cumplir con las especificaciones PHY y MAC de *FiRa™*, lo que permite la interoperabilidad con otros dispositivos compatibles con *FiRa™* como los chips U1 y U2 de *Apple*. Este dispositivo tiene un costo de 29 dólares aproximadamente.

### **DMW3001CDK**

El DWM3001CDK es una placa de desarrollo para el módulo transceptor completamente integrado (UWB) DWM3001C. Este kit puede ser utilizado para evaluar el rendimiento del hardware como una etiqueta TWR o TDoA y para construir un sistema de localización en tiempo real (RTLS, por sus siglas del inglés) de evaluación.

Un depurador *J-Link* integrado proporciona interfaces SWD, UART y USB al DWM3001C. La placa puede alimentarse desde puertos USB, interfaz Raspberry Pi, una batería o una fuente de alimentación externa. Este dispositivo tiene un costo de 38 dólares aproximadamente.

## ESP32UWB3000

La placa de desarrollo ESP32UWB3000 de *Makerfabs*, también basado en el módulo UWB DW3000, consiste en un nodo de comunicaciones UWB que integra un procesador ESP32 capaz de comunicarse a través del protocolo SPI con el transceptor UWB. Este dispositivo tiene un costo de 44 dólares aproximadamente.

### 5.1.1 Discusión módulo de radio UWB

La Tabla 8 muestra como uno de los parámetros a comparar entre las opciones de módulo de radio UWB era que otorgara al implementador privilegios para trabajar con la capa de acceso al medio y la posibilidad de empaquetar mayor cantidad de información en las tramas de capa física, estas características decantaron el proceso de selección hacia la familia de transceptores DW3000 de Qorvo.

Por otro lado, se eligió la placa de desarrollo EVBDW3000 puesto que respecto a las funcionalidades del transceptor UWB son similares a las demás placas analizadas, en cambio esta tiene un costo menor debido a que no presenta otras características como transceptores *Bluetooth* y *Wifi* integrados como es el caso del ESPUWB3000 y el DWM3001CDK, características que no son necesarias ya que el trabajo de tesis tiene como objetivo diseñar una red inalámbrica multisalto que utilice únicamente comunicaciones UWB.

## 5.2 Selección del sistema de procesamiento

Al elegir la placa de desarrollo EVBDW3000 como el módulo de radio UWB, y como se expuso anteriormente que este necesita un módulo de procesamiento externo, fue necesario seleccionar la tarjeta de desarrollo para el sistema de procesamiento, que tiene la responsabilidad de ejecutar los algoritmos de sincronización, localización y la transmisión de la información hacia el sistema central. El sistema de procesamiento debe contar con los recursos computacionales suficientes para ejecutar las instrucciones que controlan el módulo de radio UWB y los algoritmos para el acceso al medio y de enrutamiento de la información.

Una característica considerada para la selección fue que se contará con capacidades y funciones para operar a bajos niveles de consumo de energía y alto desempeño. Este requerimiento está motivado porque

los dispositivos colocados en los contenedores deben permanecer operando con baterías durante varios días, evitando el tener que cambiarlas de manera frecuente.

Se seleccionó el procesador ARM Cortex-M4 que cubre las necesidades del diseño y cuenta con los puertos de comunicación SPI (del inglés, *Serial Peripheral Interface*) a través de los cuales se accede y controla el módulo UWB.

También es importante que el sistema de procesamiento sea compatible con el factor de forma de Arduino UNO V3 para una mejor integración con el transceptor IEEE 802.15.4z. Otro requisito que se debe cubrir es que se cuente con un reloj de tiempo real (RTC, por sus siglas del inglés) con una resolución de microsegundos para lograr la sincronización entre los dispositivos que integrarán la red diseñada.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se decidió usar como sistema de procesamiento en todos los nodos de la red la tarjeta de evaluación NUCLEO-L4R5ZI de *ST Microelectronics*, tanto para los nodos en las anclas como para los nodos en las etiquetas o *tags* que serán colocadas en los contenedores.

La Tabla 9 resume algunas de las características fundamentales del sistema seleccionado.

**Tabla 9.** Características fundamentales de la tarjeta de evaluación NUCLEO-L4R5ZI.

<b>Características</b>	<b>NUCLEO-L4R5ZI</b>
<b>Procesador</b>	ARM® Cortex®-M4 de 32 bits
<b>Tipo de alimentación</b>	USB Externa 3.3V, 5V, 7-12 V
<b>Interfaces de comunicación</b>	I2C, UART, SPI
<b>Memoria Ram</b>	384 kB
<b>Memoria Flash</b>	2 MB
<b>Compatibilidad con el estándar Arduino UNO v3</b>	Si
<b>Resolución del RTC</b>	Microsegundos
<b>Modo de operación de bajo consumo de energía</b>	Si

### 5.3 Implementación de la etapa de sincronización global

Una vez que fue seleccionado el hardware que se utiliza para el módulo UWB de comunicación y posicionamiento, así como el hardware para el sistema de procesamiento, dio inicio la etapa de implementación. El primer proceso por implementar fue el de sincronización global.

Como se explicó en la sección 4.4.3.1 la sincronización global de la red se logra mediante un proceso de esparcimiento del valor de reloj de tiempo real (RTC, por sus siglas en inglés) proveniente del nodo central del sistema, siendo esta la referencia de tiempo necesaria para coordinar el funcionamiento de las diferentes etapas diseñadas.

Una vez que el nodo central envía el valor de RTC lo recibirán los demás nodos en la red, los cuales tienen roles diferentes en este proceso, ya que existen nodos que solamente deberán actualizar su reloj local, mientras que otros tienen la tarea adicional de retransmitir su valor de RTC local actualizado y de esta manera lograr que todos los nodos obtengan un valor de RTC actualizado.

El sistema se diseñó de manera tal que los nodos que no reciban información actualizada de RTC no podrán desempeñar las funciones programadas en la siguiente supertrama, deberán esperar a estar nuevamente sincronizados para hacerlo, de esta manera se busca impedir que un nodo particular pueda mermar significativamente la eficacia de las comunicaciones a causa de no estar coordinado con el resto de los nodos de la red.

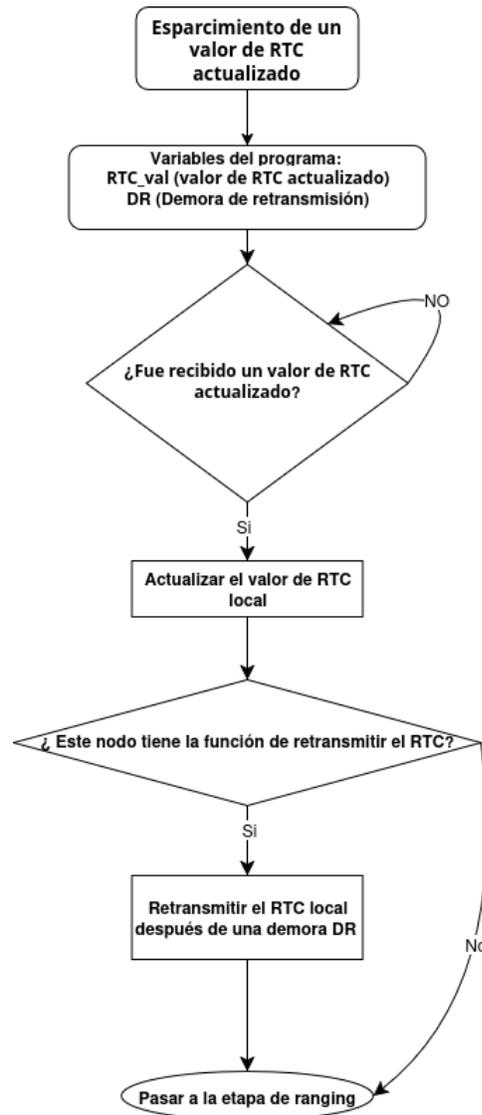
#### 5.3.1 Descripción técnica de la implementación

Para la implementación de la red, se decidió que los nodos de la red se sintonizan en el canal de comunicaciones número 9 y esperan recibir un paquete de datos que contiene un valor de RTC más actualizado, con la finalidad de compensar los efectos de las variaciones del período de conteo del oscilador que sustenta el funcionamiento de este reloj de tiempo real. Estas variaciones son provocadas por las variaciones de temperatura y por el arrastre de pequeños errores en los ciclos de conteo del RTC que se vuelven más graves al pasar del tiempo.

Como se definió anteriormente el protocolo de acceso al medio para esta etapa de sincronía del sistema, se basa en la programación controlada de demoras en la retransmisión en cada uno de los nodos

encargados de propagar la referencia de tiempo, de manera tal que en conjunto con información topológica del escenario sea posible evitar colisión de paquetes durante este proceso.

La Figura 35 muestra la lógica de programación utilizada para describir el comportamiento de un nodo que participa en este proceso.



