

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de
Telecomunicación

Evaluación de un método de localización de baja
carga computacional para un sistema
Ultra-Wideband.

Autor: José Antonio de Oliveira Reales

Tutor: Eva M^a Arias de Reyna Domínguez.

Dpto. Teoría de la Señal y Comunicaciones
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería de las Tecnologías de Telecomunicación

**Evaluación de un método de localización de baja
carga computacional para un sistema
Ultra-Wideband.**

Autor:

José Antonio de Oliveira Reales

Tutor:

Eva M^a Arias de Reyna Domínguez

Profesora Contratada Doctora

Dpto. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2018

Proyecto Fin de Carrera: Evaluación de un método de localización de baja carga computacional para un sistema Ultra-Wideband.

Autor: José Antonio de Oliveira Reales

Tutor: Eva M^a Arias de Reyna Domínguez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de

Sevilla, 2018

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Al finalizar una etapa que sin duda ha marcado mi vida, tengo la necesidad de acordarme de aquellas personas que han estado ahí y han formado parte de este camino.

Agradecer, en primer lugar, el apoyo brindado por mi tutora, Eva, cuyos consejos y ayuda han sido fundamentales para la realización de este trabajo.

A mi familia, por apoyarme siempre, por creer en mí cuando ni yo mismo creía y por el esfuerzo que ha supuesto que hoy yo me encuentre aquí.

A María, por su comprensión y apoyo. Espero que sigamos cumpliendo objetivos juntos.

A mis compañeros, a los que siguieron este largo camino y a los que decidieron abandonarlo, a los que nunca confiaron en mí y a los que nunca dejaron de hacerlo.

Gracias a todos porque las experiencias vividas junto a cada uno de vosotros me han hecho ser quien soy.

Sevilla, 2018

Resumen

Este trabajo se enfoca especialmente en la evaluación del comportamiento en diferentes situaciones de un método de baja carga computacional para la estimación de la localización de objetos en interiores.

Podemos dividirlo en dos partes bien diferenciadas. La primera parte de este trabajo abarca toda la parte teórica. Está compuesta por los tres primeros apartados. La segunda parte es la parte puramente experimental, donde se analizan los resultados obtenidos de los experimentos realizados.

En los primeros apartados explicaremos detalladamente la tecnología utilizada, Ultra Wideband (UWB) y por qué es tan indicada para la localización en interiores. Posteriormente, habrá un apartado donde describiremos el entorno de trabajo, dónde y cómo hemos realizado todas las pruebas, así como la descripción de todos los instrumentos utilizados.

En una segunda parte, hemos implementado un método de localización en Matlab, el método bounding-box también conocido como Min-Max. Seguidamente, hemos tomado medidas reales en una habitación con varias anclas (transmisores UWB), de manera que se ha podido realizar una evaluación de su comportamiento y comprobar la robustez de este método frente a las medidas sin línea de visión directa (*non line of sight*, NLOS). Además, también se mostrarán diversos efectos, como el efecto perímetro, que se producen debido a cómo se distribuyen las anclas. Estos comportamientos y efectos los veremos en situaciones reales.

Abstract

This work focuses especially on the evaluation of the behavior in different situations of a method of low computational load for the estimation of the location of objects in indoor environments.

We can divide it into two distinct parts. The first part of this work covers the whole theoretical part. It is composed of the first three sections. The second part is the purely experimental part, where the results obtained from the experiments carried out are analyzed.

In the first sections we will explain in detail the technology used, UWB and why it is so indicated for indoor location. Later, there will be a section where we will describe the work environment, where and how we have done all the tests, as well as the description of all the instruments used.

In a second part, we have implemented a localization method in Matlab, the bounding-box method, also known as Min-Max. Next, we have taken real measurements in a room with several anchors (UWB transmitters), so that it has been possible to evaluate their behavior and check the robustness of this method against non line of sight (NLOS) measurements. In addition, various effects will also be illustrated, such as the perimeter effect, which occur due to how the anchors are distributed. We will see these behaviors and effects in real situations.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvii
Índice de Figuras	xix
Notación	xxi
1 Introducción	1
1.1. <i>Motivación</i>	1
1.2. <i>Objetivos</i>	2
1.3. <i>Estructura</i>	2
2 Localización con UWB	3
2.1. <i>Tecnología</i>	3
2.1.1. Ventajas	5
2.1.2. Desventajas	5
2.1.3. Normativa	5
2.1.4. Comparativa con otros sistemas	5
2.1.5. Estandarización	7
2.2. <i>Localización en interiores</i>	7
2.3. <i>Acontecimientos importantes</i>	8
2.4. <i>Técnicas de estimación de la posición</i>	8
2.5. <i>Medidas con señales UWB en entornos de múltiples caminos</i>	9
3 Entorno de trabajo	12
3.1. <i>Introducción</i>	12
3.2. <i>Equipos</i>	12
3.2.1. Transmisores	14
3.3. <i>Estimación de la distancia(Ranging)</i>	16
3.3.1. Emparejamiento	16
3.3.2. Intercambio de datos	17
3.4. <i>Funcionamiento de los equipos</i>	19
3.4.1. Modo de funcionamiento INT-INT	19
3.4.2. Modo de funcionamiento INT-EXT	20
3.5. <i>Laboratorio</i>	20
3.5.1. Introducción	20
3.5.2. Parámetros y situación	21

4	Sistema de posicionamiento	23
4.1.	<i>Introducción</i>	23
4.2.	<i>Algoritmo de localización</i>	24
4.2.1.	Implementación en Matlab.	26
4.3.	<i>Análisis de las medidas realizadas</i>	27
4.3.1.	Habitación	28
4.3.2.	Colocación de las anclas	29
4.3.3.	Efecto perímetro	30
4.3.4.	Posición estimada sin errores en las medidas de distancia	31
4.3.5.	Posición estimada con medidas reales	33
4.3.6.	Casos concretos	35
4.3.7.	RMSE para el error de localización	39
5	Resultados y conclusiones	41
6	Apéndice A: Tablas	42
6.1.	<i>Medidas con obstáculos</i>	42
6.1.1.	Ancla 1	42
6.1.2.	Ancla 2	44
6.1.3.	Ancla 3	46
6.1.4.	Ancla 4	48
6.2.	<i>Clasificación</i>	50
6.2.1.	Ancla 1	50
6.2.2.	Ancla 2	52
6.2.3.	Ancla 3	54
6.2.4.	Ancla 4	56
7	Apéndice B: Ficheros de Matlab	58
7.1.	<i>anclas.m</i>	58
7.2.	<i>habitacion.m</i>	59
7.3.	<i>estimacion.m</i>	59
7.4.	<i>estimacionpos.m</i>	61
7.5.	<i>perimetroyang.m</i>	63
7.6.	<i>caso3sinobs.m</i>	64
7.7.	<i>caso4sinobs.m</i>	66
7.8.	<i>caso3.m</i>	67
7.9.	<i>caso4.m</i>	69
7.10.	<i>rmsecaso3.m</i>	71
7.11.	<i>rmsecaso4.m</i>	72
	Referencias	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de frecuencias y anchos de banda con distintas tecnologías.	6
Tabla 2. Configuración de S1.	15
Tabla 3. Modos de operación.	16
Tabla 4. Parámetros, definición y descripción de variables utilizadas.	24
Tabla 5. RMSE para el caso con 3 anclas.	39
Tabla 6. RMSE para el caso con 4 anclas.	40

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 2-i. Comparación de la densidad espectral de potencia y frecuencia según el ancho de banda	4
Ilustración 2-ii. Comparación del rango frente a la tasa de datos entre tecnologías inalámbricas.	6
Ilustración 2-iii. Comparación de la densidad espectral de potencia y frecuencia según la frecuencia central.	7
Ilustración 3-i. Kit decaWave.	13
Ilustración 3-ii. EVB1000.	13
Ilustración 3-iii. Placa que contiene el DW1000	14
Ilustración 3-iv. EVB1000	14
Ilustración 3-v. Emparejamiento.	17
Ilustración 3-vi. Intercambio de datos.	17
Ilustración 3-vii. Tiempos de propagación	18
Ilustración 3-viii. Configuración INT-INT	19
Ilustración 3-ix. Medida de distancia INT-INT	20
Ilustración 3-x. Situación ilustrativa.	21
Ilustración 3-xi. Situación real	21
Ilustración 4-i. Diagrama de bloques del proceso de localización usando las medidas reales obtenidas del kit de DecaWave.	23
Ilustración 4-ii. Método Min-Max con 3 anclas	25
Ilustración 4-iii. Método Min-Max con 3 anclas sin que interceptan los cuadrados.	25
Ilustración 4-iv. Caso basado en medidas reales	27
Ilustración 4-v. Habitación con obstáculos	28
Ilustración 4-vi. Colocación de las anclas.	29
Ilustración 4-vii. Efecto perímetro	30
Ilustración 4-viii. Posición estimada teniendo en cuenta cuatro anclas (interiores) con medidas sin errores	31
Ilustración 4-ix. Posición estimada teniendo en cuenta cuatro anclas con medidas sin errores	32
Ilustración 4-x. Posición estimada teniendo en cuenta tres anclas (interiores) con medidas reales	33
Ilustración 4-xi. Posición estimada teniendo en cuenta cuatro anclas.	34
Ilustración 4-xii. Efecto perímetro con tres anclas	35
Ilustración 4-xiii. Efecto perímetro con cuatro anclas	36
Ilustración 4-xiv. Posición estimada sin obstrucción total del rayo directo	37
Ilustración 4-xv. Posición estimada con obstrucción del rayo directo.	38

MSE	Mean Square Error
RMSE	Root Mean Square Error
RSS	Nivel de potencia
<	Menos o igual
>	Mayor o igual
GPS	Global Positioning System
AoA	Ángulo de llegada
ToA	Tiempo de llegada
UWB	Ultra-Wide Band
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
FCC	Federal Communications Commission
B	Ancho de banda
f_0	Frecuencia central
dB	Decibelio
f_U	Frecuencia superior
f_L	Frecuencia inferior
NB	NarrowBand
WB	WideBand
WPAN	Wireless Personal Area Network
WLAN	Wireless Local Area Network
NLOS	Non Line Of Sight
LOS	Line Of Sight
DP	Direct Path
PRF	Pulse Repetition Frequency
NBI	NarrowBand Interference
MUI	Multiuser Interference

1 INTRODUCCIÓN

*Si buscas resultados disitntos,
no hagas siempre lo mismo.*

- Albert Einstein -

La geolocalización es uno de los temas que siempre me ha llamado bastante la atención. Cuando hablamos de localización de objetos o personas siempre pensamos en la tecnología GPS (*Global Position System*), la cuál actualmente es la más extendida y en el mundo cotidiano las personas solemos utilizar. A todos nos ha pasado que cuando estamos en entornos interiores esta tecnología es incapaz de funcionar.

Esta tecnología la podemos ver en todo tipo de dispositivos inteligentes, desde los ‘SmartWatch’ hasta los sistemas de navegación de los automóviles. Sin embargo, donde más se está explotando esta tecnología es en los teléfonos móviles que actualmente usan las personas en su día a día.

Sin embargo, esta tecnología no funciona igual en interiores que en exteriores, debido a que la señal sufre una gran degradación cuando estamos en entornos interiores.

En estos momentos hay una gran variedad de tecnologías para determinar la posición de un objeto o persona en esta situación. La más conocida actualmente es la tecnología Wi-Fi. Sin embargo, ésta posee grandes desventajas en cuanto a su alcance y coste.

Actualmente, Ultra Wideband (UWB) es una de las mejores opciones. Esta tecnología tiene la gran ventaja de tener grandes prestaciones a corto alcance, así como su bajo coste. Ésto hace pensar que esta tecnología tenga un futuro muy prometedor.

Hay diferentes técnicas para estimar la posición de un objeto, según el nivel de potencia (RSS), según el tiempo de llegada (TOA) y según el ángulo de llegada (AOA). Sin embargo, en este trabajo vamos a centrarnos, debido al hardware que disponemos, en la técnica TOA y en un algoritmo muy concreto de baja carga computacional.

1.1 Motivación.

La motivación de este proyecto es estudiar el comportamiento de un método de localización de baja carga computacional para un sistema UWB actual en el estándar IEEE 802.15.4-2011 en situaciones reales. Tendremos situaciones en las que habrá visión directa pero habrá muchas otras en las que no la habrá. Utilizaremos un método el cuál podría servir para identificar cuáles son esas medidas sin línea de visión directa (*non line of sight*, NLOS). Este método también puede utilizarse como una estimación inicial robusta frente a errores NLOS y si se necesita más precisión se puede refinar la estimación aplicando un segundo método. Para llevar a cabo este trabajo, contamos con un Kit de DecaWave compuesto de dos transmisores UWB para hacer las medidas necesarias.

Este trabajo me ha causado gran interés debido a que utiliza una tecnología aún sin explotar.

1.2 Objetivos.

- **Fundamentos teóricos de la tecnología UWB**, breve reseña histórica, principales características, ventajas, desventajas y normativa actual.
- **Funcionamiento básico** y comunicación en un sistema UWB usando el Kit de DecaWave EVK1000, además del entorno de trabajo.
- **Utilizar un algoritmo de posicionamiento de baja carga computacional**, para, a partir de las medidas de distancia obtenidas entre un objeto y varias anclas, estimar la posición del objeto.
- Basándonos en esos puntos, evaluar el **método de localización** para un sistema Ultra-Wideband

1.3 Estructura.

El presente trabajo consta de 7 apartados:

- Primer capítulo: Breve **introducción** del trabajo, junto con la motivación, objetivos y estructura del mismo.
- Segundo capítulo: Capítulo teórico en el que detallaremos las características principales de la **tecnología UWB**. Abordaremos, por un lado, las ventajas y desventajas con respecto a sus principales competidores, sus aplicaciones y su normativa. Por otro lado, detallaremos las diferentes técnicas de estimación de la posición y las principales fuentes de error de las medidas con señales UWB en entornos de múltiples caminos.
- Tercer capítulo: En este capítulo definiremos con detalle el **entorno de desarrollo** de este trabajo. Explicaremos por un lado, los materiales, los parámetros y la situación de desarrollo. Por otro lado, explicaremos el funcionamiento de nuestro hardware.
- Cuarto capítulo: En este capítulo, mediante las medidas de distancia obtenidas con nuestro hardware, utilizaremos un **algoritmo de localización** llamado ‘bounding-box’. Empezaremos utilizando medidas de distancia sin errores y posteriormente utilizaremos las medidas reales, y podremos ver el comportamiento que tiene cuando hay **obstáculos**.
- Quinto capítulo: Capítulo final con los **resultados y conclusiones**.
- Apéndice A: Nos encontramos las tomas de datos hechas ‘a mano’.
- Apéndice B: Nos encontramos todos los ficheros de Matlab utilizados.

2 LOCALIZACIÓN CON UWB

*Cada fracaso enseña al hombre
lo que necesitaba aprender.*

- Charles Dickens -

En este apartado vamos a describir aspectos importantes sobre la tecnología UWB. Para empezar, haremos una breve introducción histórica y las distintas ventajas y desventajas que ésta tiene. Se comentarán además algunos aspectos sobre la normativa y se comparará con algunos competidores y sistemas similares a UWB. A continuación, se detallará su aplicación de localización en interiores. Para finalizar, detallaremos las diferentes técnicas de estimación de la posición y las principales fuentes de error de las medidas con señales UWB en entornos de múltiples caminos.

2.1 Tecnología

Ultra-Wideband se define como cualquier transmisión radio que ocupe un ancho de banda mayor al 20% de la frecuencia central o más de 500 MHz. El término UWB o Ultra-Wideband traduce Banda ultra ancha o Ultra Banda ancha.

La FCC define dos conceptos:

1. Ancho de banda B/f_o entre dos puntos a 10 dB es $\geq 20\%$.

f_U : frecuencia superior

f_L : frecuencia inferior

$$\frac{B}{f_o} = 2 * \frac{f_U - f_L}{f_U + f_L} * 100 > 20\%$$

Ecuación I. Ancho de banda

2. Ancho de banda absoluto $B \geq 500 \text{ MHz}$

$$B = f_U - f_L > 500 \text{ MHz}$$

Ecuación II. Ancho de banda absoluto.

Las transmisiones en UWB constan de una serie de impulsos de energía modulados, del orden de los picosegundos de duración, siendo la duración de estos impulsos mucho menor que el intervalo de tiempo de un bit. Para el proceso de modulación y codificación de la información de los impulsos se varía la amplitud, fase, polarización o temporización. Como hay que distribuir la energía sobre un ancho de banda muy grande, la densidad espectral de ésta es muy pequeña, del orden de mW/Hz , lo que conlleva una carencia casi absoluta de interferencias con otras señales que estén utilizando esa misma porción del espectro. Ésto conlleva a poder emitir sin licencia. Las distintas regiones del mundo han regulado algunas máscaras espectrales para la emisión de señales UWB.

La característica principal de esta tecnología es por tanto su gran ancho de banda. UWB tiene una buena capacidad de penetración en materiales. Esta cualidad hace a UWB apropiada para otras aplicaciones aparte de las comunicaciones; tales como radares personales para detectar colisiones, sistemas de imagen que puedan ver a través de paredes, dispositivos precisos de localización, etc ...[17]

El rango de frecuencias de UWB varía desde pocos Hz hasta los GHz, lo que hace imposible que se le asigne un espectro solo a UWB. Además, la potencia emitida por esta tecnología es muy baja. En sus versiones iniciales fue pensada para aplicaciones militares, ya que es una transmisión prácticamente indetectable aunque actualmente es implementada en aplicaciones de baja tasa de datos, con capacidad de localización.

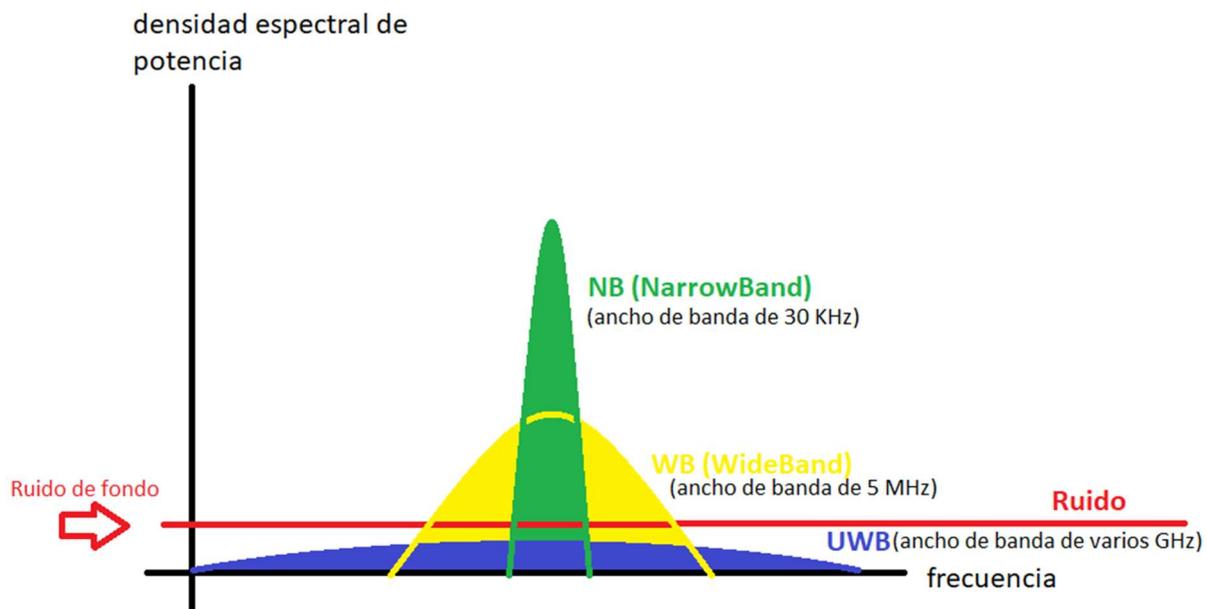


Ilustración 2-i. Comparación de la densidad espectral de potencia y frecuencia según el ancho de banda [17]

2.1.1 Ventajas

- Su alto potencial para alcanzar altas velocidades en la transferencia de datos.
- Bajo consumo.
- Señal inmune al efecto del multitrayecto. Debido a su corta duración, es posible distinguir entre la señal de visión directa y las señales reflejadas en los obstáculos.
- Tiene la posibilidad de estimar una posición con una precisión de centímetros.
- Alta capacidad de penetración de obstáculos.
- Interoperabilidad.
- Gran robustez, lo que permite ser más tolerante a interferencias.
- Los equipos de radio que usan esta tecnología son más baratos que los radios de banda estrecha.
- Funciona perfectamente en espacios cortos. Ésto es una ventaja para los usuarios que trabajen en espacios de dimensiones no muy grandes como lo pueden ser sus hogares.
- Bajo coste. [10]

2.1.2 Desventajas

- Sólo funciona en espacios pequeños. Es una desventaja si quiere utilizarse en aplicaciones de largo alcance, debido a sus limitaciones de potencia.
- Debido a su espectro tan ancho, tiene muchos problemas legales y de implementación en muchos países, en donde muchas de las frecuencias ya son usadas por otros dispositivos o tecnologías. [10]

2.1.3 Normativa

La norma asigna una porción del espectro para que opere dicha tecnología, la cuál está entre 3.1GHz hasta 10.6 GHz pero se hace la aclaración de que se debe cumplir la condición de densidad espectral de potencia de - 41,3 dBm/MHz [29],[30],[31], lo que garantiza la coexistencia con otras tecnologías inalámbricas. [32]

La regulación en Europa es más restrictiva, aunque sigue siendo compatible con la definición de UWB.

