

# Arquitecturas para la adquisición y distribución de la información de localización en sistemas de seguimiento en interiores basados en UWB

---

*Trabajo Fin de Máster*

*Máster en Tecnologías de la Información y Comunicaciones en Redes Móviles*

*Programa Oficial de Posgrado en Ingeniería de Telecomunicación*

*Curso 2009/2010*

*Septiembre 2010*

---

**Juan Chóliz Muniesa**

Director: Ángela Hernández Solana

Departamento Ingeniería Electrónica y Comunicaciones  
Ingeniería Superior de Telecomunicación  
Centro Politécnico Superior



*Universidad de Zaragoza*



*Ingeniería de Telecomunicaciones*



*Centro Politécnico Superior*



# **Arquitecturas para la adquisición y distribución de la información de localización en sistemas de seguimiento en interiores basados en UWB**

## **Resumen**

El presente trabajo fin de máster se enmarca dentro de la participación de la Universidad de Zaragoza, a través del Grupo de Tecnologías de las Comunicaciones (GTC) del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), en el proyecto integrado EUWB del VII Programa Marco.

La tecnología radio Ultra-Wideband es una de las tecnologías más prometedoras de cara a su uso en aplicaciones de localización y seguimiento en interiores, combinando un bajo consumo de potencia, complejidad y coste con una precisión del orden de centímetros en la estimación de las distancias, proporcionando buenas prestaciones en entornos multicamino y NLOS y permitiendo el despliegue de redes de transmisión de datos combinada con localización. Sin embargo, Ultra-Wideband presenta una serie de limitaciones tales como su corto alcance, y su limitada tasa de transmisión.

Cualquier sistema de localización basado en la estimación del tiempo de llegada conlleva el intercambio de tramas de ranging entre el nodo a localizar y una serie de nodos de referencia. Esto implica que una serie de recursos temporales (timeslots) deberán dedicarse a la localización, con la consiguiente reducción de la capacidad disponible para la transmisión de datos. Por ello la cantidad de recursos dedicados a la aplicación de localización debe evaluarse cuidadosamente y minimizarse en la medida de lo posible.

El objetivo principal de este trabajo es analizar la viabilidad de sistemas combinados de transmisión de datos y localización en entornos interiores basados en tecnología Ultra-Wideband mediante la evaluación de los recursos utilizados para la localización. Por ello, en el presente trabajo se proponen y evalúan diversas arquitecturas del sistema de seguimiento, así como diferentes estrategias para la adquisición y distribución de información de localización. También se analizará el impacto de otros parámetros de diseño tales como el número de nodos fijos utilizados en el cálculo de la posición, el método de selección de los nodos fijos y la tasa de actualización de la posición. Para ello, se ha desarrollado una aplicación de simulación específica que permita evaluar las prestaciones de cada una de las arquitecturas y estrategias propuestas en términos de recursos utilizados para la localización (timeslots necesarios para la adquisición y distribución de la información de localización) y error de posicionamiento.



## **Agradecimientos**

Quiero dar mi más sincero agradecimiento a Ángela y Toni por la confianza depositada en mí para hacerme cargo del proyecto EUWB, así como por su orientación a lo hora de plantear mi carrera investigadora y por su ayuda tanto en el planteamiento y en el desarrollo de las distintas tareas y en particular de este trabajo.

También a todos los profesores, investigadores y proyectistas, que forman o han formado parte del equipo investigador del proyecto EUWB y que en mayor o menor medida han colaborado en este trabajo.

Finalmente, agradecer al resto de socios del proyecto EUWB por su colaboración y las propuestas aportadas.



# Índice de Contenidos

<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>9</b>
1.1 PRESENTACIÓN.....	9
1.1.1 UWB como tecnología de posicionamiento .....	10
1.2 CONTEXTO.....	11
1.3 MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS.....	12
1.4 DOCUMENTACIÓN DEL TRABAJO FIN DE MÁSTER.....	13
<b>CAPÍTULO 2. ANÁLISIS DEL SISTEMA.....</b>	<b>15</b>
2.1 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN .....	15
2.2 TOPOLOGÍA DE LA RED .....	15
2.3 ESTRUCTURA DE LA SUPERTRAMA MAC .....	17
2.4 ADQUISICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOCALIZACIÓN .....	18
2.5 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN .....	21
2.6 ALGORITMOS DE LOCALIZACIÓN Y SEGUIMIENTO.....	22
2.7 MÉTODO DE SELECCIÓN DE LOS ANCHORS.....	22
<b>CAPÍTULO 3. DISEÑO Y DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN .....</b>	<b>25</b>
3.1 ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS DE DISEÑO .....	25
3.1.1 Entorno de desarrollo y simulación .....	25
3.1.2 Esquema de simulación .....	25
3.2 DESCRIPCIÓN DEL DISEÑO.....	26
3.2.1 Escenario .....	26
3.2.2 Modelado de los dispositivos UWB.....	27
3.2.3 Entrada de parámetros.....	28
3.2.4 Salida de resultados.....	28
3.2.5 Clase CNetwork.....	29
3.2.6 Clase CPicocell_manager .....	29
3.2.7 Clase CAnchor_node .....	29
3.2.8 Clase CTarget_node.....	30
3.2.9 Clase CLocation_manager.....	30
3.3 DESARROLLO DE LA SOLUCIÓN .....	30
3.4.1 Fases de desarrollo del simulador global .....	30
3.4.2 Proceso de desarrollo .....	31
3.4.3 Herramientas utilizadas .....	32
3.4.4 Planificación.....	32

<b>CAPÍTULO 4. RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	35
4.2 IMPACTO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN .....	35
4.3 MEJORAS EN LA ADQUISICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOCALIZACIÓN ..	36
4.4 NÚMERO DE ANCHORS UTILIZADOS EN LA LOCALIZACIÓN Y DISTANCIA ENTRE ANCHORS..	40
4.5 MÉTODO DE SELECCIÓN DE ANCHORS .....	43
4.6 EFECTO DE LA MOVILIDAD Y DE LA TASA DE ACTUALIZACIÓN DE LA POSICIÓN .....	46
4.7 DIMENSIONADO Y CAPACIDAD DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN .....	48
<b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES .....</b>	<b>49</b>
5.1 CONCLUSIONES .....	49
5.2 PUBLICACIONES GENERADAS .....	49
5.3 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURAS .....	50
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>53</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>55</b>
<b>ANEXO A DESCRIPCIÓN DEL SIMULADOR.....</b>	<b>59</b>
A.1 INTRODUCCIÓN .....	59
A.2 ESCENARIO.....	59
A.3 MODELOS IMPLEMENTADOS.....	60
A.3.1 Topología de la red .....	60
A.3.2 Estructura de la supertrama MAC .....	60
A.3.3 Arquitecturas del sistema de localización .....	60
A.3.4 Modelo dinámico de los targets .....	61
A.3.5 Modelo de ranging .....	61
A.3.6 Modelo de cobertura.....	61
A.3.7 Algoritmo de seguimiento .....	61
A.3.8 Modos de funcionamiento de ranging .....	62
A.3.9 Adquisición y distribución de la información de localización .....	62
A.3.10 Método de selección de anchors .....	62
A.4 DOCUMENTACIÓN DEL SIMULADOR .....	63
A.4.1 CSimulator.....	63
A.4.2 CNetwork .....	63
A.4.3 Picocell manager.....	65
A.4.4 CLocation_manager .....	67
A.4.5 CAnchor_node.....	68
A.4.6 CTarget_node .....	69
A.4.7 Fichero de entrada de parámetros .....	73
A.4.8 Ficheros de salida: error y resources.....	75
<b>ANEXO B RESULTADOS COMPLETOS .....</b>	<b>77</b>
B.1 INTRODUCCIÓN .....	77
B.2 IMPACTO DE LA ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE LOCALIZACIÓN .....	77
B.3 MEJORAS EN LA ADQUISICIÓN Y DISTRIBUCIÓN DE LA INFORMACIÓN DE LOCALIZACIÓN ..	81
B.4 NÚMERO DE ANCHORS UTILIZADOS EN LA LOCALIZACIÓN Y DISTANCIA ENTRE ANCHORS..	87
B.5 MÉTODO DE SELECCIÓN DE ANCHORS .....	90
B.6 EFECTO DE LA MOVILIDAD Y DE LA TASA DE ACTUALIZACIÓN DE LA POSICIÓN .....	97

# Capítulo 1. Introducción

## 1.1 Presentación

El conocimiento acerca de la localización de los terminales móviles se ha convertido en un requisito importante para las redes inalámbricas comerciales, de servicio público y militares. Mientras que en entornos exteriores, la tecnología GPS está ampliamente extendida con aplicaciones como los sistemas de navegación para automóviles, la gestión de flotas o la localización de llamadas de emergencia, las potenciales aplicaciones de la localización en interiores no se están explotando debido a la incapacidad de GPS para operar en entornos interiores. Ejemplos de posibles aplicaciones en interiores son la localización de equipos y personal médico en un hospital, la gestión de mercancías en almacenes o el desarrollo de auto-guías inteligentes para museos, mientras que centros comerciales, aeropuertos, palacios de exposiciones y congresos o estadios deportivos son algunos de los posibles escenarios de interés.

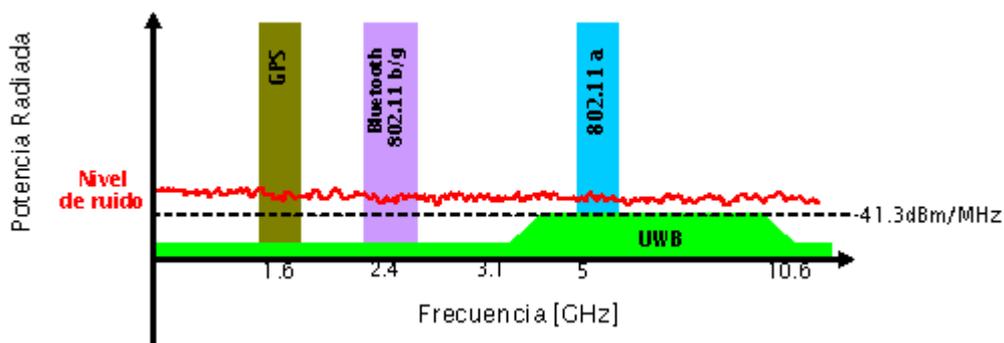
En general, la localización se compone de dos fases, la estimación de las distancias, también denominada ranging, y el cálculo de la posición. La estimación de las distancias se basa en la medida de distintos parámetros como pueden ser el ángulo de llegada (AOA, Angle of Arrival), el nivel de señal recibida (RSSI, Received Signal Strength Indication) o el tiempo de llegada (TOA, Time of Arrival) de señales de referencia transmitidas entre el elemento a localizar y los nodos de referencia. Por otro lado, para el cálculo de la posición existen multitud de algoritmos, desde los más sencillos basados en cálculos geométricos hasta algoritmos de seguimiento que tienen en cuenta la posición anterior del usuario y su trayectoria.

La precisión de la localización depende en gran medida de los parámetros de las señales y por tanto de la tecnología utilizada, dado que determina la calidad de la estimación de dichos parámetros. Por lo que respecta a las tecnologías radio, dejando aparte otras alternativas tales como sistemas ópticos o de ultrasonidos, las redes celulares (GSM, etc.) proporcionan información de posicionamiento, aunque su precisión es insuficiente para la mayoría de aplicaciones, especialmente en el caso de entornos interiores. En la literatura pueden encontrarse múltiples propuestas de sistemas de localización en interiores basados en tecnologías radio de medio y corto alcance tales como WiFi, Bluetooth, Zigbee o Ultra-Wideband (UWB) con distintos niveles de precisión, alcance y complejidad. Por lo general los sistemas de localización basados en la estimación del RSSI no son muy adecuados para entornos interiores, ya que el RSSI es muy sensible al efecto multicamino y a la falta de visión directa (NLOS, non-line-of-sight) y su precisión por lo general es del orden de unos pocos metros [1].

### 1.1.1 UWB como tecnología de posicionamiento

Ultra-Wideband (UWB) es una de las tecnologías más prometedoras de cara al desarrollo de sistemas de localización en interiores. De acuerdo a la definición de la FCC, un sistema se considera como UWB si cumple una de las dos condiciones siguientes: que el ancho de banda de la señal transmitida sea superior al 20 por ciento de la frecuencia central, o que el ancho de banda total de la señal transmitida sea superior a 500MHz. UWB combina un tamaño y consumo de potencia muy reducido con una alta capacidad de transmisión y una elevada precisión en la estimación de las distancias, permitiendo la transmisión de datos y la localización de forma simultánea [2].

Como consecuencia de disponer de una señal con elevado ancho de banda, la energía se distribuye en una banda frecuencial lo suficientemente amplia como para que su densidad espectral de potencia esté por debajo del nivel de ruido. Esto permite la reutilización del espectro, generando un bajo nivel de interferencia sobre servicios ya existentes de banda estrecha, como se muestra en la Figura 1.



**Figura 1. Situación de UWB en el espectro de frecuencias**

En función de su aplicación, cabe distinguir entre dos tipos fundamentales de sistemas UWB:

- HDR/VHDR (High/Very High Data Rate): Se basan en modulaciones como espectro ensanchado por secuencia directa (DSSS) y OFDM multibanda (MB-OFDM) y presentan tasas de transmisión elevadas, hasta centenares de Mbps, y alcances cortos, hasta 5 metros. Ambas propuestas se estudiaron en el grupo IEEE 802.15.3a, que se cerró sin acuerdo. Sin embargo, la propuesta de MB-OFDM ha sido impulsada por la WiMedia Alliance, que ha desarrollado el estándar WiMedia (ECMA-368), adoptado por el USB Implementers Forum para las capas inferiores de WUSB (Certified Wireless USB).
- LDR/LDR-LT (Low Data Rate with Location Tracking): Se basan en modulaciones IR (Impulse Radio) y presentan tasas de transmisión inferiores, hasta la decena de Mbps, pero mayores alcances, del orden de decenas de metros. Además permiten una gran resolución en la

estimación de la distancia, por lo que son apropiadas para la localización y seguimiento. El uso de UWB en redes inalámbricas de área personal (WPANs) de baja tasa se contempla en el estándar IEEE 802.15.4a.

