

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías de
Telecomunicación

Evaluación de dispositivos UWB para localización
en interiores con medidas de distancia

Autor: Luis De la Calle Rozadillas

Tutor: Eva Arias de Reyna Domínguez

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

Sevilla, 2017



Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería en Tecnologías de Telecomunicación

Evaluación de dispositivos UWB para localización en interiores con medidas de distancia

Autor:

Luis De la Calle Rozadillas

Tutor:

Eva Arias de Reyna Domínguez

Profesora Contratada Doctora

Dep. de Teoría de la Señal y Comunicaciones

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2017

Proyecto Fin de Carrera: Evaluación de dispositivos UWB para localización en interiores con medidas de distancia

Autor: Luis De la Calle Rozadillas

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, 2017

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

En primer lugar, me gustaría agradecer a Dña Eva M^a Arias de Reyna Domínguez la oportunidad de poder realizar este proyecto, de estar siempre disponible y ayudarme en todo lo necesario. Por supuesto agradecerle todo el material con el que he trabajado, desde el equipo para realizar los experimentos hasta la regla con la que medí los últimos datos.

Al departamento de Teoría de la señal y comunicaciones, por permitirme realizar las pruebas en una habitación dedicada para ello.

A todos mis profesores que he tenido, desde el colegio hasta ahora, porque las ganas de seguir aprendiendo son gracias a ellos.

A mis padres y mi hermana, porque gracias a ellos he conseguido llegar hasta aquí, sobre todo agradecerles la paciencia que han tenido estos años y el esfuerzo que han tenido que hacer.

A todos mis compañeros de universidad, en especial a Miguel, por todas las teorías, deducciones y problemas que hemos sacado juntos.

Sevilla, 2017

El objetivo de este proyecto es estudiar el comportamiento de un sistema UWB actual en el estándar IEEE 802.15.4-2011 en situaciones reales, principalmente con línea de visión directa.

Para ello, vamos a usar un kit del fabricante DecaWave (EVK1000).

Este proyecto podría dividirse en dos partes, por un lado, la parte teórica, abarcando los tres primeros apartados y por otro lado una parte puramente experimental, analizando los resultados de los experimentos realizados.

En los primeros apartados explicaremos a fondo esta tecnología y por qué es tan indicada para la localización en interiores. También tendremos un apartado para describir el entorno de investigación, dónde y cómo hemos realizado todas las pruebas, así como una detallada descripción de los aparatos utilizados.

En la segunda parte, realizaremos pruebas colocando los dos transmisores a una distancia determinada y mediante los logs que exportaremos a Matlab, analizaremos la media y desviación típica de la medida estimada. A continuación, intentaremos modelar las medidas de nuestro sistema mediante alguna distribución, elegida tras observar una muestra de histogramas. Plantearemos un modelo que dependa de la distancia real entre nodos, y que por tanto permita una simulación realista de un sistema de localización basado en UWB.

Por último, una vez tengamos modeladas las medidas de nuestro sistema de comunicaciones UWB, vamos a utilizar un algoritmo de localización para simular el comportamiento de un objeto en una habitación con varias anclas (transmisores UWB) empleando el modelo obtenido. De esta manera podremos ver los beneficios y desventajas de usar un sistema UWB como sistema de posicionamiento en interiores.

También haremos un análisis preliminar del comportamiento con ciertos obstáculos, aunque esto último es una introducción a futuros proyectos.

Abstract

The objective of this project is to study the behavior of a current UWB system in the IEEE 802.15.4-2011 standard in real situations, mainly with direct line of sight.

To do this, we will use a DecaWave manufacturer's kit (EVK1000).

This project could be divided into two parts, on the one hand, the theoretical part, covering the first three sections and on the other hand a purely experimental part, analysing the results of the experiments.

In the first part, we will explain this technology and why it is so suitable for indoor location. We will also have a section to describe the research environment, where and how we have done all the tests, as well as a detailed description of the used devices.

In the second part, we will perform tests by placing the two transmitters at a certain distance and using the logs we will export to Matlab, we will analyze the mean and variance of the estimated measures. Next, we will try to model the measures of our system through some distribution, chosen after observing a sample of histograms. We will propose a model that depends on the real distance between nodes, and therefore allows a realistic simulation of a UWB based location system.

Finally, once we have modeled the measurements of our UWB communications system, we will use a localization algorithm to simulate the behavior of an object in a room with several anchors (UWB transmitters) using the obtained model. In this way, we can see the benefits and disadvantages of using a UWB system as an indoor positioning system.

We will also do a preliminary analysis of behavior with certain obstacles, although the latter is an introduction to future projects.

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Figuras	xvii
Índice de Tablas	xxi
Notación	xxii
1 Introducción	11
1.1 <i>Motivación</i>	11
1.2 <i>Objetivos</i>	12
1.3 <i>Estructura</i>	12
2 UWB	13
2.1 <i>Tecnología</i>	13
2.1.1 <i>Ventajas</i>	15
2.1.2 <i>Desventajas</i>	16
2.1.3 <i>Normativa</i>	16
2.1.4 <i>Comparativa con otros sistemas</i>	16
2.2 <i>Localización en interiores</i>	19
2.3 <i>Acontecimientos importantes</i>	20
3 Entorno de trabajo	22
3.1 <i>Introducción</i>	22
3.2 <i>Equipos</i>	22
3.2.1 <i>Transmisores</i>	24
3.2.2 <i>Software</i>	26
3.3 <i>Estimación de la distancia. 'Ranging'.</i>	26
3.3.1 <i>Emparejamiento</i>	26
3.3.2 <i>Intercambio de datos</i>	27
3.4 <i>Funcionamiento de los equipos</i>	29
3.4.1 <i>Modo de funcionamiento INT-INT</i>	29
3.4.2 <i>INT-EXT</i>	32
3.4.3 <i>Configuración de parámetros</i>	34
3.5 <i>Laboratorio</i>	36
3.5.1 <i>Introducción</i>	36
3.5.2 <i>Parámetros y situación</i>	37
4 Modelo	39
4.1 <i>Introducción</i>	39
4.2 <i>Análisis de la señal recibida</i>	39
4.3 <i>Fuentes de error</i>	41
4.4 <i>Histograma</i>	41
4.5 <i>Distribución Normal de las medidas de distancia</i>	46

4.5.1	Media de las medidas de distancia	47
4.5.2	Desviación típica de las medidas de distancia	49
4.6.	<i>Mínimos cuadrados</i>	50
4.6.1	Modelo de la media de las medidas de distancia, en función de la distancia real.	50
4.6.2	Modelo de la desviación típica de las medidas de distancia, en función de la distancia real.	51
4.6.3	Modelos	51
5	Sistema de posicionamiento	54
5.1	<i>Introducción</i>	54
5.2.	<i>Algoritmo de localización</i>	56
5.2.1	Implementación en Matlab	57
5.3.	<i>Medidas simuladas</i>	59
5.3.1	Introducción.	59
5.3.2	Caso de medidas simuladas para un objeto de posición fija	60
5.3.3	Caso de medidas simuladas para un objeto móvil	63
5.4	<i>Medidas reales</i>	64
5.4.1	Introducción	64
5.4.2	Habitación	66
5.4.3	Posición exacta	67
5.4.4	Posición estimada	68
6	Obstáculos	69
6.1.	<i>Introducción</i>	69
6.2.	<i>Obstrucción parcial del rayo directo</i>	69
6.2.1	Análisis	71
6.3.	<i>Obstrucción total del rayo directo</i>	72
6.3.1	Análisis	73
7	Resultados y Conclusiones	74
8	Apéndice A: Tablas	76
8.1	<i>Visión directa (LOS)</i>	76
8.1.1	INT - INT	76
8.1.2	INT –EXT	77
8.2	<i>Visión no directa (NLOS)</i>	80
8.2.1	INT – INT con objeto metálico	80
9	Apéndice B. Instalación y uso del Software	81
9.1.	<i>Instalación</i>	81
9.2.	<i>Uso</i>	84
9.2.1	Logs	87
9.2.2	Exportar datos con Matlab	89
9.2.3	Ficheros	90
10	Apéndice C. Ficheros de Matlab	92
10.1	<i>Modelo</i>	92
10.1.1	signalUWB.m	92
10.1.2	distribucionNormalDefinitiva.m	93
10.1.3	minimosCuadrados.m	97
10.1.4	medidasDeDistancia.m	97
10.2	<i>Sistema de Posicionamiento</i>	101
10.2.1	Medidas simuladas	101
10.2.2	Medidas reales	106
10.2.3	Medidas simuladas con movimiento	109
	Referencias	112

ÍNDICE DE FIGURAS

Ilustración 2-i. Comparación de la densidad espectral de potencia y frecuencia según el ancho de banda.	14
Ilustración 2-ii. Escenario militar con UWB (Fuente: Lawrence Livermore National Laboratory).	15
Ilustración 2-iii. Comparación del rango frente a la tasa de datos entre tecnologías inalámbricas.	17
Ilustración 2-iv. Comparación de la densidad espectral de potencia y frecuencia según la frecuencia central.	18
Ilustración 2-v. Comparación de pulsos en los dominios del tiempo y frecuencia.	19
Ilustración 2-vi. Diagrama de bloques de un sistema de posicionamiento.	20
Ilustración 3-i. Kit decaWave.	23
Ilustración 3-ii. EVB1000.	23
Ilustración 3-iii. Placa de evaluación que contiene el DW1000.	24
Ilustración 3-iv. EVB1000	24
Ilustración 3-v. Emparejamiento.	27
Ilustración 3-vi. Intercambio de datos.	27
Ilustración 3-vii. Tiempos de propagación.	28
Ilustración 3-viii. Configuración INT-INT.	30
Ilustración 3-ix. Configuración TAG	31
Ilustración 3-x. Configuración ANCLA	31
Ilustración 3-xi. Medida de distancia INT-INT.	32
Ilustración 3-xii. Conexión USB	32
Ilustración 3-xiii. Indicador de conexión USB.	33
Ilustración 3-xiv. Situación con dos aplicaciones de PC.	33
Ilustración 3-xv. Situación con una aplicación de PC.	34
Ilustración 3-xvi. Situación ilustrativa.	36
Ilustración 3-xvii. Situación real.	37
Ilustración 3-xviii. Las tres situaciones distintas, de izquierda a derecha: larga, media y corta distancia.	38
Ilustración 4-i. Extracto de señal recibida	40
Ilustración 4-ii. Respuesta impulsiva en magnitud.	40
Ilustración 4-iii. Histograma de las medidas de distancia	42
Ilustración 4-iv. Curva Gaussiana	42
Ilustración 4-v. Histograma con función de densidad normal.	43
Ilustración 4-vi. Distribución de la probabilidad.	44

Ilustración 4-vii. Histograma de las medidas de distancia para la situación de visión directa (LOS) en el caso de transmisores a 1.5m.	45
Ilustración 4-viii. Histograma de las medidas de distancia para la situación de visión no directa (NLOS) en el caso de transmisores a 3m de distancia con una pared en medio como obstáculo.	45
Ilustración 4-ix. ECDF	46
Ilustración 4-x. Proceso seguido para modelar la distancia medida, para una distancia real determinada.	47
Ilustración 4-xi. Media de las medidas de distancia en función de la distancia real. A la izquierda, Rango 0-1m y a la derecha Rango 0-5m.	47
Ilustración 4-xii. Media de las medidas de distancia en función de la distancia real. Rango 0-20m.	48
Ilustración 4-xiii. Media de las medidas de distancia en función de la distancia real. Rango 0-60m.	48
Ilustración 4-xiv. Desviación típica de las medidas de distancia en función de la distancia real.	49
Ilustración 4-xv. Aproximación por mínimos cuadrados de la media de las medidas de distancia, en función de la distancia real.	50
Ilustración 4-xvi. Aproximación por mínimos cuadrados de la desviación típica de las medidas de distancia, en función de la distancia real.	51
Ilustración 4-xvii. Proceso seguido a partir de los experimentos hasta el modelo de la distancia medida.	52
Ilustración 4-xviii. Diagrama de bloques del modelo de la distancia medida.	53
Ilustración 5-i. Diagrama de bloques del proceso de localización usando el modelo de distancia medida.	54
Ilustración 5-ii. Diagrama de bloques del proceso de localización usando las medidas reales obtenidas del kit de DecaWave.	55
Ilustración 5-iii. Algoritmo de posicionamiento	56
Ilustración 5-iv. Intersección de 3 esferas proyectadas sobre el eje XY con medidas sin error.	56
Ilustración 5-v. Situación de las anclas en el plano XY.	57
Ilustración 5-vi. Esquema del proceso de localización para el caso de medidas simuladas.	59
Ilustración 5-vii. Habitación.	60
Ilustración 5-viii. Habitación con móvil.	61
Ilustración 5-ix. Posición estimada.	62
Ilustración 5-x. Habitación con posiciones de desplazamiento.	63
Ilustración 5-xi. Movimiento	64
Ilustración 5-xii. Caso basado en medidas reales.	65
Ilustración 5-xiii. Habitación vacía	66
Ilustración 5-xiv. Habitación con móvil.	67
Ilustración 5-xv. Posición estimada	68
Ilustración 6-i. Obstrucción parcial del rayo directo con una pared como obstáculo.	69
Ilustración 6-ii. Amplitud de la señal recibida en magnitud, para el caso de visión directa	70
Ilustración 6-iii. Amplitud de la señal recibida en magnitud, para el caso de visión directa incluyendo valores reales e imaginarios.	70
Ilustración 6-iv. Pared como obstáculo.	70
Ilustración 6-v. Rayo por debajo del umbral.	71
Ilustración 6-vi. Rayo por encima del umbral	71
Ilustración 6-vii. Obstrucción total del rayo directo con un objeto metálico como obstáculo.	72