**Figura 35.** Esquema para el esparcimiento de un valor de RTC actualizado

Para validar este procedimiento de sincronía se utilizaron cinco dispositivos. Cada uno de estos dispositivos contaba con la funcionalidad de retransmitir el valor de RTC global, con una demora de transmisión de 200 microsegundos. El nodo del sistema central luego de enviar un paquete con su referencia de tiempo se

dispone a recibir un mensaje proveniente del último dispositivo en participar en la sincronización global, de manera que en el momento de la recepción sea posible comparar el valor de RTC que ha atravesado la red y el valor de RTC del dispositivo que sirve de referencia para la red.

### 5.3.2 Resultados del experimento de validación de la etapa de sincronización global

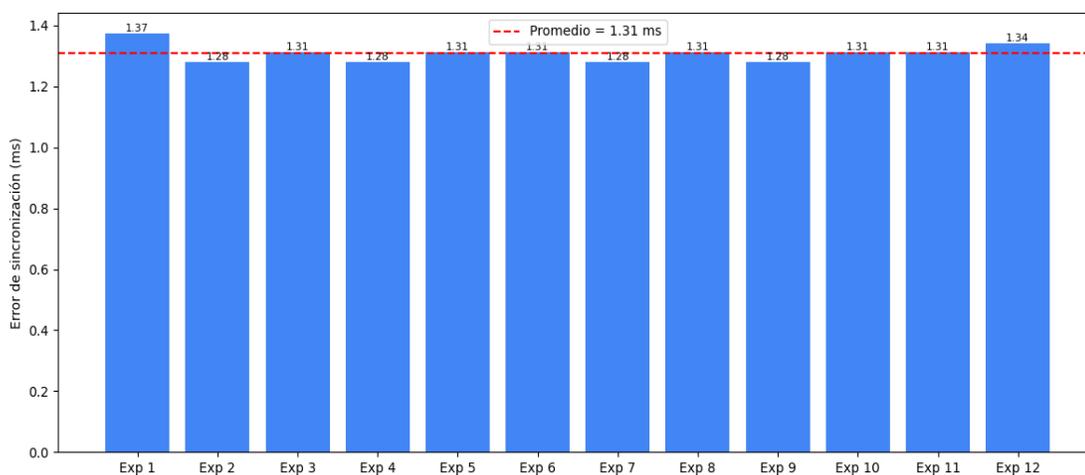
Acorde con los procedimientos y especificaciones planteadas anteriormente se realizó el experimento para validar el funcionamiento del mecanismo de retransmisión de RTC. La Figura 36 muestra los valores de RTC obtenidos luego de 12 repeticiones. Se puede observar que existe sincronización en los campos de hora, minutos y segundos. Por otro lado, se logró un margen de error de sincronización entre los registros de conteo con resolución de microsegundos de 1.31 ms, tal como se muestra en la Figura 37.

```

-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:45:0:31876
RTC_RETORNADO:  11:45:0:31921
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:46:0:31879
RTC_RETORNADO:  11:46:0:31921
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:47:0:31879
RTC_RETORNADO:  11:47:0:31922
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:48:0:31879
RTC_RETORNADO:  11:48:0:31921
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:49:0:31879
RTC_RETORNADO:  11:49:0:31922
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:50:0:31878
RTC_RETORNADO:  11:50:0:31921
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:51:0:31879
RTC_RETORNADO:  11:51:0:31921
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:52:0:31879
RTC_RETORNADO:  11:52:0:31922
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:53:0:31879
RTC_RETORNADO:  11:53:0:31921
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:54:0:31879
RTC_RETORNADO:  11:54:0:31922
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:55:0:31878
RTC_RETORNADO:  11:55:0:31921
CONTEO DE SALTOS: 5
-----
NODO SISTEMA CENTRAL
RTC_LOCAL:      11:56:0:31877
RTC_RETORNADO:  11:56:0:31921
CONTEO DE SALTOS: 5
-----

```

**Figura 36.** Captura de los valores de RTC obtenidos durante varias supertramas de funcionamiento del mecanismo



**Figura 37.** Error de sincronización en los experimentos.

## 5.4 Etapa de acceso a la red y *ranging*

Posterior a la etapa de sincronización se encuentra la etapa de acceso a la red y *ranging*. Lo anterior implica que cada nodo ancla debe cambiar a la frecuencia de operación predefinida por el protocolo y luego realizar las actividades de asociación y *ranging* en la cual intervienen los nodos etiquetas UWB colocadas en los contenedores.

### 5.4.1 Descripción de la implementación de acceso a la red y *ranging*.

El experimento para validar esta etapa se llevó a cabo en ambiente de laboratorio, de manera que todos los dispositivos se encontraban en rango de comunicaciones por lo que se fueron energizando paulatinamente y así simular el comportamiento de los *tags* colocados en los contenedores haciendo su entrada a la zona de cobertura de un nodo tipo ancla.

```

SUPER-NODE
-----
                NODO ANCLA
Canal para ranging: CH-5
-----
Tabla de datos
-----
Sincr global
18:9:0:59471
Sincr local
Resp Asociac
Resp Asociac
-----
                NODO ANCLA
Canal para ranging: CH-5
-----
Tabla de datos
-----
EUI-64: 0A1B2FFFE3D4AA
Local_ID: 23
Dist = 6.721 m
-----
EUI-64: 0A1B2FFFE3D4DD
Local_ID: 24
Dist = 3.110 m
-----
Sincr global
18:10:0:32857
Sincr local
Resp Asociac

```

**Figura 38.** Resultados del experimento para la validación del proceso de asociación

En la Figura 38 se observa como dos *tags* recibieron su respuesta de asociación durante la misma supertrama, esto gracias a que los *tags* acceden aleatoriamente para enviar sus solicitudes de asociación como se indicó en el diseño del protocolo. En la misma imagen también se puede visualizar como el nodo ancla obtiene las mediciones de distancia relativa a los *tags*, esta información es almacenada en conjunto

con las direcciones de los nodos asociados, para que posteriormente serán accedidas por las anclas con el objetivo de enviarlas al nodo central y de esta manera ofrecer una actualización de la posición de los contenedores. La Figura 39 muestra como es actualizada la información mencionada de hasta 4 nodos tipo *tag* en el área de cobertura de nodo de la red operando en el canal de operaciones número 5.

```

                                NODO ANCLA
Canal para ranging: CH-5
-----
Tabla de datos
-----
EUI-64: 0A1B2FFFE3D4AA
Local_ID: 23
Dist = 6.717 m
-----
EUI-64: 0A1B2FFFE3D4DD
Local_ID: 24
Dist = 3.105 m
-----
EUI-64: 0A1B2FFFE3D4BB
Local_ID: 25
Dist = 6.853 m
-----
EUI-64: 0A1B2FFFE3D4CC
Local_ID: 26
Dist = 3.668 m
-----
Sincr global
18:12:0:46006
Sincr local
-----
```

Figura 39. Tablas de datos referentes a hasta 4 nodos tipo tag

## 5.5 Enrutamiento de la información

Ahora que las anclas ya tienen la información de los nodos etiquetas o *tags*, ésta debe ser enviada al nodo central. La implementación de esta etapa del sistema se llevó a cabo mediante simulación, con el objetivo de probar varios protocolos de enrutamiento y evaluar su funcionamiento trabajando sobre el mecanismo de acceso diseñado durante este trabajo de tesis.

Las métricas de evaluación seleccionadas para medir el desempeño de la red funcionando con los diferentes protocolos fueron la pérdida de paquetes y la latencia. Se utilizó el *framework Inetmanet* versión 4 del simulador OMNET++ versión 6 sobre el sistema operativo *Windows* versión 11. A continuación se comentan algunas de las características de las herramientas utilizadas durante este proceso de evaluación.

### 5.5.1 Simulador OMNET++

OMNeT++ (del inglés: *Objective Modular Network Testbed in C++*) es un potente simulador de eventos discretos de código abierto ampliamente utilizado en el ámbito de las redes de comunicaciones y sistemas distribuidos. Desarrollado en C++, OMNeT++ proporciona una arquitectura modular y flexible que permite a los investigadores y desarrolladores modelar, simular y analizar una amplia gama de sistemas complejos. Su interfaz gráfica intuitiva, junto con su capacidad para crear modelos jerárquicos y reutilizables, facilita la construcción de simulaciones detalladas de redes, protocolos y algoritmos (Whichi et al., 2021). OMNeT++ se destaca por su extensibilidad, rendimiento y capacidad para manejar simulaciones a gran escala, lo que lo convierte en una herramienta valiosa tanto en entornos académicos como industriales para el estudio y optimización de sistemas en red.