Este trabajo se centra en los sistemas LDR-LT. Los sistemas IR-UWB se basan en la transmisión de pulsos de muy corta duración, lo que origina señales con un ancho de banda muy elevado. La corta duración de los pulsos, típicamente del orden del nanosegundo, permite una gran precisión en la estimación del tiempo de llegada (TOA) y por tanto una gran resolución en la estimación de la distancia, del orden de unos pocos centímetros. Además, gracias a la corta duración de los pulsos, UWB proporciona buenas prestaciones incluso en entornos multicamino y NLOS, ya que es posible distinguir las distintas componentes recibidas [3]. Además, UWB proporciona otras ventajas frente a sistemas como WiFi tales como una menor complejidad y consumo de potencia, lo que resulta fundamental a la hora de integrar los sensores en dispositivos alimentados mediante baterías. Además, el elevado ancho de banda de UWB proporciona una mayor inmunidad frente a interferencias mientras que WiFi, Bluetooth y ZigBee operan en la saturada banda de los 2.4 GHz.

En la actualidad es posible encontrar algunos sistemas de localización comerciales basados en UWB (Ubisense, Time Domain, Zebra-Multispectral Solutions). Sin embargo, por lo general se trata de soluciones propietarias que no siguen ningún estándar. Además, no proporcionan capacidad de comunicación de forma simultánea a la localización. Los sensores/receptores se conectan con el motor de localización mediante Ethernet, mientras que los tags no tienen capacidad de comunicación ni presentan ningún interfaz para su integración en otro dispositivo. Por contra, las soluciones basadas en un estándar, como el IEEE 802.15.4a-2007, permitirían la interoperabilidad entre distintas soluciones y facilitarían la integración con dispositivos de usuario.

## **1.2 Contexto**

El presente proyecto se enmarca dentro de la participación de la Universidad de Zaragoza, a través del Grupo de Tecnologías de las Comunicaciones (GTC) del Instituto de Investigación en Ingeniería de Aragón (I3A), en el proyecto integrado EUWB del VII Programa Marco.

Dentro del proyecto EUWB, la participación del grupo investigador de la Universidad de Zaragoza se focaliza en dos grupos de trabajo: el grupo de trabajo 4, centrado en la investigación de sistemas de localización y seguimiento avanzados, y el grupo de trabajo 6, centrado en la integración de UWB y otras tecnologías en redes heterogéneas.

Uno de los posibles escenarios dentro del grupo de trabajo de redes heterogéneas es la integración de la tecnología LDR-LT UWB en dispositivos de

usuario en redes de acceso inalámbricas tales como UTMS o WiMAX. El objetivo de integrar UWB en estos dispositivos es el de proporcionar información de localización en entornos interiores, complementando la información de posicionamiento en exteriores proporcionada por GPS. Los principales escenarios de aplicación identificados son áreas de interiores relativamente grandes y con una alta densidad de usuarios tales como centros comerciales, palacios de congresos, aeropuertos, etc. La disponibilidad de información de posicionamiento es fundamental para el desarrollo de servicios basados en localización, además de poder ser aprovechada por la propia red de acceso celular para mejorar la gestión de recursos radio.

Dentro del grupo de trabajo 4, una de las tareas planteadas por el grupo investigador de la Universidad de Zaragoza es el desarrollo de una herramienta de simulación que permita analizar las prestaciones reales de un sistema de localización UWB en un entorno interior de área relativamente grande, evaluando las posibles alternativas de diseño (arquitecturas, algoritmos, etc.). Para ello se utilizan las especificaciones reales tanto a nivel físico como de acceso al medio de los dispositivos LDR-LT UWB que se han desarrollado dentro del propio proyecto. El presente trabajo fin de máster se enmarca dentro de esta línea de trabajo.

### **1.3 Motivación y objetivos**

Gracias a la capacidad de transmisión de datos y localización simultánea de UWB, una única red UWB puede utilizarse para interconectar diferentes sensores (por ejemplo, una red de sensores de detección de incendio) y para localizar a usuarios móviles. Esta característica es muy importante de cara a minimizar la infraestructura fija y el cableado, ya que una única red de sensores, interconectados entre ellos de forma inalámbrica, podría utilizarse para proporcionar ambas funcionalidades. Además, los usuarios podrían acceder a otro tipo de información de interés a través de la red UWB.

Sin embargo, la aplicación de la tecnología UWB para el despliegue de redes combinadas de transmisión de datos y localización en escenarios de interiores relativamente amplios presenta una serie de inconvenientes derivados del corto alcance y la limitada capacidad de transmisión de los sistemas LDR-LT UWB.

En primer lugar, el área de interés puede ser relativamente grande (longitudes de centenares de metros) frente al alcance de UWB (10-50 metros), lo que implica que serán necesarios un número elevado de nodos fijos de referencia (anchors) y eventualmente múltiples picoceldas UWB. La arquitectura del sistema y la topología de la red deben seleccionarse de manera que se adecúe al gran tamaño de la red.

Cualquier sistema de localización basado en la estimación del TOA conlleva el intercambio de tramas de ranging entre los nodos de referencia (anchors) y los elementos a localizar (targets). Además, las distancias estimadas deben transmitirse a un controlador de localización (LC) que calcula la posición de los targets. Esto implica que una serie de recursos temporales (timeslots) deben dedicarse a la localización, con la consecuente reducción de la tasa de datos disponible para transmisión de datos no relativos a la localización. La movilidad de los usuarios implica que la tasa de actualización de la posición debe ser relativamente elevada de cara a mantener el error de la posición estimada por debajo de un valor razonable. Sin embargo, una mayor tasa de actualización de la posición implica una mayor necesidad de recursos. Finalmente, el sistema debe ser capaz de manejar un gran número de usuarios, lo que también conlleva una mayor necesidad de recursos.

En consecuencia, la cantidad de recursos que son necesarios para la aplicación de localización y seguimiento debe evaluarse cuidadosamente de cara a garantizar que el sistema puede satisfacer los requisitos de precisión y número de usuarios deseado y por otro lado proporcionar una tasa de datos para comunicación suficiente con un nivel razonable de complejidad.

El principal objetivo de este trabajo es analizar la viabilidad de un sistema UWB de comunicación y localización simultánea para escenarios amplios de interiores mediante la evaluación de los recursos temporales necesarios para la localización. Por ello, se hace necesario disponer de una herramienta de simulación de cara a evaluar las prestaciones que un sistema de localización UWB real puede proporcionar en entornos de estas características. De cara a que esta evaluación sea realista, se deben utilizar las especificaciones tanto a nivel físico como de acceso a red (topología de la red, estructura de la supertrama, duración de los slots) de un sistema UWB real, en concreto del diseñado dentro del propio proyecto EUWB, además de un modelo de estimación de distancias en interiores. De cara a optimizar la necesidad de recursos, se proponen diferentes arquitecturas del sistema de localización y estrategias para la adquisición y distribución de la información de localización. También se evalúa el impacto de diferentes parámetros de diseño, tales como el número de anchors utilizados en la estimación o la tasa de actualización de la posición.

## **1.4 Documentación del trabajo fin de máster**

La documentación aportada en este trabajo fin de máster está compuesta por la memoria propiamente dicha y los anexos a la memoria.

### **• Memoria**

La memoria es el documento donde se reflejan todas las decisiones de análisis, diseño e implementación tomadas en la elaboración de este trabajo

fin de máster, así como los resultados y conclusiones principales. La memoria consta de los siguientes apartados:

- Descripción del proyecto: Describe brevemente el contexto de este trabajo fin de máster, así como su motivación y objetivos.
- Análisis de requisitos: En este capítulo se analizan los distintos elementos funcionales del sistema de localización UWB y que constituyen los requisitos para el diseño y desarrollo de la aplicación de simulación.
- Diseño y desarrollo del proyecto: En este apartado se describe el diseño de la aplicación de simulación desarrollada, así como la planificación y desarrollo del trabajo.
- Resultados: Contiene un resumen de los principales resultados obtenidos.
- Conclusiones: Presenta las principales conclusiones extraídas, así como las posibles líneas de investigación futuras.
- Referencias bibliográficas.

• **Anexo A: Descripción del simulador**

En este anexo, se detalla el funcionamiento y la estructura de la aplicación de simulación desarrollada, así como las funciones realizadas por cada uno de sus elementos.

• **Anexo B: Resultados completos**

Este documento presenta un análisis más completo de los resultados obtenidos mediante la aplicación de simulación.

## Capítulo 2. Análisis del sistema

En este capítulo se describen las principales características del sistema de seguimiento en interiores basado en UWB, así como las arquitecturas y estrategias para la adquisición y distribución de la información de localización. De este análisis se derivan los requisitos para el simulador a desarrollar, que deberá modelar de la manera más fiel posible las características que aquí se describen.

### 2.1 Descripción del sistema de localización

El objetivo del sistema de localización y seguimiento es seguir la posición de usuarios móviles en escenarios de interiores relativamente amplios. Con ese propósito, sobre el escenario se desplegará una red UWB de transmisión de datos combinada con localización compuesta por varias picoceldas, aunque por simplicidad en este trabajo se va a considerar una única picocelda. Respecto a UWB, se considerarán las capas física (PHY) y de control de acceso al medio (MAC) propuestas en el marco del proyecto EUWB [4], que están basadas en el estándar IEEE 802.15.4 [5].

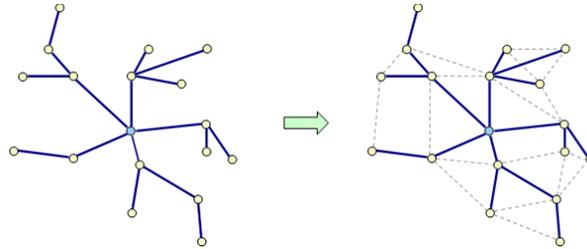
Cada picocelda se compone de nodos móviles a ser localizados (targets) y nodos fijos de referencia con posiciones conocidas (anchors). Las distancias entre los nodos target y anchor se estiman mediante un intercambio de tramas ranging, en la que el iniciador del intercambio estima la distancia a partir del tiempo de llegada (TOA) de la respuesta. Tanto target como anchor pueden iniciar el intercambio. La transmisión de datos entre nodos de una picocelda también es posible mediante las tramas de datos, que se retransmitirán a nivel MAC en caso de que origen y destino no estén directamente conectados. Así, las distancias estimadas se transmiten a un controlador de localización (LC), que es la unidad funcional que ejecuta el algoritmo de localización para obtener la posición estimada de los targets. La funcionalidad LC puede localizarse en uno o varios anchors o en los propios targets.

### 2.2 Topología de la red

Las picoceldas se basan en una topología mallada-centralizada (mesh centralized), que se define por una gestión de asignación de recursos centralizada y una referencia de sincronización temporal común centralizada. Para ello, se designa un coordinador de la picocelda que transmite las tramas piloto (beacon) y gestiona la asignación de recursos.

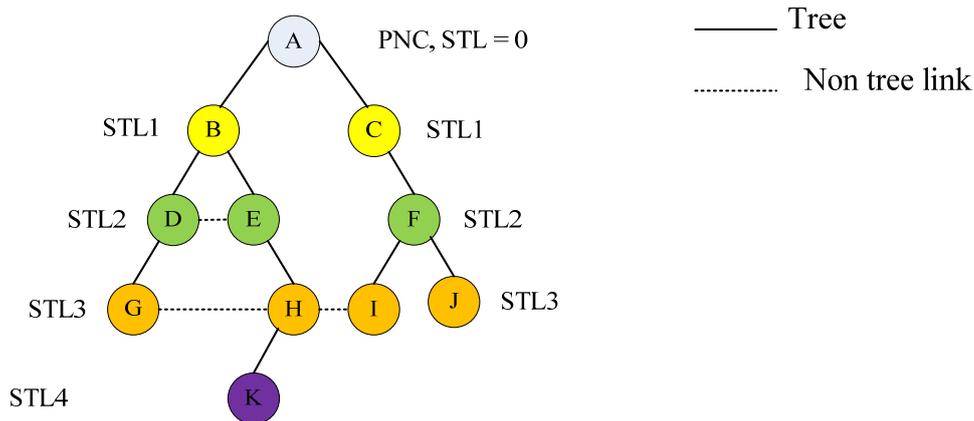
En la Figura 2 se muestra la construcción de una red mallada-centralizada. En primer lugar se construye un árbol para el transporte de las tramas piloto, solicitudes de asociación y comandos de solicitud de slots

garantizados. Posteriormente se extiende a un árbol mallado permitiendo la transmisión fuera del árbol de tramas de datos y ranging, así como de las tramas hello. Mediante las tramas hello que los nodos difunden periódicamente, cada nodo tiene conocimiento de sus nodos vecinos.



**Figura 2. Topología mallada-centralizada [4]**

El coordinador de la picocelda (Piconet Coordinator) se encuentra en el vértice del árbol. Los diferentes nodos se definen por su nivel en el árbol. El máximo número de niveles del árbol es 4. En la Figura 3 se muestra una posible representación del árbol.



**Figura 3. Ejemplo de árbol mallado [4]**

Cabe destacar que la retransmisión de las tramas de datos se realiza a nivel MAC, solicitando el nodo origen la asignación de slots para la ruta completa entre origen y destino. Cuando un nodo tiene datos que transmitir, enviará una solicitud de slots garantizados (GTS) al coordinador con su dirección como origen y la dirección del nodo destino. El coordinador, que conoce la estructura completa de la red, mirará las retransmisiones que son necesarias entre origen y destino y asignará los slots GTS necesarios para cada retransmisión. Si los nodos origen y destino son vecinos entre sí, únicamente será necesario un slot, en caso contrario la transmisión requerirá varios slots. El coordinador da a conocer las asignaciones de slots mediante las tramas beacon.