Ilustración 6-viii. Distancia corta	73
Ilustración 9-i. Software	82
Ilustración 9-ii	83
Ilustración 9-iii. Instalación	83
Ilustración 9-iv. Estado inicial del software	84
Ilustración 9-v. Configuración del Ancla.	85
Ilustración 9-vi. Mensajes 'blink'.	86
Ilustración 9-vii. Ranging.	87
Ilustración 9-viii. Trama TX	88
Ilustración 9-ix. Trama RX	88
Ilustración 9-x. Respuesta impulsiva	88
Ilustración 9-xi. Tráfico SPI	89

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de distintas tecnologías de comunicación.	16
Tabla 2. Comparación de frecuencias y anchos de banda con distintas tecnologías.	18
Tabla 3. Acontecimientos importantes.	20
Tabla 4. Configuración de los interruptores S1.	25
Tabla 5. Modos de operación.	26
Tabla 6. Parámetros y definición.	55

Notación

MSE	Mean square error
RMSE	Root mean square error
<	Menor o igual
>	Mayor o igual
GPS	Global Positioning System
RSS	nivel de potencia
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
EIRP	Límite de emisión
HDR/VHDR	High/Very High Data Rate
LDR/LDR-LT	Low Data Rate with Location Tracking

1 INTRODUCCIÓN

LA geolocalización siempre me ha entusiasmado, mapas, GPS, brújulas... cualquier artilugio con el que poder orientarte, el día que empecé la carrera ya sabía que mi proyecto final tenía que estar relacionado con la localización, y lo he conseguido, aunque no tal y como esperaba.

Siempre que hablamos de localización de personas u objetos, pensamos en la tecnología GPS, yo el primero hasta hace unos meses, es sin duda la más extendida, tanto en el ámbito civil como militar, y más actualmente, donde casi todos los dispositivos que se venden tienen incorporado un GPS, pero, ¿Qué pasa cuando entramos en un edificio? Perdemos la señal, GPS es incapaz de funcionar en entornos interiores.

La tecnología GPS (Global Positioning System) está ampliamente extendida, la mayoría de dispositivos inteligentes suelen incorporar esta tecnología, desde relojes inteligentes o 'smartWatch' hasta los ya conocidos y tradicionales sistemas de navegación para los automóviles. Pero sin duda, donde más se está explotando el GPS es en los dispositivos móviles, por la cantidad de aplicaciones que se pueden desarrollar.

Sin entrar en detalles, GPS se nutre de una constelación nominal formada por 24 satélites operativos que transmiten señales unidireccionales. [1]

Sin embargo, esa señal sufre una gran degradación cuando nos encontramos en posiciones interiores o indoor.

Actualmente existen muchas tecnologías para determinar la posición en dicha situación, la más conocida es 802.11 o más conocida como WiFi, no obstante, existen grandes desventajas y limitaciones en cuanto a su alcance y coste.

UWB es posiblemente una de las mejores alternativas, y lo mejor aún, está sin explotar. Sus grandes prestaciones a corto alcance, así como su bajo coste, otorgan a esta tecnología un papel con un futuro muy prometedor.

Existen distintas técnicas para estimar la posición de un objeto según el nivel de potencia (RSS), tiempo de llegada (ToA) y ángulo de llegada (AoA) de la señal recibida. Nosotros según el Hardware del que disponemos vamos a desarrollar este proyecto usando la técnica ToA.

1.1 Motivación

La motivación de este proyecto es estudiar el comportamiento de un sistema UWB actual en el estándar IEEE 802.15.4-2011 en situaciones reales, principalmente con línea de visión directa. Para llevar a cabo esta investigación contamos con un Kit de DecaWave compuesto por dos transmisores UWB para hacer las pruebas necesarias.

Este proyecto me causa un gran interés, ya que une mi pasión por la localización con una nueva tecnología aun por explotar. Espero que les guste tanto como a mí, ya que he disfrutado cada párrafo que he escrito en este documento.

1.2 Objetivos

- **Fundamentos teóricos de la tecnología UWB**, características principales, breve reseña histórica, ventajas y desventajas frente a sus principales competidores y normativa actual.
- **Funcionamiento básico** y comunicación en un sistema de comunicaciones UWB usando el kit de **decaWave EVK1000**, además del software proporcionado “DecaRanging” por el mismo.
- **Modelado de las medidas** de nuestro hardware según los experimentos realizados.
- **Utilizar un algoritmo de posicionamiento**, simulando mediante el modelo obtenido las medidas de distancia entre un objeto y algunas anclas.
- Basándonos en todos estos puntos, evaluar un **sistema de localización** basado en un dispositivo actual con **tecnología UWB**.

1.3 Estructura

El presente documento consta de 9 apartados:

- Primer capítulo: Breve **introducción** del presente proyecto, junto con la motivación, objetivos y estructura del mismo.
- Segundo capítulo: Capítulo puramente teórico donde abordaremos las principales características de la **tecnología UWB**. Nos centraremos en las diferencias con el resto de tecnologías competidoras y analizaremos sus puntos fuertes y débiles.
- Tercer capítulo: En este capítulo definiremos con detalle el **entorno de desarrollo** del presente proyecto. Por un lado, la parte más experimental, donde explicaremos brevemente los materiales utilizados, los parámetros y la situación de desarrollo. Por otro lado, explicaremos el funcionamiento de nuestro hardware.
- Cuarto capítulo: En el cuarto capítulo comenzamos analizando la señal recibida en nuestro transmisor DW1000 por medio del software Matlab, a continuación, mediante el histograma, la media y la desviación típica de las medidas de distancia modelaremos **las medidas de distancia de nuestro sistema, que presentan un error respecto de las distancias reales**.
- Quinto capítulo: Usando el modelo del apartado anterior, en este apartado vamos a utilizar un **algoritmo de localización** basado en la trilateración; a continuación, simularemos varias posiciones para calcular el error cuadrático medio y observar su comportamiento.
- Sexto capítulo: En el sexto capítulo analizaremos el caso de que no exista línea de visión directa entre las dos antenas, veremos el comportamiento con distintos **obstáculos**.
- Séptimo capítulo: Capítulo final con los **resultados** y **conclusiones** del proyecto.
- Apéndice A: En este apéndice nos encontramos las tomas de datos hechas “a mano”, sin ningún software externo.
- Apéndice B: Resumen sobre el software “pcDecaRanging”, instalación y uso del mismo.
- Apéndice C: Todos los ficheros Matlab utilizados.

2 UWB

En este apartado vamos a describir la tecnología UWB, una breve introducción histórica, las distintas ventajas y desventajas que ofrece, la normativa actual en la que se encuentran los sistemas UWB. A continuación, analizaremos los distintos competidores y sistemas similares a UWB y por último su aplicación en localización de interiores.

2.1. Tecnología

Hemos usado las siguientes referencias para el desarrollo de este apartado: [2] [3] [4] [5] [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13]

Ultra-wideband (UWB) es una tecnología de origen militar que surgió alrededor de los años sesenta. Se traduce como banda ultra-ancha o ultra banda ancha, y también es conocido como “Impulse Radio”. Básicamente se define como **cualquier transmisión de radio con un espectro de frecuencia mayor al 20% de la frecuencia central o un ancho de banda mayor que 500MHz.** (*Federal Communications Commission*).

Matemáticamente:

1. Ancho de banda B/fo entre dos puntos a 10 dB es $\geq 20\%$ (la densidad espectral de potencia de la señal está a 10dB respecto del máximo)

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

Esto se define como millones de nano pulsos (con una duración aproximada de 1 nanosegundo) o lo que es lo mismo, millones de pulsos con una frecuencia del orden de Giga-Hercios. Estos trenes de pulsos permiten localizar objetos o personas determinando el tiempo de llegada con una precisión de picosegundos, logrando por tanto una precisión en la posición de centímetros, como garantiza nuestro proveedor de Hardware.

Los sistemas UWB usan señales basadas en trenes de pulsos de corta duración. El intervalo entre los pulsos individuales puede ser uniforme o variable y existen diferentes métodos para modular el tren de pulsos con datos para comunicaciones.

La característica principal de UWB es por tanto el **gran ancho de banda** que utiliza.

Inicialmente, la interpretación original de UWB era en banda base, pero finalmente no se permitió la emisión en banda base estricta, por lo que los pulsos están trasladados en frecuencia al igual que en los sistemas tradicionales de radio. Estos nano pulsos son modulados por la información a transmitir.

UWB tiene un rango de frecuencias que varía desde pocos Hertzios hasta GHz, lo que hace imposible que trabaje en un espectro asignado solo a esta tecnología UWB, sin embargo, **los sistemas UWB emiten a una potencia muy baja**. Esto, unido al gran ancho de banda, hace que esta potencia se reparta produciendo una densidad espectral del orden de mW/MHz. Esto posibilita a los sistemas UWB ocupar bandas de frecuencias de otros servicios sin causar interferencia por lo que se permite emisión sin licencia. Las distintas regiones del mundo han regulado diferentes máscaras espectrales para la emisión de señales UWB.

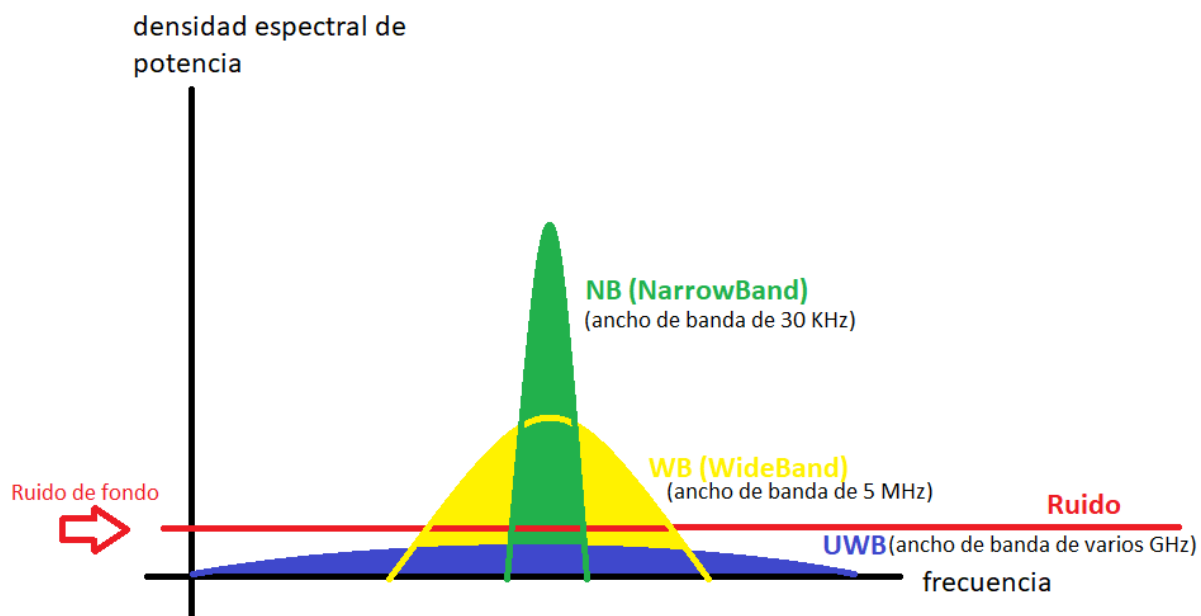


Ilustración 2-i. Comparación de la densidad espectral de potencia y frecuencia según el ancho de banda.