2.1.4 Comparativa con otros sistemas.

En esta sección vamos a realizar una comparación de la tecnología UWB con sus principales competidores. En el entorno WPAN (*Wireless Personal Area Network*) existen otros competidores, como Bluetooth, HomeRF o ZigBee, aunque una de las alternativas más atractivas en cuanto a coste y prestaciones es sin lugar a dudas UWB.

La penetración de obstáculos es una característica muy importante en la localización, ya que nos permitiría reducir el número de anclas en el espacio considerado y por consiguiente, abarataría los costes del sistema UWB. [17]

UWB presenta la penetración de los sistemas de frecuencia media y la precisión e inmunidad al multitrayecto de los sistemas de alta frecuencia. Los sistemas de baja frecuencia no están presentes en la localización y seguimiento, debido al insuficiente ancho de banda. [9]

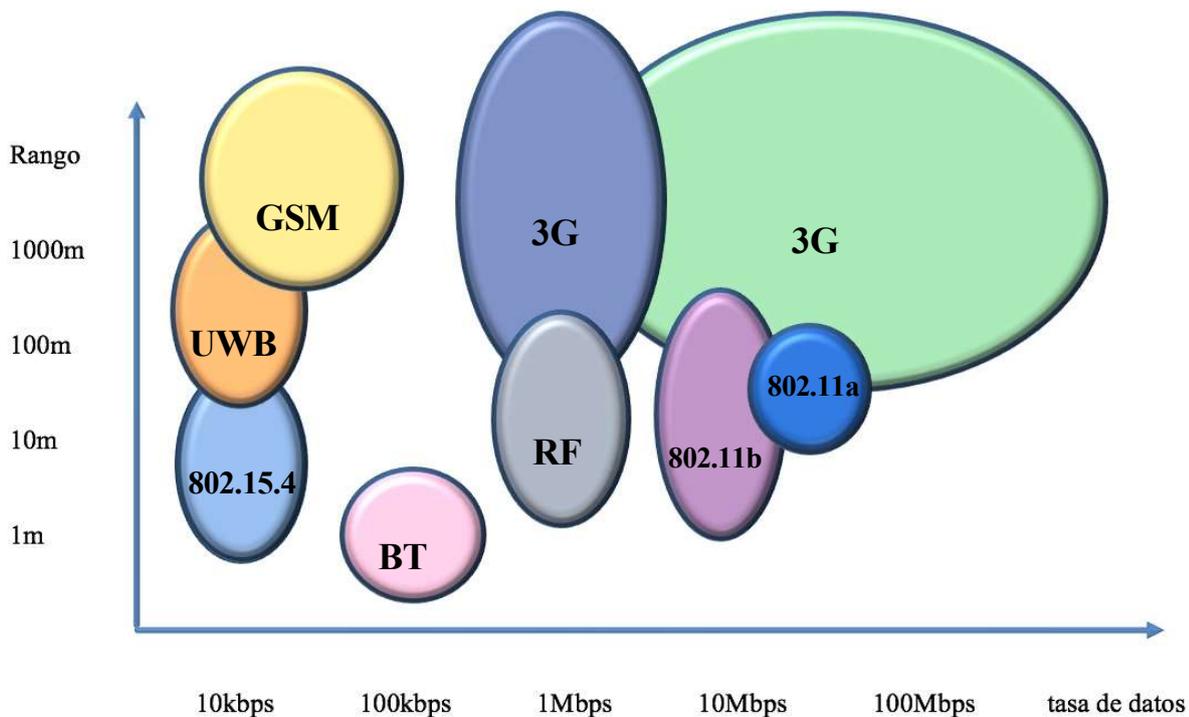


Ilustración 2-ii. Comparación del rango frente a la tasa de datos entre tecnologías inalámbricas.

UWB es la elección perfecta para localización en interiores, debido a que, como se puede ver en la ilustración 2-ii, vemos que UWB destaca por su alto alcance en tasa de datos baja. Su poca implantación en el mercado es una de las desventajas de UWB comparado con sus competidores. [9]

A continuación, vamos a presentar una tabla con las distintas frecuencias centrales y anchos de banda que usan las principales tecnologías de comunicación. [17]

	GSM	UMTS	WI-FI	GPS
<i>B APROXIMADO</i>	200 KHz a 25 MHz	3.8 MHz	16.6 MHz	20 MHz
<i>F_o APROXIMADO</i>	900,1800 MHz	1950,2150 MHz	2400,5200 MHz	1600 MHz
<i>B(%)</i>	0.02-3%	0.2%	0.7%	1.3%

Tabla 1. Comparación de frecuencias y anchos de banda con distintas tecnologías.

Como podemos apreciar en la tabla 1, UWB se caracteriza por su gran ancho de banda en comparación con las tecnologías mostradas en la tabla. UWB ocupa parte del espectro de las demás tecnologías, pero al estar delimitada en potencia, no llega a interferir en las demás. La relación señal/ruido es tan baja que las transmisiones son confundidas con ruido ambiente o ruido de fondo.

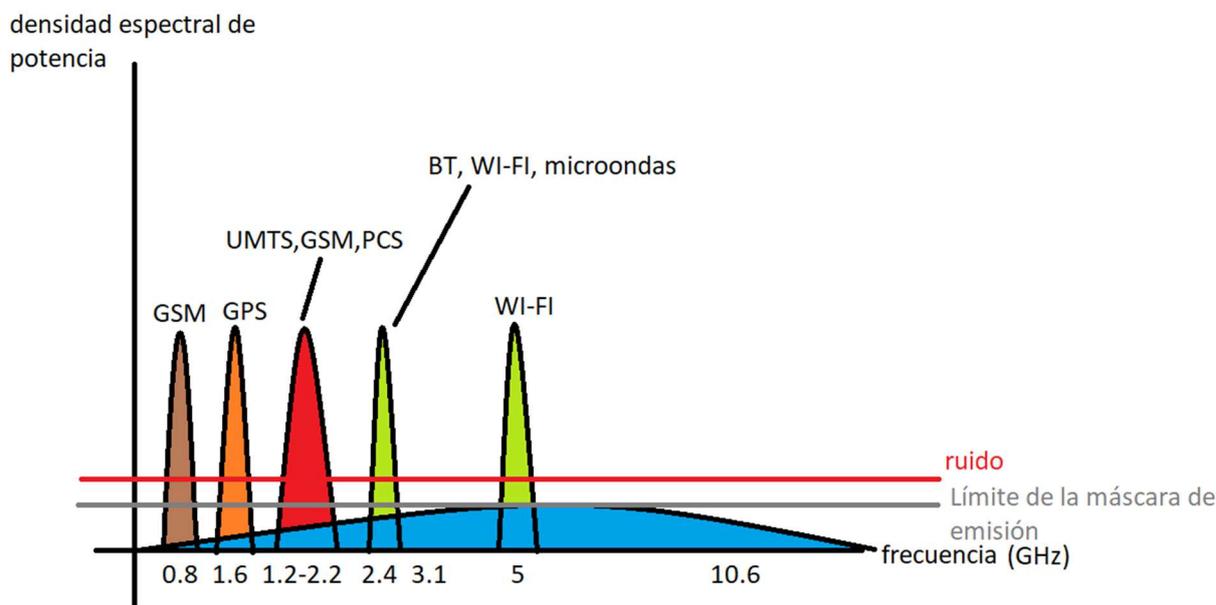


Ilustración 2-iii. Comparación de la densidad espectral de potencia y frecuencia según la frecuencia central. [17]

2.1.5. Estandarización

El IEEE formó un grupo de trabajo llamado IEEE 802.15 WPAN Low Rate Alternative PHY Task Group 4a (TG4a) [33], que se ocupa de la estandarización del nivel físico y del control de acceso al medio para redes de área personal inalámbricas de baja velocidad y baja potencia basadas en UWB.

El grupo TG4a ha desarrollado tres estándares en los años 2003, 2006 y 2007 llamados: [12]

- IEEE 802.15.4a-2003 [35]
- IEEE 802.15.4a-2006 Revisión [36]
- IEEE 802.15.4a-2007 Enmienda [34]

Estos estándares definen el nivel físico y el control de acceso al medio de las redes de baja velocidad y baja potencia basadas en UWB y están concebidos para sistemas de baja complejidad, bajo costo y con baterías cuyas duraciones son de meses o años sin recargar.

2.2 Localización en interiores

Esta tecnología tiene muchas aplicaciones en diferentes ámbitos como son el civil y el militar.

En el ámbito civil podemos destacar las siguientes aplicaciones:

- Comercios: localización de objetos en almacenes.
- Hospitales: monitorización de personas que requieran cuidados especiales.

- Edificios públicos: geolocalizar personas y orientarlas en cualquier situación

En el ámbito militar se destacan las siguientes aplicaciones:

- Seguridad pública: monitorizar individuos en las prisiones.
- Misiones militares: misiones en interiores, control de equipo, armas y personas.

Estas aplicaciones anteriormente mostradas junto a muchas otras son la causa de que haya despertado el interés de muchos fabricantes en desarrollar productos de localización en interiores con la tecnología UWB.

El diagrama principal de un sistema de posicionamiento estaría compuesto por tres partes fundamentales. La primera constaría de los sensores de localización, los cuales reciben la señal y dan como salida las métricas de localización. Éstas son la entrada del segundo elemento a considerar. Éste sería el algoritmo de posicionamiento, el cual nos daría las coordenadas estimadas del objeto que representaríamos en una pantalla. [17]

2.3 Acontecimientos importantes

El concepto de Ultra-Wideband se desarrolló en la primera mitad de la década de los sesenta, cuando se investigaba el comportamiento transitorio de una cierta clase de redes de microondas. Como resultado de estas investigaciones se desarrollaron sistemas de comunicaciones y radar que eran basados en impulsos cortos. Más tarde, en 1973, se patentó un receptor para este tipo de impulsos que sería el primer sistema de comunicaciones basado en el concepto de UWB. Más adelante, en los ochenta, a UWB se le asignaron varios nombres como *Baseband* (Banda base) y *Carrier-free* (Sin portadora).

El término UWB se adoptó en 1989 mientras se investigaban sus aplicaciones en diferentes campos como radar, comunicaciones, sensores y sistemas de posicionamiento.

En el año 2002, la Comisión Federal de Comunicaciones de Estados Unidos (FCC) impuso la primera reglamentación para sistemas inalámbricos basados en canales UWB. Dicha reglamentación definió las señales UWB especificando parámetros importantes como su máxima densidad espectral de potencia, su ancho de banda y el espectro disponible para este tipo de tecnología. La principal idea de la norma realizada por la FCC es definir qué tecnologías basadas en canales UWB usan una gran porción espectral y baja potencia de transmisión.

En 2005, WiMedia Alliance y la organización europea para la definición de estándares en sistemas de información y comunicaciones ECMA Internacional realizan una primera propuesta para la estandarización de nivel físico y de control de acceso al medio para redes de alta velocidad basadas en UWB. En el 2007 se presenta una propuesta final de estandarización al comité de estándares de la Organización Internacional para la Estandarización/Comisión Electrotécnica Internacional (ISO/IEC).

Hoy en día WiMedia Alliance sigue trabajando en el desarrollo de tecnologías basadas en canales UWB. [12]

2.4 Técnicas de estimación de la posición

La estimación de la posición de un nodo en una red inalámbrica implica intercambios de señales entre ese nodo y una cantidad de nodos de referencia [23]. Dependiendo de si la posición se estima a partir de las señales que viajan entre los nodos directamente o no, se pueden considerar dos esquemas de estimación de posición diferentes. El posicionamiento directo se refiere al caso en el que la posición se estima directamente a partir de las señales que viajan entre los nodos [22]. Por otro lado, se puede plantear un sistema de posicionamiento en dos pasos, primero extrae ciertos parámetros de señal de las señales y luego estima la posición en función de esos parámetros de señal. Este último esquema, el sistema de posicionamiento en dos pasos, es la técnica común en la mayoría de los sistemas de posicionamiento [6].

En el primer paso de una técnica de posicionamiento en dos pasos, se estiman los parámetros de señal, tales

como TOA, AOA y/o RSS. Luego en el segundo paso, la posición del nodo objetivo se estima en base a los parámetros de señal obtenidos a partir del primer paso. [6]

Los parámetros que se estiman en el primer paso están relacionados con la energía, el tiempo y/o la dirección de las señales que viajan entre el nodo objetivo y el nodo de referencia.

1. RSS: Como la energía de una señal cambia con la distancia, el RSS en un nodo transmite información sobre la distancia entre ese nodo y el nodo que ha transmitido la señal. Para convertir la información de RSS en una estimación de rango, debe conocerse la relación entre la distancia y la energía de la señal.

En presencia de tal relación, la distancia entre los nodos puede estimarse a partir de la medición de RSS en uno de los nodos suponiendo que se conoce la energía de la señal transmitida. [6]

2. Angulo de llegada (AOA): Este parámetro especifica el ángulo entre dos nodos. Comúnmente, se emplean antenas múltiples en forma de un conjunto de antenas en un nodo para estimar el AOA de la señal que llega a ese nodo. La idea principal es que las diferencias en los tiempos de llegada de una señal entrante en diferentes elementos de antena contienen la información de ángulo para una geometría de matriz conocida. [23]

3. Tiempo de llegada (TOA): El TOA de una señal que viaja desde un nodo a otro se puede usar para estimar la distancia entre esos dos nodos [6]. Para obtener una estimación inequívoca de TOA, los nodos deben tener un reloj común o intercambiar información de temporización por ciertos protocolos, como un protocolo de determinación de distancias bidireccionales. [24], [25], [26]

La técnica de estimación de TOA convencional implica el uso de filtros combinados [27].

Esta técnica es la utilizada por el hardware utilizado en este trabajo.

4. Diferencia entre los tiempos de llegada (TDOA): Otro parámetro relacionado con la posición es la diferencia entre los tiempos de llegada de dos señales que viajan entre el nodo objetivo y dos nodos de referencia [28]. Este parámetro, TDOA, se puede estimar inequívocamente si hay sincronización entre los nodos de referencia. Una forma de estimar TDOA es obtener estimaciones TOA relacionadas con las señales que viajan entre el nodo objetivo y dos nodos de referencia y luego obtener la diferencia entre esas dos estimaciones. Dado que los nodos de referencia están sincronizados, las estimaciones de TOA contienen el mismo desplazamiento de temporización. [23]

En el segundo paso, la posición del nodo objetivo se estima en base a los parámetros del primer paso. Dependiendo de la presencia o ausencia de una base de datos (datos de entrenamiento), se pueden considerar dos tipos de esquemas de estimación de posición [23].

- Las técnicas de mapeo (huella digital) emplean una base de datos, que consiste en parámetros de señal previamente estimados en posiciones conocidas, para estimar la posición de un nodo objetivo. Comúnmente, la base de datos se obtiene de antemano mediante un entrenamiento de fase.
- Las técnicas geométricas y estadísticas estiman la posición del nodo objetivo a partir de los parámetros de la señal, estimados en el primer paso, a través de relaciones geométricas y enfoques estadísticos, respectivamente [6]. El método estudiado en este trabajo se incluye dentro de este grupo y se va a centrar en medidas TOA.

2.5 Medidas de distancia con señales UWB en entornos de múltiples caminos.

El rendimiento de localización depende en gran medida de la calidad de las medidas de distancia. Por esta razón, es importante saber el gran conjunto de diversos factores que pueden degradar la precisión de la

medición.

Vamos a definir algunos términos. Nos referimos a una medida de distancia entre dos nodos como una medida DP (*Direct Path*) si la señal medida viaja en línea recta entre los dos nodos por un medio con una permitividad constante y conocida (por el aire). Una medición puede ser no-DP, si por ejemplo, la señal DP está parcialmente obstruida o está totalmente obstruida de manera que la primera ruta de llegada ha sido reflejada por obstáculos. Se produce una medida con línea de visión directa (*line of sight*, LOS) cuando la primera ruta de llegada se encuentra a lo largo del DP sin obstrucciones, mientras que una medida que no es LOS (NLOS) ocurre, o bien cuando el DP está totalmente bloqueado, en cuyo caso la primera ruta de llegada proviene de la señal reflejada, o bien por un exceso en el retardo del DP, en el que la señal atraviesa diferentes materiales en línea recta, lo que resulta en retrasos adicionales. [3]

Las principales fuentes de error se describen a continuación.

A. Propagación.

Las fuentes de error debido a la propagación de la señal inalámbrica incluyen multitrayecto, retardo de DP excesivo y bloqueo de DP.

1. Multitrayecto.

El desvanecimiento multitrayecto es causado por la interferencia destructiva y constructiva de las señales que llegan al receptor a través de diferentes trayectorias de propagación. Cuando se utilizan los sistemas de banda estrecha en entornos desordenados, las señales que llegan a través de diferentes rutas de propagación por lo general no se pueden resolver. Esto da como resultado la interferencia destructiva y constructiva de las señales y hace que la detección de la componente DP, si existe, sea difícil. Aunque el uso de señales UWB puede resolver estas componentes multitrayecto [37], [38], la cantidad de componentes multitrayecto en entornos difíciles hace que la detección DP no sea trivial.

2. Retardo de DP excesivo.

Otra fuente de error es el retardo de DP excesivo causado por la propagación de una componente DP parcialmente obstruida que viaja a través de diferentes obstáculos, como las paredes de los edificios. El tiempo de propagación de estas señales depende no solo de la distancia recorrida sino también de los materiales encontrados. Dado que la propagación de ondas electromagnéticas es más lenta en algunos materiales en comparación con el aire, la señal llega con un retardo excesivo, introduciendo un sesgo positivo en la estimación de la medida.

El error de medida debido al retardo de DP excesivo se puede caracterizar de la siguiente manera: la velocidad de las ondas electromagnéticas que viajan en un material homogéneo se reduce por un factor de $\sqrt{\epsilon_r}$ con respecto a la velocidad de la luz c , donde ϵ_r es la permitividad eléctrica relativa del material. El retraso de DP excesivo introducido por el material con grosor, d_W es dado por: [39], [40]

$$\Delta\tau = (\sqrt{\epsilon_r} - 1) \frac{d_W}{c}.$$

Ecuación III. Exceso en el retardo de DP

Los experimentos en entornos comunes de oficina han demostrado que este retraso afecta significativamente a la precisión de los sistemas UWB. Recientes campañas de medición muestran que la media del error de medida (el sesgo de las estimaciones de medida) debido al exceso de retardo DP son del orden del grosor de los obstáculos, como las paredes, entre dos nodos transmisores. [41]

3. *Bloqueo DP. (Bloqueo camino directo)*

Cuando el DP (camino directo) a un nodo está completamente obstruido, el receptor del nodo solo puede observar componentes NLOS, lo que da como resultado distancias estimadas mayores que la distancia real. Una observación importante es que el efecto del bloqueo de DP y el retardo de DP excesivo es el mismo: ambos agregan un sesgo positivo a la estimación de la medida [3]. Ésta es la clave para nuestro método que estudiaremos en otros capítulos, ya que este método es robusto frente a errores NLOS.

Tanto el exceso de DP como las condiciones de bloqueo de DP ocurren en condiciones NLOS. [3]

B. Debidos al reloj.

La medición basada en el tiempo requiere mediciones precisas del intervalo de tiempo (con errores del orden de 1 ns o menos cuando se requiere una precisión de centímetros).

Con este fin, los nodos están equipados con un oscilador del que se deriva una referencia de reloj interno para medir el tiempo verdadero t . Numerosos efectos físicos hacen que los osciladores experimenten derivas de frecuencia independientes, lo que resulta en grandes errores de temporización. Estos errores pueden ser particularmente significativos en sistemas con osciladores pobres. [3]

C. Interferencia.

UWB está destinada a funcionar como una tecnología subyacente, por lo tanto, debe coexistir con otros sistemas de comunicación. Por lo tanto, se espera que los sistemas sensibles a la ubicación basados en la tecnología UWB operen en presencia de interferencia de banda estrecha (NBI, *NarrowBand Interference*) e interferencia multiusuario (MUI, *Multiuser Interference*), lo que puede degradar el rendimiento de la estimación TOA. En tales escenarios, la señal recibida se puede expresar como: [3]

$$r(t) = s(t) + n(t) + i(t)$$

Ecuación IV. Señal recibida.

Donde $i(t)$ muestra la interferencia.

3 ENTORNO DE TRABAJO

*El aprendizaje es experiencia,
todo lo demás es información
- Albert Einstein -*

Conocer el entorno de trabajo en el que se ha desarrollado este proyecto es uno de los aspectos importantes que debemos detallar. A continuación mostraremos la situación, escenario del proyecto, parámetros y cualquier otra cosa necesaria para conocer la forma en la que se ha desarrollado este proyecto.

3.1 Introducción

En este capítulo vamos a detallar el entorno de trabajo en el que se ha desarrollado este proyecto.

Se han utilizado las siguientes referencias: [15], [16], [17], [21]

3.2 Equipos

Para llevar a cabo este proyecto, contamos con el DecaWave EVK1000 Evaluation Kit, el cuál incluye:

- 2 placas EVB1000.
- 2 antenas.
- 2 cables USB 2.0
- Guía de inicio rápido.