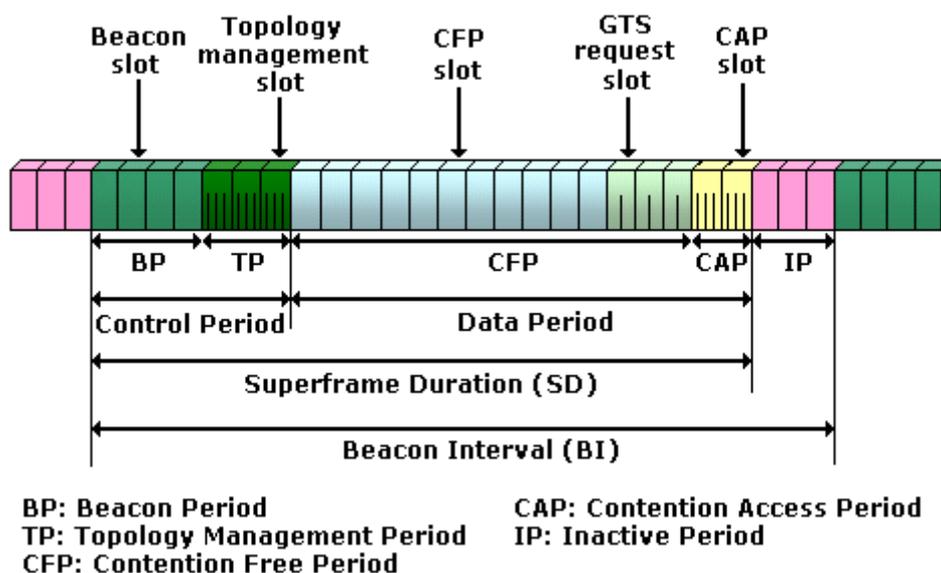
Por lo que respecta al ranging, las tramas de ranging nunca se retransmiten ya que éste únicamente puede realizarse entre nodos vecinos. Se definen dos tipos de tramas ranging: solicitud de ranging (ranging request) y

respuesta de ranging (ranging response). Ambas tramas requieren un slot para su transmisión. Finalmente, las tramas de hello se difunden a todos los vecinos, con lo que no llevan dirección de destino.

## 2.3 Estructura de la supertrama MAC

La capa MAC diseñada en el marco del proyecto EUWB tiene como objetivo aplicaciones de baja tasa de transmisión con capacidad de localización y seguimiento (LDR-LT). Está basada en el estándar 802.15.4 [5], con algunas mejoras para cumplir los requisitos de calidad de servicio y para proporcionar soporte de ranging y localización sobre una capa física UWB. En [4] se puede encontrar una descripción detallada de la capa MAC de EUWB.

La estructura de la supertrama define la temporización de slots utilizados para cada propósito (descubrimiento de vecinos, comunicación, ranging...). La supertrama MAC se divide en slots temporales (timeslots) en los que se envían las distintas tramas (tramas piloto, tramas hello, tramas de datos, tramas de ranging, solicitudes de slots...). La estructura de la supertrama se muestra en la Figura 4.



**Figura 4. Estructura de la supertrama MAC de EUWB [4]**

La supertrama se divide en dos periodos principales denominados periodo de control y periodo de datos. El periodo de control se divide a su vez en dos partes:

- El Beacon Period para el alineamiento de las tramas piloto. El primer slot se reserva para el coordinador, mientras que los siguientes se utilizan para la retransmisión del piloto.

- El Topology management Period (TP) para la transmisión de las tramas hello. Dada la menor longitud de las trama hello, cada slot del TP se divide 4 sub-slots.

Por otra parte, el periodo de datos se utiliza para la transmisión de tramas de datos, tramas de ranging, tramas de solicitud de slots GTS y tramas de comandos. Las tramas de datos, ranging y solicitud de slots GTS se envían en un periodo libre de contención (CFP, Contention Free Period), mientras que las tramas de comando se envían en el periodo de acceso por contención (CAP, Contention Access Period). Los slots de ranging se consideran como slots de datos y las tramas de ranging se envían en el periodo CFP como cualquier trama de datos. Por lo tanto, el periodo libre de contención CFP se compone de:

- Slots garantizados (GTS, Guaranteed Time Slots) para la transmisión de tramas de datos, reconocimiento (ACK) y ranging. El número de slots GTS dedicados a ranging puede definirse libremente en función del número de dispositivos a localizar y el número de medidas de ranging necesarias para actualizar la posición. Las tramas de reconocimiento inmediato (Immediate ACK) se envían en el mismo slot que la trama de datos correspondiente.
- Un periodo de solicitud de slots GTS (GTS Request Period). Dada la menor longitud de las tramas de solicitud de slots GTS, cada slot se divide en 2 sub-slots.

El periodo de acceso por contención CAP se utiliza para la transmisión de tramas de comando mediante un esquema de acceso múltiple ALOHA ranurado (slotted ALOHA). Cada slot CAP se divide en subslots de cara a retransmitir los comandos desde el nodo origen al coordinador de la picocelda y viceversa.

Finalmente, si no se alcanza la máxima longitud de la supertrama, se define un periodo inactivo antes del comienzo de la siguiente supertrama.

## **2.4 Adquisición y distribución de la información de localización**

De cara obtener la posición de los nodos target, deben estimarse las distancias entre los nodos target y los nodos anchor y transmitirse al controlador de localización (LC), lo que denominamos como adquisición y distribución de la información de localización. Tanto los nodos target como los anchor pueden estimar las distancias, siendo la ubicación de la función de adquisición una alternativa de diseño que puede impactar en la cantidad de recursos necesarios. En caso de que la función controlador de localización se localice físicamente en los nodos target, la función de adquisición deberá

localizarse también en los targets, ya que de esta forma no será necesaria la transmisión de las distancias estimadas, minimizando así los recursos necesarios.

La adquisición de la información de localización se realiza mediante el procedimiento de ranging. Se definen tres procedimientos [6]:

- One Way Ranging: El nodo target transmite una trama de ranging y cada anchor mide el tiempo de llegada de la trama. La posición del target puede obtenerse de las diferencias entre los tiempos de llegada en cada anchor. Sólo se necesita un timeslot, pero requiere la sincronización entre todos los anchors, por lo que no se va a considerar de aquí en adelante.
- Two Way Ranging: El iniciador del procedimiento (target o anchor) transmite una trama de solicitud de ranging (ranging request) a otro nodo, que estima el tiempo de llegada y transmite una trama de respuesta (ranging response) después de un tiempo predefinido. El iniciador mide el tiempo de llegada de la respuesta y estima el retardo de la transmisión entre los dos nodos y por tanto la distancia. Se requieren dos timeslots por cada medida, pero se elimina la necesidad de sincronización.
- Three Way Ranging: Similar al esquema Two Way Ranging, pero en este caso se envían dos tramas de respuesta para compensar la posible deriva de reloj. Al igual que en el caso anterior, el procedimiento puede iniciarlo tanto los nodos target como los nodos anchor, y la distancia la estima el iniciador del procedimiento. Requiere tres timeslots, pero mejora la precisión de las distancias estimadas, por lo que será el esquema considerado en este trabajo.

Para caracterizar el error en la estimación de las distancias se ha utilizado un modelo estadístico de ranging, identificado en el marco del proyecto EUWB y validado empíricamente utilizando los dispositivos LDR-LT desarrollados en el proyecto [7]. Las distancias estimadas en base a la medida del tiempo de llegada de ida y vuelta (round-trip TOA) mediante transacciones n-Way Ranging pueden modelarse como:

$$\tilde{d}_{ij} = d_{ij} + \varepsilon_{ij} + n_{ij} = d'_{ij} + n_{ij}$$

donde  $d_{ij}$  es la distancia real entre los nodos  $i$  y  $j$ ,  $d'_{ij}$  es la distancia sesgada (con un sesgo  $\varepsilon_{ij}$ ) y  $n_{ij}$  es un término de ruido residual. El sesgo modela los efectos del canal (atenuación, multicamino, NLOS...) mientras que el ruido residual modela el error en la medida del TOA (resolución, deriva de reloj...). Puede encontrarse más información sobre los modelos de ranging en [8], mientras que el modelo y parámetros específicos considerados pueden encontrarse en [7][9].

La distancia sesgada se modela como una suma ponderada de componentes gaussianas y exponenciales condicionadas por la distancia real y la configuración del canal (LOS/NLOS/NLOS severo). De esta manera se tiene en cuenta no solo el efecto multicamino, sino también la probabilidad de que no haya visión directa entre el target y el anchor, que crece conforme aumenta la distancia entre ambos.

Por otra parte, el ruido residual se modela como aditivo y centrado, con una varianza  $\sigma_n^2$  que depende de distintos términos del error de detección que afecta a las estimaciones individuales del TOA y a las duraciones implícitas en el protocolo de intercambio de tramas de ranging, y es independiente de la distancia.

Una vez que el iniciador del procedimiento de ranging (target o anchor) ha estimado las distancias, éstas deben transmitirse al controlador de localización en una trama de datos (measurement report data packet). El LC calcula la nueva posición y, en función de la aplicación, la transmite al nodo target (position update data packet).

De cara a reducir la cantidad de recursos (timeslots) necesarios para la adquisición y distribución de la información de localización, pueden aplicarse diferentes mejoras, que fueron propuestas en el marco del proyecto EUWB [6]:

- Agregación de datos (Data aggregation): Todas las distancias estimadas por un mismo iniciador (target o anchor) pueden agregarse y enviarse al LC en un único measurement report data packet.
- Solicitud broadcast/multicast (Broadcast/multicast request): En caso de que el intercambio de ranging sea iniciado por los targets, un target puede agregar varias solicitudes de ranging en una única solicitud de ranging enviada a todos sus anchors vecinos (target broadcast request) o a un conjunto de ellos (target multicast request). En caso de que el intercambio de ranging sea iniciado por los anchors, un anchor puede agregar varias solicitudes de ranging en una única solicitud de ranging enviada a todos sus targets vecinos (anchor broadcast request) o a un conjunto de ellos (anchor multicast request).
- Respuesta multicast (Multicast response): En caso de que el intercambio de ranging sea iniciado por los targets y después de recibir la solicitud de ranging de varios targets, un anchor puede agregar las respuestas en una única respuesta de ranging (anchor multicast response) enviada a los targets correspondientes. En caso de que el intercambio de ranging sea iniciado por los anchors y después de recibir la solicitud de ranging de varios anchors, un target puede agregar las respuestas en una única respuesta de ranging (target multicast response) enviada a los anchors correspondientes.

No todas las mejoras tienen la misma complejidad de implementación. En caso de que el intercambio de ranging sea iniciado por los targets, la respuesta multicast de los anchors requeriría la actualización simultánea de todos los targets de cara a poder agregar las respuestas en un paquete de respuesta multicast. Lo mismo se puede aplicar a la solicitud broadcast/multicast en el caso de que el intercambio sea iniciado por los anchors, ya que el anchor debe agregar las solicitudes de ranging a varios targets. Finalmente, también aplica a la agregación de datos en el caso de que el intercambio sea iniciado por los anchor, ya que el anchor debe agregar las distancias estimadas a varios targets en un único paquete de datos.

## **2.5 Arquitectura del sistema de localización**

Como ya se ha comentado anteriormente, la funcionalidad de localización y seguimiento (LT) es ejecutada por los controladores de localización (LC), que pueden localizarse físicamente en uno o más nodos anchor o en los nodos target. En función de la ubicación de los LC, pueden definirse varias arquitecturas (centralizadas y distribuidas).

En el caso de la arquitectura centralizada en la red, la funcionalidad de LT se implementa en uno o más nodos anchor previamente definidos. Utilizar un único LC conlleva una mayor necesidad de recursos, ya que se necesitarán varios saltos y por lo tanto varios slots para transmitir la información de localización hasta el LC. Por otro lado, definir varios LC reduce la necesidad de recursos, pero incrementa la complejidad, ya que debe implementarse la funcionalidad de LT en varios nodos, además de un procedimiento para que cada target se asigne al LC más cercano en cada momento.

En la arquitectura distribuida cada target escoge dinámicamente a uno de sus nodos anchor vecinos para que ejecute la funcionalidad de LT. Por lo tanto, puede haber tantos LCs simultáneamente como targets. Dado que la funcionalidad de LT siempre se ejecuta por un anchor vecino del target, no habrá necesidad de retransmisión y únicamente se necesitará un slot para transmitir las tramas de datos con la información de localización entre el target y el LC, con la consiguiente reducción de los recursos necesarios. Como inconveniente, la funcionalidad de LT debe implementarse en cada anchor, así como un procedimiento para la elección del anchor.

Finalmente, en la arquitectura centralizada en los móviles la funcionalidad de LT se implementa en los nodos target. Los nodos target realizan el ranging con sus nodos anchor vecinos y obtienen su propia posición aplicando el algoritmo de localización y seguimiento. Por tanto, no hay necesidad de transmitir las distancias estimadas ni la posición actualizada. Sin embargo, la implementación de la funcionalidad de LT en los nodos target incrementaría su complejidad y esto no siempre es deseable, por ejemplo en el caso de que los targets sean tags con una capacidad computacional mínima.

La viabilidad de esta arquitectura dependerá de la aplicación específica y de los dispositivos a localizar.

## **2.6 Algoritmos de localización y seguimiento**

Por lo que respecta a las técnicas de localización y seguimiento, podemos distinguir entre técnicas paramétricas y no paramétricas. Las técnicas paramétricas son aquellas en las que la posición se calcula en base al conocimiento a priori de un modelo, mientras que las técnicas no paramétricas procesan directamente los datos con el uso, en algunos casos, de algunos parámetros estadísticos (media, varianza). Asimismo podemos distinguir entre algoritmos de localización, en los que el cálculo de la posición se realiza en base a las medidas actuales, independientemente de las posiciones estimadas anteriormente, y algoritmos de seguimiento, en los que se estima también la trayectoria del target, utilizando esta estimación como base para el cálculo de estimaciones posteriores.

Dado que el objetivo del presente trabajo se centra principalmente en la evaluación de la necesidad de recursos y no de la precisión del sistema, únicamente se van a implementar dos técnicas sencillas de localización y seguimiento. Por un lado la trilateración, que calcula la posición del target a partir de la distancia a tres nodos de referencia en base a relaciones geométricas, como ejemplo de algoritmo de localización no paramétrico. Y por otro lado, el filtro extendido de Kalman, que es un algoritmo de seguimiento paramétrico ampliamente utilizado en sistemas de navegación [10]. Con posterioridad a este estudio, se implementarán técnicas más avanzadas de cara a realizar estudios de la precisión del sistema. Puede encontrarse más información acerca de algoritmos de localización y seguimiento para UWB y propuesta de técnicas paramétricas y no paramétricas en [8].