Como vemos en la figura 2-i, el nivel de señal de este sistema UWB es menor o similar a los típicos niveles de ruido que soportan otros sistemas, disminuyendo la posibilidad de interceptar la señal, además de que la interferencia a otros servicios es prácticamente nula.

Por esta característica UWB tuvo su origen militar, ya que es una transmisión prácticamente indetectable y tiene una gran resistencia a las interferencias de banda estrecha.

A continuación, vemos un ejemplo de aplicación militar con UWB, las radios UWB pueden comunicarse sin ser interceptadas, un inconveniente en las radios convencionales.



Ilustración 2-ii. Escenario militar con UWB (Fuente: *Lawrence Livermore National Laboratory*).

En la imagen 2-ii, las comunicaciones de todos los soldados y demás vehículos pueden ser coordinadas para que las señales transmitidas sean únicamente detectadas y recibidas en un solo lugar, en este caso en la estación de la parte superior izquierda.

2.1.1 Ventajas

- Posibilidad de estimación de posición con **precisión de centímetros**.
- Señal **immune al efecto multi-camino** ya que, debido a su corta duración, es posible distinguir entre la señal directa y las señales reflejadas en los obstáculos.
- Utiliza bandas de frecuencias asignadas a otros servicios sin causar **ningún tipo de interferencia** perjudicial gracias a su **baja potencia** de transmisión. **Reutilización de espectros**.
- Alta capacidad de **penetración**, utilizando las frecuencias más bajas posibles, ya que la señal contiene diferentes componentes de frecuencia, lo que aumenta la posibilidad de que al menos alguna de ellas pueda atravesar o rodear obstáculos.
- **Indetectable** (los demás sistemas ven las señales UWB como ruido) y con gran **resistencia a las interferencias** procedentes de la banda estrecha.
- **Bajo consumo y bajo coste** (Como emisor de radio, transceptores).

2.1.2 Desventajas

- **Inviabile en aplicaciones de largo alcance**, debido a sus limitaciones de potencia para no interferir en la banda de frecuencia con el resto de servicios. (Solo es rentable en redes WPAN).
- Interoperabilidad.
- Alto coste de solución global.

2.1.3 Normativa

UWB puede usar frecuencias que van, en la regulación estadounidense, desde 3.1 GHz hasta 10.6 GHz: una banda de más de 7 GHz de anchura. Cada canal de radio tiene una anchura de más de 500 MHz, dependiendo de su frecuencia central.

Límite de emisión: EIRP=-41.3dBm/MHz.

La regulación europea es más restrictiva, pero sigue siendo compatible con la definición de UWB.

2.1.4 Comparativa con otros sistemas

En esta sección vamos a comparar la tecnología UWB con sus principales competidores.

Categoría	Frecuencia	Ancho de banda	Penetración	Inmunidad al multitrayecto
Ultrasónico	Muy alta	Muy alto	Ninguna	Muy buena
Infrarrojos	Muy alta	Muy alto	Ninguna	Muy buena
UWB	Alta	Muy alto	Buena	Muy buena
Banda estrecha	Media	Bajo	Excelente	Mala
Espectro ensanchado	Media	Medio	Muy buena	Media

Tabla 1. Comparación de distintas tecnologías de comunicación.

UWB combina la precisión y la inmunidad al multitrayecto de los sistemas de alta frecuencia con la penetración de los sistemas de frecuencia media. Los sistemas de baja frecuencia no se utilizan para la localización y seguimiento, ya que no hay suficiente ancho de banda.

La penetración es una característica muy importante en la localización, ya que nos permitiría colocar menos anclas en un edificio y por consiguiente abarataría mucho los costes del sistema UWB.

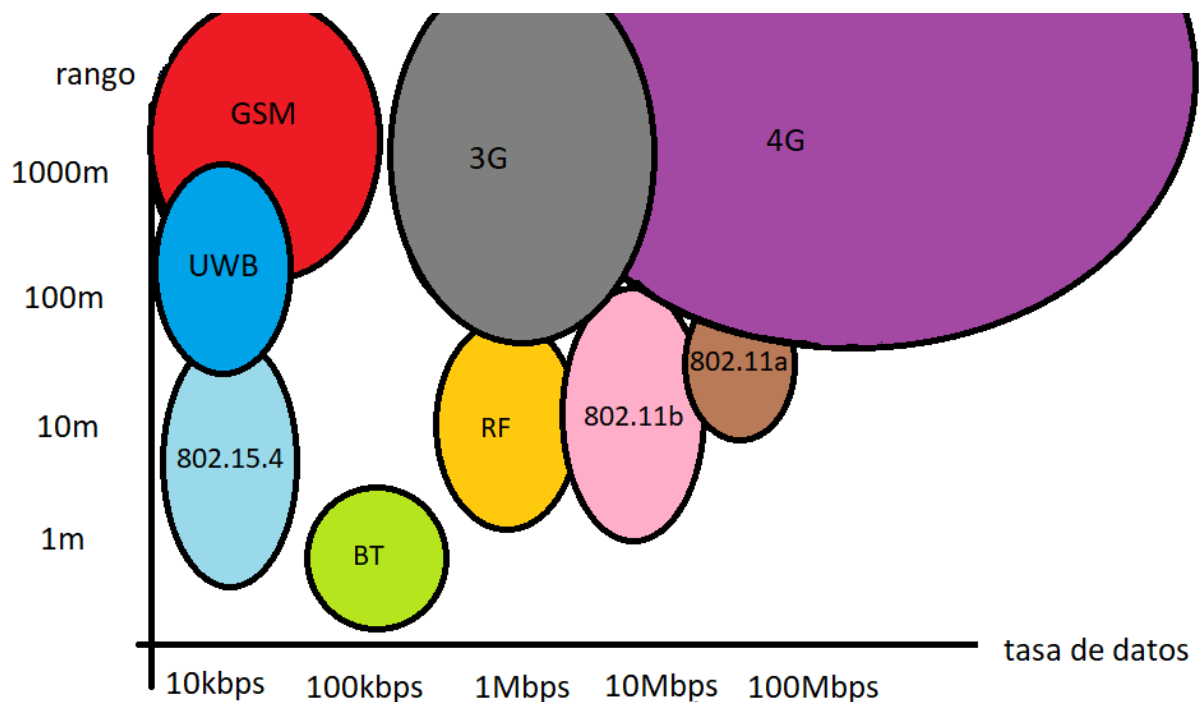


Ilustración 2-iii. Comparación del rango frente a la tasa de datos entre tecnologías inalámbricas.

En la figura 2-iii podemos ver una comparación entre distintas tecnologías inalámbricas y competidoras de UWB, en ella vemos que UWB destaca por su gran alcance a baja tasa de datos, lo que la convierte en una elección perfecta para localización en interiores, ya que el alcance cubre con las necesidades de un edificio.

Centrándose en las aplicaciones de la tecnología UWB, cabe distinguir entre dos tipos fundamentales de sistemas UWB: [14]

- HDR/VHDR (High/Very High Data Rate): Presentan tasas de transmisión elevadas, hasta centenares de Mbps, y alcances cortos, hasta 5 metros. No se basan en pulsos, sino en modulaciones como Multiband-OFDM y DS-SS (Direct Sequence Spread Spectrum). Se estudiaron en el grupo IEEE 802.15.3a, y la propuesta basada en MB-OFDM ha sido estandarizada por la WiMedia Alliance. En la figura 2-v no hemos incluido HDR/VHDR, ya que existen problemas aún no resueltos para la alta tasa de datos.
- LDR/LDR-LT (Low Data Rate with Location Tracking): Presentan tasas de transmisión inferiores, hasta la decena de Mbps, pero con mayores alcances, del orden de decenas de metros. Además, permiten una gran resolución en la estimación de la distancia, por lo que son apropiadas para la localización y seguimiento. El uso de UWB en redes inalámbricas de área personal (WPANs) de baja tasa se contempla en el estándar 802.15.4a.

Esta última opción es la que desarrollaremos en nuestro proyecto.

A continuación, vemos una tabla con las distintas frecuencias centrales y anchos de banda que usan las principales tecnologías de comunicación de hoy en día.

	<i>GSM</i>	<i>UMTS</i>	<i>WI-FI</i>	<i>GPS</i>
<i>B aproximado</i>	200 KHz a 25Mhz	3.8 MHz	16.6 MHz	20 MHz
f_0 <i>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 2. Comparación de frecuencias y anchos de banda con distintas tecnologías.

UWB se caracteriza por su gran ancho de banda en comparación con el resto de tecnologías, como vemos en la siguiente imagen 2-iv, UWB ocupa parte del espectro de las demás tecnologías, pero al estar delimitada en potencia, esta no llega a interferir en las demás.

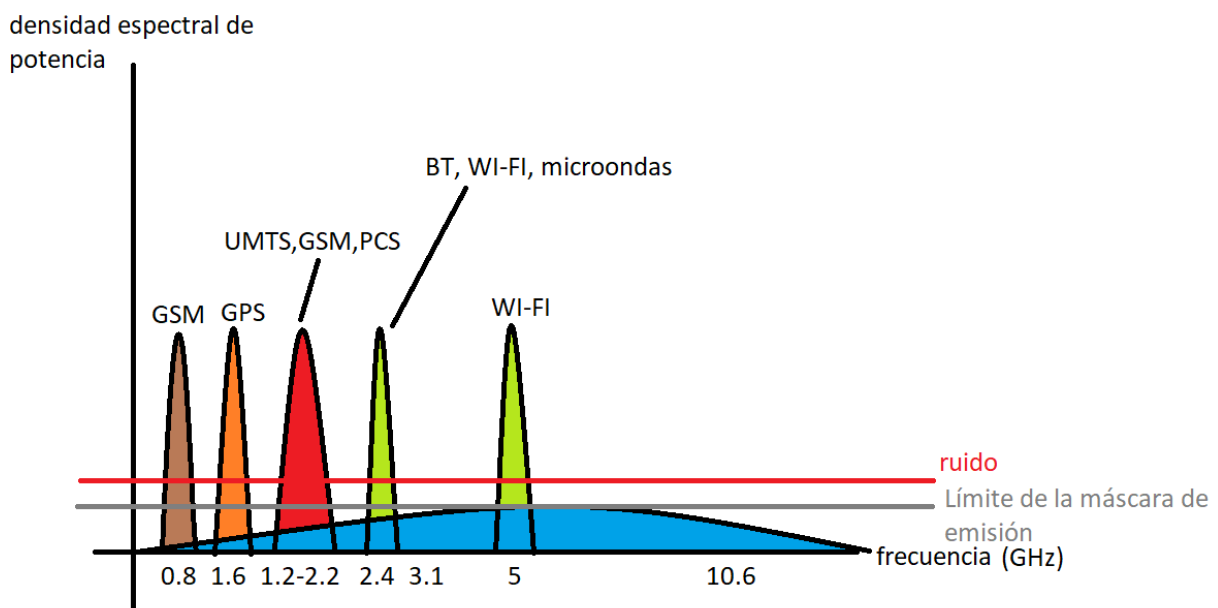


Ilustración 2-iv. Comparación de la densidad espectral de potencia y frecuencia según la frecuencia central.

Por último, vamos a comparar los pulsos según el ancho de banda en el dominio del tiempo y la frecuencia. UWB se basa como ya sabíamos, en pulsos muy estrechos con una duración que tiende a 0s. Esto en el dominio de la frecuencia se traduce en un ancho de banda grande.