La versatilidad de OMNeT++ se amplía significativamente gracias a una serie de marcos de trabajo o *frameworks* desarrollados como proyectos independientes. Estos *frameworks* especializados proporcionan soporte para una amplia gama de tecnologías y sistemas de red, abarcando desde redes de sensores y redes ad-hoc hasta protocolos de Internet, redes fotónicas, sistemas vehiculares y diversas formas de comunicación inalámbrica. Cada uno de estos *frameworks* se enfoca en ofrecer librerías y modelos básicos para aplicaciones o áreas de estudio específicas, permitiendo a los investigadores y desarrolladores crear simulaciones altamente personalizadas y precisas. Dentro de estos se pueden mencionar algunos como INET, INETMANET, MiXiM y Veins cada uno enfocado a áreas específicas de las comunicaciones.

### 5.5.2 Framework Inetmanet

Para el caso de INET/INETMANET, este es un *framework* de código abierto diseñado para la simulación de redes de comunicación, construido sobre el simulador de eventos discretos OMNeT++. Este *framework* se especializa en la simulación de protocolos de Internet, redes cableadas e inalámbricas, y redes móviles ad hoc (MANET). Además, este proporciona modelos detallados de diversos protocolos de red, como TCP, UDP, IPv4, IPv6, OSPF y BGP. Esto permite simular escenarios de red complejos como pueden ser las redes inalámbricas de sensores con un alto grado de fidelidad (Whichi et al., 2021).

Una de las características más destacadas de INET/INETMANET es su enfoque en las redes móviles ad hoc. El *framework* implementa varios protocolos de enrutamiento específicos para MANET, como AODV, OLSR

y DSR. INET/INETMANET también incluye modelos de movilidad que permiten simular el movimiento de nodos en redes ad hoc. Esto es crucial para evaluar el rendimiento de protocolos y aplicaciones en escenarios móviles realistas. Además, el *framework* tiene la capacidad de simular aspectos físicos como la propagación de radio y el consumo de energía, lo que permite a los investigadores considerar factores importantes del mundo real en sus simulaciones.

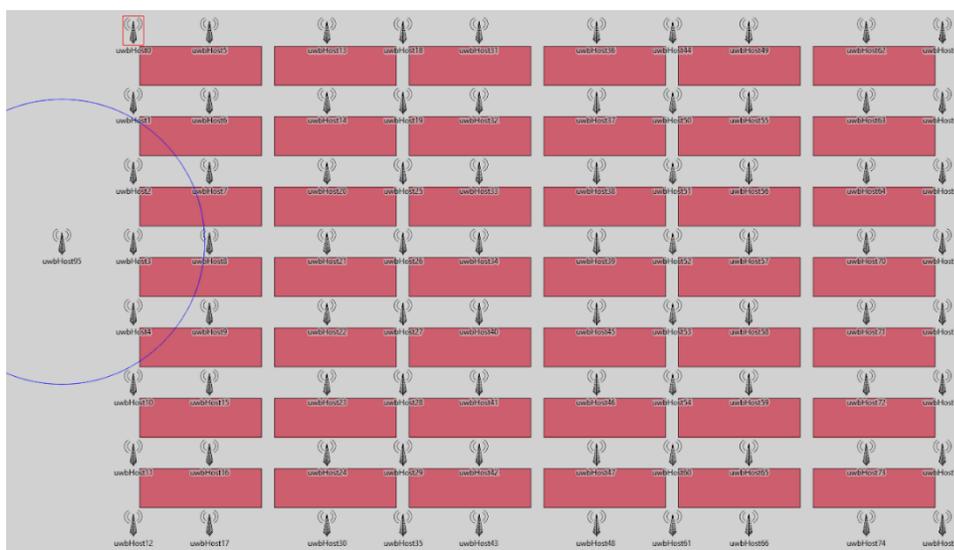
La naturaleza de código abierto de INET/INETMANET fomenta la colaboración y la extensibilidad. Los investigadores pueden modificar y extender los modelos existentes o añadir nuevos componentes según sea necesario para sus estudios específicos. Esta flexibilidad ha contribuido a la amplia adopción del *framework* en la comunidad académica y de investigación en redes.

### 5.5.3 Parámetros de la simulación

Es así, que utilizando las herramientas de software previamente descritas se procedió a programar las simulaciones que nos permitan obtener las métricas principales antes mencionadas, las cuales son: pérdida de paquetes y la latencia. Las simulaciones realizadas involucran tres tipos de protocolos de enrutamiento, por lo que los escenarios utilizados para estas simulaciones comparten parámetros como las características de capa física, las dimensiones de la red, el patrón de generación de tráfico, entre otros. A continuación, se mencionan tanto los parámetros comunes para las simulaciones como los que son específicos para el funcionamiento de cada protocolo de enrutamiento a evaluar.

#### **Parámetros comunes**

La distribución de los nodos en el escenario de simulación está en correspondencia con la arquitectura planteada en la sección 4.2 y se puede observar en la Figura 40, de igual manera el flujo lógico de la información sigue una topología de malla donde el nodo más a la izquierda del escenario juega el rol de sumidero de la información generada por la red o como se mencionado previamente, este tiene el rol de nodo central de la red. La tasa de transmisión de cada nodo se configuró de 6.8 Mbps en correspondencia con la tasa de transferencia ofrecida por los transceptores IEEE 802.15.4z.



**Figura 40.** Distribución geográfica de los nodos de la red.

### Parámetros del mecanismo de acceso al medio

Los parámetros incluidos en la implementación del algoritmo para el acceso múltiple al canal y el enlace de datos son fieles al diseño mencionado en las secciones 4.5.1 y 4.5.2 donde se especifica una duración de supertrama de un minuto y la asignación de intervalos de transmisión de dos milisegundos a los nodos de la red con el objetivo de evitar las colisiones durante esta etapa.

En todos los escenarios simulados la generación de tráfico estuvo dada por una aplicación que generaba dos paquetes con una carga útil de 700 Bytes cada uno, en cada supertrama, o sea, cada un minuto. Aplicando la ecuación (9) se obtiene que esto representa una tasa de generación de datos de 186.67 bps para cada nodo.

### Parámetros de configuración para la capa de enrutamiento

Cada uno de los protocolos de enrutamiento evaluados emplean diferentes parámetros de configuración para su funcionamiento. Además, en las simulaciones se contempló un período inicial de tiempo tomado para el establecimiento de la red, con el objetivo de obtener métricas separadas de ese instante inicial donde existe mucho tráfico de control de protocolo, necesario para el descubrimiento de rutas, y de la etapa más enfocada en el enrutamiento de la información generada por los nodos de la red. Se definió que la duración del período inicial sería de 59 segundos en todos los casos.

### Parámetros para el protocolo OLSR

Cuando se implementó OLSR como protocolo de enrutamiento en el escenario se definieron parámetros comunes para ambas etapas de funcionamiento, como son la disposición de los nodos para ser elegidos como MPR con un valor intermedio y uniforme para todos. No se permitió el uso de múltiples interfaces OLSR en los nodos y se utilizó la versión del protocolo que cumple con las especificaciones de la RFC 3626. La Tabla 10 recoge los parámetros de simulación utilizados en las diferentes etapas de funcionamiento de la red operando con este protocolo.

**Tabla 10.** Parámetros de configuración de la red funcionando con OLSR como estrategia de enrutamiento.

Parámetros	Etapas de conformación de la red	Etapas de enrutamiento de la información
Intervalo de paquetes <i>Hello</i>	5 segundos	120 segundos
Intervalo de paquetes de control de topología	10 segundos	350 segundos
Tiempo de validez de vecino	15 segundos	360 segundos

### Parámetros para el protocolo AODV

En el caso de las simulaciones usando el protocolo AODV, para la creación de rutas hasta el sistema central se definieron parámetros como el diámetro de la red igual a 15 unidades, este se relaciona con la cantidad de saltos que necesita el nodo más alejado para que la información transmitida por este sea recibida por otro nodo en el otro extremo de la red. También se decidió que la versión de AODV a implementar sería la que sigue la RFC 3561, no utilizar mensajes *Hello* para el mantenimiento de los enlaces entre vecinos y se configuró un tiempo de validez de ruta igual a 103 segundos.

### Parámetros para el protocolo *flooding*

El protocolo de *flooding* utilizado en simulación se configuró de forma tal que fuese un *flooding* plano capaz de almacenar identificación de hasta 100 mensajes, información empleada para evitar retransmisiones innecesarias. Así mismo, se definió un tiempo de vida de los paquetes igual a 16 unidades,

en concordancia con la cantidad de saltos que debería necesitar un mensaje para atravesar la red, desde fuente hasta destino.