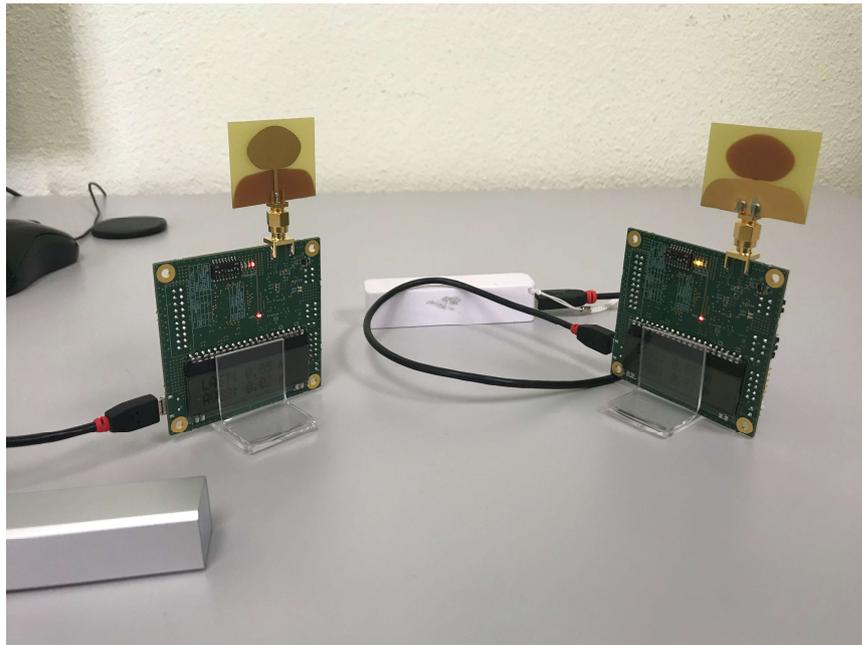


Ilustración 3-i. Kit decaWave.

La placa de evaluación utilizada tiene unas dimensiones de 7 cm x 7 cm. La información de las medidas de distancia es mostrada en una pantalla LCD que se encuentra en la parte frontal de la placa, junto con el interruptor S1 en el que se controla el modo de operación.

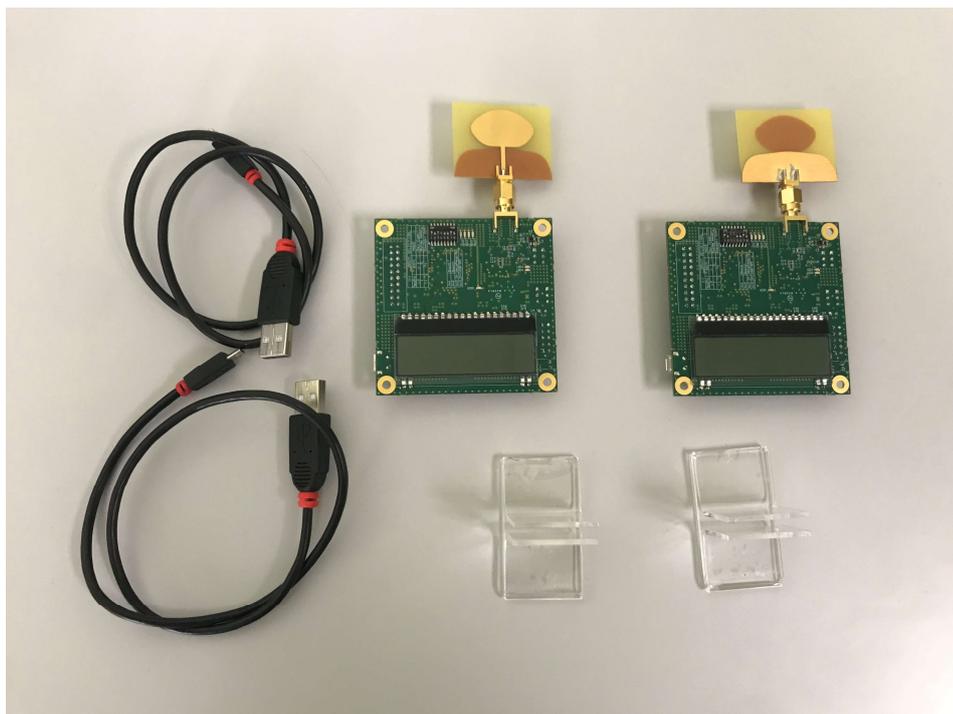


Ilustración 3-ii. EVB1000.

En la parte trasera podemos encontrar el DW1000 IC, el ARM IC, el botón ARM reset, dos interruptores DIP (S2 y S3), el conector JTAG, una conexión externa SPI y varios conectores para configurar el modo de operación como el S1 de la parte frontal.

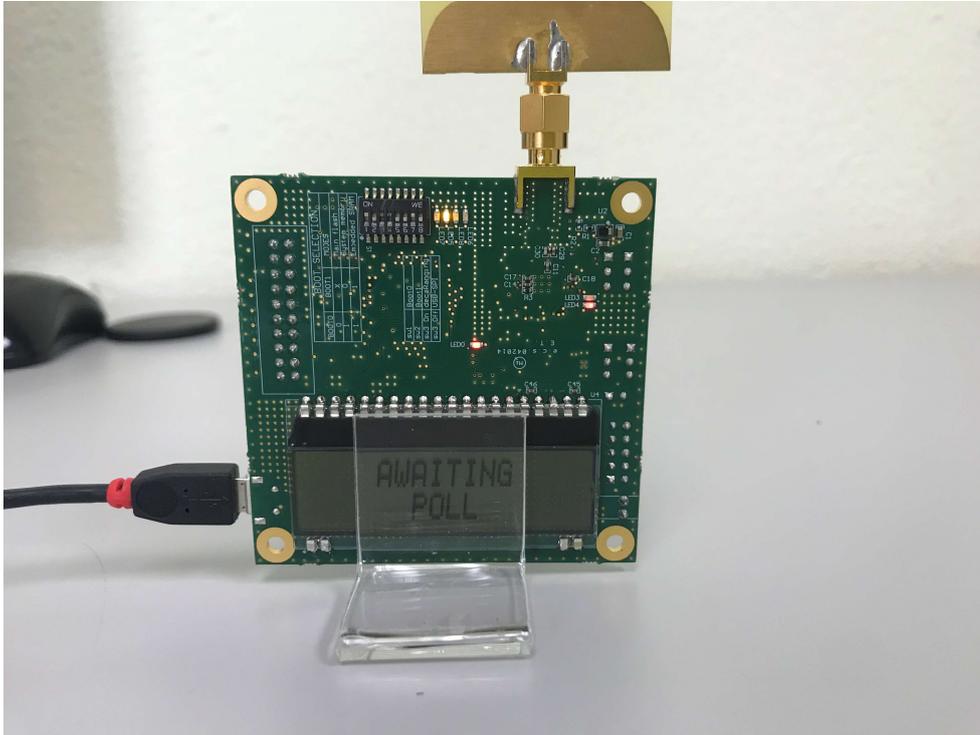


Ilustración 3-iii. Placa que contiene el DW1000

3.2.1 Transmisores

El kit EVK1000 incluye dos placas y 2 antenas como los de la ilustración 3-iv, que formarían los dos transmisores.



Ilustración 3-iv. EVB1000

3.2.1.1 Características

- Cumple IEEE 802.15.4-2011 UWB y las máscaras definidas por FCC Y ETSI.
- Soporta 6 bandas RF de 3.5GHz a 6.5GHz.
- Programación de la potencia de salida.
- Soporta voltaje de 2.8V a 3.6V.
- Tasa de datos de 110kbps, 850kbps y 6.8Mbps.
- Longitud máxima del paquete 1023 bytes.
- Soporta Ranging TDOA si se programa. Por defecto, lo que mide es TOA.

3.2.1.2 Beneficios

- Alta precisión de 10 cm.
- Rango de operación hasta de 290m con 110kbps de tasa de datos en estructuras RTLS.
- Batería de gran capacidad y duración.
- Alto porcentaje de inmunidad frente al desvanecimiento multirrayecto.

3.2.1.3 Ajustes

Este hardware tiene una gran posibilidad de ajuste del comportamiento. Vamos a detallar las principales funcionalidades con respecto a la comunicación de nuestro sistema. El interruptor S1 esta formado a su vez por 8 interruptores, los cuales se pueden configurar de la siguiente manera:

Interruptor	OFF	ON	Descripcion
S1-1	Desactivar ARM	Activar ARM	Funcionalidad de ARM
S1-2	Desactivar fast-ranging (150ms)	Activar fast-ranging (5m)	Configura el tiempo de respuesta de las medidas
S1-3	Activar USB to SPI	Desactivar USB to SPI	Necesario para aplicación DecaRanging
S1-4	Activar el rol TAG	Activa el rol ANCLA	Configurar rol
S1-5	Modos de operación		
S1-6			
S1-7			
S1-8	Desactiva la configuración remota del tiempo de respuesta	Activa la configuración remota del tiempo de respuesta	Modificar en la aplicación DecaRanging el tiempo de respuesta.

Tabla 2. Configuración de S1.

Vamos a detallar ahora los modos de operación, que se pueden configurar como hemos mostrado en la tabla anterior mediante los interruptores S1-5, S1-6 Y S1-7.

S1-5	S1-6	S1-7	Modo	Canal	Tasa de datos	PRF	Preámbulo	Código de preámbulo
Off	Off	Off	1	2	110 kbps	16	1024	3
On	Off	Off	2	2	6.8 Mbps	16	128	3
Off	On	Off	3	2	110 kbps	64	1024	9
On	On	Off	4	2	6.8 Mbps	64	128	9
Off	Off	On	5	5	110 kbps	16	1024	3
On	Off	On	6	5	6.8 Mbps	16	128	3
Off	On	On	7	5	110 kbps	64	1024	9
On	On	On	8	5	6.8 Mbps	64	128	9

Tabla 3. Modos de operación.

3.3 Estimación de la distancia. (Ranging)

Para determinar la medida de distancia a la que se encuentran dos nodos utilizaremos un conjunto de tres mensajes que se transmiten para ello. Mediante el retardo de ida y vuelta, que es el tiempo que pasa desde que enviamos el mensaje hasta que recibimos una respuesta, podemos obtener de una manera aproximada la distancia que existe entre los dos nodos.

3.3.1 Emparejamiento

Inicialmente, ni el TAG ni el ANCLA se encuentran emparejados. El TAG está continuamente enviando mensajes 'blink', cuyo contenido incluye su propia dirección. En él se puede apreciar que aparece el mensaje 'Awaiting response' en su pantalla LCD.

El ancla, por el contrario, se encuentra en estado constante de escucha, a la espera de recibir un mensaje 'blink'. En la pantalla LCD de ésta podemos apreciar que aparece el mensaje 'Awaiting poll'. Una vez ésta recibe un mensaje 'blink' y decide emparejarse con ese TAG, envía un mensaje de Ranging para asociarse y terminar la fase de emparejamiento.

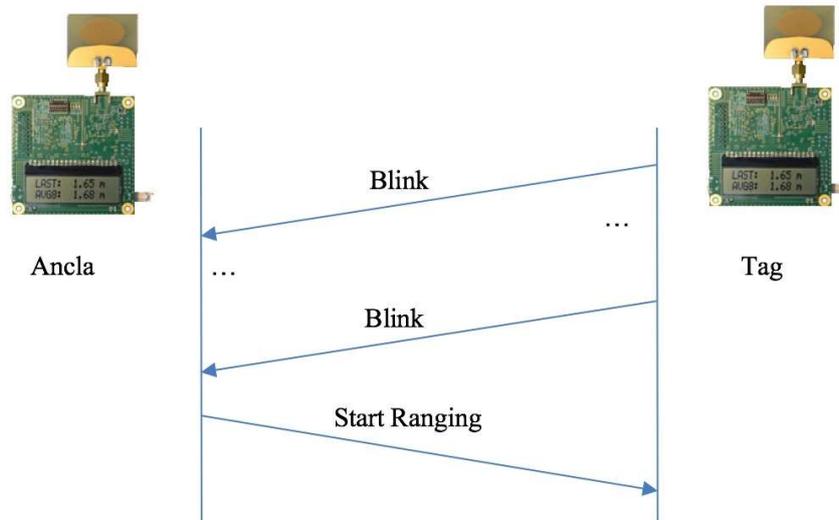


Ilustración 3-v. Emparejamiento.

3.3.2 Intercambio de datos

El envío del mensaje de sondeo del TAG es el momento de inicio de la medida de distancia. Una vez el ancla recibe el mensaje envía un mensaje de respuesta. Una vez el TAG ya ha recibido este mensaje, podemos decir que ambos están asociados y comienza la transmisión de datos.

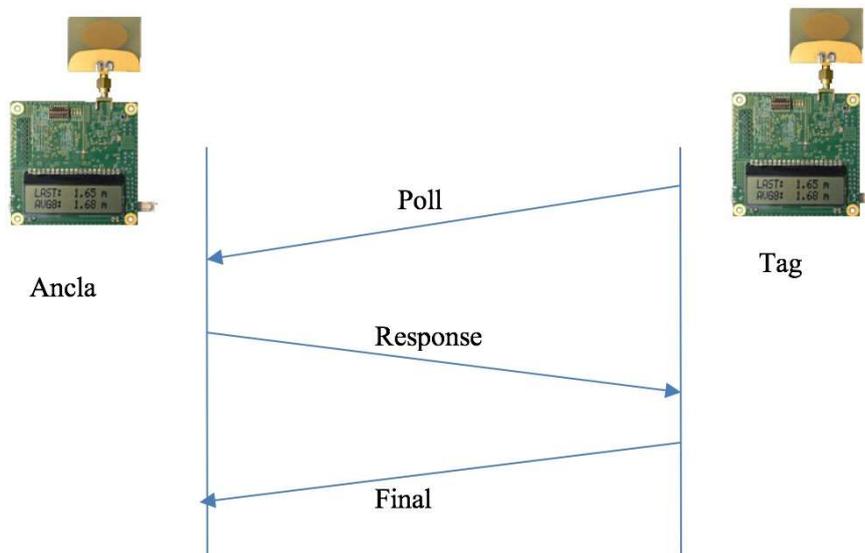


Ilustración 3-vi. Intercambio de datos.

Seguidamente, el TAG envía el mensaje final. Este mensaje incluye los datos de la transmisión y recepción, la respuesta recibida del ANCLA y el mensaje en sí. Una vez este mensaje es recibido por el ANCLA, ésta lo utiliza junto con sus propios datos de transmisión y recepción para calcular los tiempos de ida y vuelta en la comunicación entre ésta y el TAG.

La distancia la calcula fácilmente multiplicando los tiempos por la velocidad de la luz. Finalmente, el ANCLA

envía un último informe con la medida de distancia al TAG para que se muestre la medida en ambas pantallas LCD.

A continuación vamos a mostrar el intercambio de tramas junto con los tiempos de propagación mediante la figura 3-vii.

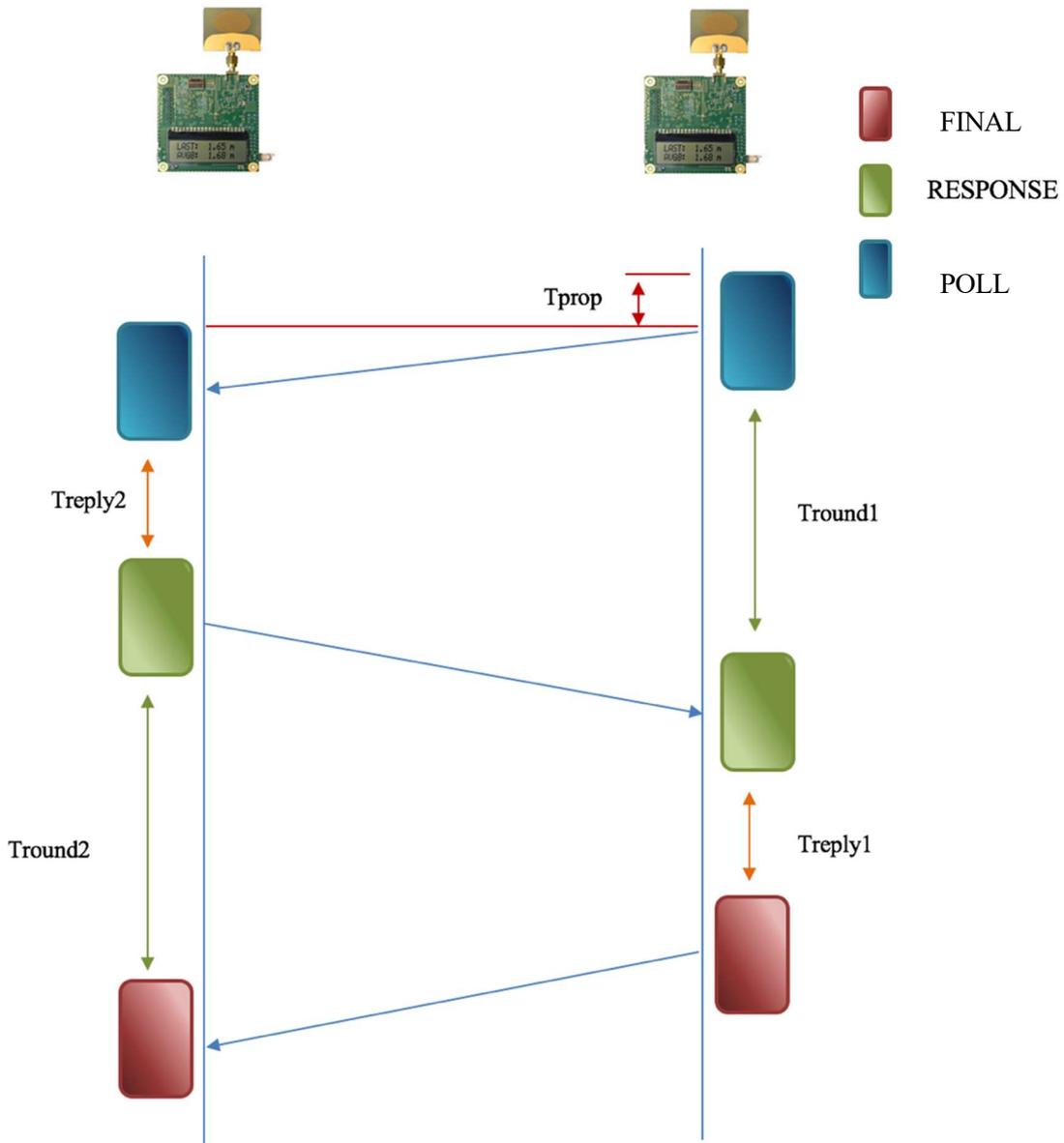


Ilustración 3-vii. Tiempos de propagación.

$$T_{prop} = \frac{T_{round1} * T_{round2} - T_{reply1} * T_{reply2}}{T_{round1} + T_{round2} + T_{reply1} + T_{reply2}}$$

Ecuación V. Tiempos de propagación.

3.4 Funcionamiento de los equipos

En nuestro paquete EVK1000 encontramos dos placas EVB1000. Estas placas están preconfiguradas con una aplicación, llamada ‘DecaRanging’ que realiza un control del DW1000 IC para el intercambio de mensajes, cálculo del tiempo de transmisión, estimación de distancia entre dos antenas y la presentación del resultado en las pantallas LCD que poseen las dos placas. Para realizar esto solo es necesario que las placas estén alimentadas. Este modo de operación es el llamado ‘INT-INT’.

Además del modo mencionado anteriormente, también podemos operar en el modo ‘INT-EXT’. En este modo, un sistema microcontrolador externo puede manejar el DW1000 IC directamente a través del interfaz SPI.

3.4.1 Modo de funcionamiento INT-INT

EVB1000 ON-BOARD RANGING APPLICATION es una aplicación de software que viene instalada en las dos placas. Esta aplicación controla el DW1000 IC para realizar todo el procedimiento de análisis de medidas automáticamente. Posteriormente, se muestran esos resultados en la pantalla LCD que poseen las placas.

Para empezar a operar en este modo hay que configurar el interruptor S1-3 a ON.

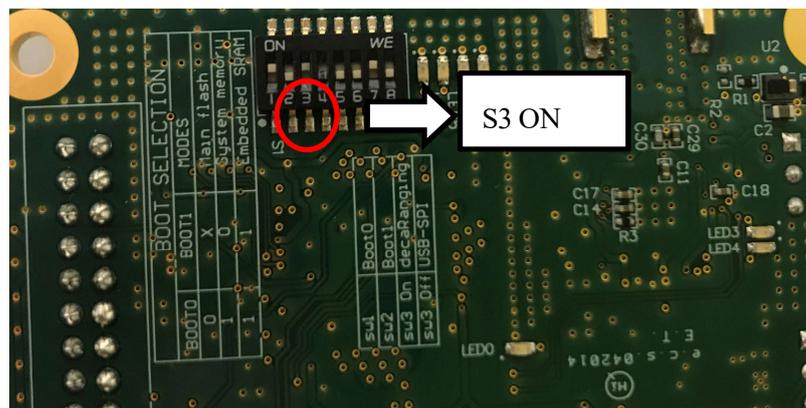


Ilustración 3-viii. Configuración INT-INT.