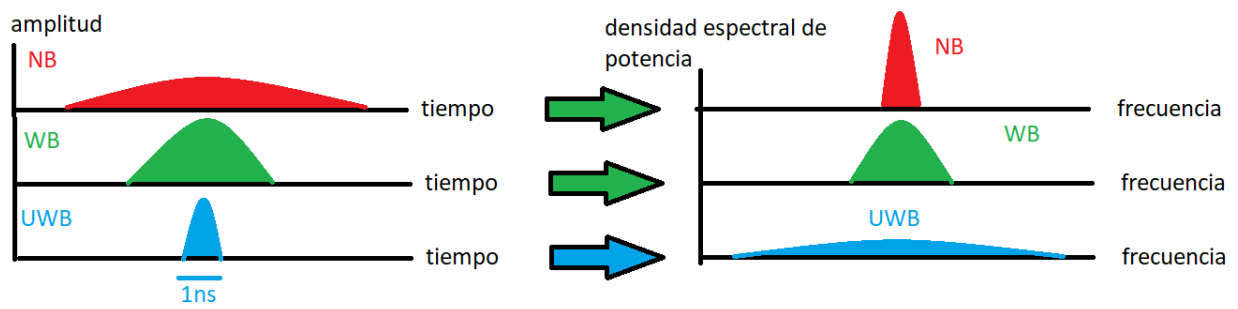


Ilustración 2-v. Comparación de pulsos en los dominios del tiempo y frecuencia.

Los pulsos en banda estrecha (NarrowBand) tienen una duración en el dominio del tiempo que tiende a infinito, por lo que en el dominio frecuencial se traduce en un ancho de banda muy pequeño al contrario de lo que sucede en UWB.

2.2. Localización en interiores

Hemos usado las siguientes referencias para el desarrollo de este apartado: [7] [8] [14] [15]

La localización en interiores es una tecnología aun en desarrollo, especialmente en el ámbito civil.

Los casos en los que resulta útil esta tecnología son muy diversos, si hablamos del ámbito civil podemos citar, por ejemplo:

- Comercios: localizar objetos en tiendas o almacenes.
- Hospitales y sanidad: monitorizar personas con necesidades especiales, localizar equipos u objetos en hospitales.
- Edificios públicos: geolocalizar personas y orientarlas en cualquier situación.

Si hablamos del ámbito militar, nos encontramos por ejemplo con:

- Seguridad pública: controlar individuos en prisión, operaciones de búsqueda y rescate.
- Misiones militares: misiones en interiores, localización de equipos y personas.

Todos estos ejemplos son solo algunos casos de aplicaciones de la tecnología UWB en interiores, que han despertado el interés de muchos fabricantes en desarrollar productos de geolocalización de interiores usando UWB.

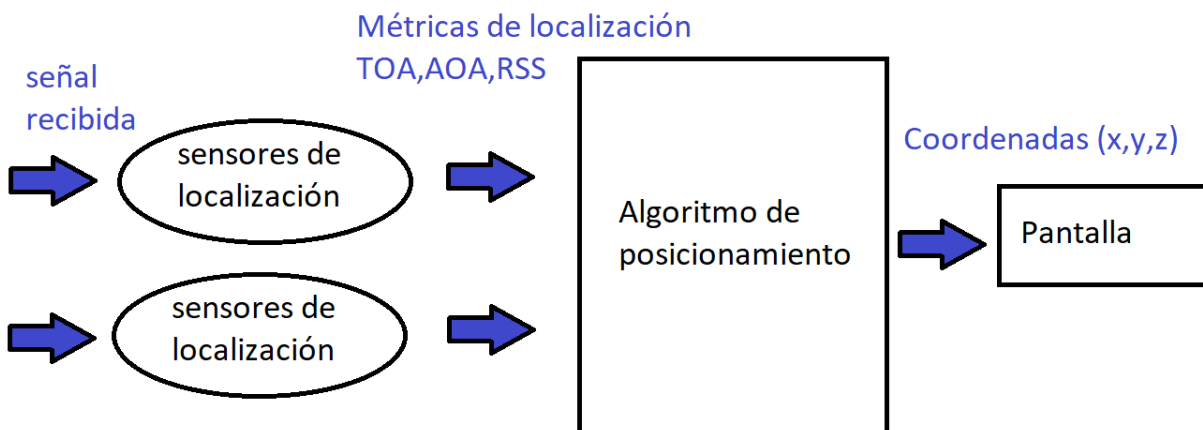


Ilustración 2-vi. Diagrama de bloques de un sistema de posicionamiento.

Como hemos comentado en el apartado anterior, UWB está basada en pulsos ultracortos, los transmisores y receptores pueden determinar el tiempo de llegada (ToA) con precisión de nanosegundos, lo que quiere decir una precisión de unos pocos centímetros, como comprobaremos en posteriores apartados.

En la figura 2-vi podemos apreciar un diagrama de bloques del caso general de un sistema de posicionamiento usando la tecnología UWB. La distancia entre las anclas y el nodo se puede calcular siguiendo distintas técnicas, aunque en este proyecto solo utilizaremos TOA. A continuación, utilizando un algoritmo de posicionamiento se determina la posición estimada del objeto.

2.3. Acontecimientos importantes

En este último apartado teórico vamos a citar y definir brevemente los acontecimientos más importantes en la historia de la tecnología UWB. En la siguiente tabla vemos las fechas más significativas: [8] [16] [2] [17] [18]

ACONTECIMIENTO	AÑO
ONDAS ELECTROMAGNÉTICAS	1893
SISTEMAS DE RADAR POR FASE	1950s
AVANCES EN EL DESARROLLO ELECTROMAGNÉTICO EN EL DOMINIO DEL TIEMPO	1960s
TRANSISTOR DE AVALANCHA Y DIODO TUNEL	Principio de los 70s
SENSOR RADAR DE CORTO ALCANCE	1972
DISPOSITIVOS DE PULSO EN BANDA ESTRECHA	Finales de los 70s
AVANCES EN TECNOLOGIA RADAR	1980s, 1990s
COMERCIALIZACIÓN DE DISPOSITIVOS UWB	2000s
ESTANDAR IEEE	2000s

Tabla 3. Acontecimientos importantes.

A día de hoy, las ondas sinusoidales son el método dominante de Comunicaciones inalámbricas. Sin embargo, los primeros sistemas de comunicaciones estaban basados en pulsos, igual que nuestra tecnología UWB.

En 1887, Heinrich Hertz uso una descarga de chispas para producir ondas electromagnéticas.

A finales de los años cincuenta, el Lincoln Laboratory & Sperry hicieron un esfuerzo para desarrollar sistemas de radar por fase. El Radar de Escaneo Electrónico (ESR) de Sperry empleó una denominada Matriz de Fase Híbrida Butler que era una interconexión de acopladores de línea ramificada de 3 dB conectados de tal manera que formaba una red de puerto 2-N.

El desarrollo del osciloscopio sampling a inicios de los 60s y las correspondientes técnicas para generación de pulsos en banda base en menos de un nanosegundo aceleró el desarrollo de UWB.

De las técnicas de medición en los años 60, el foco principal se movió al desarrollo de los dispositivos del radar y de las comunicaciones. El radar de penetración de tierra se desarrolló posteriormente, ya que los componentes de baja frecuencia eran útiles en objetos penetrantes.

En 1973 fue concedida la primera patente en EEUU para comunicaciones UWB. La mayoría de las aplicaciones y desarrollos en esa fecha fueron en el ámbito militar, debido a la baja probabilidad de interceptación de las comunicaciones y la gran precisión que ofrecía la tecnología UWB.

A comienzo de los 2000s se comenzó a comercializar dispositivos y sistemas de comunicaciones UWB. Compañías como TimeDomain y en particular emprendedoras como XtremeSpectrum fueron pioneras usando UWB.

3 ENTORNO DE TRABAJO

ES muy importante conocer el entorno de trabajo en el que se ha desarrollado este proyecto, a continuación se intentará detallar de la mejor forma posible la situación, parámetros, y cualquier otra información importante para conocer la forma en que se ha realizado este proyecto.

3.1. Introducción

En este apartado vamos a describir el entorno de investigación en el cual se ha realizado este Proyecto.

Hemos usado las siguientes referencias para el desarrollo de este apartado:

[19] [20] [21] [22] [23] [24] [11]

3.2. Equipos

Para desarrollar este proyecto, contamos con el kit EVK1000 Evaluation Kit, el cual incluye:

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

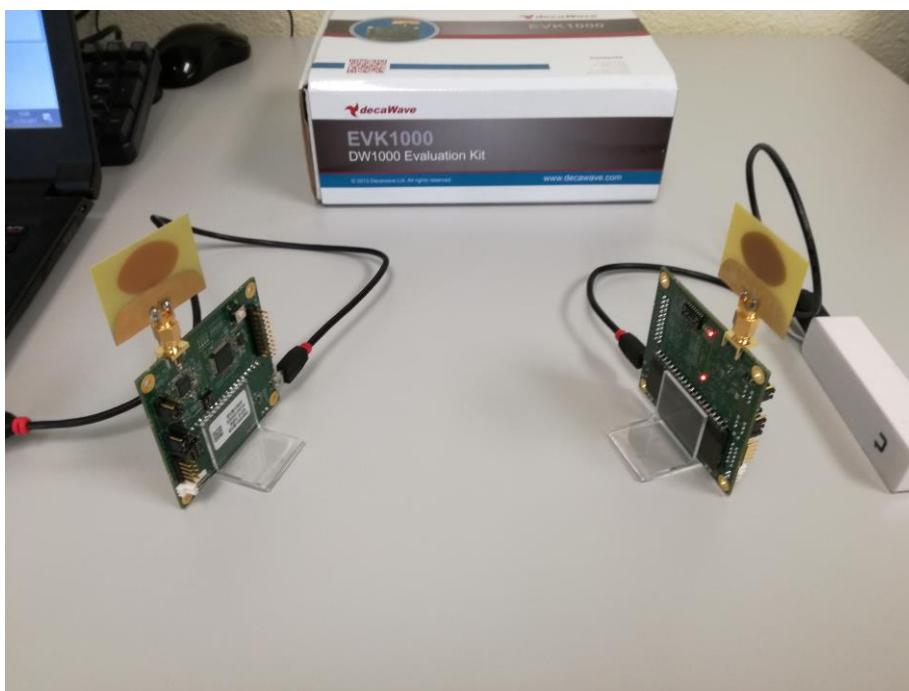


Ilustración 3-i. Kit decaWave.

La placa de evaluación EVB1000 mide 7cm x 7cm. La parte frontal contiene una pantalla LCD que se utiliza para mostrar información de las medidas de distancia, también disponemos de un interruptor (S1) que controla el modo de operación.



Ilustración 3-ii. EVB1000.

La parte trasera contiene el DW1000 IC, el ARM IC, el botón de ARM reset, dos interruptores DIP (S2 y S3), el conector JTAG, la conexión externa SPI y varios conectores y jumpers para configurar el modo de operación.

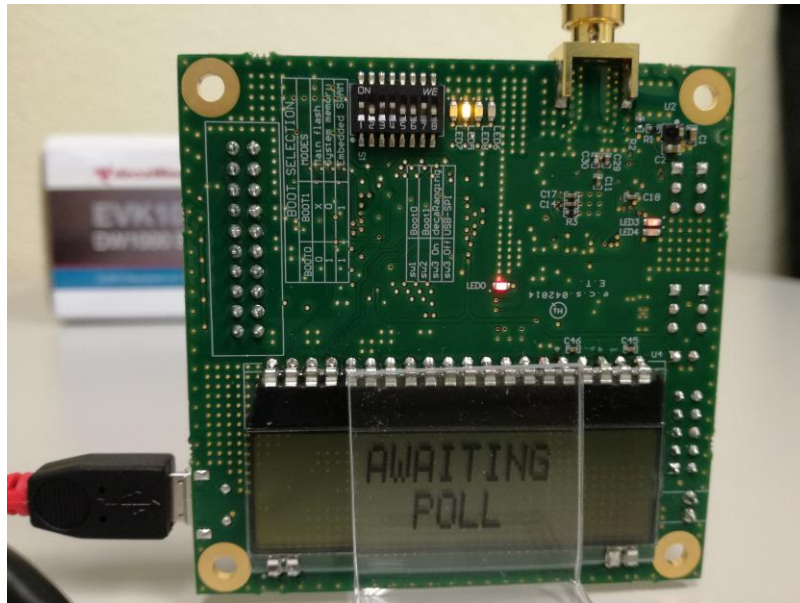


Ilustración 3-iii. Placa de evaluación que contiene el DW1000.

3.2.1 Transmisores

Este Kit incluye dos placas EVB1000.



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, 850 kbps y 6.8Mbps.
- Longitud máxima del paquete 1023 bytes para determinadas aplicaciones.
- Soporta Ranging TDOA .