#### 5.5.4 Métricas

Una vez definidos los parámetros de simulación para cada uno de los protocolos de enrutamiento, para el proceso de evaluación, se definieron las siguientes métricas de desempeño:

**La tasa de entrega de paquetes (PDR, por sus siglas del inglés, *Packet Delivery Rate*):** Esta métrica se define como la razón entre el número de paquetes que se recibieron exitosamente por el nodo sumidero de información de la red ( $P_r$ ) y el total de paquetes transmitidos por el resto de los nodos de la red ( $P_s$ ), durante el período de observación utilizado. El PDR es un indicador de la eficacia del protocolo de enrutamiento, puesto que la calidad de las rutas encontradas por este último repercute directamente con la pérdida de paquetes que se pueda dar durante el funcionamiento del sistema.

$$PDR_{avg}(\%) = \frac{P_r}{P_s} \times 100 \quad (10)$$

**Tiempo de demora:** Este se define como la diferencia entre los tiempos de transmisión de los paquetes desde la fuente de la comunicación y el tiempo en el que son recibidos por el destino, ambos tiempos con referencia a la capa de aplicación. Esta métrica indica la eficiencia del protocolo de capa de acceso al medio al medio para repartir equitativamente recursos de red como el derecho de transmisión de los nodos, y a la vez muestra sí el tráfico existente puede estar generando una sobrecarga, lo que se traduce en que los paquetes demoran más tiempo en alcanzar el destino de la comunicación.

$$Demora_{avg} = \frac{\sum_{i=1}^n (t_r - t_s)}{P_s} \quad (11)$$

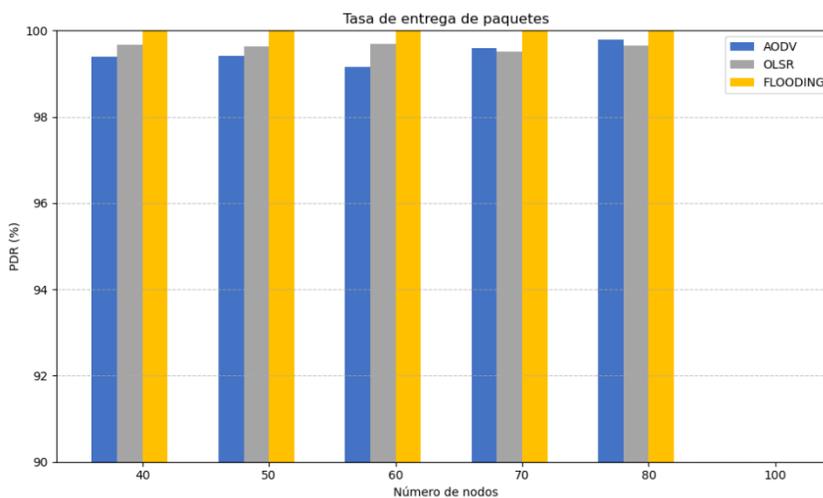
**Sobrecarga del protocolo de enrutamiento:** Está definido como cantidad de paquetes de control generados por los nodos como parte del funcionamiento del protocolo de enrutamiento sumado a la cantidad de paquetes de datos enviados y reenviados durante un período de observación.

### 5.5.5 Resultados de la simulación

De esta manera, las simulaciones realizadas para evaluar el desempeño de los diferentes protocolos de enrutamiento tuvieron una duración de 7200 segundos, tiempo en el que transcurren 120 tramas del protocolo MAC diseñado, donde cada trama tiene una duración de 60 segundos cada una. Se realizaron 100 repeticiones de cada experimento con el objetivo de obtener resultados consistentes, siendo posible el cálculo de promedios de las métricas de desempeño, puesto que estas pueden variar debido a factores aleatorios o condiciones iniciales diferentes.

En los experimentos realizados se varió la cantidad de nodos que conforman la red, de manera que también variaba el tráfico que se debía manejar en cada caso, puesto que un aumento en el número de dispositivos con información que transmitir se traduce en un aumento del tráfico de información que circula en la red. Esta variación se llevó a cabo mediante la incorporación de filas de 10 nodos al escenario de simulación.

Además, se evaluaron los resultados obtenidos en cuanto al PDR alcanzado usando los diferentes protocolos, se toma como referencia el nodo sumidero del sistema para contabilizar las recepciones exitosas de los paquetes generados por el resto de los nodos que conforman la red.



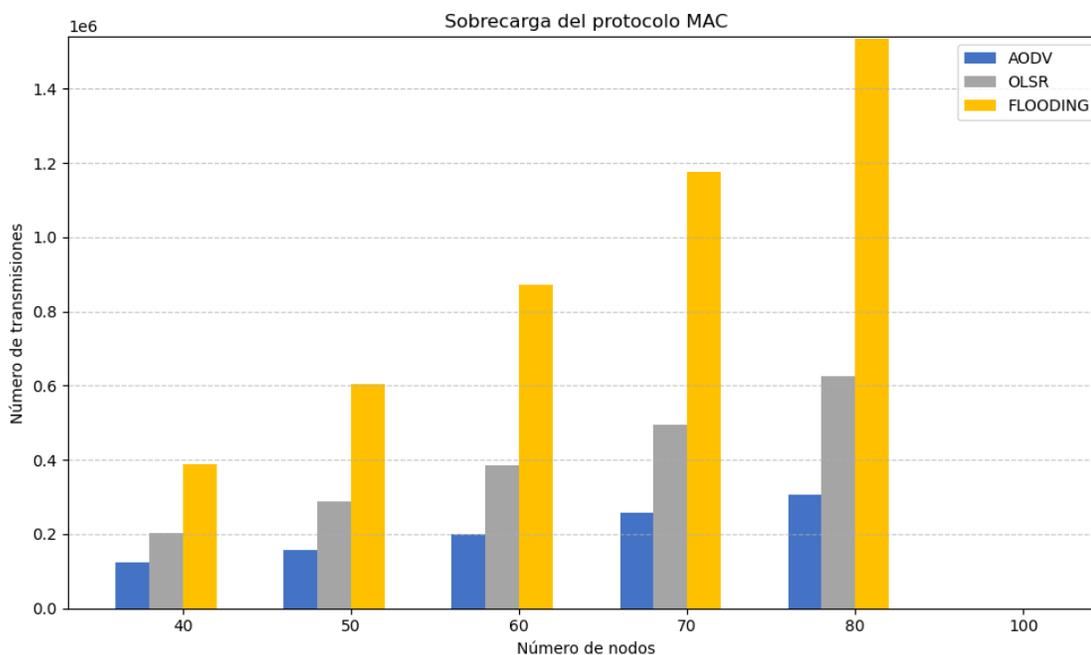
**Figura 41.** Tasa de paquetes entregados (PDR)

En la Figura 41 se muestra el PDR alcanzado por cada uno de los protocolos de enrutamiento, en ésta se observa, cómo a pesar de que todos los protocolos son muy eficaces para este escenario, sobresale el

algoritmo de *flooding* por lograr que la totalidad de paquetes generados consiguieron alcanzar el destino de la comunicación exitosamente.

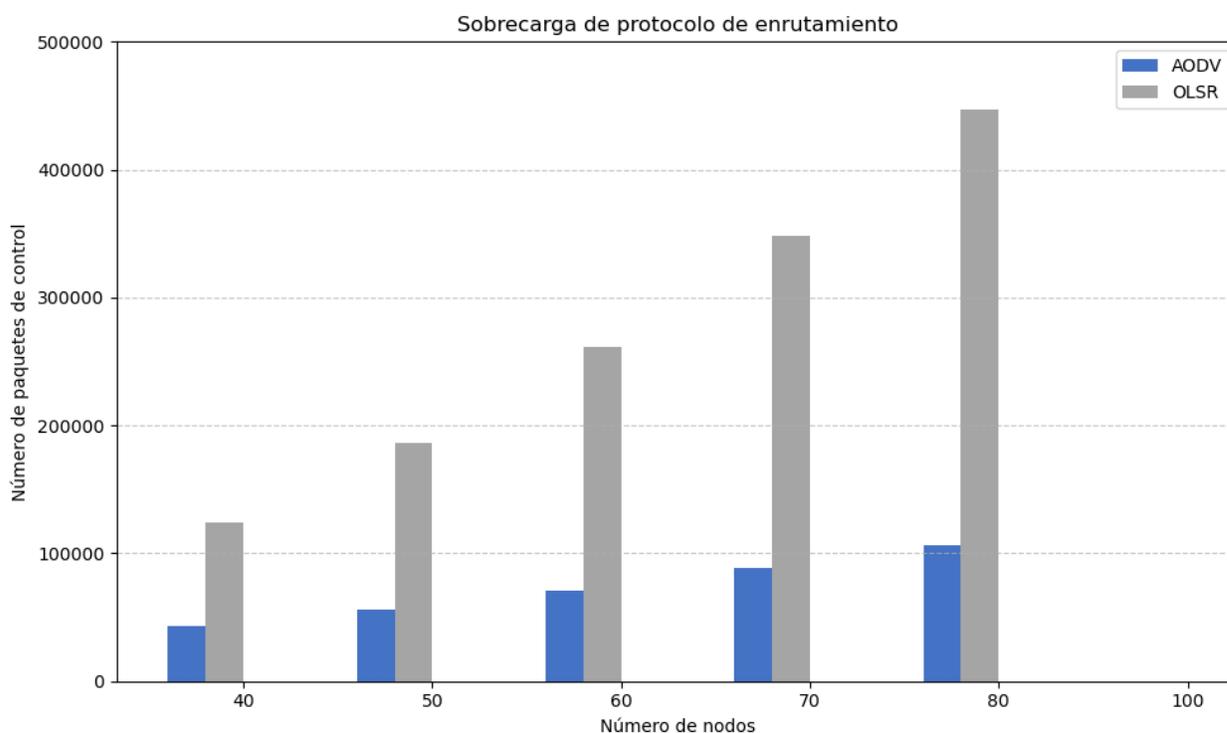
Por otro lado, es posible afirmar que a medida que aumenta el número de nodos de la red el protocolo AODV tiene mejor desempeño que OLSR en cuanto a la métrica de PDR.