Esta aplicación requiere que las placas se configuren como ANCLA o como TAG. Esto se configura fácilmente con el interruptor S1-4.

- S1-4 ON: Placa configurada como ‘Ancla’.
- S1-4 OFF: Placa configurada como ‘Tag’.

Pasos a seguir

Ya configurada cada placa según el modo de operación que queramos, se procede a la alimentación de los dos dispositivos para encenderlos. El indicador de que la placa se está alimentando es el LED 0, que se encenderá.

Seguidamente las dos placas empezarán a intercambiar mensajes.

En la placa configurada como ANCLA, aparecerá iluminado el LED 5. En cambio, en la placa configurada como TAG aparecerá iluminado el LED 6.

En unos segundos, nos mostrará en la pantalla LCD el resultado de la medida de distancia.



Ilustración 3-ix. Medida de distancia INT-INT

3.4.2 Modo de funcionamiento INT-EXT

El EVB1000 tiene la opción de poder configurarlo para que permita a una aplicación externa, llamada ‘DecaRanging’ de DecaWave, controlar el DW1000 IC a través de una conexión USB con el PC. Esta aplicación es similar a la que viene preprogramada en el microcontrolador ARM EVB1000.

En este modo de funcionamiento, la aplicación USB-to-SPI integrada en el dispositivo actúa como un puerto COM virtual esclavo. Éste es el encargado de traducir los comandos del puerto COM en las transacciones SPI.

Para activar esta aplicación, es necesario que el interruptor S1-3 esté OFF.

Hay varias opciones de uso:

- Control mediante la aplicación externa de las dos unidades.
- Control mediante la aplicación externa de una de las dos unidades y la otra se controla mediante la aplicación ‘DecaRanging’ del microcontrolador ARM integrado.

3.5 Laboratorio

3.5.1 Introducción

En esta sección vamos a detallar la colocación de cada equipo.

En la figura 3-x se puede ver la situación explicada anteriormente INT-INT, que recordamos que consiste en que los dos transmisores utilizan una aplicación de software instalada internamente llamada EVB1000 ON-BOARD RANGING APPLICATION, que controla el DW1000 IC para realizar el procedimiento de análisis de medidas de una forma automática, mostrando finalmente el resultado en la pantalla LCD frontal.

Las medidas tomadas que hemos utilizado en el posterior análisis se han tomado en la siguiente situación.

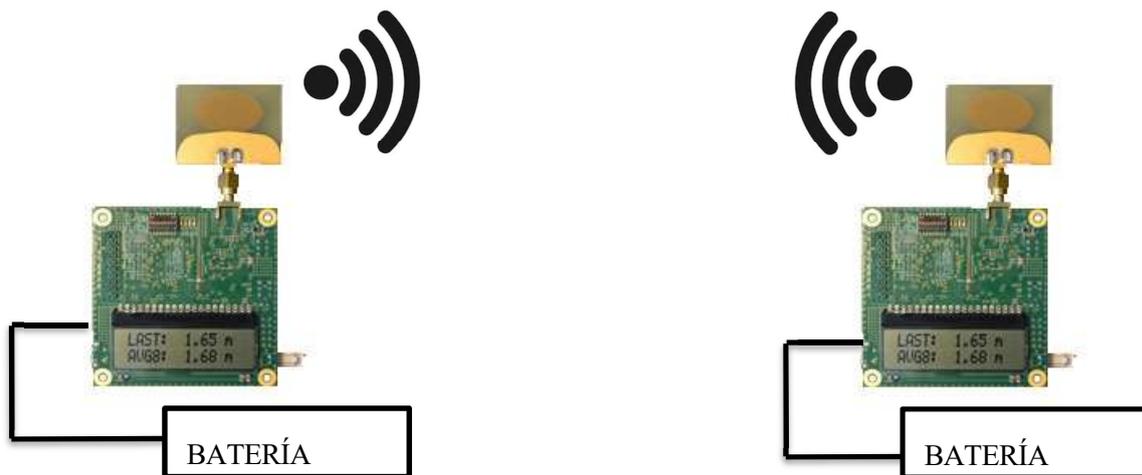


Ilustración 3-x. Situación ilustrativa.

A continuación, se puede ver en la figura 3-xi una situación real del escenario anterior presentado en la figura 3-x.

En la figura 3-xi se puede observar los dos transmisores UWB conectados a través de USB a las baterías portátiles.



Ilustración 3-xi. Situación real

3.5.2. Parámetros y situación

Tiene una gran importancia describir y detallar bien los parámetros que se han configurado y la situación.

Las medidas de distancia se han realizado siempre dentro de la ETSI, más concretamente se han realizado en la sala de investigaciones del Departamento de Teoría de la Señal y Comunicaciones.

Los medidas de distancia tomadas siempre han sido a corta distancia (1m-5m).

Estas medidas fueron realizadas en intervalos de 50 cm. Se usó como ancla un nodo configurado como tal y conectado a una batería. El funcionamiento fue INT-INT.

En el otro extremo se colocó otro extremo conectado también a una batería, configurado con el rol TAG y el cuál se iba alejando en línea recta por las diferentes posiciones de la sala.

Ambos nodos fueron colocados en un taburete como base y usando el modo de operación 5, con una tasa de datos de 110 kbps, un PRF (*Pulse Repetition Frequency*), que es la frecuencia de repetición de pulsos, de 16 MHz y usando el canal 5. Así se realizaron una serie de medidas sin ningún software exterior.

Todas las medidas INT-INT pueden consultarse en el apéndice A: Tablas.

4 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

*Me lo contaron y lo olvidé;
lo vi y lo entendí;
lo hice y lo aprendí.*

- Confucio. Filósofo chino(551 a.C - 479 a.C.) -

En este capítulo vamos a aplicar nuestro conjunto de medidas de distancia, tomadas en distintas situaciones reales, donde estimaremos la posición de un objeto mediante un algoritmo de localización de baja carga computacional.

4.1 Introducción

En esta situación, vamos a usar medidas de distancia reales con la ayuda del kit de DecaWave a las que le aplicaremos un algoritmo que implementaremos a continuación para obtener la localización estimada del objeto.



Ilustración 4-i. Diagrama de bloques del proceso de localización usando las medidas reales obtenidas del kit de DecaWave.

A continuación, en la tabla 4, mostraremos el significado de las variables utilizadas.

Simbolo	Significado	Unidades	Descripción
r	Medida de distancia experimental.	m	Medida de distancia que nos proporciona nuestro kit EKV1000.
(x, y)	Posición estimada	(m, m)	Posición estimada.

Tabla 4. Parámetros, definición y descripción de variables utilizadas

4.2 Algoritmo de localización.

El propósito de cualquier algoritmo de posicionamiento es, dado un conjunto de mediciones (por ejemplo, distancia, ángulo, conectividad), encontrar las ubicaciones de los nodos con posiciones desconocidas (nodos desconocidos). El posicionamiento ocurre en dos pasos. Se obtienen las primeras medidas de los nodos, luego las mediciones se combinan utilizando técnicas de posicionamiento para deducir la ubicación en los nodos desconocidos.

Al comparar diferentes algoritmos, los índices de rendimiento típicos son: la precisión, relacionada con la dispersión del error de estimación de posición (generalmente modelada por una distribución de probabilidad Gaussiana), la solidez del algoritmo frente a algunos errores, como los errores de medición de distancia, y la cobertura, el porcentaje de nodos con posición estimada.

Hay diferentes métodos y algoritmos para calcular de una forma estimada la posición de un objeto. En nuestro caso vamos a elegir una técnica, clasificada como “single-hop”. Esta técnica se conoce como multi-lateración de baja complejidad: Min-Max por su simplicidad en la implementación.

La principal idea de este método es construir un cuadrado como se puede ver en la figura 4-ii por cada ancla usando la posición de ésta y la distancia estimada entre ésta y el móvil, y entonces determinar la intersección de estos cuadrados. La posición del móvil es tomada como el centro del cuadro interceptor.

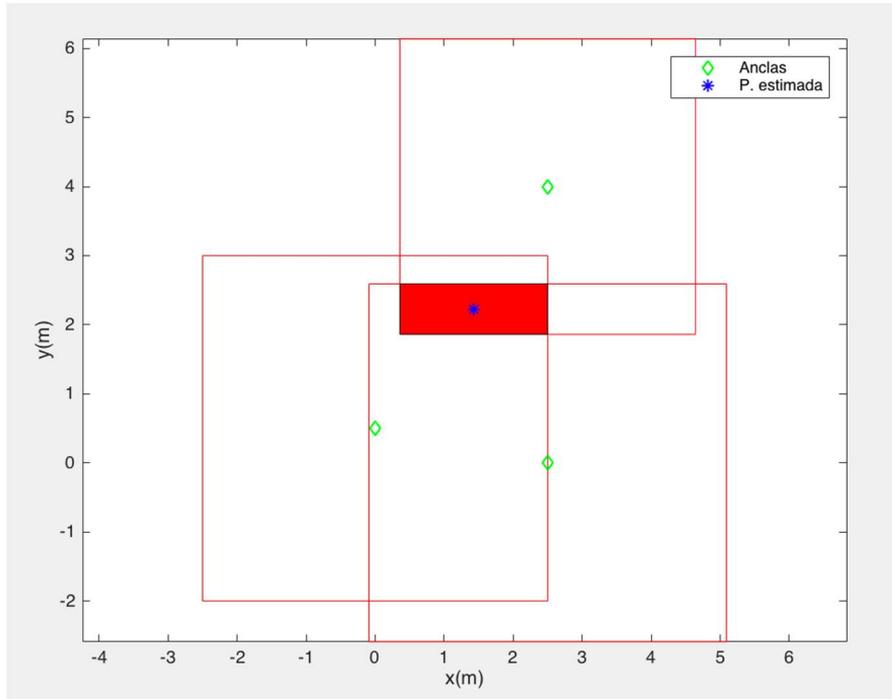


Ilustración 4-ii. Método Min-Max con 3 anclas

En la figura 4-ii se ilustra el método Min-Max para un nodo con estimaciones de distancia a tres anclas.

A continuación, en la figura 4-iii representamos el caso en el que no haya ningún cuadrado interceptor, debido a que no interceptan los cuadrados.

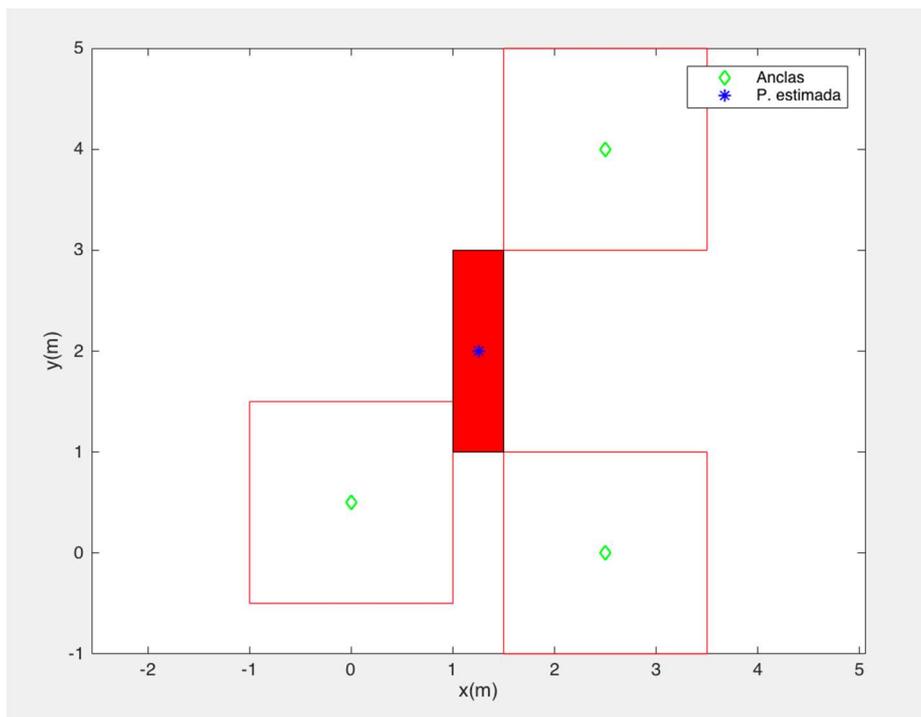


Ilustración 4-iii. Método Min-Max con 3 anclas sin que intercepten los cuadrados.

4.2.1 Implementación en Matlab.

En este apartado vamos a explicar las pautas para estimar la posición mediante el algoritmo de multilateración: Min-Max.

El cuadro delimitador de un anclaje a se crea sumando y restando la distancia estimada (d_a) de la posición del ancla (x_a, y_a).

$$(x_i - d_i, y_i - d_i) \times (x_i + d_i, y_i + d_i).$$

Ecuación VI

La intersección de los cuadros delimitadores se calcula tomando el máximo de todos los mínimos de coordenadas y el mínimo de todos los máximos.

$$[\max_i(x_i - d_i), \max_i(y_i - d_i)] \times [\min_i(x_i + d_i), \min_i(y_i + d_i)].$$

Ecuación VII

La posición final se establece en el promedio de ambas coordenadas de esquina. Además, cuando se introduce ruido en el rango de mediciones, el algoritmo muestra algunos comportamientos distintos. El algoritmo Min-Max es bastante preciso y robusto frente a medidas con error grande positivo si hay suficientes medidas con error pequeño. Además este algoritmo es bastante insensible al sesgo, porque estirar los cuadros delimitadores tiene poco efecto en la posición del centro del cuadro de intersección si hay suficientes medidas con error pequeño. [13]

Por eso, a este método le afecta menos una medida NLOS, que como ya se explicó dan lugar a una medida mayor que la distancia real, si tenemos las suficientes medidas LOS.

4.3 Análisis de las medidas realizadas

En esta situación vamos a usar los siguientes scripts de Matlab, que pueden consultarse en el Apéndice B: Ficheros de Matlab: habitacion.m, estimación.m, casoefectoperimetro.m, caso4.m, caso3.m, anclas.m, rmsecaso4.m, rsmecaso3.m, perimetroyang.m, caso4sinobs.m, caso3sinobs.m y estimacionpos.m

Partimos de una situación real, con una habitación de 3.5x5 m². Para llevar a cabo este experimento, necesitamos cuatro anclas y un TAG. Al tener sólo un par de transmisores decaWave, el proceso seguido lo comentamos a continuación.

Analizaremos cuatro situaciones, correspondientes a las cuatro anclas. Por tanto, colocaremos uno de nuestros transmisores configurado como ANCLA en una posición previamente definida e iremos tomando medidas de distancia por toda la habitación moviendo de posición el transmisor que hemos configurado como TAG.

Este proceso lo repetiremos para las posiciones de las otras tres anclas. Para cada posición del plano obtendremos cuatro medidas de distancia, una por cada ancla, y gracias al algoritmo de localización implementado, calcularemos la posición estimada de cada una de las posiciones reales.

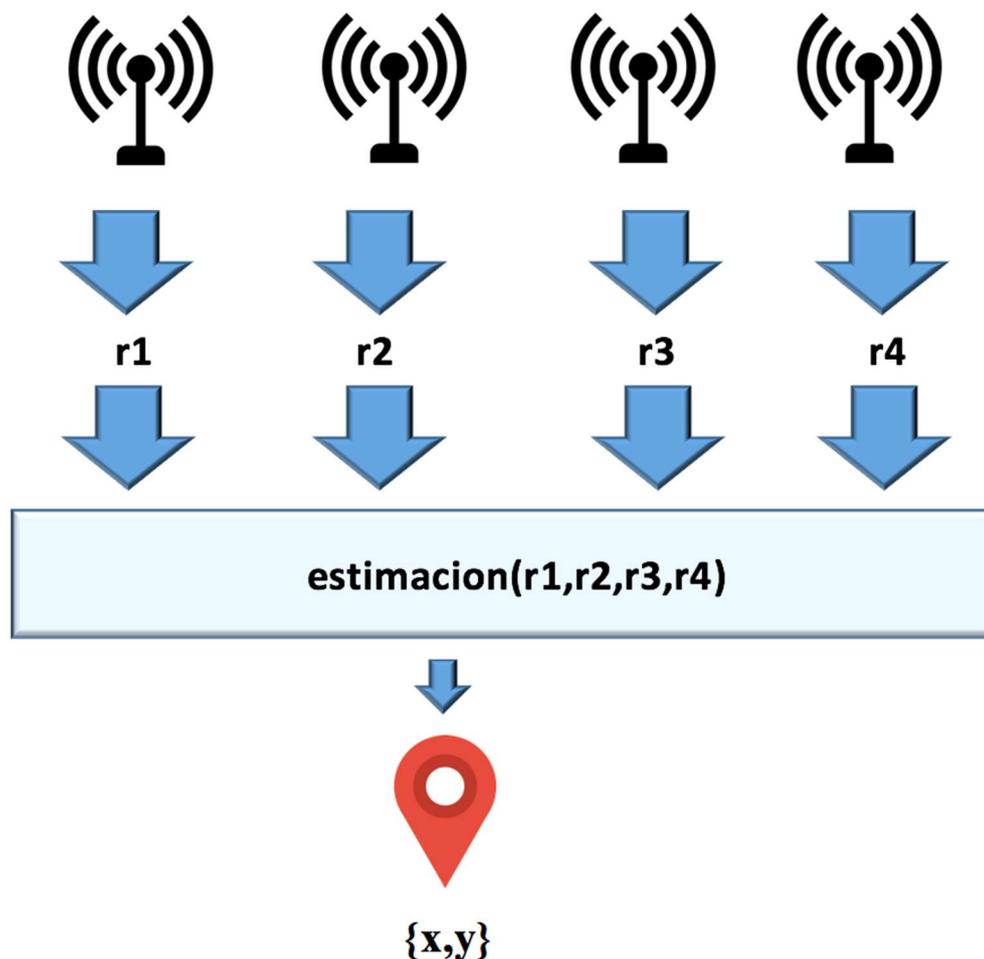


Ilustración 4-iv. Caso basado en medidas reales

4.3.1 Habitación.

Como hemos comentado anteriormente, partimos de la situación de una habitación de 3.5×5 m² con algunos obstáculos en su interior. En la figura 4-v podemos observar las posiciones reales que se van a estudiar y las cuales se van a estimar. Estas posiciones están repartidas por toda la habitación e incluso por un pasillo fuera de ésta.



Ilustración 4-v. Habitación con obstáculos

4.3.2. Colocación de las anclas.

En la figura 4-vi se muestra la localización de las anclas en nuestro estudio. Las coordenadas serán las siguientes:

- Ancla 1: (2.5m,0m).
- Ancla 2: (0m, 0.5m).
- Ancla 3: (0m, 5.5m).
- Ancla 4: (2.5m, 4m).
- Ancla 5: (1.5m,5.5m).

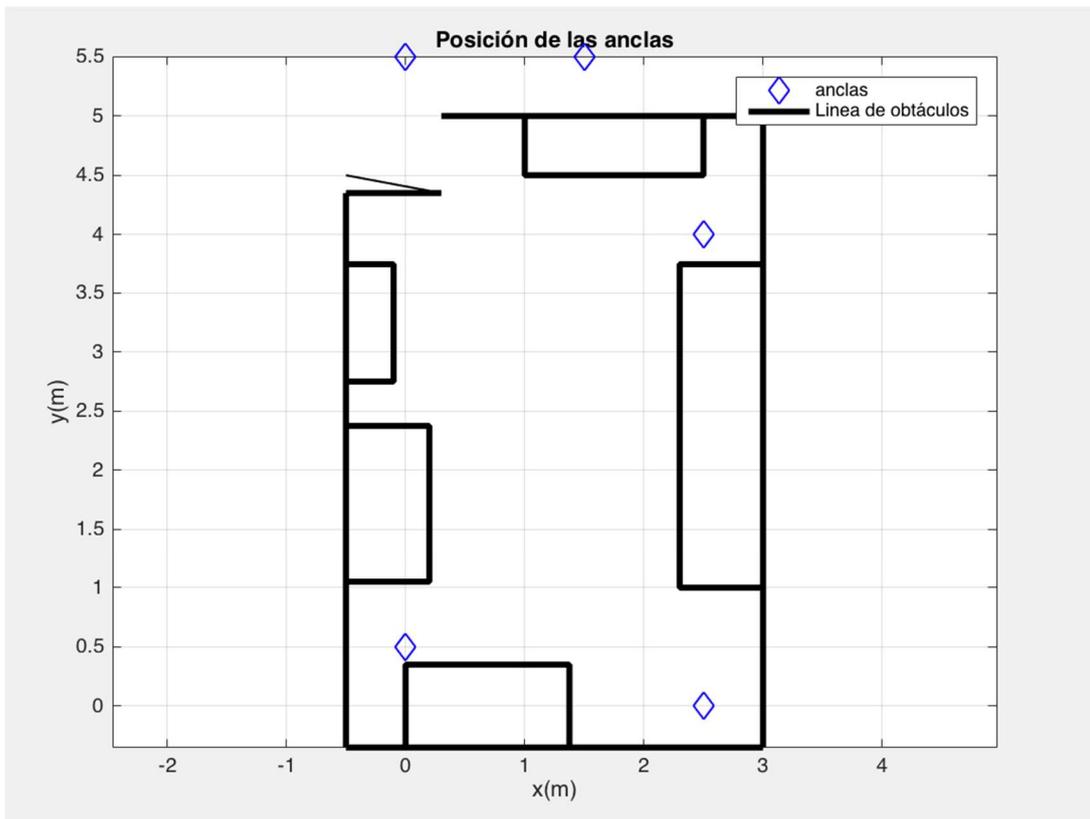


Ilustración 4-vi. Colocación de las anclas.