## **2.7 Método de selección de los anchors**

Un parámetro importante a tener en cuenta por lo que respecta a la localización es el número de anchors que se utilizan para el cálculo de la posición, ya que un mayor número de anchors permite una mayor precisión y una menor variabilidad, pero también incrementa el número de intercambios de ranging y por tanto la cantidad de recursos necesarios.

Por otro lado, los anchors más cercanos proporcionan estimaciones de la distancia más precisas y fiables, por lo que debe implementarse un método de selección de anchors de cara a escoger a los anchors más cercanos en base a la información de localización disponible (posición estimada del target, posiciones de los anchors, distancias estimadas). Se han considerado cuatro posibles métodos de selección:

- Selección por mínima distancia en base a conocimiento ideal: En cada actualización, se escogen los anchors más cercanos de acuerdo a la distancia real entre el target y los anchor. Esta opción se considera únicamente como referencia, ya que la posición real del target no es conocida.
- Selección por mínima distancia en base a las distancias estimadas con broadcast periódico: Periódicamente, se realiza el ranging con todos los anchors vecinos (broadcast periódico). Se seleccionan los anchors más cercanos de acuerdo a la distancia estimada y se mantienen en las siguientes actualizaciones hasta el siguiente broadcast periódico. Si se pierde la cobertura con uno de los anchors seleccionados, se realizará una actualización broadcast independientemente del tiempo que haya transcurrido desde la anterior actualización broadcast periódica.
- Selección por mínima distancia en base a la posición estimada del target: En cada actualización, se escogen los anchors más cercanos de acuerdo a la distancia calculada utilizando la posición estimada del target y las posiciones reales de los anchors, que son conocidas.
- Selección por mínima distancia en base a la posición estimada del target con broadcast periódico: Similar al método basado en la posición estimada del target, pero combinado con un ranging periódico a todos los vecinos. De esta forma se evita que el error en la posición estimada del target se realimente a través de una selección incorrecta de los anchors.



# Capítulo 3. Diseño y desarrollo de la solución

## 3.1 Análisis de alternativas de diseño

### 3.1.1 Entorno de desarrollo y simulación

La primera decisión a tomar es el entorno de desarrollo y simulación a utilizar, considerándose 3 opciones:

- C++/Visual Studio: Las principales ventajas ofrecidas por C++ en un entorno de Visual Studio son la mayor experiencia del autor con este lenguaje y la orientación a objetos, que resulta muy adecuado para modelar los distintos elementos del sistema (nodos target, nodos anchor, controlador de localización, coordinador de picocelda...).
- OPNET: Aunque esta herramienta proporcionaría una buena base para el desarrollo del simulador, se descartó debido a la falta de familiaridad del autor con este entorno y a la no existencia de modelos relativos a la tecnología a utilizar, específica del proyecto EUWB, lo que obligaría a realizar todo el desarrollo, con el coste añadido de aprendizaje.
- MATLAB: Su uso se descarta, dada la menor orientación a objetos (aunque la programación orientada a objetos está contemplada en las versiones más nuevas), la menor experiencia del autor y la escasa carga matemática del simulador, que se limita a los algoritmos de localización.

Por ello, se optó por C++ como lenguaje de desarrollo, Visual Studio como entorno de desarrollo y la orientación a objetos como técnica de programación.

### 3.1.2 Esquema de simulación

Una vez definido C++ como lenguaje de programación del simulador y una estructura orientada a objetos, otra decisión importante es la referente al esquema de ejecución del simulador, con dos alternativas principales:

- Por eventos: Cada objeto es independiente y la ejecución se controla a través de eventos. Cuando se produce un evento (por ejemplo, la necesidad de actualizar la posición de un móvil) se ejecuta el código correspondiente. Esto es óptimo en cuanto a consumo de recursos de computación, ya que no se consumen recursos en periodos de inactividad, sino únicamente en la ejecución de los eventos.

- Secuencial: Se define un paso de simulación. La simulación se realiza paso a paso, ejecutando en cada ciclo un bucle en el programa principal donde se mira si hay alguna acción que realizar. Este esquema es intensivo en cuanto a consumo de recursos ya que está continuamente en ejecución, aunque permite conseguir una menor duración de las simulaciones, ya que no hay periodos de inactividad.

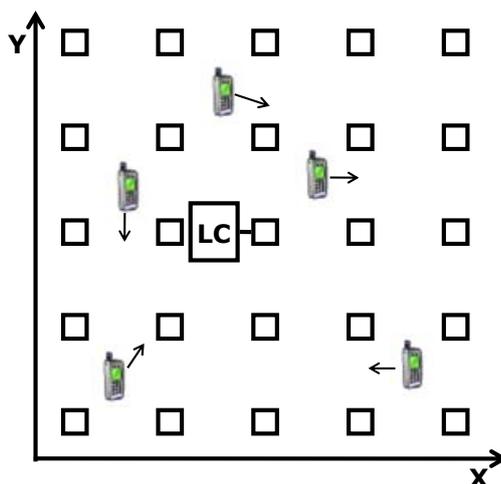
En este caso, se ha optado por el esquema secuencial, ya que se adapta mejor a la estructura basada en TDMA de la supertrama MAC de EUWB. De este modo, considerando el paso de simulación igual a la duración de un slot, se facilita la gestión de las transmisiones o procesos de ranging que se realizan en cada paso.

## 3.2 Descripción del diseño

Previamente al desarrollo del simulador, se realizó un diseño del mismo describiendo el escenario, la entrada de parámetros y salida de resultados y las principales clases con sus funciones y variables más importantes, así como la interrelación entre las diferentes clases. En este apartado se presenta un resumen del diseño. En el Anexo A se encuentra una descripción más completa del simulador una vez desarrollado. Cabe destacar la importancia de esta fase previa de diseño, que facilitó en gran medida el desarrollo, y que durante el desarrollo únicamente se realizaron cambios menores (incorporar nuevas funciones y variables, etc.) respecto del diseño inicial.

### 3.2.1 Escenario

El escenario de simulación es la representación de un entorno de interiores relativamente amplio de dimensiones *longitud* x *anchura*. En este escenario se despliega una red UWB, tal y como se muestra en la Figura 5. La red se compone de  $N_a$  anchors, nodos fijos y distribuidos regularmente con posiciones conocidas, y  $N_m$  targets, nodos móviles a localizar. La función de controlador de localización (LC), que se encarga del cálculo de la posición de los targets en base a las distancias estimadas, puede localizarse en uno ó más anchors o en los targets en función de la arquitectura elegida. Por simplicidad, se considera que el escenario está cubierto por una única picocelda, por lo que no será necesario tener en cuenta la transmisión de datos entre distintas picoceldas ni el handover.



**Figura 5. Escenario de simulación**

El movimiento de los nodos móviles se modela mediante direcciones y velocidades aleatorias que se mantienen constantes durante un cierto periodo de tiempo, después del cual se generan nuevas direcciones y velocidades aleatorias. El modelo dinámico viene caracterizado por las velocidades máxima y mínima y la tasa de cambio de dirección.

### **3.2.2 Modelado de los dispositivos UWB**

Las características particulares de la tecnología UWB se van a reflejar a través de diversos modelos:

El modelo de cobertura se utiliza para identificar las relaciones de vecindad entre los distintos nodos en función de la distancia entre ellos. En una primera aproximación se utiliza un modelo básico en base a una distancia umbral definida por el alcance nominal de los dispositivos del proyecto EUWB (15 metros). La implementación de un modelo más avanzado de la probabilidad de cobertura en función de la distancia se hará en función de su disponibilidad dentro del proyecto EUWB.

El modelo de transmisión se utiliza para caracterizar la probabilidad de pérdida de las tramas en función de la distancia. Debido a la no disponibilidad de un modelo de canal específico para la modulación y ancho de banda de los dispositivos EUWB, en principio se va a considerar la transmisión sin pérdidas. Dado que el objeto del simulador es evaluar la funcionalidad de localización, que viene determinada principalmente por el modelo de ranging, y no la transmisión de datos, esta suposición es asumible, siempre que los nodos estén lo suficientemente cercanos para que la probabilidad de pérdida sea pequeña. La implementación de un modelo de transmisión se hará en función de su disponibilidad dentro del proyecto EUWB.

El modelo de ranging se utiliza para caracterizar el error en la estimación de la distancia hecha a partir de la medición del TOA en un intercambio n-Way

Ranging. El modelo que se implementará es el descrito en el apartado 2.4, validado empíricamente mediante una campaña de medidas con los dispositivos EUWB. En un primer momento, la configuración del canal, o lo que es lo mismo la probabilidad de estar en situación LOS, NLOS o NLOS severa en función de la distancia, se determinará de acuerdo a un modelo estadístico propuesto en el propio modelo de ranging. Más adelante se desarrollará un modelo determinista, en el que la configuración del canal se determinará en base a una serie de paredes definidas en el escenario.

Por lo que respecta a la capa MAC, se implementará la estructura presentada en el apartado 2.3 y definida en el marco del proyecto EUWB. En una primera aproximación no se tendrá en cuenta ni la limitación del número de slots ni su duración, contabilizando únicamente el número de slots necesarios. Más adelante se tendrán en cuenta las longitudes de cada periodo y los parámetros temporales propuestos en el proyecto EUWB.

### **3.2.3 Entrada de parámetros**

La entrada de parámetros al simulador se hará por medio de un fichero de texto (parameters.txt). Los principales parámetros de entrada al simulador son:

- Tipo de simulador (según fases de desarrollo)
- Arquitectura del sistema de localización (centralizada en la red, distribuida, centralizada en el móvil) y disposición de los controladores de localización.
- Esquemas de distribución de la información: iniciador del proceso de actualización (red o target), iniciador de los intercambios de ranging (target o anchors), uso de mejoras de adquisición y distribución (data aggregation, broadcast/multicas request, multicast response).
- Tamaño del área
- Número de targets y parámetros del modelo dinámico.
- Número y distribución de los nodos anchors.
- Parámetros relativos a supertrama MAC.
- Tasa nominal de actualización de la posición.
- Algoritmo de seguimiento y número de anchors utilizados en el cálculo.

### **3.2.4 Salida de resultados**

La salida de los resultados de las simulaciones se realizará a través de ficheros de texto:

- En el fichero error.txt se guardarán las estadísticas relativas al error en el posicionamiento incluyendo, tanto a nivel global como para cada target, la media, la varianza y la distribución del error de posicionamiento, así como el número de procesos de posicionamiento realizados.
- En el fichero resources.txt se guardarán las estadísticas relacionadas con los recursos utilizados para localización, en particular el número de slots, estratificados según el tipo de trama (ranging request, ranging response, tramas de datos de envío de distancias y trama de datos de actualización de posición).

### **3.2.5 Clase CNetwork**

Esta clase implementa la topología de la red, conteniendo los distintos elementos: nodos anchor, nodos target, controladores de localización y coordinador de la picocelda. También realiza la lectura e inicialización de los parámetros del simulador, la distribución geográfica de los nodos anchor, la inicialización de las posiciones de los nodos target y la inicialización de las relaciones de vecindad entre los distintos nodos. Además, también se encarga de la actualización de las relaciones de vecindad entre targets y anchors, de la distribución geográfica de los controladores de localización, de la asignación de los targets a cada controlador de localización y del cálculo del número de saltos desde cada nodo anchor al controlador de localización más cercano.

### **3.2.6 Clase CPicocell\_manager**

Este elemento controla todo lo relacionado con la transmisión de tramas y el uso de los slots. Se encarga de controlar los procesos de ranging y de transmisión de datos y de contabilizar las estadísticas relativas a uso de recursos. Para ello se implementan dos colas, la de transmisión y la de ranging, donde se almacenan las solicitudes de transmisión y ranging, que se procesarán en el periodo correspondiente. En el caso del simulador ideal, dado que las transmisiones se consideran instantáneas y los recursos (slots) ilimitados, únicamente se procesan las tramas y se contabilizan los recursos consumidos. En el caso de tener en cuenta la supertrama MAC, este elemento controla además el slot en el que nos encontramos de cara a gestionar tanto la temporización como la disponibilidad de slots en cada periodo.

### **3.2.7 Clase CAnchor\_node**

Esta clase define el funcionamiento de los nodos anchor. Los nodos anchor tienen dos funciones principales. Por un lado servir como referencia

para el posicionamiento de los targets, y por el otro transmitir la información de localización de los targets a los controladores de localización y viceversa.

### **3.2.8 Clase CTarget\_node**

Este elemento implementa los nodos móviles a localizar, controlando el movimiento de los nodos (posición, dirección y velocidad). Esta clase realiza las funciones de estimación de las distancias a cada nodo anchor vecino, transmisión de estas distancias al controlador de localización y recepción de la posición estimada. También se encarga de contabilizar las estadísticas relativas al error de posicionamiento. En el caso de que la estrategia sea distribuida, también tiene la función de escoger el nodo anchor que actuará como controlador de localización.

### **3.2.9 Clase CLocation\_manager**

Este elemento, asociado a un nodo anchor o target en función de la arquitectura utilizada, es el encargado de calcular la posición de los targets en función de las distancias estimadas. Para ello necesita conocer las posiciones de los nodos anchor, la última posición estimada de los targets, los nodos anchor a utilizar en la localización, las distancias estimadas a estos y el algoritmo de localización a utilizar. Entre sus funciones también está la de determinar cuándo es necesario actualizar la posición de un target determinado y la de seleccionar los nodos anchor a utilizar en la actualización.

## **3.3 Desarrollo de la solución**

### **3.4.1 Fases de desarrollo del simulador global**

Dada la envergadura del simulador completo, su desarrollo se dividió en una serie de fases de forma que las diferentes funcionalidades pudieran validarse sin tener que esperar al desarrollo del simulador completo

#### **• Fase 1: Simulador ideal**

En la primera fase de desarrollo no se tendrá en cuenta ni la limitación del número de slots ni los retardos, pudiendo realizarse todo el proceso de actualización de la posición en un único paso de simulación.