La comparativa mostrada anteriormente se puede complementar con la información presentada en la Figura 42, en la que se observa que a pesar de la gran eficacia del protocolo de *flooding*, este necesitó realizar un gran número de transmisiones para conseguir tales valores de PDR, lo que se considera una sobrecarga del protocolo de capa MAC cuando lo comparamos con los resultados obtenidos de los escenarios que usaban AODV y OLSR. Según la Figura 42, en todos los escenarios ocurre que un aumento de la cantidad de nodos lógicamente causa un aumento de la cantidad de transmisiones necesarias para enrutar la información, pero existe una marcada diferencia entre *flooding* y los demás protocolos.



**Figura 42.** Sobrecarga del protocolo MAC

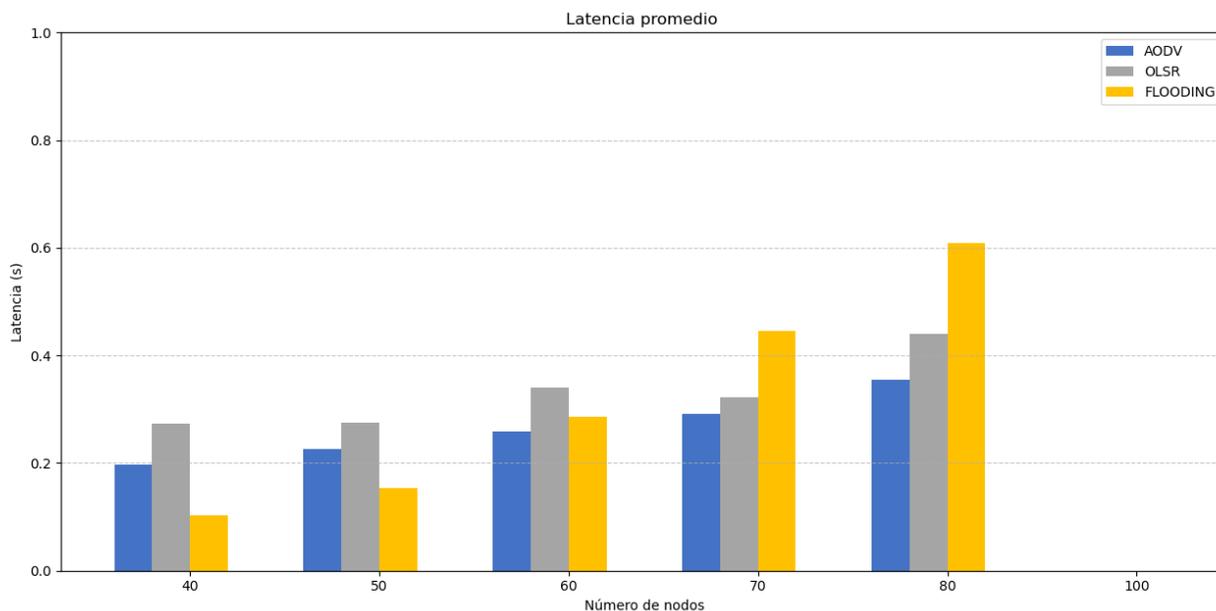
Para ser más específicos se construyó la Figura 43 donde se detalla las diferencias entre la cantidad de paquetes de control que necesitó en este caso AODV y OLSR para el funcionamiento de la red. En esta ocasión no se incluye el protocolo de *flooding* puesto que no utiliza paquetes de control para enrutar la información.



**Figura 43.** Comparación entre la cantidad de paquetes de control generado por cada protocolo

Asimismo, se puede establecer una comparativa final para tener más información sobre el desempeño de los protocolos analizados, y éste es el caso de la latencia promedio entre la generación de paquetes de información por los nodos de la red y su arribo exitoso al destino final de la comunicación.

En la Figura 44 se muestra la comparativa mencionada, pudiéndose observar que el valor promedio de tiempo de arribo de los paquetes es inferior a 1 segundo para todos los experimentos realizados independientemente del protocolo de enrutamiento empleado y de la cantidad de nodos que se utilicen. También es posible comentar que el protocolo AODV presenta el mejor comportamiento conforme aumenta la cantidad de nodos en la red, no así sucede con el protocolo de *flooding*, que pasa de ser el protocolo más rápido en una red de 40 nodos, al más lento cuando la red se integra de 80 nodos en funcionamiento.



**Figura 44.** Latencia promedio

Los resultados obtenidos de la etapa de enrutamiento de la información muestran que el protocolo de *flooding* es el más eficaz de los protocolos analizados para entregar los paquetes, pero a costa de realizar un número de transmisiones considerablemente mayor. Los protocolos AODV y OLSR resultaron estar bastante igualados en cuanto a la tasa de paquetes entregados con éxito en el destino; en este caso los elementos distintivos fueron la cantidad de paquetes de control necesitados y la sobrecarga de la capa MAC medida según la cantidad de transmisiones realizadas. En ambos aspectos el protocolo AODV resultó ser el de mejor desempeño y el que mejor manejó la cantidad de tráfico en aumento en la red.

## 5.6 Conclusiones de la evaluación experimental y resultados de la simulación

Analizando los resultados obtenidos luego de los experimentos realizados, se llega a la conclusión que, en la etapa de sincronización global, los dispositivos en la red muestran que no existe una sincronización perfecta, observándose un error de promedio de 1.31 ms, luego de que el valor de reloj del nodo central da 5 saltos inalámbricos como parte del proceso de propagación de la referencia de tiempo. En cuanto a los experimentos realizados para la etapa de acceso a la red y *ranging*, resultaron ser exitosos tanto en el proceso de asociación, donde varios dispositivos lograron completar el registro en la misma supertrama gracias a la etapa de acceso aleatorio implementada; como en la etapa de *ranging* donde el esquema de

acceso múltiple permitió una correcta medición de las distancias evitando colisión de información durante el proceso. Los experimentos en esta etapa se llevaron a cabo con un total de 5 dispositivos por motivos de disponibilidad de hardware.

En cuanto a las simulaciones realizadas para evaluar los protocolos de enrutamiento propuestos, muestran que todos tuvieron una eficacia notablemente alta en cuanto a la entrega de paquetes de forma exitosa al destino de las comunicaciones. Respecto a esta métrica sobresale el protocolo de *flooding* por conseguir que todos los paquetes de información generados por la red llegaran exitosamente al destino. Sin embargo, el buen desempeño de este protocolo se consiguió a costa de un gran número de transmisiones realizadas, lo que se considera una sobrecarga del protocolo de acceso al medio. Ocurrió que el protocolo de *flooding* en el caso de menor tráfico realizó el doble de las transmisiones totales que OLSR, el cual fue el segundo protocolo que más transmisiones realizó para ese mismo tráfico, y cuando se analizó el escenario de mayor tráfico en la red, el protocolo de *flooding* realizó más del doble de las transmisiones que OLSR. Lo mencionado anteriormente muestra que el protocolo de *flooding* analizado no hace un uso eficiente de los recursos de la red, por lo que no es recomendable para su adopción en el escenario propuesto en este trabajo de tesis.

Por otro lado, los resultados de las simulaciones muestran que la eficacia de los protocolos de AODV y OLSR cambia con la cantidad de tráfico que maneja la red, teniendo mejores resultados OLSR cuando el tráfico es bajo o moderado, y cuando aumenta la cantidad de tráfico que maneja la red AODV presenta las mejores estadísticas. Así mismo, es posible mencionar que OLSR necesitó intercambiar muchos más paquetes de control para descubrir y mantener rutas que los que necesitó AODV, tal es el caso, que cuando se operó con el mayor tráfico manejado en la red, OLSR necesitó más de tres veces la cantidad de paquetes de control que los necesitados por AODV.

Para el caso de la métrica de latencia promedio, muestra valores correctos en todos los protocolos, con un valor promedio inferior a 0.6 segundos. Se observa, además, que en el protocolo de *flooding* aumenta su latencia según aumenta el tráfico en la red puesto que pasa de ser el protocolo más rápido a ser el de mayor latencia. Los otros dos protocolos tienen un comportamiento más consistente siendo AODV más rápido que OLSR en todos los escenarios.