4.3.3. Efecto perímetro.

En los siguientes apartados demostraremos que este algoritmo es robusto frente a medidas NLOS, pero sólo proporciona un buen posicionamiento dentro del perímetro del área abarcada por todos los anclas.

Podemos ver un ejemplo en la figura 4-vii donde se representa el efecto perímetro con cuatro anclas en un área de $10 \times 10 \text{ m}^2$.

Las anclas se sitúan en la posición:

1. (3m, 3m)
2. (3m, 7m)
3. (7m, 7m)
4. (7m, 3m)

Se observa que si el objeto está fuera del perímetro de las anclas, la tendencia del algoritmo es ubicar el objeto en el perímetro. Cuanto más lejos esté el objeto del perímetro, más grande será el error de posicionamiento. Este error lo representamos de una forma muy visual como el segmento que une la posición real y la posición estimada. Así se podrá ver como algunos segmentos son mayores a otros, lo que significa que algunas posiciones tendrá un error mayor que otras. Por tanto, se concluye que para usar este algoritmo hay que garantizar que las anclas rodean la zona en la que se quiere lograr la localización.

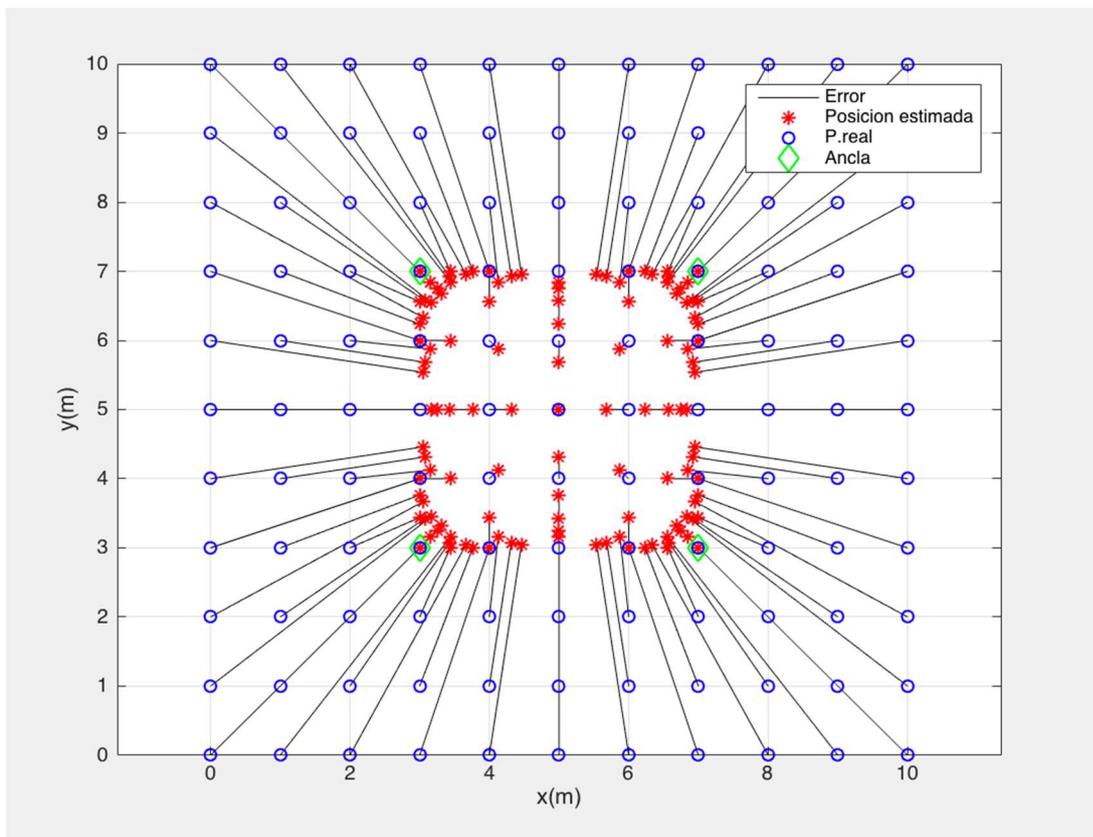


Ilustración 4-vii. Efecto perímetro

4.3.4. Posición estimada sin errores en las medidas de distancia.

En este apartado vamos a realizar una estimación de la posición teniendo en cuenta solamente las tres anclas interiores de la habitación (Ancla 1, Ancla 2 y Ancla 4) y, un segundo caso, añadiendo el ancla 3, que está situada en el pasillo. Lo vamos a hacer para medidas perfectas de distancia sin error. Así podremos apreciar el efecto perímetro explicado anteriormente en nuestro escenario real y la mejora que supone añadir una cuarta ancla.

4.3.4.1. Posición estimada teniendo en cuenta 3 anclas (interiores).

En este apartado se muestran las posiciones estimadas teniendo en cuenta las tres anclas interiores. Podemos observar en la figura 4-viii que los errores más significativos son los que se encuentran fuera del área comprendida entre las anclas. Éstos son causados principalmente por el efecto perímetro.

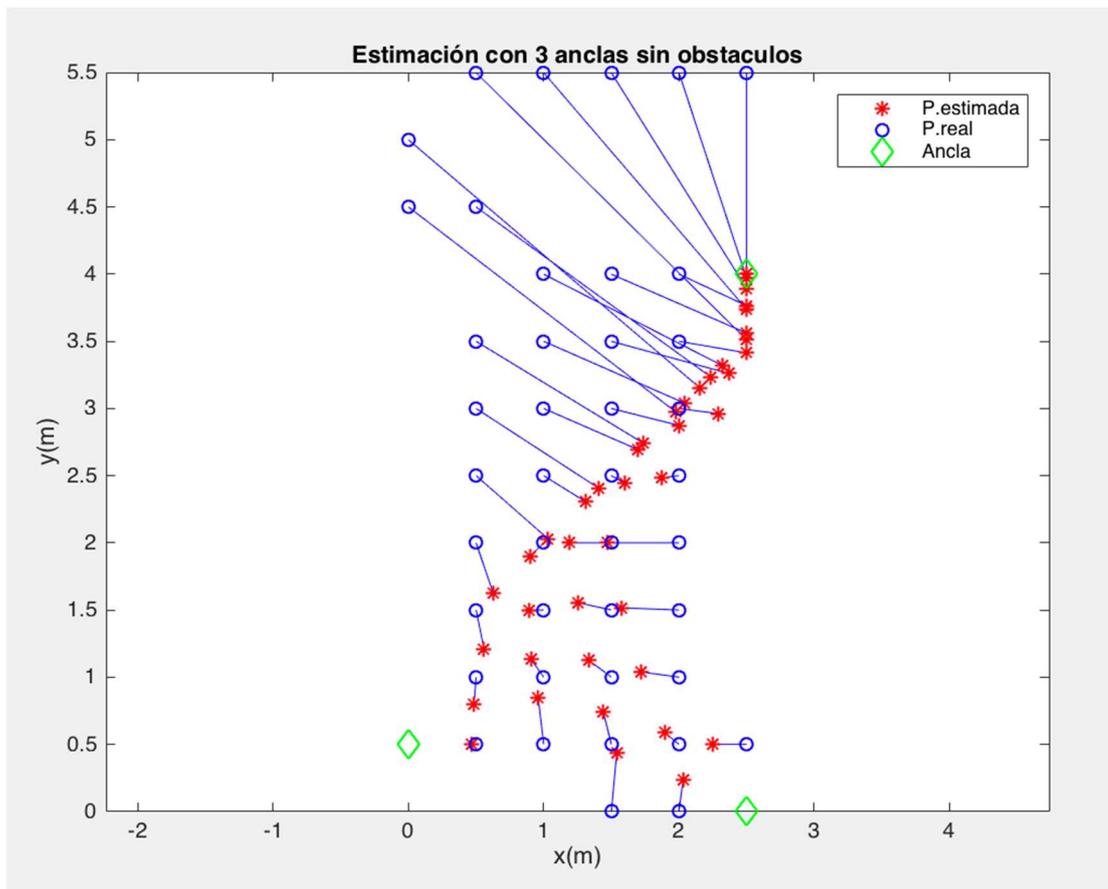


Ilustración 4-viii. Posición estimada teniendo en cuenta cuatro anclas (interiores) con medidas sin errores

4.3.4.2. Posición estimada teniendo en cuenta 4 anclas.

Ahora vamos a mostrar la mejora frente al caso anterior al añadir el ancla 3 en la posición (0m, 5.5m). Esta ancla hace que el perímetro sea mayor y se abarquen muchas más posiciones que antes estaban fuera. En este caso se mitiga en gran parte de las posiciones el efecto perímetro.

Aun así, vemos en la figura 4-ix que las posiciones situadas en $y=5.5$ siguen teniendo este efecto porque se sitúan fuera del área.

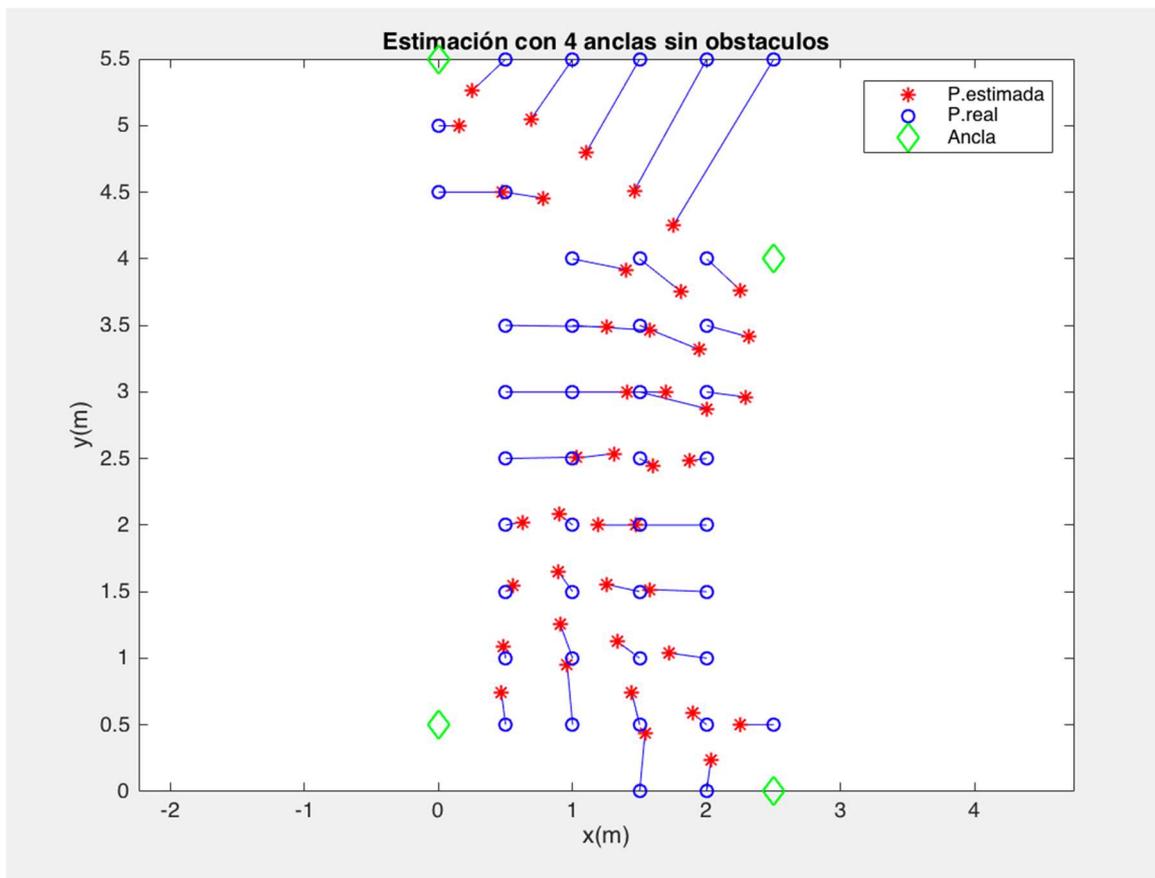


Ilustración 4-ix. Posición estimada teniendo en cuenta cuatro anclas con medidas sin errores

4.3.5. Posición estimada con medidas reales.

En este apartado vamos a estimar las posiciones teniendo en cuenta las tres anclas interiores (Ancla 1, Ancla 2 y Ancla 4) y, un segundo caso, añadiendo el ancla 3, que se encuentra en el pasillo. Esta vez, a diferencia del apartado anterior, vamos a hacerlo con medidas reales, ya que tenemos en cuenta los obstáculos y habrá errores en las medidas de distancias.

4.3.5.1. Posición estimada teniendo en cuenta 3 anclas(interiores).

Una vez ejecutamos nuestro script de Matlab, nos representará la estimación de cada una de las posiciones reales y la recta de error que une la posición estimada con la real, clasificada en cada caso según las medidas LOS y NLOS que ha obtenido desde cada posición.

Como se puede ver en la figura 4-x se obtienen unos errores fuera del perímetro similares al caso de medidas sin errores. Esto nos lleva a pensar que los grandes errores de fuera del perímetro se deben al efecto perímetro.

Podemos observar también en la misma figura que hay varias posiciones etiquetadas como “2LOS, 1NLOS”, sin embargo, algunas de ellas al estar fuera del área comprendida entre las anclas tienen un error mucho mayor que las que están dentro del área. Un ejemplo de esto son las posiciones (0.5m, 3.5m) y (1.5m, 1.5m). Las dos posiciones están etiquetadas como “2LOS, 1NLOS”. Sin embargo, la primera tiene un error de 1.44m mientras que la segunda tiene un error de 0.27m.

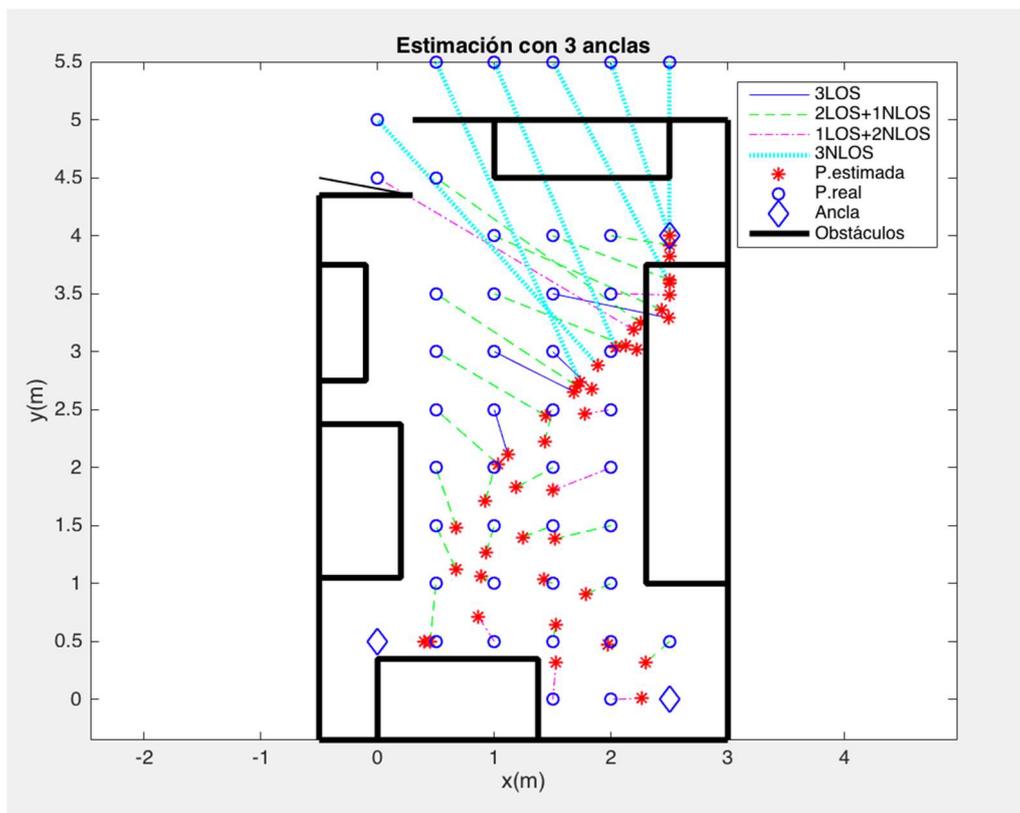


Ilustración 4-x. Posición estimada teniendo en cuenta tres anclas (interiores) con medidas reales.

4.3.5.2. Posición estimada teniendo en cuenta 4 anclas.

Ahora vamos a centrarnos en el caso de la estimación de las posiciones teniendo en cuenta las tres anclas interiores y el ancla 3.

Como podemos observar en la figura 4-xi, las posiciones obtenidas en el pasillo tienen un error considerable debido a que sólo había un ancla con visión directa y las otras tres se encontraban dentro de la habitación. Adicionalmente, observamos que hay un armario de metal, y éste va a hacer que las medidas de las anclas interiores tengan unos errores aún mayores para las posiciones situadas en $y=5.5\text{m}$. Así, en las posiciones del pasillo vamos a obtener tres medidas NLOS y sólo un ancla tiene visión directa a estas posiciones.

Además, podemos observar un gran error en la posición $(2.5\text{m}, 5.5\text{m})$. Ésto, aparte de que sólo hay una medida LOS, puede ser debido al efecto perímetro, que hemos comentado anteriormente. Este efecto también está presente en las posiciones de $y=5.5\text{m}$.

Haciendo una comparación entre casos con distinta proporción de LOS y NLOS, podemos observar que en la figura 4-xi, a mayor proporción de medidas LOS, los palitos, que representan el error entre la posición real y la estimada, tienden a ser más pequeños.

Además, también podemos destacar un caso como el de la posición $(2\text{m}, 2\text{m})$ en la cual en la figura 4-x es clasificada como un caso '1LOS+2NLOS' y en la figura 4-xi es clasificada como un caso '1LOS+3NLOS'. Sin embargo, este error tampoco empeora excesivamente al aumentar la proporción NLOS debido a que, como hemos dicho anteriormente, este algoritmo es robusto frente a las medidas NLOS y el cuadro delimitador de esa medida añadida en este caso, engobará a los demás cuadrados y no perjudicará en exceso a la estimación de la posición.

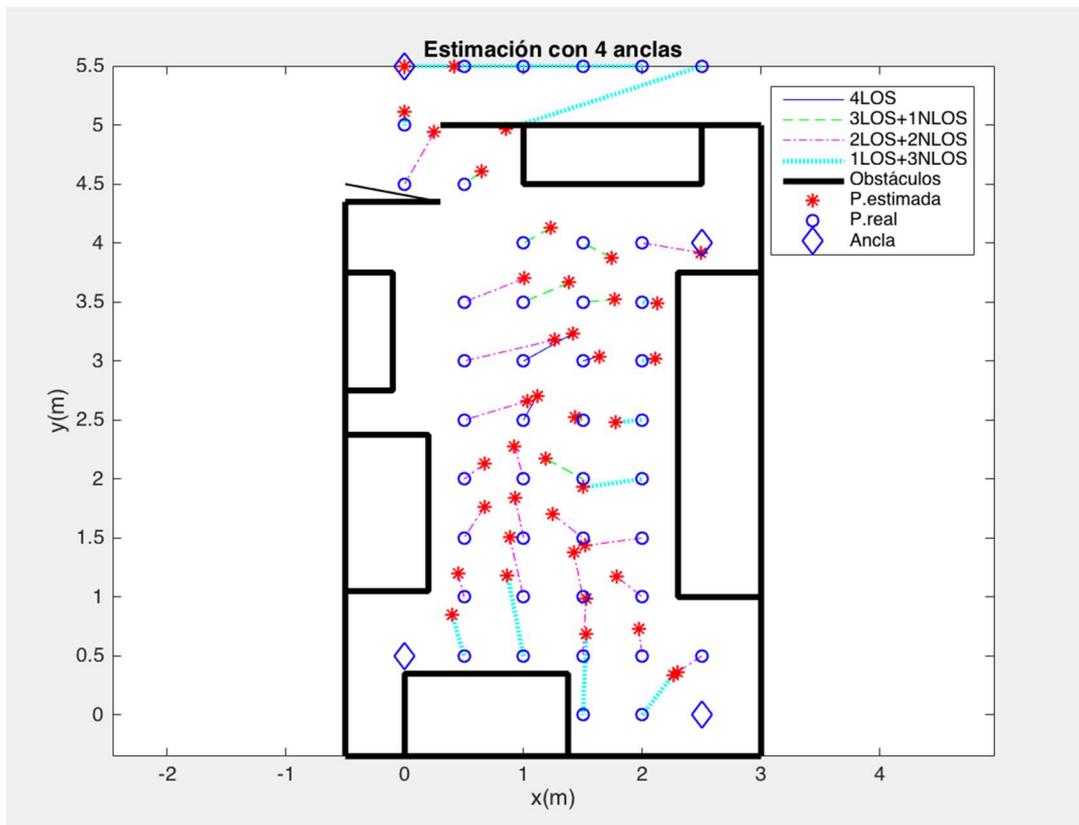


Ilustración 4-xi. Posición estimada teniendo en cuenta cuatro anclas.