- Fase 1a. Desarrollo de la estructura básica del simulador en base a una arquitectura centralizada en la red con un único controlador de localización
- Fase 1b. Desarrollo de las arquitecturas centralizada en la red con varios controladores de localización, distribuida y centralizada en los móviles

- Fase 1c. Desarrollo de las mejoras en la adquisición y distribución de la información de localización
- Fase 1d. Desarrollo de los métodos de selección de anchors

▪ **Fase 2: Simulador basado en MAC EUWB**

En esta fase se tendrá en cuenta la estructura y temporización de la supertrama MAC. El paso de simulación se hará equivaler a un timeslot, con lo que en cada paso de simulación únicamente se realizarán los procesos correspondientes (ranging, transmisión de información...) de acuerdo a la posición en la supertrama. De esta forma se tendrá en cuenta tanto la limitación de los slots dedicados a cada uno de los periodos como el retardo introducido por la temporización de la capa MAC.

▪ **Fase 3: Simulador basado en información geográfica y algoritmos avanzados**

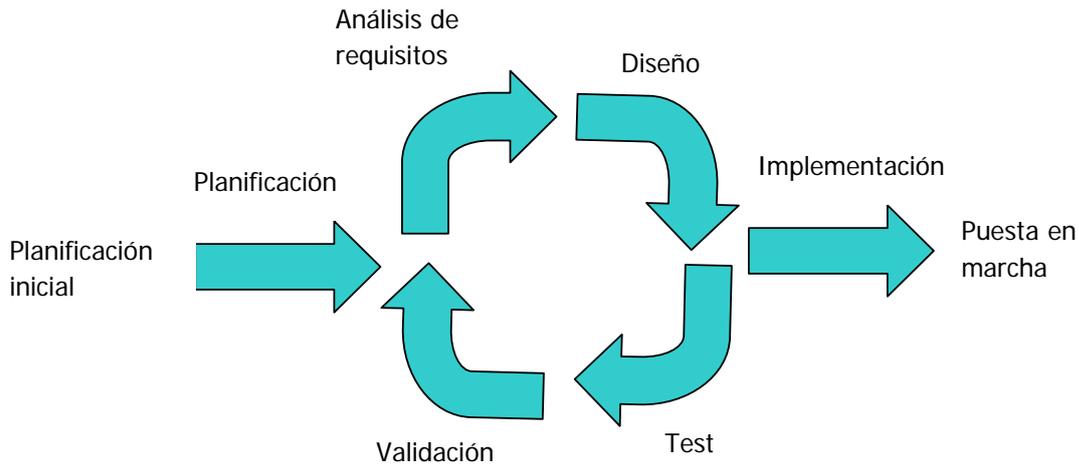
En esta fase se implementará un nuevo modo de simulación en el que tanto el modelo dinámico de los targets como el modelo de ranging vendrán determinados por la información geográfica acerca de posibles rutas (pasillos e intersecciones) y paredes previamente definidas en un fichero. Además, se implementarán algoritmos de localización y seguimiento más avanzados, tanto paramétricos como no paramétricos, y se evaluará la ganancia obtenida del uso de dicha información geográfica en los algoritmos.

El presente trabajo hace referencia a la fase 1 del desarrollo, mientras que las siguientes fases serán implementadas mediante proyectos fin de carrera.

### **3.4.2 Proceso de desarrollo**

Tanto a nivel global del proyecto como para cada una de las fases, el proceso de desarrollo seguido se muestra en la siguiente Figura 6.

Tras una planificación inicial, se realiza un análisis de los requisitos y alternativas y se diseña la solución. Tras implementar la solución y verificar el correcto funcionamiento, corrigiendo los posibles errores de desarrollo, se pasa al testeo y evaluación de la solución, validando que la solución desarrollada cumple efectivamente con los requisitos planteados. En caso contrario, se repite este proceso de forma iterativa, replanteando los objetivos en caso de que sea necesario.



**Figura 6. Proceso de desarrollo**

### 3.4.3 Herramientas utilizadas

Para la realización de este proyecto se ha utilizando:

- Microsoft Visual Studio 2005, como plataforma de desarrollo para la programación en C++.
- Microsoft Office Word 2007, para la documentación del proyecto y realización de informes, publicaciones y memoria.
- Microsoft Office Excel 2007, para el tratamiento de los resultados.
- GanttProject para la realización de los diagramas de Gantt

### 3.4.4 Planificación

#### • Hitos del proyecto

Los dos hitos principales del proyecto vienen determinados por la obligación de incluir los resultados obtenidos (preliminares y finales) en los entregables del proyecto EUWB

- M1: Simulador básico desarrollado y análisis preliminar de resultados (Marzo 2009, EUWB Deliverable D4.2.1)
- M2: Fase 1 de desarrollo completada y análisis completo de resultados (Septiembre 2009, EUWB Deliverable D4.2.2)

#### • Planificación inicial

El desarrollo del proyecto se planificó en base a los hitos definidos por el proyecto EUWB. Se definieron las siguientes fases, cuyo diagrama temporal se muestra en la Figura 7:

- **Análisis del sistema:** Comprende el análisis de la documentación existente, tanto a nivel del proyecto EUWB como a nivel de publicaciones científicas.
- **Diseño:** Incluye el diseño del escenario, funcionalidades y estructura del simulador, especificando las distintas clases y sus principales funciones y variables.
- **Desarrollo:** El presente trabajo cubre el desarrollo de la Fase 1 del simulador, por lo que el desarrollo se ha dividido en las cuatro subfases correspondientes (1a, 1b, 1c y 1d).
- **Simulación y análisis:** Se plantea la realización de dos campañas de simulación, una con resultados preliminares de cara al hito M1 y otra con el análisis completo de los resultados para el hito M2.
- **Difusión:** Incluye la redacción de los entregables del proyecto EUWB, así como la redacción y presentación de artículos de investigación en revistas y/o congresos especializados.
- **Documentación:** Hace referencia a la generación de la memoria del trabajo, así como de los anexos.

- **Desarrollo real y desajustes**

En la Figura 8 se muestra el diagrama del desarrollo temporal real del proyecto. Cabe destacar que el desarrollo se ha ajustado en gran medida a lo planificado, gracias principalmente al trabajo llevado a cabo en las fases de análisis y diseño. Sin embargo, sí que se aprecia un desajuste en la fase de desarrollo 1c. Pese a que en principio no se identificó el nivel de desarrollo exacto a alcanzar en el primer hito del proyecto (Marzo 2009), en la planificación se planteó, probablemente de manera excesivamente optimista, la posibilidad de completar hasta la fase de desarrollo 1c. Dado que algunas de las mejoras a implementar requerían mayor complejidad, esto no fue posible, con lo que el hito se alcanzó con un desarrollo parcial de la fase 1c, completándose posteriormente el desarrollo de esa fase.

Pese a que en la planificación inicial se planteaba difundir los resultados finales en alguna publicación o congreso científico de manera simultánea a la redacción del entregable EUWB D4.2.2 en Septiembre de 2009, esto no fue posible, por lo que los resultados finales se difundieron en el congreso WPNC 2010 celebrado en Dresde (Alemania) en Marzo de 2010. También se retrasó la redacción de la memoria, inicialmente planificada nada más concluir el trabajo, por la necesidad de enfocar los esfuerzos al desarrollo de las fases 2 y 3 para nuevos entregables del proyecto EUWB.

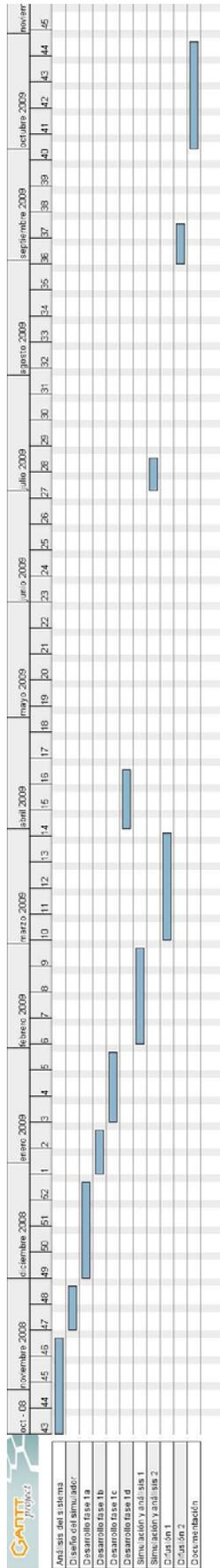


Figura 7. Diagrama de Gantt estimado

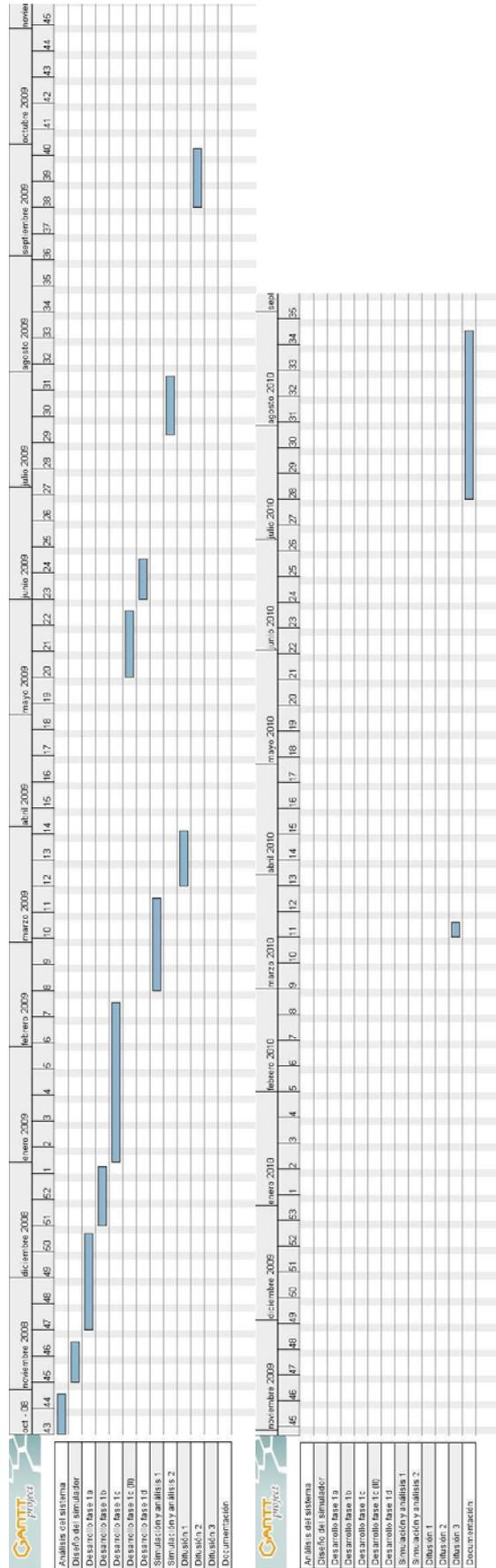


Figura 8. Diagrama de Gantt real

# Capítulo 4. Resultados

## 4.1 Introducción

Las prestaciones del sistema de localización y seguimiento UWB se han evaluado en términos de error de posicionamiento (media, varianza, error cuadrático medio, distribución del error...) y de la cantidad de recursos utilizados para la localización (número de timeslots utilizados en la adquisición y distribución de la información de localización).

Con ese propósito se han realizado diversas series de simulaciones con las diferentes arquitecturas y estrategias para la adquisición y distribución de la información de localización propuestas. La influencia del número de anchors utilizados para la localización también se ha analizado, evaluando los distintos métodos de selección de anchors. Finalmente, también se ha analizado el impacto de la movilidad de los targets y la tasa de actualización de la posición.

Para estas simulaciones se han definido un conjunto de parámetros. La duración de las simulaciones se ha fijado en 10000 segundos y el número de targets en 10, excepto en las simulaciones en función del número de targets. El tamaño del área se ha fijado en 50 m x 50 m y la distancia entre anchors en 10 m, salvo que se especifique lo contrario, lo que implica que el área se cubre con 25 anchors. Respecto al modelo dinámico de los targets, las velocidades máxima y mínima se han fijado en 3 m/s y 0.1 m/s, con cambios de dirección cada 20 segundos. El alcance de los nodos UWB se considera de 15 m y la tasa de actualización se ha fijado en 1 segundo salvo en las simulaciones en función de este parámetro.

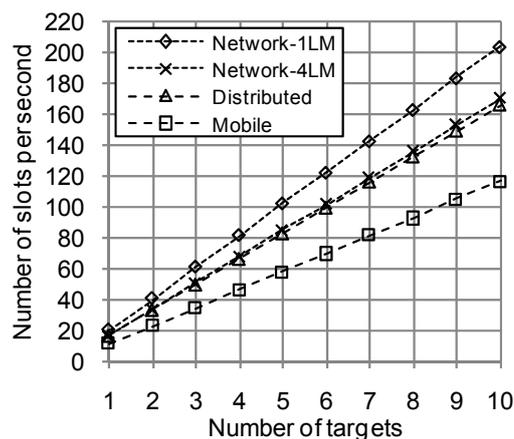
## 4.2 Impacto de la arquitectura del sistema de localización

Como se ha explicado anteriormente, la función de controlador de localización (LC) puede localizarse físicamente en uno o varios nodos anchor o en los nodos móviles, en función de la arquitectura del sistema de localización definida. En la arquitectura centralizada en la red, la función LC se implementa en uno o varios nodos anchor definidos previamente. En la arquitectura distribuida, la función LC está implementada en todos los nodos anchor, y el nodo target elige dinámicamente qué nodo anchor la ejecuta. Finalmente, en la arquitectura centralizada en los móviles la función LC se implementa en los nodos target, que calculan su propia posición en base a las distancias estimadas.

El uso de recursos temporales para la localización asociado a cada una de las arquitecturas propuestas se muestra en detalle en el Anexo B. Aquí se presenta únicamente la comparativa entre las distintas arquitecturas.