## Capítulo 6. Conclusiones y trabajo futuro

---

### 6.1 Introducción

En vista de todo lo descrito con anterioridad, es importante recordar que la investigación realizada surge gracias a la detección de un área de interés, la cual consiste en la implementación de un sistema de localización de contenedores en un área de almacenamiento.

El trabajo realizado se enfocó en el diseño e implementación de la capa de acceso al medio utilizando radios UWB, así como análisis a través de simulaciones de protocolos de enrutamiento que pudiesen ser utilizados para el sistema propuesto. En este capítulo se presentan las observaciones de manera más detallada sobre el análisis de los resultados obtenidos, así como recomendaciones y trabajo futuro que se espera sean de relevancia para la realización de mejoras al sistema propuesto.

Dicho lo anterior, considero que la aportación principal de este trabajo es el diseño e implementación de un mecanismo de acceso al medio que permitiera la operación de una red inalámbrica de sensores (WSN, por sus siglas del inglés) multisalto, que posibilite la transferencia de información de posicionamiento de los contenedores hasta el nodo central de la red. Con esto se logra ofrecer un sistema moderno y tecnológico que mejore la eficiencia en procesos de logística y movimientos de mercancías, mediante un rastreo en tiempo real de contenedores en áreas de descargue y almacenamiento. Para lograr esto, se diseñó un mecanismo para el acceso múltiple de los nodos en las etapas de transferencia de información y *ranging* que minimizará la ocurrencia de colisiones en las transmisiones.

El mecanismo de acceso al medio diseñado fue validado experimentalmente, y a su vez, mediante simulación fueron evaluados varios protocolos de enrutamiento, con el objetivo realizar recomendaciones de adopción dependiendo de las métricas de desempeño definidas. El resultado de este proceso hace posible afirmar que se cumplió con el objetivo principal del trabajo de tesis, el cual era diseñar una red inalámbrica de sensores multisalto basada en el estándar IEEE 802.15.4z (UWB) para la localización de contenedores en el área de almacenamiento.

## 6.2 Conclusiones

Con la finalidad de resumir los puntos claves del proceso de diseño llevado a cabo durante el presente trabajo de tesis, a continuación, se presentan las conclusiones en dos secciones, la primera referente al diseño del protocolo MAC y la etapa de *ranging*, y la segunda enfocada en la evaluación de los protocolos de enrutamiento seleccionados en vista a realizar una propuesta de adopción.

### 6.2.1 Sobre diseño e implementación del protocolo MAC y la etapa de *ranging*

Para llevar a cabo este proceso de diseño e implementación del protocolo MAC y la etapa de ranging, se realizó una búsqueda de bibliografía relacionada con las características de la tecnología banda ultra ancha basada en impulsos de radiofrecuencias (IR-UWB, por sus siglas del inglés) y de las consideraciones y propiedades de sistemas de localización que adoptan la tecnología, específicamente cuestiones de control de acceso múltiple al canal de radio, técnicas para la medición de distancias y capacidades de establecer redes inalámbricas multisalto. Luego de la implementación se realizaron experimentos dirigidos a la validación de las etapas diseñadas. A continuación, se presentan las principales conclusiones de esta etapa de diseño e implementación del protocolo MAC y las actividades de ranging.

- La etapa de sincronización global según los resultados obtenidos aún tiene margen de mejora ya que fue de 1.4 milisegundos en la desviación de los relojes de los dispositivos. A pesar de esto, se pueden considerar opciones como aumentar la duración de los intervalos de transmisión garantizada de manera que los tiempos de guarda definidos puedan evitar las colisiones de información debido a falta de sincronización entre los dispositivos.
- La definición de un período de tiempo donde los nodos acceden aleatoriamente al medio para enviar solicitudes de acceso a la red es una técnica factible si se considera que no existe control sobre el momento en que un nodo entra a la red. Se asume que un total de 20 oportunidades de enviar la solicitud cada minuto es suficiente si se considera que se trata de contenedores entrando a un área de almacenamiento y que tarda más de un minuto en colocar un contenedor dentro de esta área.

## 6.2.2 Sobre las simulaciones realizadas para la evaluación de los protocolos de enrutamiento propuestos

Se realizó una revisión bibliográfica de los protocolos de enrutamiento comúnmente empleados para el establecimiento de redes inalámbricas de sensores (WSN, por sus siglas en inglés). Se analizaron sus características y propiedades con el objetivo de establecer puntos de comparación entre ellos, los cuales permitieran realizar recomendaciones de adopción sustentadas en los resultados obtenidos del escenario de simulación de red en OMNet++. A continuación, se muestran las conclusiones obtenidas del análisis de los resultados de simulación.

- Las métricas de desempeño planteadas permitieron realizar observaciones en cuanto a la eficiencia de los protocolos evaluados. Fue posible identificar que el protocolo de *flooding* resultó ser el protocolo más eficaz dentro de los protocolos evaluados alcanzando un 100% de tasa de paquetes entregados en las diferentes configuraciones, así como el que menor latencia promedio tuvo en escenarios de baja densidad de nodos llegando a demorar 50% menos que los demás protocolos. En cambio, la sobrecarga de capa MAC experimentada por el sistema debido al funcionamiento de *flooding*, duplica la experimentada por la utilización de OLSR y triplica la medida cuando se implementó AODV en el experimento, lo que no justifica su adopción en sistemas en los que se espera un bajo consumo de energía de los dispositivos.
- Según los resultados obtenidos, AODV presenta una mejor eficacia que OLSR cuando se experimenta un aumento del tráfico que maneja la red, aunque no es determinante porque ambos presentan una tasa de paquetes entregados superior al 99%. AODV resalta por usar una cantidad significativamente menor de generación de tráfico de control para el descubrimiento y mantenimiento de las rutas para el intercambio de información con el sistema central, generando solamente el 23% del tráfico de control que transmitió OLSR en el caso del experimento que incorporaba la mayor cantidad de nodos. Lo mencionado anteriormente convierte a AODV como el protocolo más deseable para que sea parte del sistema propuesto.
- La latencia promedio experimentada en cada uno de los escenarios, trabajando con diferentes protocolos de enrutamiento, muestra que en todos los casos se obtuvo un desempeño correcto acorde con los requerimientos del sistema relativos a tener la información de la localización de los contenedores disponible cada 1 minuto en el nodo central de la aplicación, puesto que todos los protocolos experimentaron una latencia menor a 0.62 segundos en todos los experimentos.

### 6.3 Trabajo futuro

La investigación realizada es el primer acercamiento al diseño para un sistema de localización de tiempo real (RTLS, por sus siglas del inglés) para contenedores funcionando con dispositivos con capacidades IEEE 802.15.4z y que emplea una WSN multisalto para el enrutamiento de la información de localización, por lo que aún existen problemas que resolver y margen de mejora para el diseño realizado. A continuación, se muestran algunas recomendaciones para trabajo futuro que pueden llevarse a cabo a partir de este trabajo de tesis.

- Evaluar el desempeño del firmware creado para los dispositivos colocados en los contenedores en diferentes plataformas con el objetivo de determinar la opción con mejor relación rendimiento/precio y de esta manera abaratar el costo de fabricación de los dispositivos del sistema que estarán más expuestos y propensos a daños.
- Añadir un filtro de Kalman para lograr menos incertidumbre en las mediciones de distancia y de esta manera conseguir mejores resultados en los cálculos de posicionamiento de los contenedores.
- Si es posible implementar un circuito de compensación de reloj de tiempo real (RTC, por sus siglas del inglés) para evitar pérdidas de sincronización en el sistema.
- Realizar pruebas de campo para evaluar la cantidad de contenedores que pueden recibir servicio de un nodo de la red, ya que en el trabajo realizado solo se consideró que los contenedores que contaban con línea de vista directa (LOS, por sus siglas del inglés) con el nodo de la red serían los que participarán en actividades de *ranging*.
- Como evolución del sistema propuesto, se propone trabajar en un sistema de posicionamiento que permita integrar los contenedores sin línea de vista (NLOS) mediante la programación de funcionalidades especiales en los dispositivos instalados en ellos, logrando así la localización del 100% de los contenedores en el área de almacenamiento.