4.3.6. Casos concretos.

4.3.6.1. Mitigación efecto perímetro.

A continuación vamos a representar un caso concreto en el que observaremos el efecto perímetro junto con el error de estimación debido a las medidas NLOS. Se va a representar una situación determinada en la cual estimaremos la posición (1m, 4m) para dos casos distintos.

En un primer caso, estimaremos la posición utilizando las tres anclas interiores (Ancla 1, Ancla 2 y Ancla 4). En la figura 4-xii podemos observar los cuadrados determinados por las medidas de distancia de anclas en situación LOS o NLOS respecto de la posición del nodo a localizar. Se observa en este caso, que al estar la posición real fuera del área comprendida entre las anclas, se produce el efecto perímetro. El error en este caso es relativamente grande.

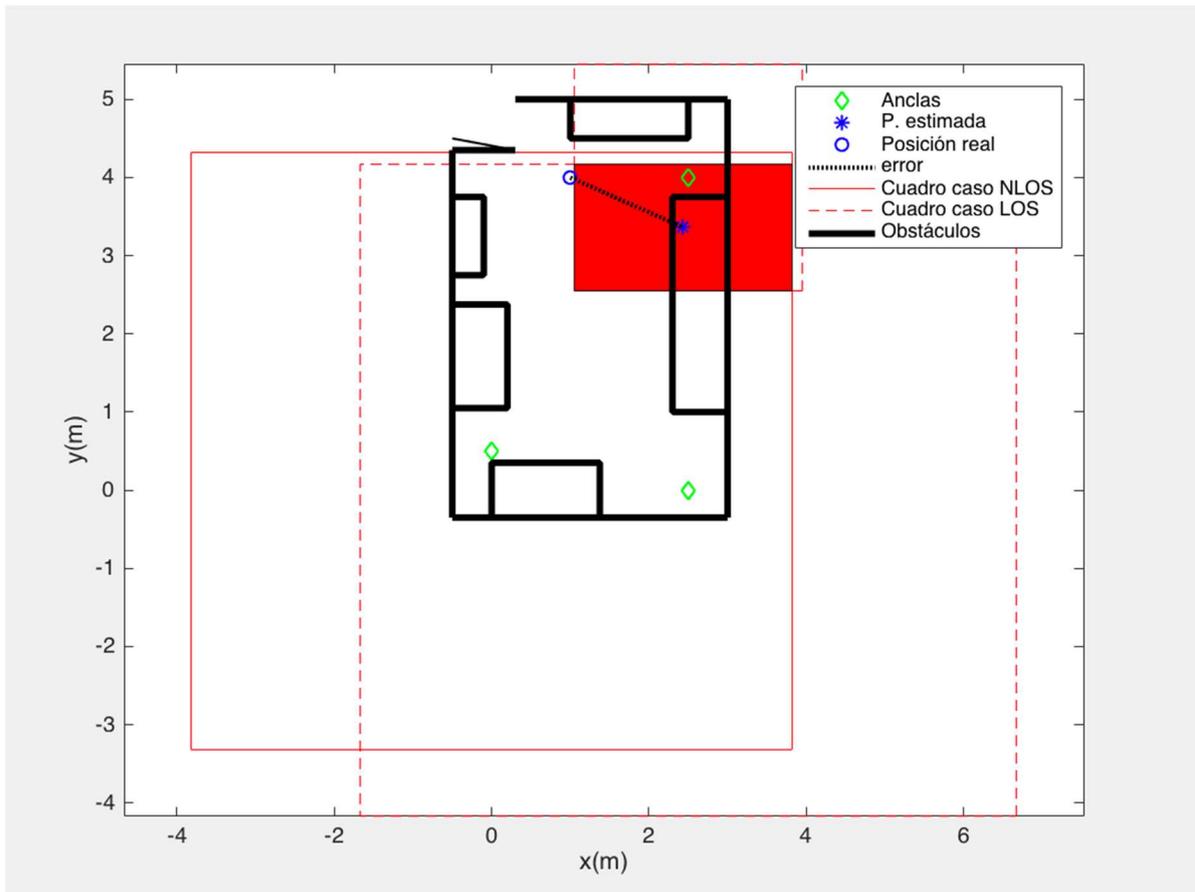


Ilustración 4-xii. Efecto perímetro con tres anclas

En este segundo caso colocamos una cuarta ancla en la posición (0m,5.5m), ampliando el área comprendida entre las anclas, como se muestra en la figura 4-xiii.

En este caso, podemos ver como el efecto perímetro se ha mitigado debido a que ahora sí se encuentra la posición real dentro del perímetro. Podemos observar en la figura 4-xiii como ahora el error es bastante más pequeño que en la figura 4-xii. Podemos concluir que el error en el caso anterior es debido prácticamente al efecto perímetro, ya que ahora al añadir la cuarta ancla el error es insignificante.

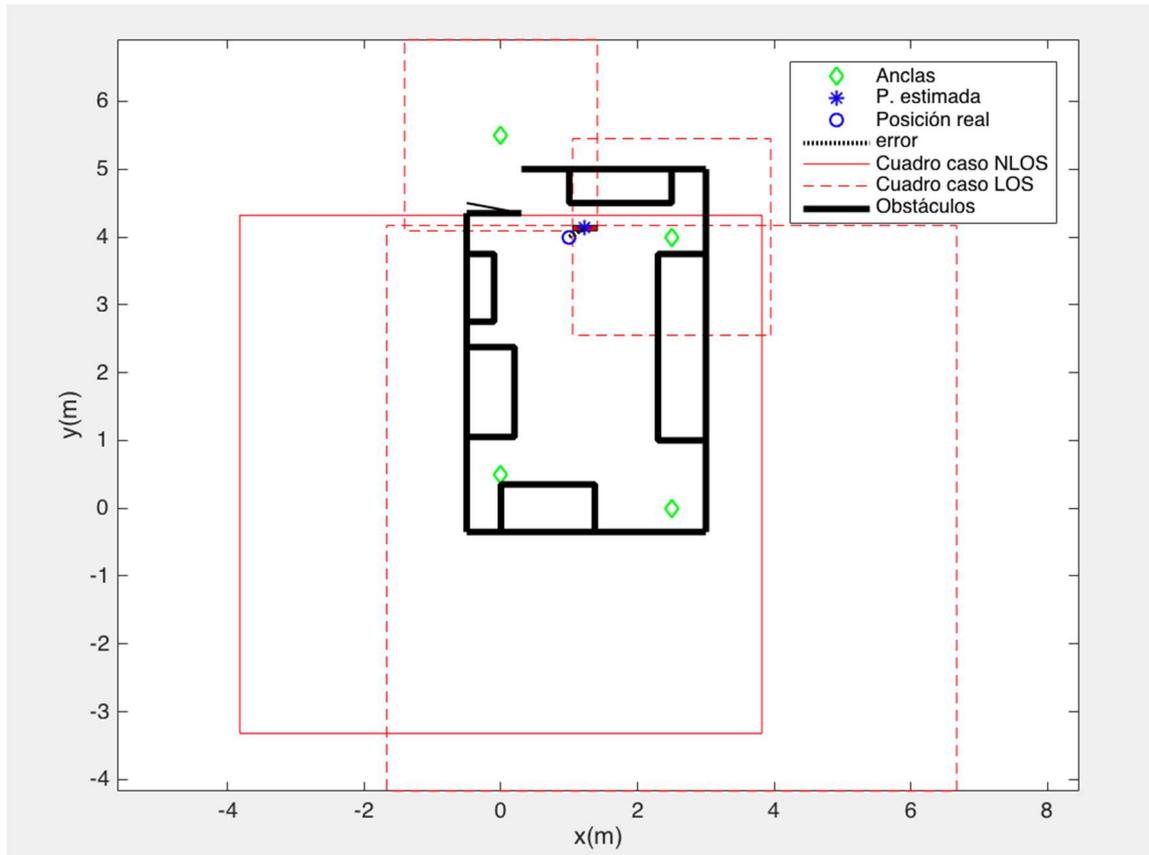


Ilustración 4-xiii. Efecto perímetro con cuatro anclas

4.3.6.2. Obstrucción total del rayo directo.

Como ya hemos comentado, este algoritmo tiene la ventaja de que si poseemos las suficientes medidas buenas, aunque tengamos una medida NLOS, el cuadrado correspondiente será grande y englobará todo el cuadrado rojo (que es la intersección de los demás cuadrados), no afectando en absoluto al resultado. Puede darse el caso de que sea una medida NLOS y se detecte el rayo directo o el caso de que sea una medida NLOS y el rayo directo quede totalmente obstruido. En este apartado ilustramos un situación en la que hemos añadido una quinta ancla NLOS en la posición (1.5m, 5.5m) y la línea directa está totalmente obstruida por una pared y un armario de metal.

En la figura 4-xiv se muestra la estimación de la posición (1.5m, 2.5m) teniendo en cuenta las anclas ‘Ancla1’, ‘Ancla 2’, Ancla 3’ y ‘Ancla 4’. Se puede apreciar en la figura que las medidas NLOS son buenas y sus cuadrados determinados por las medidas de distancias no son muy diferentes a los que tendría si fuera una medida LOS.

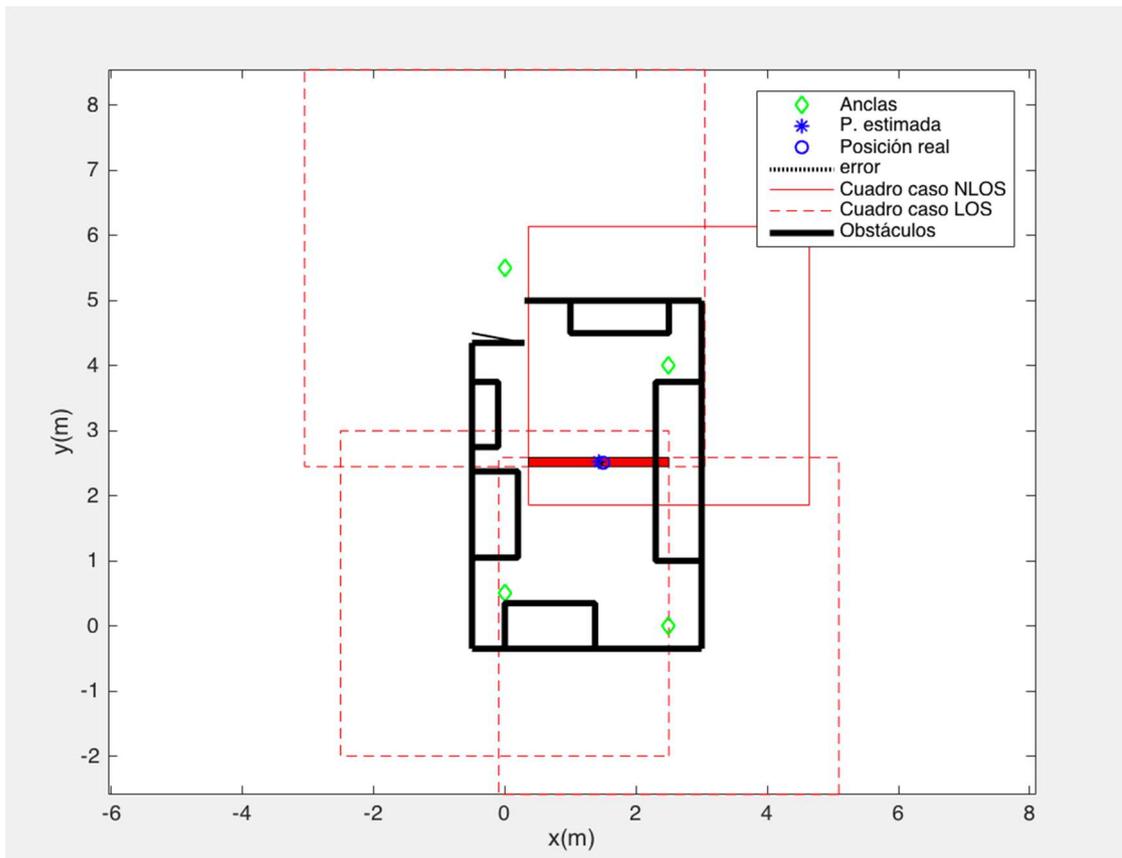


Ilustración 4-xiv. Posición estimada sin obstrucción total del rayo directo

En la figura 4-xv podemos observar la inclusión de la ancla ‘Ancla 5’ en la posición (1.5m,5.5m). Esta ancla tiene totalmente obstruída la visión directa con el TAG, que se encuentra en la posición (1.5m, 2.5m), debido al armario de metal. En estos casos, el cuadrado correspondiente será más grande de lo que correspondería a una medida buena. En este caso, el resultado de la estimación no se ve alterado por esta quinta ancla, ya que el cuadrado correspondiente engloba a la intersección de los cuadrados correspondientes a las otras cuatro anclas.

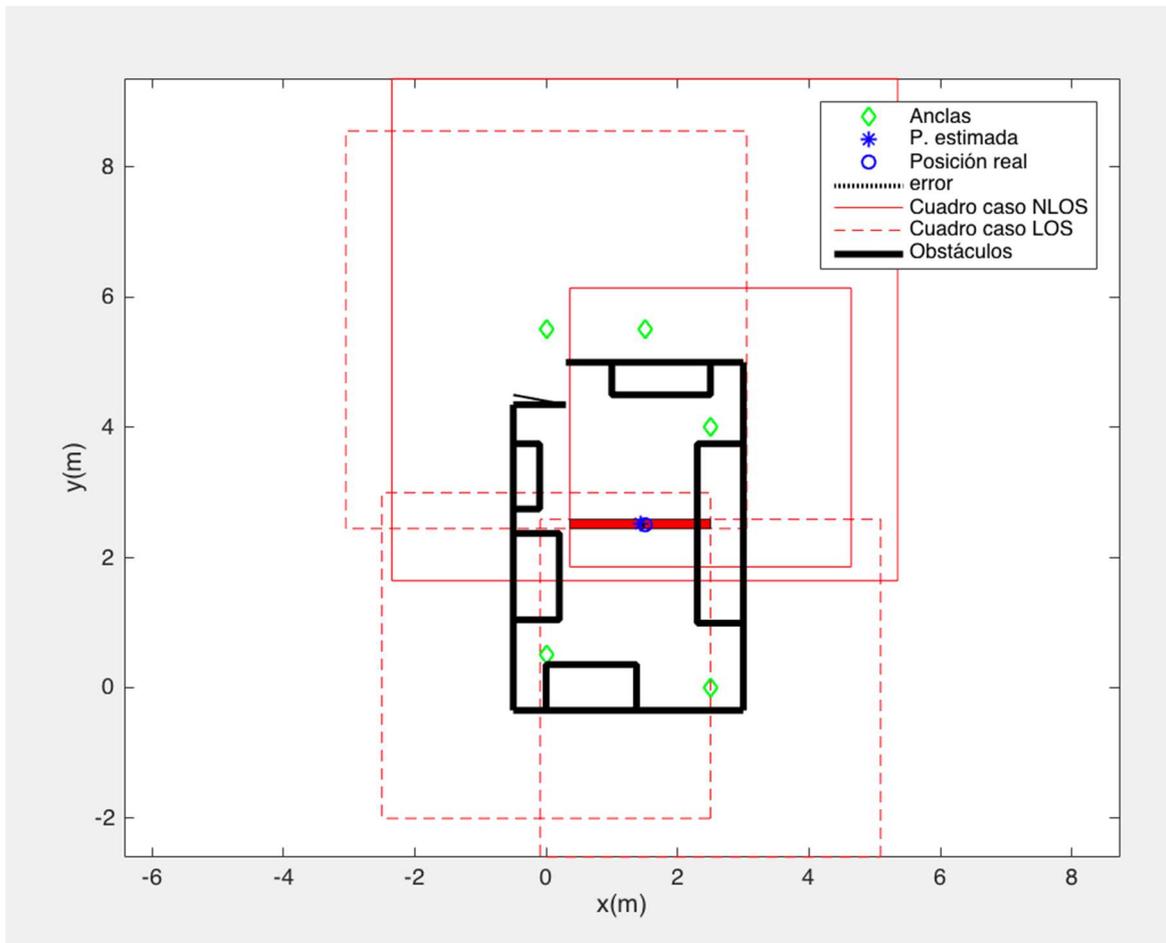


Ilustración 4-xv. Posición estimada con obstrucción del rayo directo.

4.3.7. RMSE para el error de localización.

En esta sección vamos a detallar el RMSE (*Root Mean Square Error*) para el error de localización. El RMSE se puede calcular con la siguiente expresión:

$$\text{RMSE} \approx \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\hat{d}_i - d_i)^2}$$

Ecuacion VIII. Aproximación del RMSE [6]

Realmente lo que se calcula es una aproximación al RMSE, ya que no se incluye la esperanza del error cuadrático, sino la media muestral del error cuadrático. [6]

Vamos a clasificar según los casos, por ejemplo, 3LOS, 2LOS+1NLOS, etc. Partimos de que para cada posición real y conjunto de anclas que hemos estudiado, hemos clasificado el caso, por ejemplo, 3LOS+1NLOS, etc. No se pretende atribuir a los valores resultantes una validez general, ya que el número de valores de error que se incluyen en el cálculo de la media muestral antes mencionada es pequeño, especialmente para algunos de los casos. Simplemente se ha elegido la fórmula de la aproximación del RMSE para resumir en un único valor los resultados de error de localización disponibles para cada caso. Además, para cada posición real y conjunto de anclas, hemos calculado una estimación de la posición según el algoritmo estudiado. Así, podemos calcular el error de localización, que será la diferencia entre la posición real y la estimada. Por lo tanto, vamos a representar en una tabla, que muestre para cada caso (ej. 2LOS+1NLOS), el RMSE en metros, que resume los resultados del algoritmo estudiado para el conjunto de medidas reales incluidas en este trabajo. Vamos a diferenciar dos casos. Primero vamos representar el caso con 3 anclas y seguidamente el caso estudiado con cuatro anclas. En esta situación tenemos en cuenta los obstáculos de la habitación, ya que estamos usando las medidas reales que se han tomado.

Para el caso estudiado con las tres anclas interiores (Ancla 1, Ancla 2 y Ancla 4).

CASO	RMSE
3LOS	0.71m
2LOS+1NLOS	0.82m
1LOS+2NLOS	0.91m
3NLOS	2.39m

Tabla 5. RMSE para el caso con 3 anclas

En la tabla 5 ilustramos cómo a medida que van aumentando el número de medidas NLOS y disminuyendo el número de medidas LOS, va empeorando la estimación, y con ello, aumentando el error de posicionamiento. En este caso no podemos decir que los errores en la estimación de la posición sean debidos exclusivamente a los errores en las medidas de distancia.

Vamos a representar ahora el caso estudiado con cuatro anclas. (Añadiendo el Ancla 3 al caso anterior).

CASO	RMSE
4LOS	0.32m
3LOS+1NLOS	0.28m
2LOS+2NLOS	0.43m
1LOS+3NLOS	0.87m
4NLOS	No se da tal caso en nuestro estudio

Tabla 6. RMSE para el caso con 4 anclas

En la tabla 6 podemos ver como los errores son significativamente menores que en el caso anterior. Una vez que se minimiza el efecto perímetro con una elección adecuada de la posición de las anclas, se refleja mejor el orden del error que tiene el método estudiado. Aquí también se ve reflejado que al aumentar el número de medidas NLOS y disminuir el número de medidas LOS, en general empeorará la estimación, aumentando el error de posicionamiento.

5 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este capítulo vamos a exponer las conclusiones y resultados finales de este trabajo.

Según los resultados obtenidos mediante el algoritmo utilizado en el capítulo 4, obtenemos una precisión muy buena teniendo en cuenta la baja carga computacional del algoritmo, en la situación de 4 anclas LOS y el objeto dentro del área comprendida entre las 4 anclas.

Hemos observado además casos en los que afectaba la estimación de la posición debido a que el objeto estaba fuera del área comprendida entre las anclas. Esto se ha solucionado añadiendo otra ancla para aumentar el perímetro y que ahora sí estuviese dentro, o bien cambiando de posición la ancla.

También hemos observado que dependiendo del tipo de obstáculo (visión no directa), la precisión varía notablemente.

La finalidad de este trabajo es la evaluación del comportamiento de un algoritmo para la estimación de la localización en interiores. En concreto, el método bounding-box (=min-max). Concluimos por tanto:

En cuanto a la tecnología utilizada, UWB, podemos concluir que es una tecnología muy adecuada para localización en interiores. La ventaja más destacable que hemos observado es su precisión en la medida de distancias aunque, en estos momentos, su coste de implantación es una gran desventaja de ésta.

En cuanto al método estudiado concluimos:

En los casos en los que al menos tres anclas tengan visión directa con el objeto a localizar, la estimación tiene una precisión muy buena teniendo en cuenta la baja carga computacional del algoritmo anteriormente mencionada. Hemos comprobado que si tenemos las suficientes medidas LOS, aunque luego tengamos medidas NLOS porque el rayo directo esté totalmente obstruido, el método estudiado es robusto frente a estos errores. Uno de los inconvenientes que tiene este método es el efecto perímetro, aunque esto puede arreglarse haciendo un diseño adecuado del sistema de localización eligiendo la posición de las anclas de manera que rodeen el área donde se quiere lograr la localización.