La Figura 9 muestra los resultados obtenidos para cada una de las arquitecturas en términos del número de slots utilizados para la localización. Por lo que respecta a la arquitectura centralizada en la red, se han considerado los casos de 1 y 4 controladores de localización. La arquitectura centralizada en los móviles es la óptima en términos de consumo de recursos, dado que no es necesario transmitir las distancias estimadas ni la posición calculada, lográndose una reducción del 40% en el número de slots con respecto a la arquitectura centralizada en la red con 1 LC. Sin embargo, la implementación de la funcionalidad LC en los móviles incrementaría su complejidad, lo que puede no ser deseable, por lo que la viabilidad de esta arquitectura depende de la aplicación y los dispositivos móviles específicos.

La arquitectura distribuida presenta una reducción de casi un 20% en el número de slots en comparación con la centralizada en la red con 1 LC, ya que la funcionalidad LC siempre se ejecuta en un anchor vecino del target móvil, con lo únicamente se necesita un slot para transmitir las tramas entre el target y el LC. La arquitectura centralizada en la red con 4 LCs presenta unos resultados muy parecidos a la distribuida, con la ventaja de que únicamente es necesario implementar la funcionalidad de LC en 4 de los 25 nodos anchor.



**Figura 9. Recursos utilizados para la localización para las diferentes arquitecturas**

### 4.3 Mejoras en la adquisición y distribución de la información de localización

De cara a reducir la cantidad de recursos utilizados para la adquisición y distribución de la información de localización, se han implementado diversas mejoras, que se presentaron en detalle en el apartado 2.4.

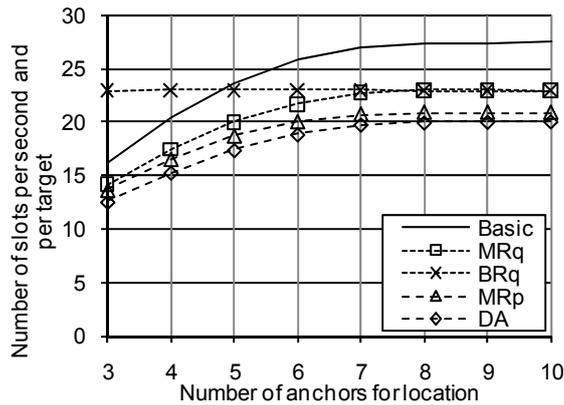
- Solicitud de ranging multicast/broadcast: Se puede enviar una única solicitud de ranging a todos los nodos vecinos (broadcast), o a un grupo de ellos (multicast)

- Respuesta de ranging multicast: Después de recibir varias solicitudes de ranging de varios iniciadores, se puede enviar una única respuesta multicast.
- Agregación de datos: Se pueden agrupar todas las distancias estimadas y enviarse al LC en un único paquete de datos

Cabe destacar que no todas las mejoras requieren la misma complejidad. En el caso de que el intercambio de ranging sea iniciado por el nodo target, la implementación de la respuesta multicast requeriría la actualización simultánea de todos los targets para que los anchors pudieran agregar todas las respuestas en una respuesta multicast. Lo mismo ocurriría para la solicitud de ranging multicast y para la agregación de datos en caso de que el intercambio de ranging sea iniciado por los nodos anchor

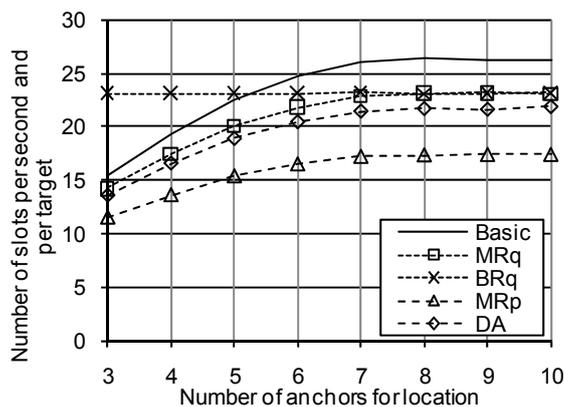
Se han simulado los recursos necesarios para la localización para cada una de las mejoras en base a una arquitectura centralizada en la red con 1 LC y 10 nodos target, considerando los casos de que el intercambio de ranging sea iniciando por los targets o por los anchors. Los resultados detallados para cada mejora se muestran en el Anexo B.

La Figura 10 resume los resultados obtenidos para cada una de las mejoras cuando los intercambios de ranging son iniciados por los targets. Como puede observarse, el número de slots se incrementa conforme aumenta el número de anchors utilizados para el posicionamiento, pero se estabiliza a partir de los 7 anchors, ya que con la configuración utilizada (25 anchors), no es probable que un target esté en cobertura de más de 7 anchors. La agregación de datos (DA) y la respuesta multicast (MRp) permiten reducir en aproximadamente un 25% el número de slots necesarios. Por lo que respecta a las solicitudes de ranging multicast (MRq) y broadcast (BRq), la primera de ellas muestra una reducción de aproximadamente un 15% en el número de slots para todos los casos, mientras que BRq es independiente del número de anchors, ya que se realiza el ranging con todos los vecinos, presentando una reducción similar para 7 ó más anchors, pero peores resultados para 6 anchors o menos.



**Figura 10. Recursos utilizados para la localización para las diferentes mejoras (ranging iniciado por target)**

La Figura 11 compara los resultados obtenidos para las distintas mejoras cuando los intercambios de ranging son iniciados por los nodos anclor. Utilizando la solicitud multicast (MRq) se logra una reducción de aproximadamente el 12%, que es menor que el 15% que se lograba cuando el intercambio de ranging era iniciado por los targets. La razón es que, para el número de nodos anclor y target utilizado, el número medio de targets con los que un anclor realiza el ranging es menor que el número de anchors utilizados para localizar un target. Por la misma razón, la ganancia de utilizar agregación de datos (DA) se reduce a un 17%. Por contra, la reducción debida al uso de respuesta multicast (MRp) se incrementa hasta aproximadamente un 34%. Finalmente, el uso de solicitudes broadcast (BRq) no se va a tener en cuenta en adelante ya que sus resultados son iguales (para 7 ó mas anchors) o peores (para 6 ó menos anchors) que los de la solicitud multicast.

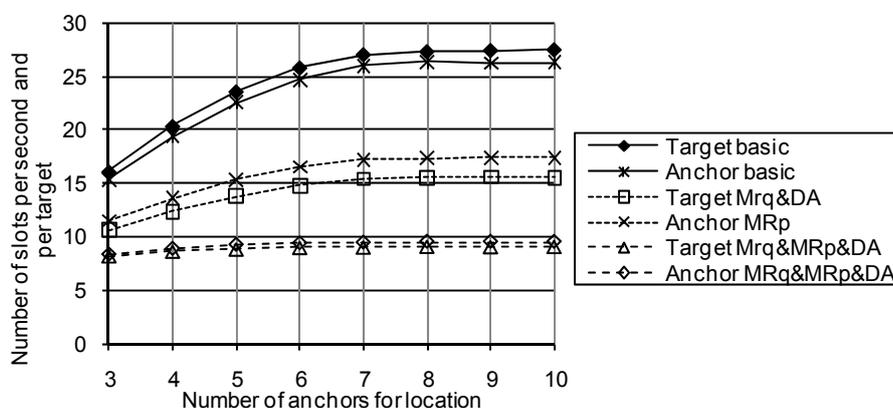


**Figura 11. Recursos utilizados para la localización para las diferentes mejoras (ranging iniciado por anchors)**

En la Figura 12 se establece una comparativa entre los modos básicos, los modos mejorados que no requieren la actualización simultánea de las posiciones de todos los targets y los modos que implementan todas las mejoras y que por tanto requieren la actualización simultánea. Cuando no se utiliza ninguna mejora, el número de slots necesarios cuando los anchor inician los intercambios de ranging es ligeramente inferior a cuando lo inician los targets, debido a que la transmisión de las distancias desde los anchors al

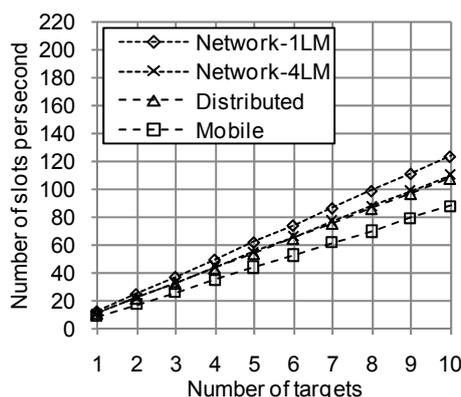
controlador de localización requiere por lo general los mismos o menos slots que desde el target.

Respecto a los modos mejorados sin actualización simultánea, cuando los targets son los iniciadores del intercambio de ranging pueden aplicarse la solicitud multicast y la agregación de datos (MRq&DA), lográndose una reducción en el número de slots necesarios del 40%. Por contra, cuando los intercambios de ranging son iniciados por los anchors únicamente se puede aplicar la respuesta multicast, con lo que la reducción es menor. Finalmente, cuando se sincronizan las actualizaciones de los targets y se aplican todas las mejoras, los resultados obtenidos tanto si los intercambios de ranging son iniciados por los targets como por los anchors son similares, siendo el número de slots necesarios prácticamente independiente del número de anchors utilizados para localizar un target, variando entre 8 y 9 slots por actualización, lo que implica una reducción del 50%-65% respecto a los modos básicos.



**Figura 12. Recursos utilizados para la localización en función del iniciador del ranging y de las mejoras aplicadas**

Finalmente, se van a evaluar nuevamente las distintas arquitecturas del sistema de LT en el caso de que se apliquen las mejoras de agregación de datos y solicitud multicast, siendo los targets los iniciadores del intercambio de ranging. No se tiene en cuenta la respuesta multicast ya que requiere la actualización simultánea de todos los targets, lo que en las arquitecturas distribuida y centralizada en los targets resultaría complejo al no existir un controlador centralizado en la red que pueda coordinar las actualizaciones de todos los targets. Los resultados se muestran en la Figura 13. Nuevamente, la arquitectura centralizada en los móviles muestra los mejores resultados, con una reducción de un 30% en el número de slots necesarios con respecto a la arquitectura centralizada en la red con 1 LC. La arquitectura distribuida muestra resultados similares a la centralizada en la red con 4 controladores de localización, con una reducción del 12% respecto a la arquitectura centralizada en la red con 1 LC.



**Figura 13. Recursos utilizados para la localización para las diferentes arquitecturas con agregación de datos y solicitud de ranging multicast**

#### 4.4 Número de anchors utilizados en la localización y distancia entre anchors

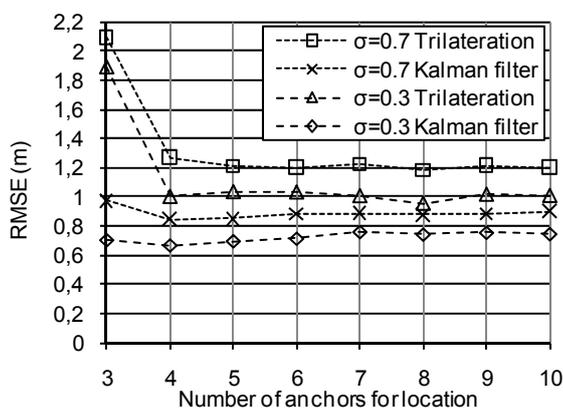
Otra posible estrategia de cara a mantener la cantidad de recursos temporales utilizados en la localización en un nivel razonable es limitar el número de anchors que se utilizan para actualizar la posición de un target. De esta forma, el ranging no se realiza con todos los anchors vecinos, sino únicamente con un determinado número de ellos. Esto permite reducir el número de slots utilizados para las solicitudes y respuestas de ranging y para la transmisión de las distancias.

Como ya se ha mostrado en la Figura 10, para una distancia entre anchors de 10m, lo que resulta en 25 anchors, la cantidad de timeslots utilizados se incrementa conforme aumenta el número de anchors utilizados para la localización, y permanece constante para más de 7 anchors, ya que con esta configuración no es probable que el target este en cobertura de más de 7 anchors. Si se limita el número de anchors utilizados para actualizar la posición del target a 4, los recursos utilizados se reducirían de 27 a 20 slots por segundo y por target para esta configuración.

Obviamente, esta reducción también tendrá un efecto sobre el error de posicionamiento, ya que un mayor número de anchors permite una mayor precisión y una menor variabilidad. Sin embargo, dado que el error en la distancia estimada entre anchor y target depende en gran medida de la distancia entre ellos, el error para los anchors cercanos será por lo general menor que para los anchors más alejados, por lo que utilizar un mayor número de anchors no siempre será positivo. Por lo general hay un número de anchors óptimo que minimiza el error de posicionamiento. Cabe recordar que el modelo de ranging utilizado tiene dos componentes: un sesgo positivo que es debido al efecto del canal y que por tanto es dependiente de la distancia, y un error residual centrado que modela el error en la medida del TOA y que es independiente de la distancia.

La Figura 14 muestra el error RMSE (Root Mean Square Error) en función del número de anchors utilizados en la localización para distintos algoritmos (trilateración y filtro de Kalman) y niveles de error residual (0.7 m y 0.3 m). Idealmente se escogen siempre los anchors más cercanos al target. Cabe destacar que el filtro de Kalman muestra un nivel de error RMSE mucho menor que la trilateración ya que, a pesar de que el error medio para ambos algoritmos es comparable, el filtro de Kalman presenta una varianza mucho menor al utilizar también la información de la posición anterior, por lo que el error RMSE es menor para el filtro de Kalman incluso en la situación de error residual alto.

En el caso de la trilateración, la posición se calcula utilizando las tres menores distancias de entre todas las estimadas, a menos que correspondan a tres nodos anchor alineados, en cuyo caso se sustituye la mayor de ellas por la cuarta menor. Por ello sus prestaciones son prácticamente independientes del número de anchors utilizados excepto en el caso de 3 anchors que presenta un importante incremento del error, ya que en ese caso no será posible sustituir uno de ellos en el caso de que estén alineados y habrá dos soluciones posibles (efecto espejo). Por lo que respecta al filtro de Kalman, como se ha comentado anteriormente existe un número óptimo de anchors que minimiza el error, que para esta configuración (10 m entre anchors) es de 4, incrementándose ligeramente el error conforme se utilizan mas anchors. Esta degradación es más marcada en el caso de error residual bajo, ya que en ese caso la importancia relativa del sesgo, que es dependiente de la distancia, es mayor.