## Literatura citada

- Abid, K., Lakhlef, H., & Bouabdallah, A. (2021). A survey on recent contention-free MAC protocols for static and mobile wireless decentralized networks in IoT. *Computer Networks*, *201*, 108583. <https://doi.org/10.1016/J.COMNET.2021.108583>
- Achroufene, A., Chelik, M., & Bouadem, N. (2021). Modified CSMA/CA protocol for real-time data fusion applications based on clustered WSN. *Computer Networks*, *196*, 108–143. <https://doi.org/10.1016/J.COMNET.2021.108243>
- Boukerche, A., & Zhou, X. (2020). A Novel Hybrid MAC Protocol for Sustainable Delay-Tolerant Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Sustainable Computing*, *5*(4), 455–467. <https://doi.org/10.1109/TSUSC.2020.2973701>
- Brunacci, V., De Angelis, A., & Costante, G. (2022). Development of a Cooperative Localization System using a UWB Network and BLE Technology. In IEEE (Ed.), *2022 IEEE International Symposium on Measurements & Networking (M&N)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MN55117.2022.9887703>
- Buffi, A., Bernardini, F., Nepa, P., Marracci, M., Tellini, B., Di Donato, L., Pirozzi, M., Tomassini, L., & Ferraro, A. (2021). RFID-Based Localization Enables a Smart System for Worker Safety. In IEEE (Ed.), *6th International Forum on Research and Technology for Society and Industry, RTSI 2021 - Proceedings* (pp. 513–518). Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. <https://doi.org/10.1109/RTSI50628.2021.9597296>
- Chen, Y. E., Liew, H. H., Chao, J. C., & Wu, R. B. (2023). Decimeter-Accuracy Positioning for Drones Using Two-Stage Trilateration in a GPS-Denied Environment. *IEEE Internet of Things Journal*, *10*(9), 8319–8326. <https://doi.org/10.1109/IJOT.2022.3231704>
- Cho, H., Kim, T., Park, Y., & Baek, Y. (2012). Enhanced Trajectory Estimation Method for RTLS in Port Logistics Environment. In IEEE (Ed.), *2012 IEEE 14th International Conference on High Performance Computing and Communication & 2012 IEEE 9th International Conference on Embedded Software and Systems* (pp. 1555–1562). IEEE. <https://doi.org/10.1109/HPCC.2012.227>
- Coppens, D., De Poorter, E., Shahid, A., Lemey, S., Van Herbruggen, B., & Marshall, C. (2022). An overview of UWB standards and organizations (IEEE 802.15. 4, FiRa, Apple): Interoperability aspects and future research directions. *IEEE Access*, *10*, 70219–70241. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3187410>
- Das, S. R., Perkins, C. E., & Belding-Royer, E. M. (2003). RFC 3561 - Ad hoc On-Demand Distance Vector (AODV) Routing. In *Request for Comments* (Vol. 3561, p. 37). RFC Editor. <https://doi.org/10.17487/RFC3561>
- De Raeve, N., Verhaever, J., Van Torre, P., Ronse, F., & Rogier, H. (2022). BLE-based Power Efficient WSN for Industrial IoT Train Integrity Monitoring. *2022 7th International Conference on Smart and Sustainable Technologies, SpliTech 2022*. <https://doi.org/10.23919/SPLITECH55088.2022.9854382>

- Ge, F., & Shen, Y. (2022). Single-Anchor Ultra-Wideband Localization System Using Wrapped PDoA. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 21(12), 4609–4623. <https://doi.org/10.1109/TMC.2021.3083613>
- Gupta, N., Jain, A., Vaisla, K. S., Kumar, A., & Kumar, R. (2021). Performance analysis of DSDV and OLSR wireless sensor network routing protocols using FPGA hardware and machine learning. *Multimedia Tools and Applications*, 80(14), 22301–22319. <https://doi.org/10.1007/S11042-021-10820-4/TABLES/8>
- Haapala, T., Rantataro, T., & Halonen, K. A. I. (2020). A fully integrated programmable 6.0-8.5-GHz UWB IR transmitter front-end for energy-harvesting devices. *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 55(7), 1922–1934. <https://doi.org/10.1109/JSSC.2020.2987734>
- IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks: Overview and Architecture*. (2014). <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2014.6847097>
- Islam, S., Islam Khan, M. N., Zannatun Ferdus, M., Islam, S. J., & Abul Kashem, M. (2020). Improving Throughput using Cooperating TDMA Scheduling of Wireless Sensor Networks. *2020 International Conference on Computing and Information Technology, ICCIT 2020*. <https://doi.org/10.1109/ICCIT-144147971.2020.9213713>
- Jiao, Z., Zhang, B., Li, C., & Mouftah, H. T. (2016). Backpressure-based routing and scheduling protocols for wireless multihop networks: A survey. *IEEE Wireless Communications*, 23(1), 102–110. <https://doi.org/10.1109/MWC.2016.7422412>
- Karapistoli, E., Pavlidou, F.-N., Gragopoulos, I., & Tsetsinas, I. (2010). An overview of the IEEE 802.15. 4a standard. *IEEE Communications Magazine*, 48(1), 47–53. <https://doi.org/10.1109/MCOM.2010.5394030>
- Kaur, A., Kumar, P., & Gupta, G. P. (2019). A weighted centroid localization algorithm for randomly deployed wireless sensor networks. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*, 31(1), 82–91. <https://doi.org/10.1016/J.JKSUCI.2017.01.007>
- Khan, F., Ahmad, S., Guruler, H., Cetin, G., Whangbo, T., & Kim, C. G. (2021). An Efficient and Reliable Algorithm for Wireless Sensor Network. *Sensors 2021, Vol. 21, Page 8355*, 21(24), 8355. <https://doi.org/10.3390/S21248355>
- Khan, K., Mehmood, A., Khan, S., Khan, M. A., Iqbal, Z., & Mashwani, W. K. (2020). A survey on intrusion detection and prevention in wireless ad-hoc networks. *Journal of Systems Architecture*, 105, 101701. <https://doi.org/10.1016/J.SYSARC.2019.101701>
- Kim, D., Jung, J., & Kwon, Y. (2022). 3D Void Handling Geographic P2P-RPL for Indoor Multi-Hop IR-UWB Networks. *Electronics*, 11(4), 625. <https://doi.org/10.3390/electronics11040625>
- Kim, D.-S., & Tran-Dang, H. (2019). 3D Perception Framework for Stacked Container Layout in the Physical Internet. In D.-S. Kim & H. Tran-Dang (Eds.), *Industrial Sensors and Controls in Communication Networks: From Wired Technologies to Cloud Computing and the Internet of Things* (pp. 241–258). Springer International Publishing. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-04927-0\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-030-04927-0_18)

- Kok, M., Hol, J. D., & Schön, T. B. (2015). Indoor positioning using ultrawideband and inertial measurements. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 64(4), 1293–1303. <https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2396640>
- Laadung, T., Ulp, S., Alam, M. M., & Moullec, Y. Le. (2022). Novel Active-Passive Two-Way Ranging Protocols for UWB Positioning Systems. *IEEE Sensors Journal*, 22(6), 5223–5237. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2021.3125570>
- Lakshmi, Y. V., Singh, P., Mahajan, S., Nayyar, A., & Abouhawwash, M. (2024). Accurate Range-Free Localization with Hybrid DV-Hop Algorithms Based on PSO for UWB Wireless Sensor Networks. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 49(3), 4157–4178. <https://doi.org/10.1007/s13369-023-08287-6>
- Landaluce, H., Arjona, L., Perallos, A., Falcone, F., Angulo, I., & Muralter, F. (2020). A Review of IoT Sensing Applications and Challenges Using RFID and Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 20(9). <https://doi.org/10.3390/s20092495>
- LAN/MAN Standards Committee of the IEEE Computer Society. (2020). IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. *IEEE, Amendment 1: Enhanced Ultra Wideband (UWB) Physical Layers (PHYs) and Associated Ranging Techniques*, 1–174. <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2020.9179124>
- Le, A. T., Tran, L. C., Huang, X., Ritz, C., Dutkiewicz, E., Phung, S. L., Bouzerdoum, A., & Franklin, D. (2020). Unbalanced Hybrid AOA/RSSI Localization for Simplified Wireless Sensor Networks. *Sensors*, 20(14), 38–54. <https://doi.org/10.3390/S20143838>
- Legrand, F., Bucaille, I., Héthuïn, S., De Nardis, L., Gaincola, G., Di Benedetto, M., Blazevic, L., & Rouzet, P. (2003). UCAN's ultra wide band system: MAC and routing protocols. *International Workshop on Ultra Wideband Systems*, 1–6. [http://newyork.ing.uniroma1.it/Papers/C51-Blazevic\\_al-IWUWBS03.pdf](http://newyork.ing.uniroma1.it/Papers/C51-Blazevic_al-IWUWBS03.pdf)
- Lorenc, A., Szarata, J., & Czuba, M. (2023). Real-Time Location System (RTL5) Based on the Bluetooth Technology for Internal Logistics. *Sustainability 2023, Vol. 15, Page 4976*, 15(6), 4976. <https://doi.org/10.3390/SU15064976>
- Macoir, N., Bauwens, J., Jooris, B., Van Herbruggen, B., Rossey, J., Hoebeke, J., & De Poorter, E. (2019). Uwb localization with battery-powered wireless backbone for drone-based inventory management. *Sensors*, 19(3), 467. <https://doi.org/10.3390/s19030467>
- Mekki, K., Bajic, E., Chaxel, F., & Meyer, F. (2018). Overview of Cellular LPWAN Technologies for IoT Deployment: Sigfox, LoRaWAN, and NB-IoT. *2018 IEEE International Conference on Pervasive Computing and Communications Workshops, PerCom Workshops 2018*, 197–202. <https://doi.org/10.1109/PERCOMW.2018.8480255>
- Mohammadmoradi, H., Heydariaan, M., & Gnawali, O. (2019). SRAC: Simultaneous ranging and communication in UWB networks. *2019 15th International Conference on Distributed Computing in Sensor Systems (DCOSS)*, 9–16. <https://doi.org/10.1109/DCOSS.2019.00025>
- Mosavat-Jahromi, H., Li, Y., Ni, Y., & Cai, L. (2021). Distributed and Adaptive Reservation MAC Protocol for Beaconing in Vehicular Networks. *IEEE Transactions on Mobile Computing*, 20(10), 2936–2948. <https://doi.org/10.1109/TMC.2020.2992045>