Para finalizar, consideramos que el método utilizado puede servir como base para identificar cuáles son las medidas NLOS. Además, puede utilizarse para obtener una estimación inicial robusta frente a errores NLOS, y si se necesita una mayor precisión, se puede refinar la estimación aplicando un segundo método. La idea es que si este segundo método es sensible a las medidas NLOS, se beneficiará de haber aplicado antes el método Mín-Max, que sí es robusto frente a estas medidas.

6 APÉNDICE A: TABLAS

6.1 Medidas reales

6.1.1 Ancla 1.

POSICIÓN	COORDENADAS(X,Y)	MEDIDA(M)
1	(2,0)	0.38
2	(1.5,0)	0.93
3	(2.5,0.5)	0.35
4	(2,0.5)	0.67
5	(1.5,0.5)	1.12
6	(1,0.5)	1.75
7	(0.5,0.5)	2.17
8	(2,1)	1.05
9	(1.5,1)	1.32
10	(1,1)	1.86
11	(0.5,1)	2.21
12	(2,1.5)	1.62
13	(1.5,1.5)	1.71
14	(1,1.5)	2
15	(0.5,1.5)	2.37
16	(2,2)	2
17	(1.5,2)	2.18

18	(1,2)	2.43
19	(0.5, 2)	2.76
20	(2, 2.5)	2.71
21	(1.5, 2.5)	2.59
22	(1, 2.5)	2.81
23	(0.5, 2.5)	3.11
24	(2,3)	3.29
25	(1.5,3)	3.15
26	(1,3)	3.26
27	(0.5,3)	3.51
28	(2,3.5)	3.85
29	(1.5,3.5)	3.73
30	(1,3.5)	3.70
31	(0.5,3.5)	3.91
32	(2,4)	4.21
33	(1.5,4)	4.15
34	(1,4)	4.17
35	(0.5,4.5)	4.83
36	(0,4.5)	5.22
37	(0,5)	5.3
38	(2.5,5.5)	6.2
39	(2,5.5)	7.08
40	(1.5,5.5)	6.94
41	(1,5.5)	6.11
42	(0.5,5.5)	6.07

6.1.2 Ancla 2

POSICIÓN	COORDENADAS(X,Y)	MEDIDA(M)
1	(2,0)	2.4
2	(1.5,0)	1.49
3	(2.5,0.5)	2.45
4	(2,0.5)	2.11
5	(1.5,0.5)	1.67
6	(1,0.5)	0.98
7	(0.5,0.5)	0.47
8	(2,1)	2.12
9	(1.5,1)	1.67
10	(1,1)	1.13
11	(0.5,1)	0.61
12	(2,1.5)	2.15
13	(1.5,1.5)	1.7
14	(1,1.5)	1.36
15	(0.5,1.5)	1.21
16	(2,2)	2.51
17	(1.5,2)	2.06
18	(1,2)	1.78
19	(0.5, 2)	1.61
20	(2, 2.5)	2.83
21	(1,5, 2.5)	2.5
22	(1, 2.5)	2.21
23	(0.5, 2.5)	2.2

24	(2,3)	3.19
25	(1.5,3)	2.97
26	(1,3)	2.81
27	(0.5,3)	2.69
28	(2,3.5)	3.67
29	(1.5,3.5)	3.64
30	(1,3.5)	3.36
31	(0.5,3.5)	3.05
32	(2,4)	4.32
33	(1.5,4)	3.93
34	(1,4)	3.82
35	(0.5,4.5)	4.01
36	(0,4.5)	4.28
37	(0,5)	4.44
38	(2.5,5.5)	6.18
39	(2,5.5)	7.14
40	(1.5,5.5)	6.24
41	(1,5.5)	5.37
42	(0.5,5.5)	5.15

6.1.3 Ancla 3

POSICIÓN	COORDENADAS(X,Y)	MEDIDA(M)
1	(2,0)	5,2
2	(1.5,0)	5,05
3	(2.5,0.5)	5,12
4	(2,0.5)	4,71
5	(1.5,0.5)	4,65
6	(1,0.5)	4,61
7	(0.5,0.5)	4,77
8	(2,1)	4,21
9	(1.5,1)	4,07
10	(1,1)	4,12
11	(0.5,1)	4,22
12	(2,1.5)	4,25
13	(1.5,1.5)	3,81
14	(1,1.5)	3,68
15	(0.5,1.5)	3,69
16	(2,2)	3,64
17	(1.5,2)	3,34
18	(1,2)	3,22
19	(0.5, 2)	3,35
20	(2, 2.5)	3,25
21	(1.5, 2.5)	3,05
22	(1, 2.5)	2,80
23	(0.5, 2.5)	2,88

24	(2,3)	2,97
25	(1,5,3)	2,57
26	(1,3)	2,29
27	(0,5,3)	2,33
28	(2,3,5)	2,62
29	(1,5,3,5)	2,19
30	(1,3,5)	1,87
31	(0,5,3,5)	1,65
32	(2,4)	2,85
33	(1,5,4)	1,90
34	(1,4)	1,41
35	(0,5,4,5)	0,80
36	(0,4,5)	0,40
37	(0,5)	0,22
38	(2,5,5,5)	1,77
39	(2,5,5)	1,26
40	(1,5,5,5)	0,73
41	(1,5,5)	0,23
42	(0,5,5,5)	0,11

6.1.4 Ancla 4

POSICIÓN	COORDENADAS(X,Y)	MEDIDA(M)
1	(2,0)	4,36
2	(1.5,0)	4,29
3	(2.5,0.5)	3,71
4	(2,0.5)	3,73
5	(1.5,0.5)	3,84
6	(1,0.5)	4,06
7	(0.5,0.5)	4,31
8	(2,1)	3,23
9	(1.5,1)	3,25
10	(1,1)	3,50
11	(0.5,1)	4,18
12	(2,1.5)	2,85
13	(1.5,1.5)	2,91
14	(1,1.5)	3,32
15	(0.5,1.5)	3,46
16	(2,2)	2,39
17	(1.5,2)	2,52
18	(1,2)	2,85
19	(0.5, 2)	3,14
20	(2, 2.5)	1,78
21	(1.5, 2.5)	2,14
22	(1, 2.5)	2,48
23	(0.5, 2.5)	2,64
24	(2,3)	1,25

25	(1.5,3)	1,80
26	(1,3)	1,95
27	(0.5,3)	2,30
28	(2,3.5)	0,87
29	(1.5,3.5)	1,15
30	(1,3.5)	1,60
31	(0.5,3.5)	2,14
32	(2,4)	0,37
33	(1.5,4)	0,91
34	(1,4)	1,45
35	(0.5,4.5)	2,01
36	(0,4.5)	2,40
37	(0,5)	3,17
38	(2.5,5.5)	2,56
39	(2,5.5)	2,93
40	(1.5,5.5)	3,55
41	(1,5.5)	3,79
42	(0.5,5.5)	4,18

6.2 Clasificación

6.2.1 Ancla 1

POSICIÓN	COORDENADAS(X,Y)	LOS(0)/NLOS(1)
1	(2,0)	0
2	(1.5,0)	0
3	(2.5,0.5)	0
4	(2,0.5)	0
5	(1.5,0.5)	0
6	(1,0.5)	1
7	(0.5,0.5)	1
8	(2,1)	0
9	(1.5,1)	0
10	(1,1)	0
11	(0.5,1)	0
12	(2,1.5)	0
13	(1.5,1.5)	0
14	(1,1.5)	0
15	(0.5,1.5)	0
16	(2,2)	1
17	(1.5,2)	0
18	(1,2)	0
19	(0.5, 2)	0
20	(2, 2.5)	1
21	(1.5, 2.5)	0
22	(1, 2.5)	0

23	(0.5, 2.5)	0
24	(2,3)	1
25	(1.5,3)	0
26	(1,3)	0
27	(0.5,3)	0
28	(2,3.5)	1
29	(1.5,3.5)	0
30	(1,3.5)	0
31	(0.5,3.5)	0
32	(2,4)	1
33	(1.5,4)	0
34	(1,4)	0
35	(0.5,4.5)	0
36	(0,4.5)	1
37	(0,5)	1
38	(2.5,5.5)	1
39	(2,5.5)	1
40	(1.5,5.5)	1
41	(1,5.5)	1
42	(0.5,5.5)	1

6.2.2 Ancla 2

POSICIÓN	COORDENADAS(X,Y)	LOS(0)/NLOS(1)
1	(2,0)	1
2	(1.5,0)	1
3	(2.5,0.5)	0
4	(2,0.5)	0
5	(1.5,0.5)	0
6	(1,0.5)	0
7	(0.5,0.5)	0
8	(2,1)	0
9	(1.5,1)	0
10	(1,1)	0
11	(0.5,1)	0
12	(2,1.5)	0
13	(1.5,1.5)	0
14	(1,1.5)	0
15	(0.5,1.5)	1
16	(2,2)	0
17	(1.5,2)	0
18	(1,2)	0
19	(0.5, 2)	1
20	(2, 2.5)	0
21	(1.5, 2.5)	0
22	(1, 2.5)	0
23	(0.5, 2.5)	1
24	(2,3)	0

25	(1.5,3)	0
26	(1,3)	0
27	(0.5,3)	1
28	(2,3.5)	0
29	(1.5,3.5)	0
30	(1,3.5)	1
31	(0.5,3.5)	1
32	(2,4)	0
33	(1.5,4)	1
34	(1,4)	1
35	(0.5,4.5)	1
36	(0,4.5)	1
37	(0,5)	1
38	(2.5,5.5)	1
39	(2,5.5)	1
40	(1.5,5.5)	1
41	(1,5.5)	1
42	(0.5,5.5)	1

6.2.3 Ancla 3

POSICIÓN	COORDENADAS(X,Y)	LOS(0)/NLOS(1)
1	(2,0)	1
2	(1.5,0)	1
3	(2.5,0.5)	1
4	(2,0.5)	1
5	(1.5,0.5)	1
6	(1,0.5)	1
7	(0.5,0.5)	1
8	(2,1)	1
9	(1.5,1)	1
10	(1,1)	1
11	(0.5,1)	1
12	(2,1.5)	1
13	(1.5,1.5)	1
14	(1,1.5)	1
15	(0.5,1.5)	1
16	(2,2)	1
17	(1.5,2)	0
18	(1,2)	1
19	(0.5, 2)	1
20	(2, 2.5)	1
21	(1,5, 2.5)	0
22	(1, 2.5)	0
23	(0.5, 2.5)	1

24	(2,3)	1
25	(1.5,3)	0
26	(1,3)	0
27	(0.5,3)	1
28	(2,3.5)	1
29	(1.5,3.5)	1
30	(1,3.5)	0
31	(0.5,3.5)	1
32	(2,4)	1
33	(1.5,4)	0
34	(1,4)	0
35	(0.5,4.5)	0
36	(0,4.5)	0
37	(0,5)	0
38	(2.5,5.5)	0
39	(2,5.5)	0
40	(1.5,5.5)	0
41	(1,5.5)	0
42	(0.5,5.5)	0

6.2.4 Ancla 4

POSICIÓN	COORDENADAS(X,Y)	LOS(0)/NLOS(1)
1	(2,0)	1
2	(1.5,0)	1
3	(2.5,0.5)	1
4	(2,0.5)	1
5	(1.5,0.5)	1
6	(1,0.5)	1
7	(0.5,0.5)	1
8	(2,1)	1
9	(1.5,1)	1
10	(1,1)	1
11	(0.5,1)	1
12	(2,1.5)	1
13	(1.5,1.5)	1
14	(1,1.5)	1
15	(0.5,1.5)	0
16	(2,2)	1
17	(1.5,2)	1
18	(1,2)	1
19	(0.5, 2)	0
20	(2, 2.5)	1
21	(1,5, 2.5)	1
22	(1, 2.5)	0
23	(0.5, 2.5)	0

24	(2,3)	1
25	(1.5,3)	0
26	(1,3)	0
27	(0.5,3)	0
28	(2,3.5)	1
29	(1.5,3.5)	0
30	(1,3.5)	0
31	(0.5,3.5)	0
32	(2,4)	0
33	(1.5,4)	0
34	(1,4)	0
35	(0.5,4.5)	0
36	(0,4.5)	0
37	(0,5)	1
38	(2.5,5.5)	1
39	(2,5.5)	1
40	(1.5,5.5)	1
41	(1,5.5)	1
42	(0.5,5.5)	1

7 APÉNDICE B: FICHEROS DE MATLAB

7.1 Anclas.m

```
%Este script muestra la localización de las anclas.
load inicial.mat

posancla1=[2.5 0];
posancla2=[0 0.5];
posancla3=[0 5.5];
posancla4=[2.5 4];
posancla5=[1.5 5.5];

x_1=plot(posancla1(1),posancla1(2),'db','MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla2(1),posancla2(2),'db','MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla3(1),posancla3(2),'db','MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla4(1),posancla4(2),'db','MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla5(1),posancla5(2),'db','MarkerSize',10);
plot([0 0 1.375 1.375],[-0.35 0.35 0.35 -0.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([3 2.3 2.3 3],[1 1 3.75 3.75] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([2.5 2.5 1 1],[5 4.5 4.5 5] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.2 0.2 -0.5],[1.05 1.05 2.375 2.375] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.5 4.35] ,'-k','LineWidth',1);
hold on
plot([-0.5 3],[-0.35 -0.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([3 3],[-0.35 5] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 -0.10 -0.10 -0.5],[2.75 2.75 3.75 3.75] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([3 0.30],[5 5] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
a=plot([-0.5 -0.5],[-0.35 4.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.35 4.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
```

```
xlabel('x(m)')
grid on
ylabel('y(m)')
title('Posición de las anclas');
lgd=legend([x_1,a], 'anclas', 'Línea de obstáculos');

axis equal
```

7.2 habitacion.m

```
%Este script muestra los obstáculos y el plano de la habitación.
load inicial.mat

x_1=plot(ejexreal*0.5,ejeyreal*0.5,'ob');
hold on
plot([0 0 1.375 1.375],[-0.35 0.35 0.35 -0.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([3 2.3 2.3 3],[1 1 3.75 3.75] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([2.5 2.5 1 1],[5 4.5 4.5 5] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.2 0.2 -0.5],[1.05 1.05 2.375 2.375] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.5 4.35] ,'-k','LineWidth',1);
hold on
plot([-0.5 3],[-0.35 -0.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([3 3],[-0.35 5] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 -0.10 -0.10 -0.5],[2.75 2.75 3.75 3.75] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([3 0.30],[5 5] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
a=plot([-0.5 -0.5],[-0.35 4.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.35 4.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on

xlabel('x(m)')

ylabel('y(m)')
title('Habitación');
lgd=legend([x_1,a], 'posición real', 'línea de obstaculos');

axis equal;
```

7.3 estimacion.m

```
%Esta función realiza el algoritmo de localización aportando el vector con
%las medidas de las diferentes anclas al objeto y la posición de éstas y
%devuelve una estimación de la localización del objeto.
function [x_est,y_est]= estimacion(vector,pos)
```

```

%vector sera un vector con las distancias desde los anclas al movil
n=length(vector);%nos devuelve el numero de anclas

figure(1)

for i=1:n
    x=[pos((2*i)-1)+vector(i) pos((2*i)-1)+vector(i) pos((2*i)-1)-vector(i)
    pos((2*i)-1)-vector(i) pos((2*i)-1)+vector(i)];
    y=[pos(2*i)-vector(i) pos(2*i)+vector(i) pos(2*i)+vector(i) pos(2*i)-
    vector(i) pos(2*i)-vector(i)];

    plot(x,y,'r');
hold on,

end

sub1x=[];
sub2y=[];
sub3x=[];
sub4y=[];

for i=1:n
    sub1x=[sub1x pos((2*i)-1)-vector(i)];
end
    sub1x_max=max(sub1x);
for i=1:n
    sub2y=[sub2y pos(2*i)-vector(i)];
end
    sub2y_max=max(sub2y);
for i=1:n
    sub3x=[sub3x pos((2*i)-1)+vector(i)];
end
    sub3x_min=min(sub3x);
for i=1:n
    sub4y=[sub4y pos(2*i)+vector(i)];
end
    sub4y_min=min(sub4y);

x_end=[sub3x_min sub3x_min sub1x_max sub1x_max sub3x_min];
y_end=[sub2y_max sub4y_min sub4y_min sub2y_max sub2y_max];

patch(x_end,y_end,'r');

x_est= sub3x_min-((sub3x_min-sub1x_max)/2);
y_est=sub2y_max+((sub4y_min-sub2y_max)/2);

for i=1:n
x_1=plot(pos((2*i)-1),pos(2*i),'dg');

end

x_2=plot(x_est,y_est,'*b');
xlabel('x(m)');
ylabel('y(m)');
lgd=legend([x_1, x_2], 'Anclas', 'P. estimada')
axis equal;
hold off,

```

```
end
```

7.4 estimacionpos.m

```
%Realiza la estimación de una posición concreta y dibujando la clasificación  
de la medida si es LOS o NLOS.
```

```
function [x_est,y_est]= estimacionpos(vector,pos,flagnlos,posreal)
```

```
load inicial.mat
```

```
load inicialLOS.mat
```

```
%vector sera un vector con las distancias desde los anclas al movil
```

```
n=length(vector);%nos devuelve el numero de anclas
```

```
figure(1)
```

```
for i=1:n
```

```
    x=[pos((2*i)-1)+vector(i) pos((2*i)-1)+vector(i) pos((2*i)-1)-vector(i)
```

```
    pos((2*i)-1)-vector(i) pos((2*i)-1)+vector(i)];
```

```
    y=[pos(2*i)-vector(i) pos(2*i)+vector(i) pos(2*i)+vector(i) pos(2*i)-
```

```
    vector(i) pos(2*i)-vector(i)];
```

```
    if(flagnlos(i)==1)
```

```
        x_3=plot(x,y,'r');
```

```
    end
```

```
    if(flagnlos(i)==0)
```

```
        x_4=plot(x,y,'--r');
```

```
    end
```

```
hold on,
```

```
end
```

```
sub1x=[];
```

```
sub2y=[];
```

```
sub3x=[];
```

```
sub4y=[];
```

```
for i=1:n
```

```
    sub1x=[sub1x pos((2*i)-1)-vector(i)];
```

```
end
```

```
    sub1x_max=max(sub1x);
```

```
for i=1:n
```

```
    sub2y=[sub2y pos(2*i)-vector(i)];
```

```
end
```

```
    sub2y_max=max(sub2y);
```

```
for i=1:n
```

```
    sub3x=[sub3x pos((2*i)-1)+vector(i)];
```

```
end
```

```
    sub3x_min=min(sub3x);
```

```
for i=1:n
```

```
    sub4y=[sub4y pos(2*i)+vector(i)];
```

```
end
```

```
    sub4y_min=min(sub4y);
```

```

x_end=[sub3x_min sub3x_min sub1x_max sub1x_max sub3x_min];
y_end=[sub2y_max sub4y_min sub4y_min sub2y_max sub2y_max];

patch(x_end,y_end,'r');

x_est= sub3x_min-((sub3x_min-sub1x_max)/2);
y_est=sub2y_max+((sub4y_min-sub2y_max)/2);

for i=1:n
x_1=plot(pos((2*i)-1),pos(2*i),'dg');

end

x_2=plot(x_est,y_est,'*b');
x_5=plot(ejexreal(posreal)*0.5,ejeyreal(posreal)*0.5,'ob');
x_6=plot([ejexreal(posreal)*0.5 x_est],[ejeyreal(posreal)*0.5
y_est],':k','LineWidth',2);
hold on
plot([0 0 1.375 1.375],[-0.35 0.35 0.35 -0.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([3 2.3 2.3 3],[1 1 3.75 3.75] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([2.5 2.5 1 1],[5 4.5 4.5 5] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.2 0.2 -0.5],[1.05 1.05 2.375 2.375] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.5 4.35] ,'-k','LineWidth',1);
hold on
plot([-0.5 3],[-0.35 -0.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([3 3],[-0.35 5] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 -0.10 -0.10 -0.5],[2.75 2.75 3.75 3.75] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([3 0.30],[5 5] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
a=plot([-0.5 -0.5],[-0.35 4.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.35 4.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on

axis equal;
xlabel('x(m)');
ylabel('y(m)');
lgd=legend([x_1, x_2,x_5,x_6,x_3, x_4,a], 'Anclas', 'P. estimada', 'Posición
real', 'error', 'Cuadro caso NLOS', 'Cuadro caso LOS', 'Obstáculos')

hold off,

end

```



```

Ancla4(i)], [posancla1 posancla2 posancla3 posancla4]);

    end

for i=1:121

    a=plot([xest(i) ejexrealper(i)], [yest(i) ejeyrealper(i)] , 'k');
    hold on

    end

for i=1:121

    b=plot(xest(i), yest(i), '*r');
    hold on
end

for i=1:121

    c=plot(ejexrealper(i), ejeyrealper(i), 'ob');
    hold on
end

x_1=plot(posancla1(1), posancla1(2), 'dg', 'MarkerSize', 10);
hold on
plot(posancla2(1), posancla2(2), 'dg', 'MarkerSize', 10);
hold on
plot(posancla3(1), posancla3(2), 'dg', 'MarkerSize', 10);
hold on
plot(posancla4(1), posancla4(2), 'dg', 'MarkerSize', 10);
hold on
    plot(ejexrealper, ejeyrealper, 'ob');
    hold on
lgd=legend([a,b,c,x_1], 'Error', 'Posicion estimada', 'P.real', 'Ancla');

xlabel('x(m)')
grid on
ylabel('y(m)')

axis equal