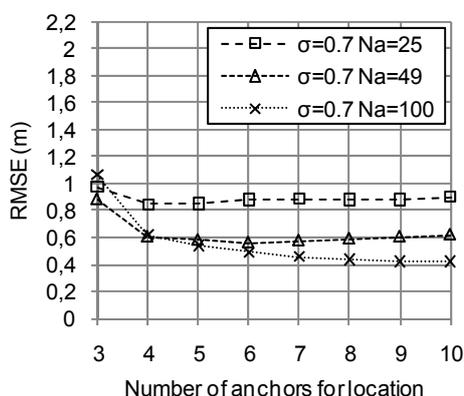


**Figura 14. Error de posicionamiento en función del número de anchors para la localización con  $N_a=25$  anchors**

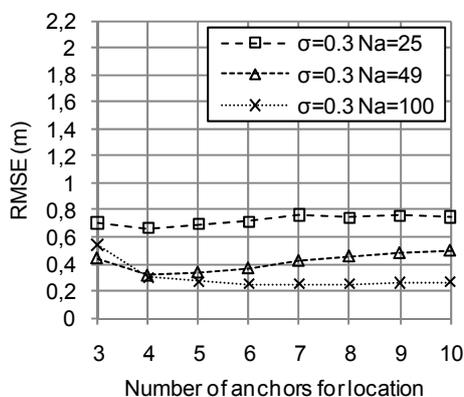
Por tanto, si únicamente se utilizan los 4 anchors más cercanos, tanto el error de posicionamiento como los recursos necesarios se reducen. Lógicamente, el número óptimo de anchors que minimiza el error de posicionamiento depende de la distancia entre los anchors y del error residual de ranging.

La Figura 15 y la Figura 16 muestran el error RMSE para el filtro de Kalman con nivel de error residual de ranging alto y bajo respectivamente

para tres configuraciones diferentes: 25 anchors (10 m entre anchors), 49 anchors (7.15 m entre anchors) y 100 anchors (5 m entre anchors). Para error residual de ranging alto, el RMSE mínimo se reduce de 0.85 m para 25 anchors a 0.56 m para 49 anchors y 0.42 m para 100 anchors. Conforme se reduce la distancia entre anchors, el número óptimo de anchors aumenta, pasando de 4 para 25 anchors a 6 para 49 anchors y 10 para 100 anchors. Cuando el error residual de ranging es bajo, las distancias estimadas son más precisas y el error se reduce, con un error RMSE mínimo de 0.66 m para 25 anchors, 0.32 m para 49 anchors y 0.25 m para 100 anchors. Al reducir el error residual de ranging, el sesgo tendrá más importancia y el número óptimo de anchors se reduce a 4 para 25 y 49 anchors y 7 para 100 anchors.



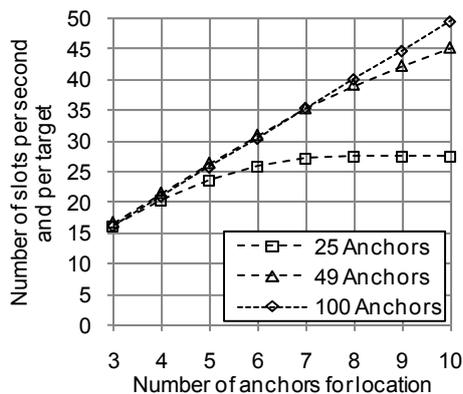
**Figura 15. Error de posicionamiento en función del número de anchors para la localización con filtro de Kalman y  $\sigma_n=0.7m$**



**Figura 16. Error de posicionamiento en función del número de anchors para la localización con filtro de Kalman y  $\sigma_n=0.3m$**

La Figura 17 muestra la cantidad de recursos utilizados para la localización en función del número de anchors utilizados para localizar a los targets. Como puede observarse, para 100 anchors el número de timeslots necesarios se incrementa linealmente de acuerdo al número de anchors utilizados, ya que el target siempre estará en cobertura de más de 10 anchors. Para 49 anchors, el número de timeslots se incrementa linealmente para menos de 8 anchors, con un incremento menor para más de 8 anchors. Para 25 anchors, el incremento no es lineal ya que es posible que el target no esté

en cobertura del número seleccionado de anchors, permaneciendo constante para más de 7 anchors.



**Figura 17. Recursos utilizados para la localización para diferentes valores del número total de anchors**

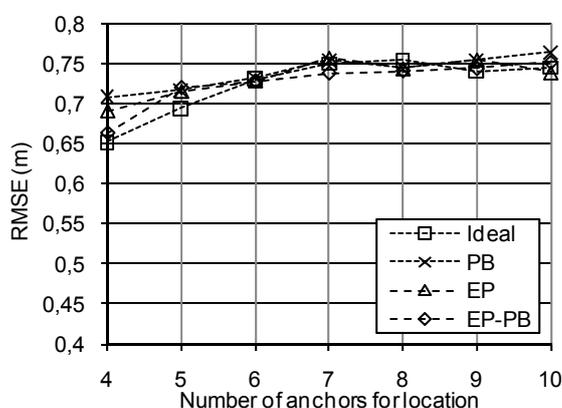
Conforme la distancia entre los anchors se reduce, el target estará en cobertura de más anchors y la necesidad de limitar el número de anchors utilizados para la localización es más importante de cara a evitar un uso excesivo de los recursos. Hasta este momento se ha considerado un enfoque ideal en el que siempre se seleccionaban los anchors más cercanos. En el caso real, se deberá diseñar un método de selección de anchors en base a la información disponible en los nodos target o en los controladores de localización (posición estimada del móvil, posiciones conocidas de los anchors, distancias estimadas previamente...). Los distintos métodos de selección de anchors diseñados se evalúan en el siguiente apartado.

#### 4.5 Método de selección de anchors

Tal y como se concluyó en el apartado anterior, limitar el número de anchors utilizados para la localización puede reducir tanto el error de posicionamiento como la necesidad de recursos, aunque para lo primero es necesario escoger los anchors más cercanos al target. Por ello es necesario implementar un método de selección de anchors basado en la información disponible tanto en la red como en los nodos target. Los distintos métodos propuestos se presentaron en el apartado 2.7:

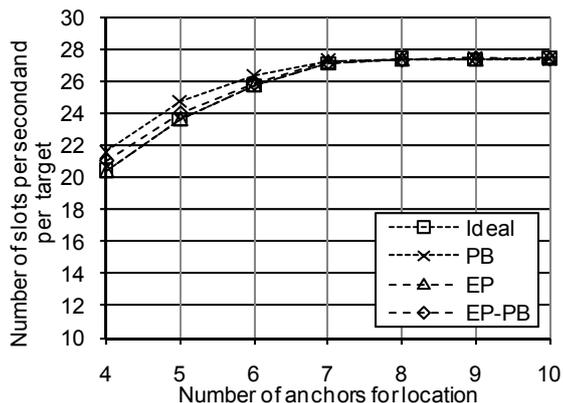
- Selección por mínima distancia en base a conocimiento ideal (Ideal)
- Selección por mínima distancia en base a las distancias estimadas con broadcast periódico (PB)
- Selección por mínima distancia en base a la posición estimada del target (EP)
- Selección por mínima distancia en base a la posición estimada del target con broadcast periódico (EP-PB)

Las prestaciones de cada uno de los métodos se han evaluado en función del número de anchors utilizados para el posicionamiento. La distancia entre anchors se ha fijado en 10 metros y, en el caso de los métodos PB y EP-PB, el tiempo entre actualizaciones broadcast periódicas en 10 segundos. Se ha utilizado una arquitectura centralizada en la red sin mejoras. La Figura 18 y la Figura 19 muestran el error RMSE y el número de slots utilizados para la localización respectivamente. Cuando se utilizan 4 anchors para el posicionamiento, los mejores resultados se obtienen con el método EP-PB, acercándose a los resultados de la selección ideal, mientras que el método PB obtiene los peores resultados. Para 5 anchors, los tres métodos obtienen resultados similares y ligeramente superiores a la selección ideal. Finalmente, para 6 o más anchors los resultados son similares independientemente del método utilizado, ya que en la mayoría de las ocasiones el target no estará en cobertura de más de 6 anchors.



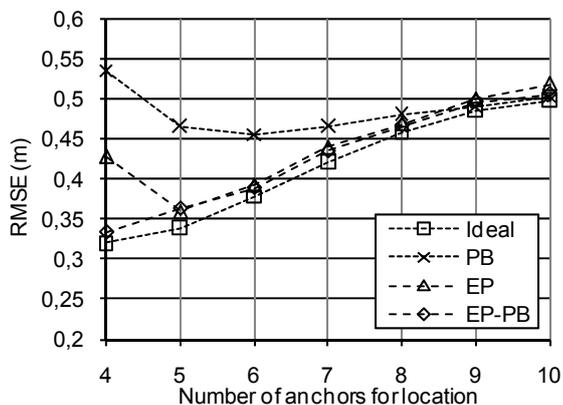
**Figura 18. Error de posicionamiento para los distintos métodos de selección (distancia entre anchors = 10m)**

Por lo que respecta a la necesidad de recursos, dado que las actualizaciones broadcast periódicas se realizan con todos los anchors en cobertura y no con el número seleccionado, los métodos que presentan esta característica (PB y EP-PB) requieren un mayor número de slots. El número de slots para el método PB es superior al de EP-PB ya que también realiza actualizaciones broadcast cuando se pierde la cobertura con uno de los anchors seleccionados. Para 7 ó más anchors todos los métodos utilizan la misma cantidad de slots, ya que no es probable que un target se encuentre en cobertura de más de 7 anchors.



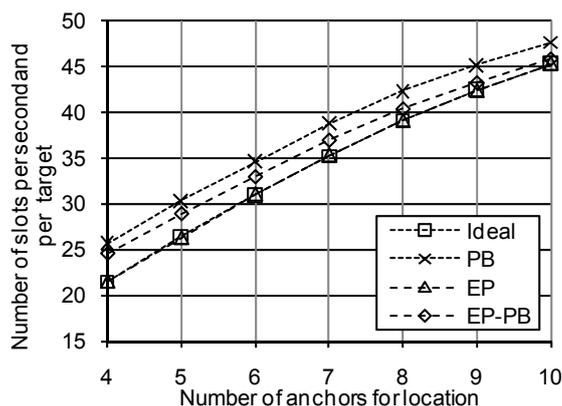
**Figura 19. Recursos utilizados para la localización para los distintos métodos de selección (distancia entre anchors = 10m)**

El mismo análisis se ha realizado para una configuración con distancia entre anchors igual a 7.15 metros, mostrándose los resultados en la Figura 20 y la Figura 21. Con esta configuración, el error para los métodos no ideales ya no es tan cercano al caso ideal, ya que el target tiene más anchors en cobertura y la probabilidad de que la selección no sea óptima se incrementa. Los resultados para EP y EP-PB son ligeramente superiores a los de la selección ideal, aunque en el caso de EP hay un importante incremento en el caso de que se utilicen 4 anchors. Esto es debido a la realimentación del error en la estimación de la posición a través de una selección incorrecta de anchors. Por otro lado, el método PB presenta un error RMSE mayor que el resto de métodos, ya que los anchors seleccionados en la actualización broadcast periódica ya no serán los óptimos al cabo de unos pocos segundos.



**Figura 20. Error de posicionamiento para los distintos métodos de selección (distancia entre anchors = 7.15m)**

Por lo que respecta a la necesidad de recursos, los métodos con actualizaciones broadcast periódicas requieren un mayor número de slots, especialmente en el caso de PB ya que también realiza actualizaciones broadcast cuando se pierde la cobertura con un anchor seleccionado. Conforme se reduce la distancia entre anchors, el target está en cobertura de más anchors, las actualizaciones broadcast requieren más slots y la diferencia entre los métodos con y sin actualizaciones broadcast periódicas aumenta.



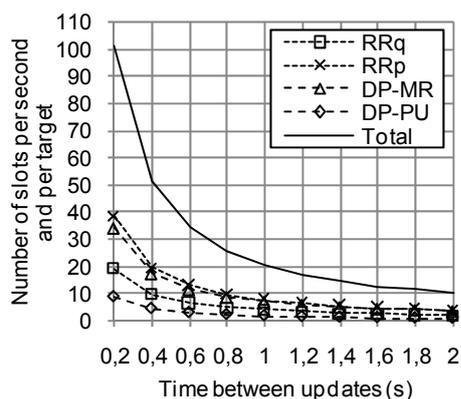
**Figura 21. Recursos utilizados para la localización para los distintos métodos de selección (distancia entre anchors = 7.15m)**

En resumen, la importancia del método de selección de anchors se incrementa conforme se reduce la distancia entre anchors y el target está en cobertura de un mayor número de anchors. PB requiere que se realicen actualizaciones broadcast periódicas cada 3-4 segundos para proporcionar buenos resultados, pero esto implica una mayor necesidad de recursos. EP proporciona buenos resultados por lo general, aunque en algunos casos el error puede incrementarse de manera importante si se realimenta a través de una selección incorrecta de los anchors. De cara a evitar esto pueden proponerse diversas soluciones, siendo una de ellas la combinación de EP con actualizaciones broadcast periódicas (EP-PB), que proporciona unas prestaciones cercanas a la selección ideal con un uso razonable de recursos.

#### 4.6 Efecto de la movilidad y de la tasa de actualización de la posición

Finalmente, otro parámetro importante relacionado tanto con el error de posicionamiento como con la cantidad de recursos utilizados para la localización es la tasa de actualización de la posición, que define la frecuencia con la que se actualizan las posiciones de los nodos móviles. La tasa de actualización de la posición está íntimamente relacionada con la movilidad de los nodos target, ya que una mayor velocidad de los móviles requiere de una mayor frecuencia de actualización de la posición de cara a realizar un seguimiento preciso de los targets.