3.2.1.2 Beneficios

- Localización con una precisión de 10 cm.
- Rango de operación hasta de 290m con 110kbps de tasa de datos en estructuras RTLS .
- Alta inmunidad frente desvanecimiento multitrayecto.
- Batería de larga duración.

3.2.1.3 Ajuste

Las posibilidades de ajustar y modificar el comportamiento de nuestro hardware son prácticamente ilimitadas, pero en este trabajo vamos a abordar principalmente las funcionalidades con respecto a la comunicación de nuestro sistema.

En este sentido, tenemos el interruptor S1, compuesto a su vez por 8 interruptores.

Interruptor	OFF	ON	Descripción
S1-1	Desactivar ARM	Activar ARM	Funcionalidad ARM (si no es necesaria puede dejarse a OFF)
S1-2	Desactivar fast-ranging (150ms)	Activar fast-ranging (5ms)	Ajusta el tiempo de respuesta de las medidas
S1-3	Activar USB to SPI	Desactivar USB to SPI	Necesario para poder ejecutar la aplicación DecaRanging
S1-4	Activa el rol TAG	Activa el rol ANCLA	Cambia el 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	Permite a la aplicación DecaRanging modificar el tiempo de respuesta.

Tabla 4. Configuración de los interruptores S1.

Modos de operación:

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 5. Modos de operación.

La comparación de los distintos modos de operación podemos verla en el Apartado 3.4.3 [Configuración de parámetros](#)

3.2.2 Software

Véase [Apéndice B. Instalación y uso del Software](#)

3.3. Estimación de la distancia. 'Ranging'.

En las medidas de distancia usaremos un conjunto de tres mensajes para determinar la distancia a la que se encuentran dos nodos. El tiempo desde que enviamos el mensaje hasta que obtenemos la respuesta, es el retardo del viaje de ida y vuelta entre nuestros dos nodos, calculando ese retardo (Td en la Ilustración 3-vi) podremos obtener de forma aproximada la distancia que los separa.

3.3.1 Emparejamiento

Al principio, tanto el TAG como el ANCLA no está asociados a ningún dispositivo. En la situación inicial, el TAG está constantemente enviando mensajes 'blink' (cada segundo), los cuales incluyen su propia dirección. Se muestra el mensaje 'awaiting response' en la pantalla LCD de nuestro TAG.

El ANCLA se mantiene en el estado de escucha, a la espera de recibir un mensaje 'blink'. En la pantalla LCD

podemos ver el mensaje 'awaiting poll'.

Una vez el ANCLA recibe un mensaje 'blink' y decide emparejarse con ese TAG, envía un mensaje de inicio de Ranging para asociarse y terminar la fase de emparejamiento.

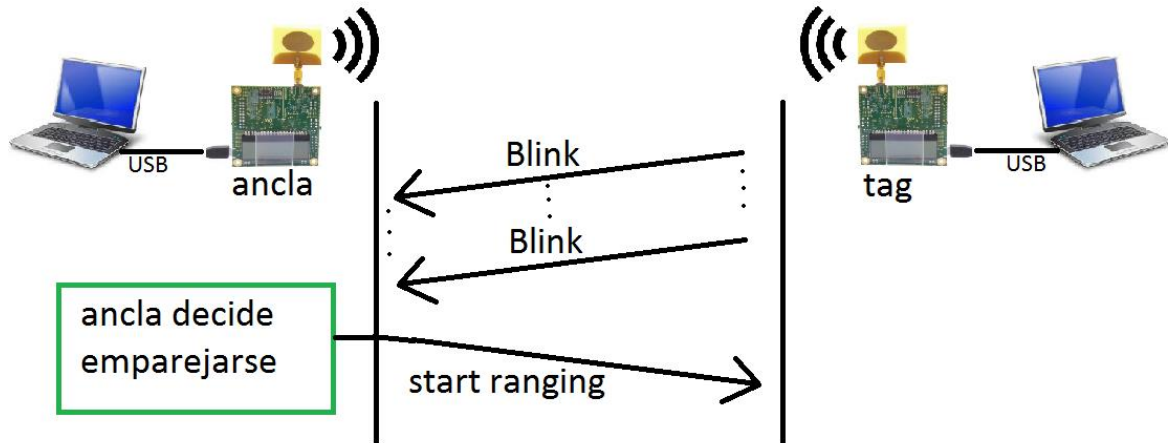


Ilustración 3-v. Emparejamiento.

3.3.2 Intercambio de datos

El procedimiento es muy simple, al comienzo se adjudica a uno de los extremos la funcionalidad de TAG y al otro extremo la funcionalidad de ANCLA. El ANCLA está continuamente escuchando los mensajes del TAG.

Una medida de distancia se inicia cuando el TAG envía el mensaje de sondeo, una vez el ancla recibe este mensaje envía el mensaje de respuesta. Al recibir este mensaje el TAG, podemos decir que ya están 'asociadas' y comienza la transmisión de datos (como hemos explicado en la sección anterior).

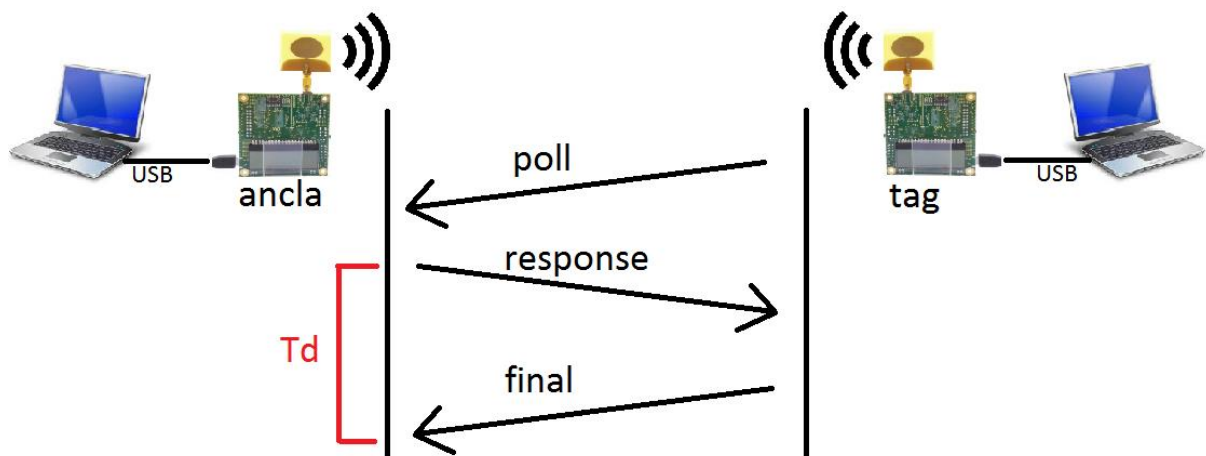


Ilustración 3-vi. Intercambio de datos.

El TAG envía el mensaje final con los datos de transmisión y recepción, la respuesta anterior del ANCLA y el mensaje en sí. Este mensaje es utilizado por el ANCLA junto a sus propios datos de transmisión y recepción para calcular el tiempo de ida y vuelta en la comunicación.

La distancia se determina simplemente multiplicando el tiempo por la velocidad de la luz.

El ANCLA utiliza el mensaje de respuesta para enviar un informe del rango calculado anterior al TAG para que ambos extremos tengan un resultado que se pueda mostrar en la pantalla LCD.

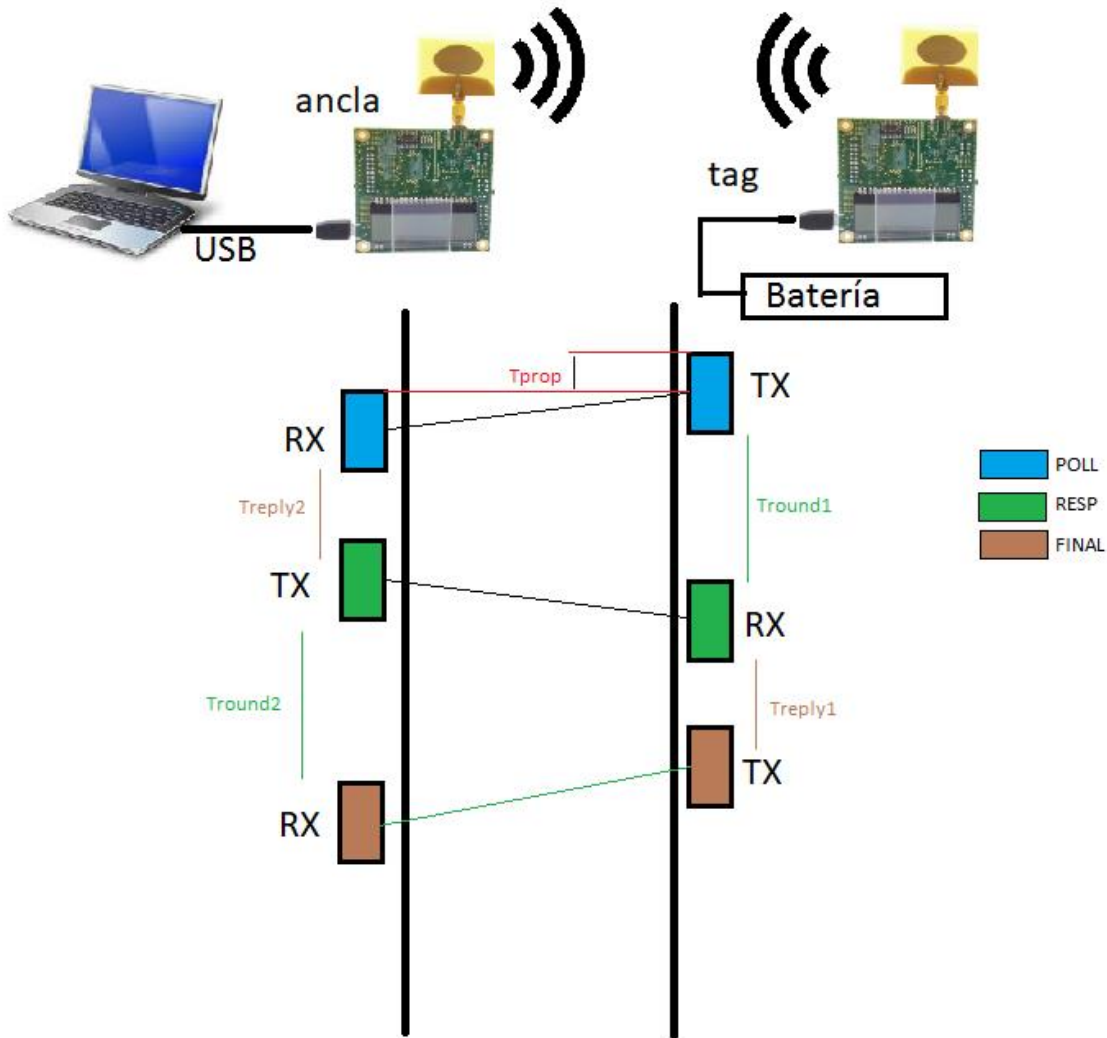


Ilustración 3-vii. Tiempos de propagación.

El software calcula el tiempo de vuelo de un transmisor al otro a partir de los instantes medidos, teniendo en cuenta el protocolo utilizado. En la figura 3-vii vemos el intercambio de tramas junto con sus tiempos de propagación. La fórmula que utiliza el software del fabricante DecaWave es la siguiente:

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

3.4. Funcionamiento de los equipos

Nuestro paquete EKV1000 consta de dos placas EVB1000. Cada una de ellas esta preconfigurada para ejecutar una aplicación de prueba “two-way Ranging”.

Esta aplicación llamada “DecaRanging” controla el DW1000 IC para intercambiar mensajes, calcular el tiempo de vuelo, estimar la distancia entre dos antenas y mostrar el resultado en la propia pantalla del dispositivo. Para realizar experimentos en este modo de operación solo es necesario alimentación.

Llamaremos a este modo de operación “INT-INT”.

Los transmisores pueden activarse opcionalmente vía USB usando el software “DecaRanging”, según lo escrito en la sección 3.2.2 . Alternativamente un Sistema microcontrolador externo puede manejar el DW1000 IC directamente a través de su interfaz SPI disponible

Llamaremos a este método de operación “INT-EXT”.