```

7.6 caso3sinobs.m

```

%caso 3 anclas sin obstáculos, con medidas perfectas
load inicial.mat

npos=42;
xest=[];
yest=[];
posancla1=[2.5 0];
posancla2=[0 0.5];

posancla4=[2.5 4];

```

```

%Con anclas 1, 2, 3 y 4
% 4 casos:
% 1:4LOS
% 2:3LOS+1NLOS
% 3:2LOS+2NLOS
% 4:1LOS+3NLOS
% 5:4NLOS

for i=1:42

    Ancla1(i)=sqrt((abs((ejexreal(i)*0.5)-
posancla1(1))^2)+(abs((ejeyreal(i)*0.5)-posancla1(2))^2));
end

for i=1:42

    Ancla2(i)=sqrt((abs((ejexreal(i)*0.5)-
posancla2(1))^2)+(abs((ejeyreal(i)*0.5)-posancla2(2))^2));
end

for i=1:42

    Ancla4(i)=sqrt((abs((ejexreal(i)*0.5)-
posancla4(1))^2)+(abs((ejeyreal(i)*0.5)-posancla4(2))^2));
end

figure(1)

for i=1:npos
    [xest(i),yest(i)]=estimacion([Ancla1(i) Ancla2(i) Ancla4(i)], [posancla1
posancla2 posancla4]);
end

for i=1:npos
    plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5] , 'b'); %Caso 1:
4LOS
    hold on

end

a=plot(xest,yest, '*r');
hold on
b=plot(ejexreal*0.5,ejeyreal*0.5, 'ob');
hold on
c=plot(posancla1(1),posancla1(2), 'dg', 'MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla2(1),posancla2(2), 'dg', 'MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla4(1),posancla4(2), 'dg', 'MarkerSize',10);

```

```

hold on

lgd=legend([a,b,c], 'P.estimada', 'P.real', 'Ancla');
axis equal
xlabel('x(m)');
ylabel('y(m)');
title('Estimación con 3 anclas sin obstaculos');
hold off

```

7.7 caso4sinobs.m

```

%caso 4 anclas sin obtáculos, con medidas perfectas
load inicial.mat

npos=42;
xest=[];
yest=[];
posancla1=[2.5 0];
posancla2=[0 0.5];
posancla3=[0 5.5];
posancla4=[2.5 4];

%Con anclas 1, 2, 3 y 4
% 4 casos:
% 1:4LOS
% 2:3LOS+1NLOS
% 3:2LOS+2NLOS
% 4:1LOS+3NLOS
% 5:4NLOS

for i=1:42

    Ancla1(i)=sqrt((abs((ejexreal(i)*0.5)-
posancla1(1))^2)+(abs((ejeyreal(i)*0.5)-posancla1(2))^2));
end

for i=1:42

    Ancla2(i)=sqrt((abs((ejexreal(i)*0.5)-
posancla2(1))^2)+(abs((ejeyreal(i)*0.5)-posancla2(2))^2));
end

for i=1:42

    Ancla3(i)=sqrt((abs((ejexreal(i)*0.5)-
posancla3(1))^2)+(abs((ejeyreal(i)*0.5)-posancla3(2))^2));
end
for i=1:42

```

```

        Ancla4(i)=sqrt((abs((ejexreal(i)*0.5)-
posancla4(1))^2)+(abs((ejeyreal(i)*0.5)-posancla4(2))^2));
end

figure(1)

for i=1:npos
    [xest(i),yest(i)]=estimacion([Ancla1(i) Ancla2(i) Ancla3(i)
Ancla4(i)],[posancla1 posancla2 posancla3 posancla4]);
end

for i=1:npos
    plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5] , 'b'); %Caso 1:
4LOS
    hold on
end

a=plot(xest,yest,'*r');
hold on
b=plot(ejexreal*0.5,ejeyreal*0.5,'ob');
hold on
c=plot(posancla1(1),posancla1(2),'dg','MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla2(1),posancla2(2),'dg','MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla3(1),posancla3(2),'dg','MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla4(1),posancla4(2),'dg','MarkerSize',10);
hold on

lgd=legend([a,b,c], 'P.estimada', 'P.real', 'Ancla');
axis equal
xlabel('x(m)');
ylabel('y(m)');
title('Estimación con 4 anclas sin obstaculos');
hold off

```

7.8 caso3.m

```

% caso 3 anclas con obstáculos, con medidas reales
load inicial.mat
load inicialLOS.mat

npos=42;
xest=[];
yest=[];
posancla1=[2.5 0];
posancla2=[0 0.5];
posancla4=[2.5 4];

```

```

figure(1)

for i=1:npos
    [xest(i),yest(i)]=estimacion([Ancla1(i) Ancla2(i) Ancla4(i)], [posancla1
posancla2 posancla4]);
end

for i=1:npos
    if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla4LOS(i))==0)
        x_2=plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5] , 'b'); %Caso
1: 3LOS
        hold on
        end
        if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla4LOS(i))==1)
            y_2=plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5] , '--g');
%Caso 1: 2LOS+1NLOS
            hold on
            end
            if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla4LOS(i))==2)
                z_2=plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5] , '-.m');
%Caso 1: 1LOS+2NLOS
                hold on
                end
                if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla4LOS(i))==3)
                    a_2=plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5]
, 'c', 'LineWidth',2); %Caso 1: 3NLOS
                    hold on
                    end
                end
            end

c_1=plot(xest,yest, '*r');
hold on
d_1=plot(ejexreal*0.5,ejeyreal*0.5, 'ob');
hold on
e_1=plot(posancla1(1),posancla1(2), 'db', 'MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla2(1),posancla2(2), 'db', 'MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla4(1),posancla4(2), 'db', 'MarkerSize',10);
hold on
plot([0 0 1.375 1.375],[-0.35 0.35 0.35 -0.35] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([3 2.3 2.3 3],[1 1 3.75 3.75] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([2.5 2.5 1 1],[5 4.5 4.5 5] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.2 0.2 -0.5],[1.05 1.05 2.375 2.375] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.5 4.35] , '-k', 'LineWidth',1);
hold on
plot([-0.5 3],[-0.35 -0.35] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([3 3],[-0.35 5] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 -0.10 -0.10 -0.5],[2.75 2.75 3.75 3.75] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([3 0.30],[5 5] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
a=plot([-0.5 -0.5],[-0.35 4.35] , '-k', 'LineWidth',3);

```

```
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.35 4.35] ,'-k','LineWidth',3);
hold on

lgd=legend([y_2,z_2,a_2,c_1,d_1,e_1,a], '2LOS+1NLOS', '1LOS+2NLOS', '3NLOS', 'P.e
stimada', 'P.real', 'Ancla', 'Obstáculos');
axis equal
xlabel('x(m)');
ylabel('y(m)');
title('Estimación con 3 anclas');
hold off
```

7.9 caso4.m

```
% caso 4 anclas con obstáculos

load inicial.mat
load inicialLOS.mat

npos=42;
xest=[];
yest=[];
posancla1=[2.5 0];
posancla2=[0 0.5];
posancla3=[0 5.5];
posancla4=[2.5 4];

%Con anclas 1, 2, 3 y 4
% 4 casos:
% 1:4LOS
% 2:3LOS+1NLOS
% 3:2LOS+2NLOS
% 4:1LOS+3NLOS
% 5:4NLOS

figure(1)

for i=1:npos
    [xest(i),yest(i)]=estimacion([Ancla1(i) Ancla2(i) Ancla3(i)
Ancla4(i)], [posancla1 posancla2 posancla3 posancla4]);
end

for i=1:npos
    if ((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==0)
        plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5] , 'b'); %Caso 1:
4LOS
        hold on
    end
    if ((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==1)
        y_1=plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5] , '--g');
    %Caso 2: 3LOS+1NLOS
    hold on
```

```

end
if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==2)
z_1=plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5] , '-.m' );
%Caso 3: 2LOS+2NLOS
hold on
end
if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==3)
a_1=plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5]
, ':c', 'LineWidth',2); %Caso 4: 1LOS+3NLOS
hold on
end
if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==4)
b_1=plot([xest(i) ejexreal(i)*0.5],[yest(i) ejeyreal(i)*0.5] , '-k' );
%Caso 5: 4NLOS
hold on
end

end

c_1=plot(xest,yest, '*r');
hold on
d_1=plot(ejexreal*0.5,ejeyreal*0.5, 'ob');
hold on
e_1=plot(posancla1(1),posancla1(2), 'db', 'MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla2(1),posancla2(2), 'db', 'MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla3(1),posancla3(2), 'db', 'MarkerSize',10);
hold on
plot(posancla4(1),posancla4(2), 'db', 'MarkerSize',10);
plot([0 0 1.375 1.375],[ -0.35 0.35 0.35 -0.35] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([3 2.3 2.3 3],[1 1 3.75 3.75] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([2.5 2.5 1 1],[5 4.5 4.5 5] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.2 0.2 -0.5],[1.05 1.05 2.375 2.375] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.5 4.35] , '-k', 'LineWidth',1);
hold on
plot([-0.5 3],[ -0.35 -0.35] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([3 3],[ -0.35 5] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 -0.10 -0.10 -0.5],[2.75 2.75 3.75 3.75] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([3 0.30],[5 5] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
a=plot([-0.5 -0.5],[ -0.35 4.35] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on
plot([-0.5 0.30],[4.35 4.35] , '-k', 'LineWidth',3);
hold on,

lgd=legend([y_1,z_1,a_1,a,c_1,d_1,e_1], '3LOS+1NLOS', '2LOS+2NLOS', '1LOS+3NLOS'
, 'Obstáculos', 'P.estimada', 'P.real', 'Ancla');
axis equal
xlabel('x (m) ');
ylabel('y (m) ');

```

```
title('Estimación con 4 anclas');  
hold off
```

7.10 rmsecaso3.m

%script que sirve para calcular el rmse en el caso de 3 anclas

```
load inicial.mat  
load inicialLOS.mat
```

```
npos=42;  
j=0;  
k=0;  
l=0;  
m=0;  
caso3error1=0;  
caso3error2=0;  
caso3error3=0;  
caso3error4=0;
```

```
xest=[];  
yest=[];  
posancla1=[2.5 0];  
posancla2=[0 0.5];  
posancla4=[2.5 4];
```

```
for i=1:npos  
    [xest(i),yest(i)]=estimacion([Ancla1(i) Ancla2(i) Ancla4(i)], [posancla1  
posancla2 posancla4]);  
end
```

```
for i=1:npos  
    error=0;
```

```
    if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla4LOS(i))==0)  
        j=j+1;  
        error=sqrt(((xest(i)-ejexreal(i)*0.5)^2)+((yest(i)-  
ejeyreal(i)*0.5)^2));  
        caso3error1=caso3error1+(error^2);
```

```
    end
```

```
    if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla4LOS(i))==1)  
        k=k+1;  
        error=sqrt(((xest(i)-ejexreal(i)*0.5)^2)+((yest(i)-  
ejeyreal(i)*0.5)^2));  
        caso3error2=caso3error2+(error^2);
```

```
    end
```

```
    if((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla4LOS(i))==2)  
        l=l+1;  
        error=sqrt(((xest(i)-ejexreal(i)*0.5)^2)+((yest(i)-  
ejeyreal(i)*0.5)^2));  
        caso3error3=caso3error3+(error^2);
```

```

end
if (Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla4LOS(i))==3
    m=m+1;
    error=sqrt(((xest(i)-ejexreal(i)*0.5)^2)+((yest(i)-
ejeyreal(i)*0.5)^2));
    caso3error4=caso3error4+(error^2);

end

end

rmse1=sqrt(caso3error1/j)
rmse2=sqrt(caso3error2/k)
rmse3=sqrt(caso3error3/l)
rmse4=sqrt(caso3error4/m)

```

7.11 rmsecaso4.m

```

%script para calcular el rmse en el caso de 4 anclas

load inicial.mat
load inicialLOS.mat

error=0;
npos=42;
j=0;
k=0;
l=0;
m=0;
n=0;
caso4error1=0;
caso4error2=0;
caso4error3=0;
caso4error4=0;
caso4error5=0;

xest=[];
yest=[];
posancla1=[2.5 0];
posancla2=[0 0.5];
posancla3=[0 5.5];
posancla4=[2.5 4];

for i=1:npos
    [xest(i),yest(i)]=estimacion([Ancla1(i) Ancla2(i) Ancla3(i)
Ancla4(i)], [posancla1 posancla2 posancla3 posancla4]);
end

```

```

for i=1:npos
    error=0;

    if ((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==0)
        j=j+1;
        error=sqrt(((xest(i)-ejexreal(i)*0.5)^2)+((yest(i)-
ejeyreal(i)*0.5)^2));
        caso4error1=caso4error1+(error^2);

    end
    if ((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==1)
        k=k+1;
        error=sqrt(((xest(i)-ejexreal(i)*0.5)^2)+((yest(i)-
ejeyreal(i)*0.5)^2));
        caso4error2=caso4error2+(error^2);

    end
    if ((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==2)
        l=l+1;
        error=sqrt(((xest(i)-ejexreal(i)*0.5)^2)+((yest(i)-
ejeyreal(i)*0.5)^2));
        caso4error3=caso4error3+(error^2);

    end
    if ((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==3)
        m=m+1;
        error=sqrt(((xest(i)-ejexreal(i)*0.5)^2)+((yest(i)-
ejeyreal(i)*0.5)^2));
        caso4error4=caso4error4+(error^2);

    end
    if ((Ancla1LOS(i)+Ancla2LOS(i)+Ancla3LOS(i)+Ancla4LOS(i))==4)
        n=n+1;
        error=sqrt(((xest(i)-ejexreal(i)*0.5)^2)+((yest(i)-
ejeyreal(i)*0.5)^2));
        caso4error5=caso4error5+(error^2);

    end

end

rmse1=sqrt(caso4error1/j)
rmse2=sqrt(caso4error2/k)
rmse3=sqrt(caso4error3/l)
rmse4=sqrt(caso4error4/m)
rmse5=sqrt(caso4error5/n)

```

REFERENCIAS

- [1] Brian, S., D. B., & Ripley, D. (2004). Introduction 1.1. *Plant Ecology*, 1–8.
- [2] Cracovski, J. I. (2007). Tecnología emergente: banda ultra ancha. Retrieved from http://www.cnc.gov.ar/publicaciones/N1_Banda_Ultra_Ancha.pdf
- [3] Dardari, D., Conti, a, Ferner, U., Giorgetti, a, & Win, M. Z. (2009). Ranging with ultrawidebandwidth signals in multipath environments. *Proc IEEE*, 97(2), 404–426. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008846>
- [4] Decawave EVK1000 EVK1000 BOX – Functionality and Contents.
- [5] Diaz, J., & Base, B. (2003). Tecnología ultra-wideband (UWB). *Buran*, 1, 52–56.
- [6] Gezici, S., & Poor, H. V. (2009). Position estimation via ultra-wide-band signals. *Proceedings of the IEEE*, 97(2), 386–403. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2008.2008840>
- [7] Ieee, U. W. B., & Alliance, Z. (n.d.). Technologies for WSANs.
- [8] Interiores, E. N., Ancha, D. E. B. U., Gps, E., Unidos, E., & Unidos, E. (1997). LOCALIZACION EN INTERIORES TECNOLOGÍA DE BANDA ULTRA ANCHA (UWB), 1–18.
- [9] Ramón J. Millán. (2004). UWB (Ultra Wide Band). *Boletín de Ingenieros de Telecomunicación (BIT)*, 69–71. Retrieved from <http://www.ramonmillan.com/documentos/uwb.pdf>
- [10] Juan Sebastián Guevara Henao. Tecnología Ultra-Wideband, 1–3.
- [11] Severino, R., & Alves, M. (2007). Engineering a Search and Rescue Application with a Wireless Sensor Network - based Localization Mechanism. *2007 IEEE International Symposium on a World of Wireless, Mobile and Multimedia Networks*, (July), 1–4. <https://doi.org/10.1109/WOWMOM.2007.4351751>
- [12] Suárez Páez, J., & Llano Ramírez, G. (2010). Revisión del estado del arte de IR-Ultra-Wideband y simulación de la respuesta impulsiva del canal IEEE802.15.4a. *Ingeniería y Ciencia - Ing.Cienc.*, 6(11), 105–127. Retrieved from <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/ingciencia/article/view/250>
- [13] Verdone, R., Dardari, D., Mazzini, G., & Conti, A. (2008). Localization and time synchronization techniques for WSANs. *Wireless Sensor and Actuator Networks*, 194–230. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-372539-4.00008-7>
- [15] DecaWave DW1000 DATASHEET, [En línea]. Available: <https://www.decawave.com/support>
- [16] DecaWave DW1000 PRODUCT BRIEF, [En línea]. Available: <https://www.decawave.com/support>
- [17] De la Calle Rozadillas, Luís (2017). Evaluación de dispositivos UWB para localización en interiores con medidas de distancia. (TFG)
- [18] Miguel, A., & Alonso, E. (2010). Sistemas de localización avanzados en entornos interiores basados en tecnología UWB, 1–52.
- [19] D.A.C. Velázquez. Cobertura dentro de construcciones para Comunicaciones Personales Móviles Vía Satélite. Modelo de propagación para interiores.

- [20] Wikipedia, “Error Cuadrático Medio”. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Error_cuadrático_medio
- [21] Wikipedia, “Frecuencia”[En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia>
- [22] A. J. Weiss, Direct position determination of narrowband radio frequency transmitters, *IEEE Signal Process. Lett.*, vol. 11, pp. 513–516, May 2004.
- [23] Gezici, S. A survey on wireless position estimation, *Wireless Pers. Commun.*, vol. 44, no. 3, pp. 263–282, Feb. 2008.
- [24] Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LRWPANs), IEEE P802.15.4a/D4 (Amendment of IEEE Std. 802.15.4), Jul. 2006.
- [25] J.Y. Lee and R. A. Scholtz, Ranging in a dense multipath environment using an UWB radio link, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, pp. 1677–1683, Dec. 2002.
- [26] W. C. Lindsey and M. K. Simon, *Phase and Doppler Measurements in Two-Way Phase-Coherent Tracking Systems*. New York: Dover, 1991.
- [27] G. L. Turin, An introduction to matched filters, *IRE Trans. Inf. Theory*, vol. IT-6, pp. 311–329, Jun. 1960.
- [28] J. J. Caffery, *Wireless Location in CDMA Cellular Radio Systems*. Boston, MA: Kluwer Academic, 2000.
- [29] Federal Communications Commission. Revision of Part 15 of the commission’s rules regarding ultra-wideband transmission systems. First report and order , 1–118 (2002)
- [30] W. Pam Siriwongpairat and K. J. Ray Liu. *Ultra-Wideband Communications Systems: Multiband OFDM Approach* , ISBN 978–0–470–07469–5. Wiley, 2007.
- [31] Ghobad Heidari. *WiMedia UWB: Technology Of Choice For Wireless Usb and Bluetooth* , ISBN 978–0–470–51834–2. Wiley, 2008.
- [32] Marco Chiani and Andrea Giorgetti. Coexistence Between UWB and Narrow-Band Wireless Communication Systems . *Proceedings of the IEEE*, ISSN 0018–9219, 97 (2), 231–254 (2009).
- [33] IEEE. 802.15 WPAN Low Rate Alternative PHY Task Group 4a (TG4a) . IEEE TG4a, 2003.
- [34] IEEE. 802.15.4a–2007, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) , ISBN 978–0–7381–5584–5, 1–203 (2007).
- [35] IEEE. 802.15.4a–2003, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY). Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) , ISBN 0–7381–3677–5, 1–679 (2003).
- [36] IEEE. 802.15.4a-2006, Part 15.4: Wireless Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications for Low-Rate Wireless Personal Area Networks (LR-WPANs) , ISBN 0–7381–4997–7, 1–305 (2006).
- [37] M. Z. Win and R. A. Scholtz, On the energy capture of ultra-wide bandwidth signals in dense multipath environments, *IEEE Commun. Lett.*, vol. 2, pp. 245–247, Sep. 1998.
- [38] D. Cassioli, M. Z. Win, and A. F. Molisch, The ultra-wide bandwidth indoor channel: From statistical model to simulations, *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 20, pp. 1247–1257, Aug. 2002.
- [39] A. Muqaibel, A. Safaai-Jazi, A. Bayeam, A. M. Attiya, and S.M. Riad, ultrawideband through-the-wall propagation, *Proc. Inst. Elect. Eng. Microw. Antennas Propag.*, vol. 152, no. 6, pp. 581–588, Dec. 2005.
- [40] C.F. Yang, C.J. Ko, and B.C. Wu, A free space approach for extracting the equivalent dielectric constants of the walls in buildings, in *Proc. Int. Symp. Antennas Propag. (AP-S)*, Jul. 1996, vol. 2, pp. 1036–1039.
- [41] D. Dardari, A. Conti, J. Lien, and M. Z. Win, The effect of cooperation on localization systems using UWB experimental data, *EURASIP J. Adv. Signal Process. (Special Issue on Cooperative Localization in Wireless Ad Hoc and Sensor Networks)*, vol. 2008, 12 p., article ID 513873, 2008.