- Nourildean, S. W., Hassib, M. D., & Mohammed, Y. A. (2023). AD-Hoc Routing Protocols in WSN-WiFi based IoT in Smart Home. *Proceedings - International Conference on Developments in ESystems Engineering, DeSE, 2023-January*, 82–87. <https://doi.org/10.1109/DESE58274.2023.10099981>
- Pallier, D., Cam, V. Le, & Pillement, S. (2021). Energy-Efficient GPS Synchronization for Wireless Nodes. *IEEE Sensors Journal*, 21(4), 5221–5229. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.3031350>
- Pirch, H.-J., Global, H., & Leong, F. (2020). Introduction to impulse radio uwb seamless access systems. *Proceedings of the Fraunhofer SIT ID: SMART Worksho, Darmstadt, Germany*, 19–20. <https://www.firaconsortium.org/sites/default/files/2020-04/fira-introduction-impulse-radio-uwb-wp-en.pdf>
- Polonelli, T., Schläpfer, S., & Magno, M. (2022). Performance Comparison between Decawave DW1000 and DW3000 in low-power double side ranging applications. *2022 IEEE Sensors Applications Symposium (SAS)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/SAS54819.2022.9881375>
- Rawat, A. S., Rajendran, J., Ramiah, H., & Rana, A. (2020). LORA (Long Range) and LORAWAN technology for IoT applications in Covid-19 pandemic. *Proceedings - 2020 International Conference on Advances in Computing, Communication and Materials, ICACCM 2020, 2020-August*. <https://doi.org/10.1109/ICACCM50413.2020.9213067>
- Ridolfi, M., Van de Velde, S., Steendam, H., & De Poorter, E. (2018). Analysis of the scalability of UWB indoor localization solutions for high user densities. *Sensors*, 18(6), 1875. <https://doi.org/10.3390/s18061875>
- Schuh, M., Brunner, H., Stocker, M., Schuß, M., Boano, C. A., & Römer, K. (2022). First Steps in Benchmarking the Performance of Heterogeneous Ultra-Wideband Platforms. *2022 Workshop on Benchmarking Cyber-Physical Systems and Internet of Things (CPS-IoTBench)*, 34–39. <https://doi.org/10.1109/CPS-IoTBench56135.2022.00013>
- Sedlacek, P., Slanina, M., & Masek, P. (2019). An overview of the IEEE 802.15. 4z standard its comparison and to the existing UWB standards. *2019 29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/RADIOELEK.2019.8733537>
- Shan, F., Huo, H., Zeng, J., Li, Z., Wu, W., & Luo, J. (2022). Ultra-Wideband Swarm Ranging Protocol for Dynamic and Dense Networks. *IEEE/ACM Transactions on Networking*, 30(6), 2834–2848. <https://doi.org/10.1109/TNET.2022.3186071>
- Shen, H., Zong, Q., Tian, B., & Lu, H. (2022). Voxel-Based Localization and Mapping for Multirobot System in GPS-Denied Environments. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 69(10), 10333–10342. <https://doi.org/10.1109/TIE.2022.3153822>
- Sinha, S., & Ashwini, S. (2021). RSSI based Improved Weighted Centroid Localization Algorithm in WSN. *2021 2nd International Conference for Emerging Technology (INCET)*, 1–4. <https://doi.org/10.1109/INCET51464.2021.9456134>
- Son, S., Kim, J., Choi, H., Jung, Y., & Baek, Y. (2010). Design and Implementation of a Real Time Locating Systems over IEEE 802.15.4a Radio for Port Logistics. *2010 Seventh International Conference on Information Technology: New Generations*, 1183–1188. <https://doi.org/10.1109/ITNG.2010.194>

- Sun, D., Wei, E., Ma, Z., Wu, C., & Xu, S. (2021). Optimized CNNs to Indoor Localization through BLE Sensors Using Improved PSO. *Sensors*, 21(6). <https://doi.org/10.3390/s21061995>
- Tiemann, J., Eckermann, F., & Wietfeld, C. (2016). Multi-user interference and wireless clock synchronization in TDOA-based UWB localization. *2016 International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation (IPIN)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/IPIN.2016.7743696>
- Tiemann, J., Elmasry, Y., Koring, L., & Wietfeld, C. (2019). ATLAS FaST: Fast and simple scheduled TDOA for reliable ultra-wideband localization. *2019 International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2554–2560. <https://doi.org/10.1109/ICRA.2019.8793737>
- Valiollahi, S., Rodriguez, I., Zhang, W., Sharma, H., & Mogensen, P. (2024). Experimental Evaluation and Modeling of the Accuracy of Real-Time Locating Systems for Industrial Use. *IEEE Access*, 12, 75366–75383. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3405393>
- Van Herbruggen, B., Jooris, B., Rossey, J., Ridolfi, M., Macoir, N., Van den Brande, Q., Lemey, S., & De Poorter, E. (2019). Wi-pos: A low-cost, open source ultra-wideband (UWB) hardware platform with long range sub-GHZ backbone. *Sensors*, 19(7), 1548. <https://doi.org/10.3390/s19071548>
- Vashistha, A., & Law, C. L. (2021). A Novel E-DTDOA Based One-Way Ranging Using UWB-IR with Unsynchronized Anchors. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 17(2), 1274–1286. <https://doi.org/10.1109/TII.2020.2992620>
- Villarreal-Reyes, S., & Edwards, R. M. (2007). Maximum free distance binary to M-ary convolutional codes for pseudo chaotic type time hopping PPM impulse radio UWB. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 17(4), 250–252. <https://doi.org/10.1109/LMWC.2007.892935>
- Villarreal-Reyes, S., & Edwards, R. M. (2008). Analysis techniques for the power spectral density estimation of convolutionally coded impulse radio UWB signals subject to attenuation and timing jitter. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58(3), 1355–1374. <https://doi.org/10.1109/TVT.2008.926619>
- Villarreal-Reyes, S., Edwards, R. M., & Vardaxoglou, J. C. (2005). On the use of simulation-DFT based analysis for spectral estimation of PPM TH-IR UWB signals. *2005 IEEE 61st Vehicular Technology Conference*, 2, 1370–1374. <https://doi.org/10.1109/VETECS.2005.1543533>
- Wang, Y., Yang, X., Zhao, Y., Liu, Y., & Cuthbert, L. (2013). Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods. *2013 IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)*, 837–842. <https://doi.org/10.1109/CCNC.2013.6488558>
- Whichi, A., Weber, M., Ketata, I., Sahnoun, S., & Derbel, F. (2021). Simulation of Wireless Sensor Nodes based on Wake-Up Receivers. *18th IEEE International Multi-Conference on Systems, Signals and Devices, SSD 2021*, 235–240. <https://doi.org/10.1109/SSD52085.2021.9429306>
- Yau, K.-L. A., Peng, S., Qadir, J., Low, Y.-C., & Ling, M. H. (2020). Towards Smart Port Infrastructures: Enhancing Port Activities Using Information and Communications Technology. *IEEE Access*, 8, 83387–83404. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2990961>
- Yin, H., Yang, H., & Shahmoradi, S. (2022). EATMR: an energy-aware trust algorithm based the AODV protocol and multi-path routing approach in wireless sensor networks. *Telecommunication Systems*, 81(1), 1–19. <https://doi.org/10.1007/S11235-022-00915-0/METRCS>

Zhang, F., Duan, S., & Tan, J. (2024). UWB-Based Wireless Clock Synchronization and Real-Time Positioning in Smart Parking. *IEEE Sensors Journal*, 24(3), 3822–3832. <https://doi.org/10.1109/JSEN.2023.3340188>

Zhao, S., Zhang, X. P., Cui, X., & Lu, M. (2021). Optimal TOa localization for moving sensor in asymmetric network. *ICASSP, IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing - Proceedings, 2021-June*, 7928–7932. <https://doi.org/10.1109/ICASSP39728.2021.9414962>