Además de mostrar las medidas” two-way Ranging” este kit se puede utilizar para evaluar las siguientes características:

- Rango de distancias a las que se pueden situar los transmisores.
- Precisión de las medidas de distancia.
- Espectro de transmisión.
- Consumo de potencia y corriente.
- Inmunidad a multitrayectos.
- Bloqueo de inmunidad.
- Opciones de la antena.

3.4.1 Modo de funcionamiento INT-INT

Cada una de las placas viene con una aplicación de software instalada, EVB1000 ON-BOARD RANGING APPLICATION, esta aplicación controla el IC DW1000 para hacer todo el procedimiento de análisis de medidas de manera automática, mostrando el resultado en la pantalla LCD frontal.

Para operar de este modo, debemos configurar el interruptor S1-3 a ON.

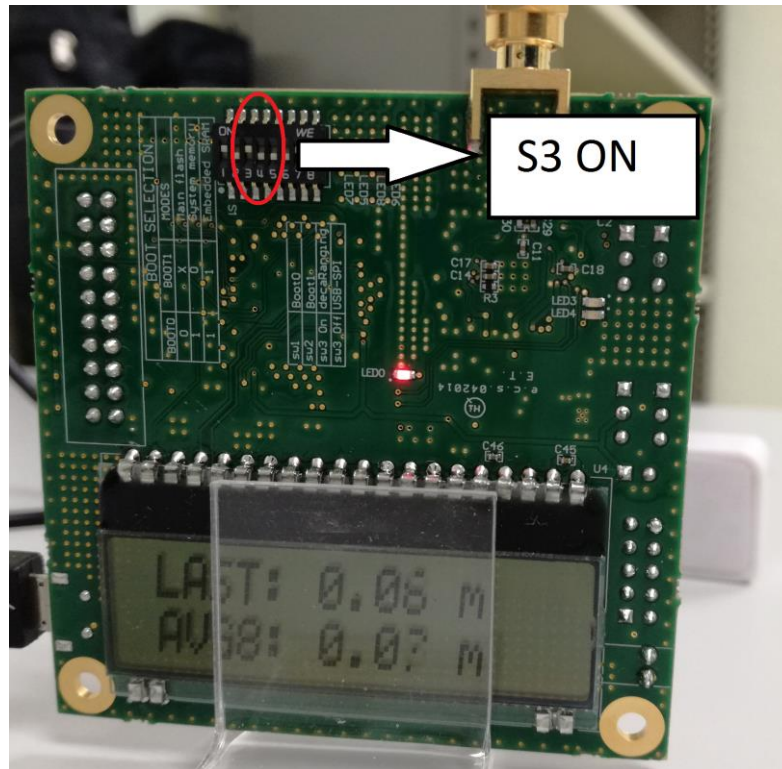


Ilustración 3-viii. Configuración INT-INT.

La aplicación “DecaRanging” requiere que el dispositivo se configure como ancla o como tag. Estos modos se controlan con el interruptor S1-4:

- S1-4 a ON →EVB1000 configurado como “Ancla”
- S1-4 a OFF →EVB1000 configurado como “Tag”

Esta aplicación soporta una gran cantidad de modos, estos modos se usan para demostrar el funcionamiento de DW1000 en aplicaciones de corto alcance y gran velocidad o largo alcance y menos velocidad. Ver el apartado 3.2.1.3 [Ajuste](#)

Por defecto la aplicación trae el modo 3 activado.

Procedimiento a seguir

Una vez configurado el modo de operación, se alimentan los dos dispositivos para encender la placa, el LED 0 se iluminará para indicar que se aplica alimentación.

Las dos unidades se iniciarán y comenzarán a intercambiar mensajes.

El LED 5 se iluminará en el modo anchor y el LED 6 en el modo tag.

A continuación, se muestra el procedimiento de inicialización:

Tag:

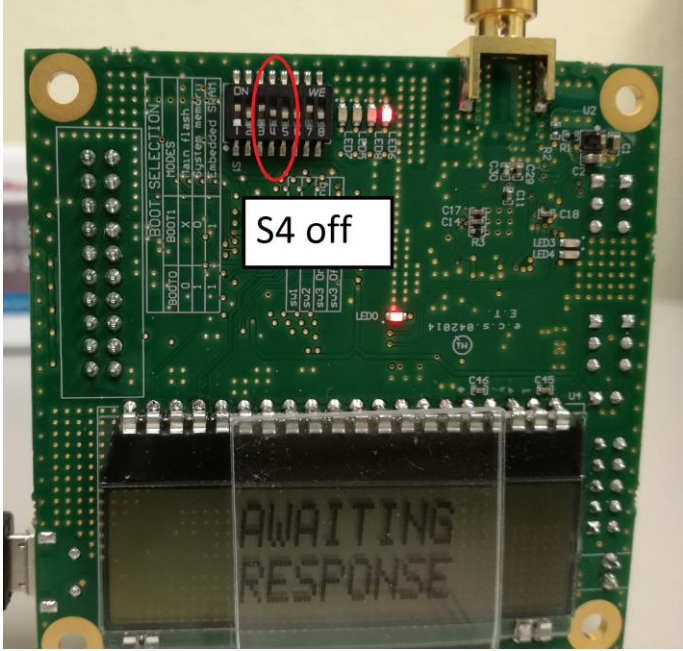


Ilustración 3-ix. Configuración TAG

Ancla:

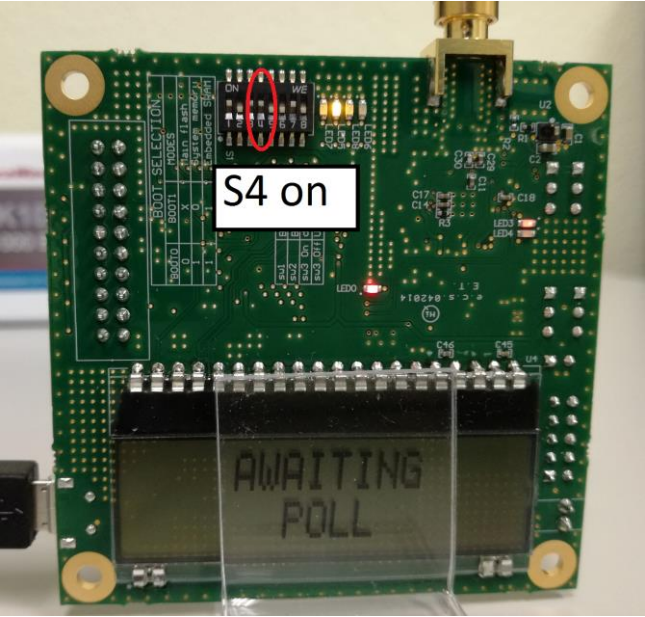


Ilustración 3-x. Configuración ANCLA

Por último, después de unos instantes, la distancia calculada se mostrará en la pantalla:

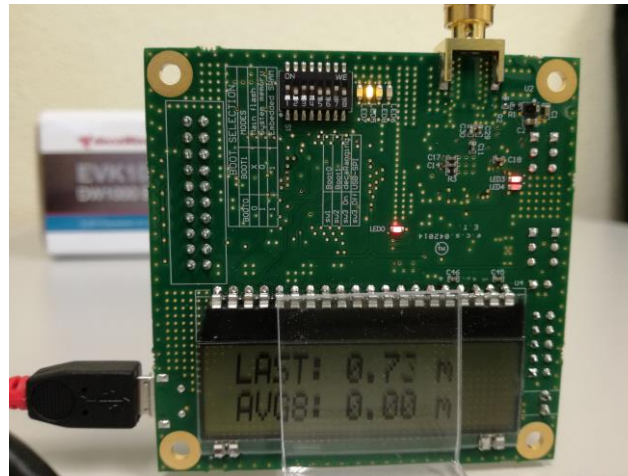


Ilustración 3-xi. Medida de distancia INT-INT.

3.4.2 INT-EXT

EL EVB1000 tiene la opción de configuración que permite a una aplicación externa controlar el DW1000 mediante una conexión USB con la aplicación de PC “DecaRanging” de DecaWave (o cualquier otro software compatible) puede controlar el IC DW1000. Esta aplicación es equivalente a la que viene preprogramada en el microcontrolador ARM EVB1000.

Como el DW1000 es controlado a través de una interfaz SPI, cualquier controlador externo que desee controlar el transceptor DW1000 debe usar SPI para la comunicación directa con el chip.

En este modo de control, la aplicación USB-to-SPI integrada en el dispositivo actúa como un puerto COM virtual esclavo USB, el cual traduce los comandos del puerto COM en las transacciones SPI al DW1000. Para activar la aplicación USB a SPI, EVB1000 necesita que el interruptor S1 S1-3 esté en la posición de apagado. El controlador para PC de Windows está disponible en el sitio web de ST Microelectronics, consulte la Guía del usuario de la aplicación PC DecaRanging para obtener detalles sobre la instalación.

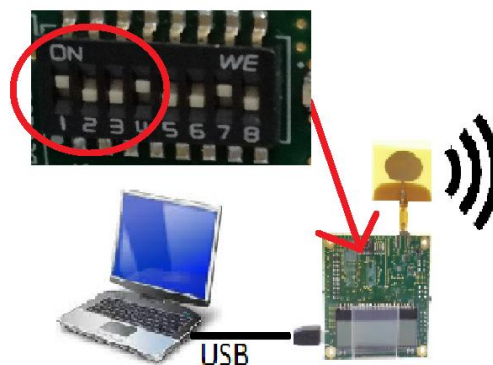


Ilustración 3-xii. Conexión USB

En la pantalla podremos ver lo siguiente:

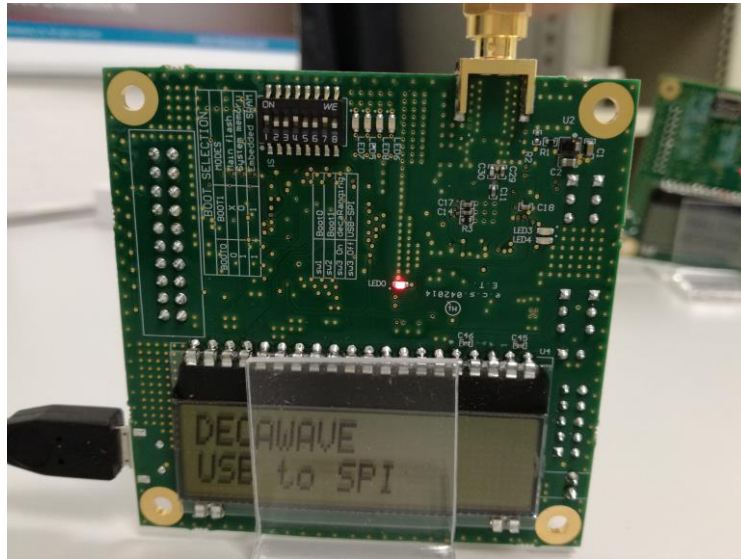


Ilustración 3-xiii. Indicador de conexión USB.

Opciones disponibles:

1. Uso de la aplicación externa para controlar ambas unidades EVB1000:



Ilustración 3-xiv. Situación con dos aplicaciones de PC.

2. Uso de la aplicación externa para controlar una de las dos unidades EVB1000.

En esta segunda configuración, uno de los dos EVB1000 ejecuta la aplicación "DecaRanging" desde el microcontrolador ARM integrado, mientras que el otro EVB1000 se controla desde un PC que tiene instalado "DecaRanging".



Ilustración 3-xv. Situación con una aplicación de PC.

3.4.3 Configuración de parámetros

En este apartado vamos a ver las diferentes formas de configurar nuestro equipo.

En interiores el rango aumenta en comparación con el espacio libre, ya que las reflexiones de trayectorias múltiples dan señal adicional al receptor.

Podemos distinguir dos formas de propagación, LOS y NLOS:

- LOS (Line of sight) → propagación en espacio libre con visión directa.
- NLOS (Non Line of sight) → Propagación en espacio libre con visión no directa (parcial o completamente obstruida).

El rango operacional depende de tres factores principalmente:

1. Tasa de datos de la trama.
2. Longitud del preámbulo.
3. Frecuencia central del canal y ancho de banda.

A continuación, vamos a explicar las diferencias de comportamiento según como ajustemos nuestro sistema.

3.4.3.1 Tasa de datos de la trama

- **TASA DE DATOS:** Las velocidades de datos más bajas tienen un rango mayor que las velocidades de datos más altas, por lo que para maximizar el rango debe seleccionarse la **velocidad de datos más baja (110 kbps)**.