En la Figura 22 se muestra el impacto de la tasa de actualización de la posición respecto a la cantidad de recursos dedicados a la localización para una arquitectura centralizada en la red con 1 LC, sin mejoras de adquisición y distribución, una distancia de 10 metros entre los nodos anchor y 4 anchors utilizados para el posicionamiento. Como puede observarse, el número de timeslots utilizados en la localización es inversamente proporcional al tiempo entre actualizaciones. Por tanto, de cara a minimizar la cantidad de recursos necesarios, sería deseable que el tiempo entre actualizaciones fuera elevado.

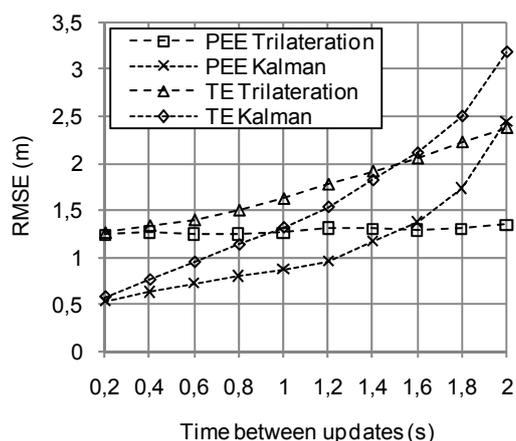


**Figura 22. Recursos utilizados para la localización en función del tiempo entre actualizaciones**

Por otro lado, la tasa de actualización de la posición también tiene impacto sobre el error de posicionamiento. De cara a medir el error se definen dos parámetros. El error en la estimación de la posición (PEE) mide el error de la posición estimada por el algoritmo en cada actualización. El error de seguimiento (TE) mide el error en la posición disponible en el móvil a cada paso de simulación, no sólo en las actualizaciones. Este error no se debe únicamente al error en la estimación, sino también al movimiento de los nodos target desde la última actualización.

La Figura 23 muestra el error en la estimación de la posición y el error de seguimiento en función del tiempo entre actualizaciones, considerando una velocidad de los targets aleatoria y uniformemente distribuida entre 0.1 m/s y 3 m/s y una tasa de cambio de dirección de 20 segundos. Por lo que respecta al PEE, la precisión de la trilateración es independiente del tiempo entre actualizaciones, ya que la posición se calcula de manera independiente en cada actualización. Por otro lado, la estimación en el filtro de Kalman se basa en la posición anterior, lo que resulta en una mayor precisión cuando el tiempo entre actualizaciones es inferior a 1.6 segundos, aunque la precisión se degrada conforme se incrementa el tiempo entre actualizaciones. Por lo que respecta al TE, la precisión se degrada conforme aumenta el tiempo entre actualizaciones para ambos casos, ya que la distancia recorrida por los móviles entre actualizaciones consecutivas será mayor. Esta degradación es mayor en el caso del filtro de Kalman, ya que al error por la falta de actualización se suma la mayor degradación en el error de estimación.

Tal y como puede observarse, no existe un valor óptimo para la tasa de actualización de la posición, ya que hay un compromiso entre el error de seguimiento y la cantidad de recursos utilizados para la localización. La tasa de actualización de la posición debe escogerse de acuerdo a la precisión de seguimiento requerida y al modelo dinámico de los móviles. Para seguir a personas desplazándose a pie, 1 actualización por segundo es un valor adecuado para mantener el error de seguimiento alrededor de 1 metro con un uso razonable de recursos.



**Figura 23. Error de posicionamiento y error de seguimiento en función del tiempo entre actualizaciones**

## 4.7 Dimensionado y capacidad del sistema de localización

Con el propósito de evaluar la capacidad de un sistema real, se van a utilizar como referencia los parámetros propuestos dentro del proyecto EUWB [4]. El tamaño del slot se fija a 160 bytes (1280 símbolos), lo que a una tasa física de 347 kbps supone una duración de la supertrama de 195.4 ms. Como en cada supertrama se asignan 20 slots para ranging y comunicación, esto significa que se dispone de aproximadamente 100 slots por segundo. Considerando la arquitectura centralizada en la red con 1 LC y sin mejoras, 4 anchors utilizados para el posicionamiento y 1 actualización por segundo, se necesitan 20 slots por segundo y por target, por lo que se podrían seguir aproximadamente 5 targets simultáneamente en cada picocelda. Sin embargo, esto no dejaría recursos disponibles para la comunicación, por lo que en el caso de aplicaciones de comunicación y localización simultáneas el número máximo de targets por picocelda debería reducirse.

En el caso de considerar la arquitectura centralizada en los móviles, los recursos necesarios para la localización se reducen a 12 slots por segundo y por target, con lo que se podrían seguir 8 targets por picocelda. Un resultado similar se consigue cuando se utiliza agregación de datos y solicitud de ranging multicast en la arquitectura centralizada en la red con 1 LC. Combinando ambas estrategias (centralizada en los móviles con agregación de datos y solicitud multicast), la necesidad de recursos se reduce hasta 9 slots por segundo y por target, con lo que pueden seguirse hasta 11 targets por picocelda de manera simultánea. Si fuera necesario seguir un número mayor de targets, debería reducirse el tamaño de las picoceldas, aunque esto incrementaría la complejidad de la red.

# Capítulo 5. Conclusiones

Para finalizar esta memoria, se expondrán las principales conclusiones obtenidas a partir del análisis realizado y de los resultados obtenidos. Asimismo, se describirán las futuras líneas de trabajo consistentes en la mejora del simulador desarrollado y su uso en diversos estudios.

## 5.1 Conclusiones

En el presente Trabajo Fin de Máster se ha analizado la viabilidad del despliegue de sistemas combinados de transmisión de datos y localización basados en tecnología UWB en entornos interiores de área relativamente amplia. Se han evaluado diversas arquitecturas y estrategias para la adquisición y distribución de la información de localización en términos del error de posicionamiento y de los recursos utilizados para la localización.

La arquitectura centralizada en los móviles es la óptima en términos de recursos utilizados, aunque para ello es necesaria cierta capacidad computacional en los terminales móviles, por lo que su viabilidad dependerá de la aplicación concreta y los terminales a localizar. El uso de mejoras en la adquisición y distribución de la información de localización conlleva una reducción de la cantidad de recursos utilizados, que puede alcanzar el 40% en el caso de utilizar agregación de datos y solicitudes multicast con un incremento mínimo de la complejidad, por lo que su uso es altamente recomendable.

Otra conclusión importante es la necesidad de limitar el número de anchors que se utilizan para el posicionamiento, ya que de esta manera no sólo se reduce la cantidad de recursos necesarios, sino que también se mejora la precisión siempre que se escojan los anchors más cercanos. Para ello será necesario implementar un método de selección de anchors, siendo el basado en la posición estimada con actualizaciones broadcast periódicas el que mejores resultados ha presentado.

Finalmente, por lo que respecta a la tasa de actualización de la posición, hay un compromiso entre la precisión del seguimiento y la cantidad de recursos utilizados, por lo que su valor debe fijarse en relación con el patrón de movilidad de los usuarios a localizar.

## 5.2 Publicaciones generadas

El trabajo desarrollado en el presente Trabajo Fin de Máster se ha incluido en dos de los entregables del proyecto EUWB, públicos bajo solicitud:

- EUWB Deliverable D4.2.1, Initial development of dissemination methods and evaluation

- EUWB Deliverable D4.2.2, Enhanced dissemination methods and evaluation

Asimismo, los resultados obtenidos han sido publicados a través de dos artículos presentados en congresos internacionales:

- J. Chóliz, A. Hernández, A. Valdovinos, "Evaluation of architectures and strategies for tracking mobile devices in UWB networks", 6th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'09), Hannover (Alemania), Marzo 2009
- J. Chóliz, A. Hernández, A. Valdovinos, "Architectures for Location Data Acquisition and Distribution in UWB Indoor Tracking Systems", 7th Workshop on Positioning, Navigation and Communication (WPNC'10), Dresde (Alemania), Marzo 2010

### **5.3 Líneas de trabajo futuras**

Tras la realización del presente Trabajo Fin de Máster, se abren diversas líneas de investigación relacionadas con la mejora y ampliación del simulador desarrollado y su uso para la realización de diversos estudios.

En primer lugar, la segunda fase de desarrollo del simulador contempla la adaptación del simulador a la estructura y temporización de la supertrama MAC propuesta en el marco del proyecto EUWB. Con ello se persigue un doble objetivo, por un lado evaluar el impacto que tiene sobre el error de posicionamiento el retardo en el proceso de adquisición y distribución de la información de localización, y por otro evaluar la capacidad real del sistema teniendo en cuenta la limitación en el número de slots impuesta por la supertrama MAC utilizada.

En segundo lugar, la tercera fase de desarrollo del simulador contempla la implementación de algoritmos avanzados de localización, en particular de los propuestos en los proyectos PULSERS PHASE II y EUWB, basados en el uso de escalado multidimensional, contracción de distancias y optimización mediante el algoritmo SMACOF. También se plantea la implementación de un algoritmo altamente parametrizable, como el filtro de partículas, de cara a investigar el posible uso de información geográfica y estadística, como la posición de las paredes o de rutas predeterminadas, para mejorar la precisión.

Finalmente, otra posible línea de trabajo, en este caso no relacionada con el simulador desarrollado, consiste en el estudio de las posibles aplicaciones del sistema de localización en interiores UWB planteado. Por un lado, además de aplicaciones específicas de localización, el conocimiento de la posición de usuarios de redes móviles puede permitir la ampliación del alcance de servicios basados en localización, actualmente limitados a entornos exteriores, a entornos interiores y el desarrollo de nuevos servicios. Por otro

lado, la disponibilidad de información de localización de los usuarios de alta precisión puede ser aprovechada por las propias redes móviles para mejorar la gestión de recursos radio en aspectos tales como la reserva predictiva de recursos para la gestión del handover o la asignación de recursos para la coordinación de interferencias.



## Bibliografía

- [1] P. Bahl, V. Padmanabhan, "RADAR: An In-Building RF-based User Location and Tracking System" In proc. IEEE INFOCOM, Tel-Aviv, Israel (March 2000)
- [2] L. Yang y G.B. Giannakis, "Ultra-Wideband communications, an idea whose time has come", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 21, num 6, November 2004.
- [3] S. Gezici, Z. Tian, G. B. Giannakis, H. Kobayashi, A.F. Molisch, H. V. Poor y Z. Sahinoğlu, "Localization via Ultra-Wideband Radios. A look at positioning aspects of future sensor networks", IEEE Signal Processing Magazine, vol. 22, número 4, Julio 2005.
- [4] "LDR-LT platform requirements, feasibility analysis and specification" D7.1.1a final version, September 2008, EUWB (IST FP7-215669), public deliverable.
- [5] IEEE 802.15.4 standard, "Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs)"
- [6] D. Macagnano, G. Destino, F. Esposito, and G. T. F. de Abreu, "MAC Performances for Localization and Tracking in Wireless Sensor Networks", In Proc. WPNC'07, Hannover.
- [7] B. Denis and N. Daniele, "NLOS Ranging Error Mitigation in a Distributed Positioning Algorithm for Indoor UWB Ad Hoc Networks", in Proc. IEEE IWWAN'04,, pp. 356-360 Oulu, May-June 2004
- [8] "Enhanced LT system- PHY, MAC and Network layers (final)" D3a-2.3 final version, June 2008, PULSERS Phase II (IST FP6-027142), public deliverable.
- [9] B. Denis, J.B. Pierrot and C. Abou-Rjeily, "Joint Distributed Time Synchronization and Positioning in UWB Ad Hoc Networks Using TOA", IEEE Trans. on MTT, Special Issue on Ultra Wideband, Vol. 54, Is. 4, Part 2, pp. 1896-1911, April 2006.
- [10] F. Daum, "Nonlinear filters: beyond the Kalman filter", IEEE Aerospace and Electronic Systems Mag., vol. 20, no. 8, pp. 57-69, Aug. 2005.



# Índice de figuras

Figura 1. Situación de UWB en el espectro de frecuencias .....	10
Figura 2. Topología mallada-centralizada [4] .....	16
Figura 3. Ejemplo de árbol mallado [4] .....	16
Figura 4. Estructura de la supertrama MAC de EUWB [4].....	17
Figura 5. Escenario de simulación .....	27
Figura 6. Proceso de desarrollo.....	32
Figura 7. Diagrama de Gantt estimado .....	34
Figura 8. Diagrama de Gantt real.....	34
Figura 9. Recursos utilizados para la localización para las diferentes arquitecturas .....	36
Figura 10. Recursos utilizados para la localización para las diferentes mejoras (ranging iniciado por target) .....	38
Figura 11. Recursos utilizados para la localización para las diferentes mejoras (ranging iniciado por anchors).....	38
Figura 12. Recursos utilizados para la localización en función del iniciador del ranging y de las mejoras aplicadas .....	39
Figura 13. Recursos utilizados para la localización para las diferentes arquitecturas con agregación de datos y solicitud de ranging multicast.....	40
Figura 14. Error de posicionamiento en función del número de anchors para la localización con $N_a=25$ anchors.....	41
Figura 15. Error de posicionamiento en función del número de anchors para la localización con filtro de Kalman y $\sigma_n=0.7m$ .....	42
Figura 16. Error de posicionamiento en función del número de anchors para la localización con filtro de Kalman y $\sigma_n=0.3m$ .....	42
Figura 17. Recursos utilizados para la localización para diferentes valores del número total de anchors.....	43
Figura 18. Error de posicionamiento para los distintos métodos de selección (distancia entre anchors = 10m) .....	44
Figura 19. Recursos utilizados para la localización para los distintos métodos de selección (distancia entre anchors = 10m).....	45
Figura 20. Error de posicionamiento para los distintos métodos de selección (distancia entre anchors = 7.15m).....	45
Figura 21. Recursos utilizados para la localización para los distintos métodos de selección (distancia entre anchors = 7.15m) .....	46
Figura 22. Recursos utilizados para la localización en función del tiempo entre actualizaciones.....	47
Figura 23. Error de posicionamiento y error de seguimiento en función del tiempo entre actualizaciones .....	48