A menor tasa de datos, mayor precisión y rango de operación.

3.4.3.2 Preámbulo

Primero definiremos el preámbulo, el cual no es más que una secuencia repetida de pulsos que sigue un patrón definido según la IEEE 802.15.4.

Los dispositivos en el mismo canal físico usando distintos códigos de preámbulo operan simultáneamente como si fueran canales separados.

- **LONGITUD DEL PREAMBULO:** En términos generales, la operación de largo alcance requiere una longitud de preámbulo larga para dar al receptor el mayor tiempo posible para "entrenar" a la señal entrante. La longitud del preámbulo debe seleccionarse conjuntamente con la velocidad de datos. No tiene sentido utilizar un preámbulo muy largo con una velocidad de datos rápida a largo alcance porque el receptor no podrá recibir los datos independientemente de la longitud del preámbulo. Sin embargo, a velocidades de datos lentas, los preámbulos más largos dan un aumento en el rango operativo. Para maximizar el alcance, debe elegirse una velocidad de datos lenta en conjunción con un **preámbulo largo (2048)**.

3.4.3.3 Canal y ancho de banda

Es importante resaltar que en cada región se aplica un reglamento distinto, por lo que deberíamos revisar la norma antes de operar.

IEEE 802.15.4 UWB PHY define los canales de 0 a 10 GHz, además debemos tener en cuenta que los canales pueden tener la misma frecuencia central pero diferente ancho de banda.

- **FRECUENCIA CENTRAL DEL CANAL:** A mayor frecuencia central, menos rango operacional, como ya sabemos, a menor frecuencia, las comunicaciones sufren menos. De ese modo, las frecuencias más bajas se propagan más lejos que las frecuencias más altas. Finalmente concluimos, para maximizar el rango debe seleccionarse **la frecuencia de canal más baja posible (Canal 1: 3,5 GHz)**.
- **ANCHO DE BANDA DEL CANAL:** Un ancho de banda de canal más amplio, permite que se transmita más energía al canal que un ancho de banda más estrecho. Para maximizar el rango se debe usar el **ancho de banda del canal más ancho**. En realidad, en el DW1000, debido a que el primer canal de banda ancha está a 4 GHz y el canal de frecuencia más baja está a 3,5 GHz, el beneficio debido al aumento de ancho de banda a 4 GHz es compensado por la mayor frecuencia central, y los mejores resultados se consiguen en el **canal 1**.

3.4.3.4 PRF

- **PRF:** La frecuencia de repetición de impulsos tiene un impacto muy pequeño, en el rango de las comunicaciones, una PRF de **64 MHz** da un rendimiento algo mejor que 16 MHz.

El EVK1000 viene preconfigurado al modo 3. Este es el modo de operación preprogramado con el rango más largo. Utiliza el canal preprogramado de frecuencia más baja (canal 2), la velocidad de transmisión de datos más lenta (110 kbps) y el preámbulo preprogramado más largo (1024).

Por defecto, solo los modos 3 y 5 están calibrados de fábrica. Usaremos estos dos métodos para la realización de nuestros experimentos. Para ver más, consultar el apartado 3.5.2 [Parámetros y situación](#). Por tanto, en nuestro Proyecto, las pruebas se han realizado con los **modos de operación 3 y 5**.

3.5. Laboratorio

3.5.1 Introducción

En esta sección explicaremos con más detalle la colocación de cada equipo:

En la figura 3-v podemos ver la situación explicada anteriormente “INT-EXT”, recordamos que consiste en un transmisor conectado a un ordenador en el que se ejecutaba el software Decaranging y otro transmisor que utiliza internamente una aplicación de software instalada, EVB1000 ON-BOARD RANGING APPLICATION, esta aplicación controla el IC DW1000 para hacer todo el procedimiento de análisis de medidas de manera automática, mostrando el resultado en la pantalla LCD frontal.

Las tomas de datos que hemos utilizado en los posteriores análisis se han realizado en esta situación.



Ilustración 3-xvi. Situación ilustrativa.

A continuación, vemos en la foto de la figura 3-xvii la situación real ilustrada en la figura anterior 3-xvi.

En la foto podemos ver un portátil con el software del fabricante DecaWave corriendo, conectado vía USB a un transmisor UWB. Al otro lado de la mesa, en la parte inferior derecha, tenemos el otro transmisor UWB conectado a una batería.

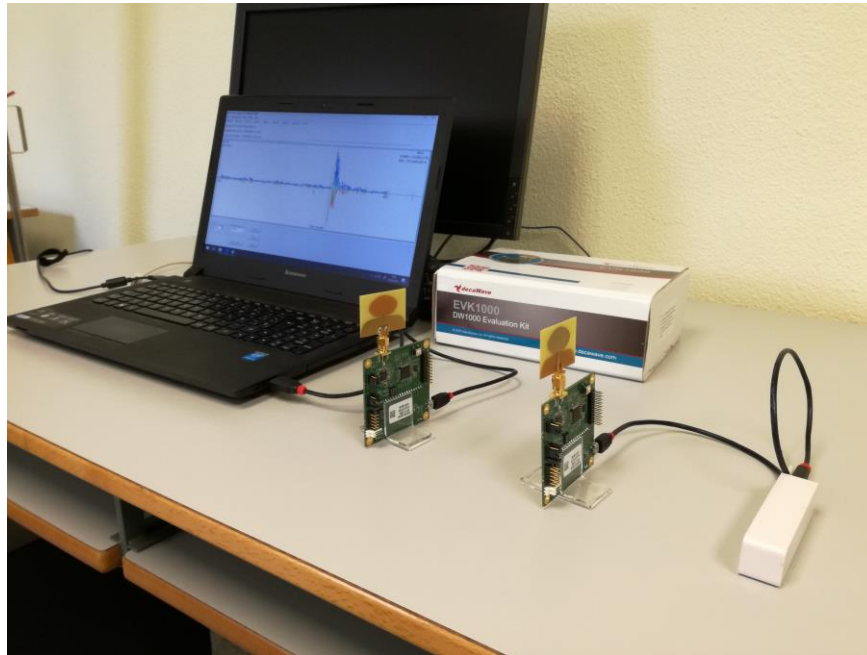


Ilustración 3-xvii. Situación real.

3.5.2 Parámetros y situación

Es importante describir los parámetros que se han configurado y la situación.

Las medidas de distancia se han realizado siempre dentro de la ETSI, en concreto en 3 situaciones distintas:

- Pasillo E2 que conecta el departamento de Ingeniería de sistemas y automática.
- Pasillo central del departamento de Teoría de la señal y comunicaciones.
- Sala de investigadores del anterior departamento.

Y los experimentos han sido los siguientes:

3.5.2.1 Medidas de larga distancia (1m – 60m):

Estas medidas fueron realizadas en intervalos de un metro, en el pasillo de la planta E2.

Se usó como ancla un nodo configurado como tal y conectado a un ordenador en el que se ejecutaba el software Decaranging. El funcionamiento fue INT-EXT.

En el otro extremo se colocó un nodo conectado a una batería, configurado con el rol TAG y el cual se iba alejando en línea recta.

Ambos nodos fueron colocados con un taburete como base y usando el modo de operación 5.

3.5.2.2 Medidas de media distancia (1m – 25m):

Estas medidas fueron realizadas en intervalos de un metro, en el pasillo central del departamento de Teoría de la señal y comunicaciones.

Se usó como ancla un nodo configurado como tal y conectado al software “DecaRanging”. El funcionamiento fue INT-EXT.

En el otro extremo se colocó un nodo conectado a una batería, configurado con el rol TAG y el cual se iba alejando en línea recta.

Ambos nodos fueron colocados con un taburete como base y usando el modo de operación 5.

3.5.2.3 Medidas de corto alcance (1m-5m):

Estas medidas fueron realizadas en intervalos de 50 cm, en la sala de investigadores del departamento de Teoría de la señal y comunicaciones.

En esta habitación se realizaron la mayoría de los experimentos, podemos distinguir las siguientes situaciones:

- INT-INT: se realizaron una serie de medidas sin ningún tipo de software externo, únicamente con los dos nodos conectados a sus respectivas baterías, en este caso se usó el modo de operación 3.
- INT-EXT: en uno de los nodos se usó la aplicación de software “DecaRanging” configurado como ancla, esta toma de medidas es similar a las de media y larga distancia.
- INT-INT y INT-EXT con obstáculos: en esta situación se usaron como obstáculos el armario y la estantería metálica que había en dicha habitación, también se usaron las paredes que las componen, situando los nodos en diferentes posiciones, como analizamos en el capítulo 6 [Obstáculos](#)

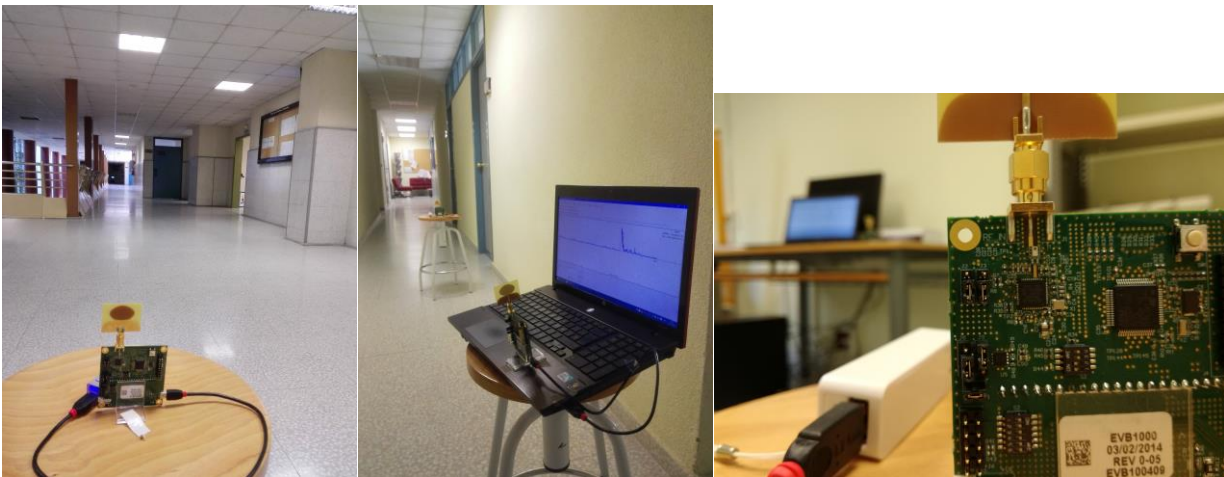


Ilustración 3-xviii. Las tres situaciones distintas, de izquierda a derecha: larga, media y corta distancia.

Todas las medidas INT-INT pueden consultarse en [Apéndice A: Tablas](#) , mientras que las medidas INT-EXT pueden consultarse en los scripts de Matlab [Apéndice C: Ficheros de Matlab](#)

* En el caso de INT-EXT cada media y desviación típica fue obtenida con un mínimo de 50 medidas.

4 MODELO

En esta sección tenemos como objetivo obtener un modelo lo más preciso posible del error de nuestro sistema. Comenzaremos analizando la señal que recibimos en uno de nuestros nodos, a continuación, veremos las distintas fuentes de error que nos afectan y por último vamos a analizar los experimentos realizados para obtener nuestro modelo. Representaremos la media y desviación típica de nuestras medidas y usando la aproximación por mínimos cuadrados definiremos nuestro modelo de la distancia medida. Por último, describiremos un modelo alternativo modelando el error.

4.1. Introducción

En este capítulo, gracias a las mediciones realizadas en el laboratorio y a una serie de scripts de Matlab, vamos a modelar la distancia medida de nuestro sistema UWB.

Con el fin de determinar con precisión las prestaciones de nuestro sistema de medida de distancia basado en DW1000 es necesario adoptar un enfoque sistemático para la evaluación y posterior análisis de los datos.

El proceso seguido es colocar los dos nodos (uno de ellos configurado como ancla y otro como tag) a una distancia física conocida, tomar varias mediciones y calcular la media y la desviación estándar de los valores medidos.

Este proceso se puede repetir para tantas distancias físicas como sean requeridas para la aplicación deseada. En nuestro caso las pruebas han sido realizadas con **visión directa**.

En esta sección se han utilizado los siguientes scripts de Matlab (los podemos encontrar en el Capítulo 10): [signalUWB.m](#) [distribucionNormalDefinitiva.m](#) [minimosCuadrados.m](#) [medidasDeDistancia.m](#)

4.2. Análisis de la señal recibida

Un sistema LTI queda completamente caracterizado por su respuesta a impulso, ya que cualquier señal se puede descomponer en suma de impulsos, basta conocer esta respuesta para conocer la respuesta a cualquier señal. [13]

A continuación, vemos una imagen (4-i) obtenida con Matlab, en ella se representa la respuesta impulsiva del canal para una posición concreta de nuestros transmisores UWB, en concreto, esta señal proviene de un nodo configurado como ANCLA, en el modo de operación 5 y con línea de visión directa con el TAG objetivo.

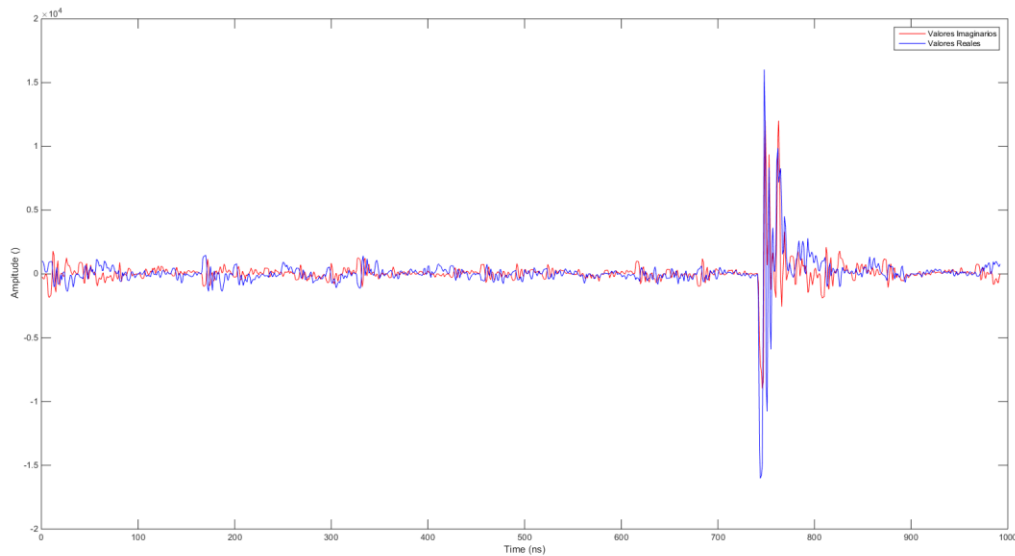


Ilustración 4-i. Extracto de señal recibida

Si hacemos zoom y aplicamos la fórmula $Magnitud = \sqrt{\text{valorReal}^2 + \text{valorImaginario}^2}$ podemos representar la señal para un análisis más profundo:

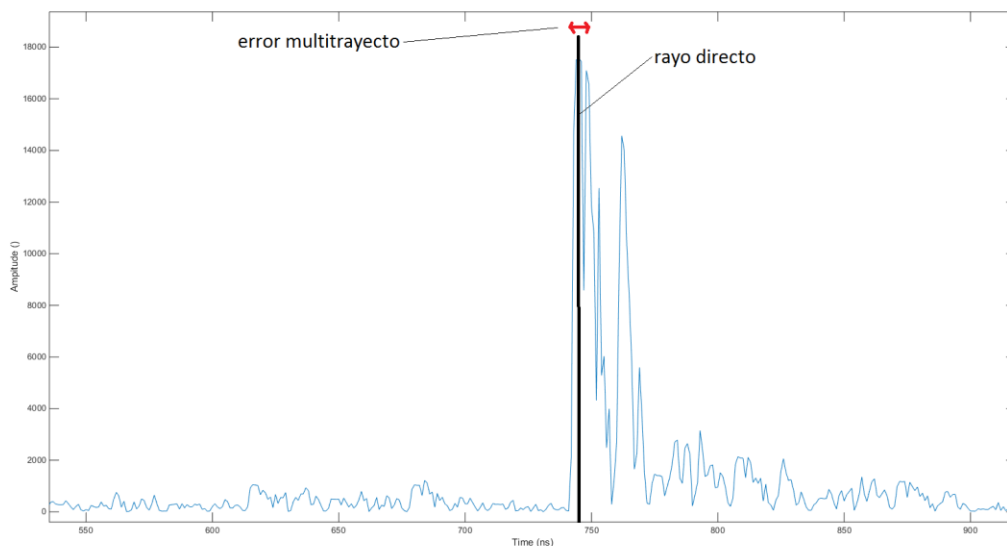


Ilustración 4-ii. Respuesta impulsiva en magnitud.

Como vemos en la figura 4-ii, claramente estamos en una situación de visión directa, sin apenas obstáculos, ya que el rayo directo corresponde con el primer rayo por encima del umbral que recibe nuestra ANCLA. A la derecha de nuestro rayo directo, vemos todos los rayos que han llegado reflejados, ya que tienen un retardo mayor que el camino directo.

Ambas figuras son obtenidas mediante el script [signalUWB.m](#), el cual usa los datos del log de decaWave. Para activar el log ver el apartado 9.2: [Uso](#)

4.3. Fuentes de error

En este apartado vamos a definir las principales fuentes de error que afectan a nuestro sistema. [21] [22] [5] [10] [25] [7] [8] [2]

❖ Ruido térmico

Afecta a SNR, determina el error fundamental.

❖ Desvanecimiento multitrayecto

La dispersión multi-trayecto siempre existe, resultado de la interferencia constructiva y destructiva de las diferentes trayectorias. En el apartado anterior, podemos ver una imagen donde aparece este efecto. (Ilustración 4 ii. Respuesta impulsiva en magnitud).

❖ Bloqueo en el rayo directo

Cuando hay obstáculos bloqueando totalmente el rayo directo, las únicas señales recibidas son reflexiones, por lo que las medidas resultantes son incorrectas, aumentando el retardo de la señal y en consecuencia aumentando la distancia calculada entre los dos nodos (suele ser un error positivo). Para ver más, consultar el apartado 6.3 [Obstrucción total del rayo directo](#)

❖ Rayo directo con retardo en exceso

Si los obstáculos no bloquean totalmente el rayo directo, dependiendo de los materiales que atraviese, el tiempo de propagación varía, lo que supone una componente de error en la medida.

(la medida siempre va a tener cierto error). Consultar el apartado 6.2 [Obstrucción parcial del rayo directo](#)

4.4. Histograma

Una vez realizados todos los experimentos, es el momento de analizar nuestros resultados.

Hemos usado la siguiente bibliografía, además de la citada en el texto de este apartado: [26] [27] [28]

En este caso no partimos de las situaciones descritas en el apartado 3.5.2 [Parámetros y situación](#); para analizar un histograma, necesitamos el máximo número de muestras posibles a una distancia fija.

Por tanto, para esta sección, hemos usado el software de decaWave para almacenar los logs en cada distancia, esperando aproximadamente cinco minutos en cada posición. En el apartado 9.2.2 [Exportar datos con Matlab](#) se explica el proceso para obtener los datos en Matlab.

Una vez tenemos exportados los ficheros, representamos el histograma de las medidas de distancia en cada posición mediante nuestro script [distribucionNormalDefinitiva.m](#), obteniendo lo siguiente:

En la Ilustración 4-iii se representa el histograma de las medidas de distancia para diferentes casos de distancia real. Todos los casos se corresponden con línea de visión directa excepto los dos últimos.

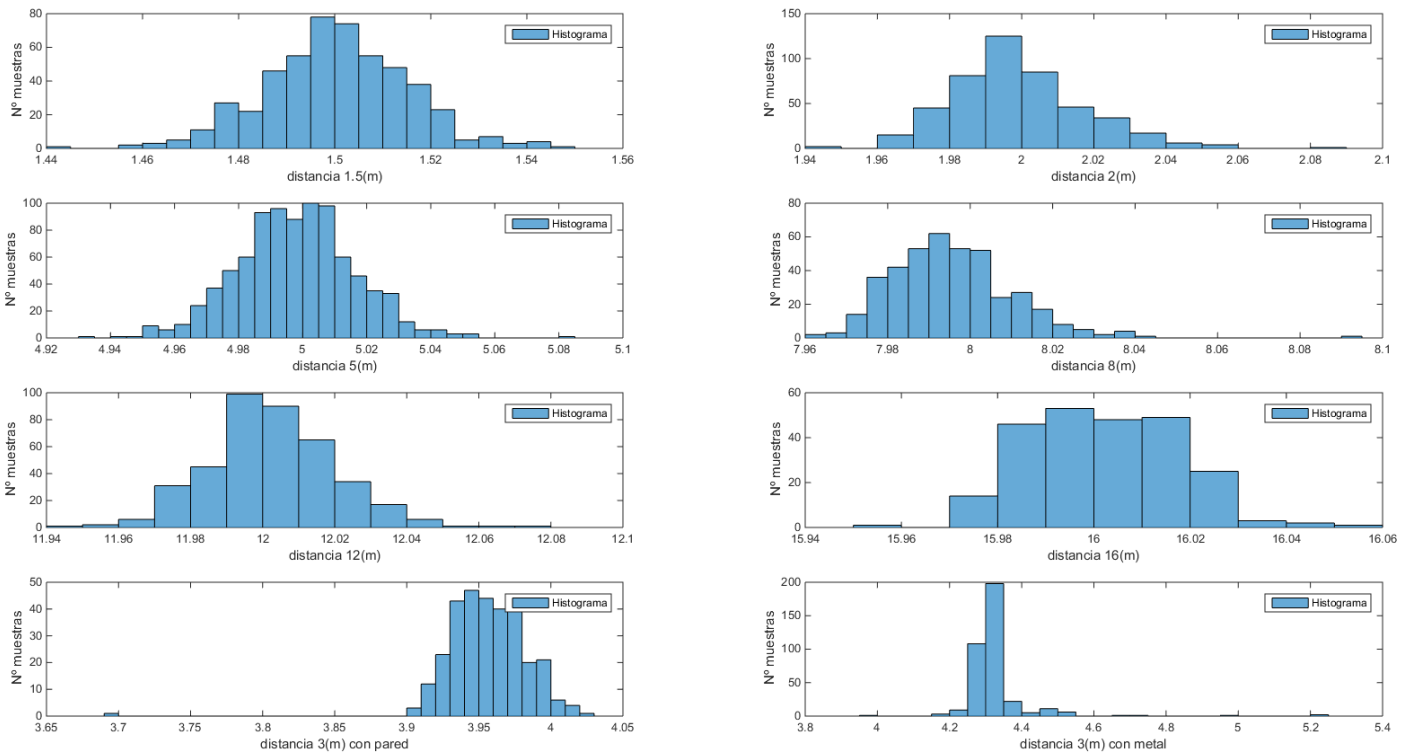


Ilustración 4-iii. Histograma de las medidas de distancia

De la gráfica anterior podemos sacar las siguientes conclusiones:

- Para el caso LOS (línea de visión directa), vemos que el histograma de las medidas de distancia tiene forma aproximada de la famosa *Campana de Gauss* (ilustrada en la figura 4-vi), esta campana sale centrada aproximadamente en la distancia real, por lo que el error es una Gaussiana de media cercana a cero.
- Para la situación de NLOS (línea de visión no directa), aunque se pudiera representar con una Gaussiana para cada posición particular, el sesgo en cada posición particular será diferente ya que depende de la posición de los obstáculos. Entonces, cuando se unen los resultados de distintas posiciones para obtener un modelo global, sale un histograma que no sigue una campana de Gauss. [29] [29] [30]

Gaussian Curve

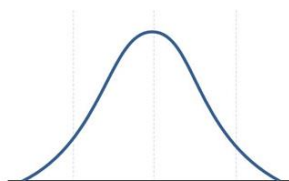


Ilustración 4-iv. Curva Gaussiana

A continuación, representamos el histograma anterior de las medidas de distancia junto a su función de densidad normal, como comentamos anteriormente, el histograma de la media de la distancia tiene forma de la famosa *Campana de Gauss*, por tanto, representamos el histograma con su función de densidad normal para comprobar que, efectivamente, tiene una forma acampanada y es simétrica respecto de un determinado parámetro estadístico (en el caso de visión directa). Esta función se corresponde con una función gaussiana. [31]

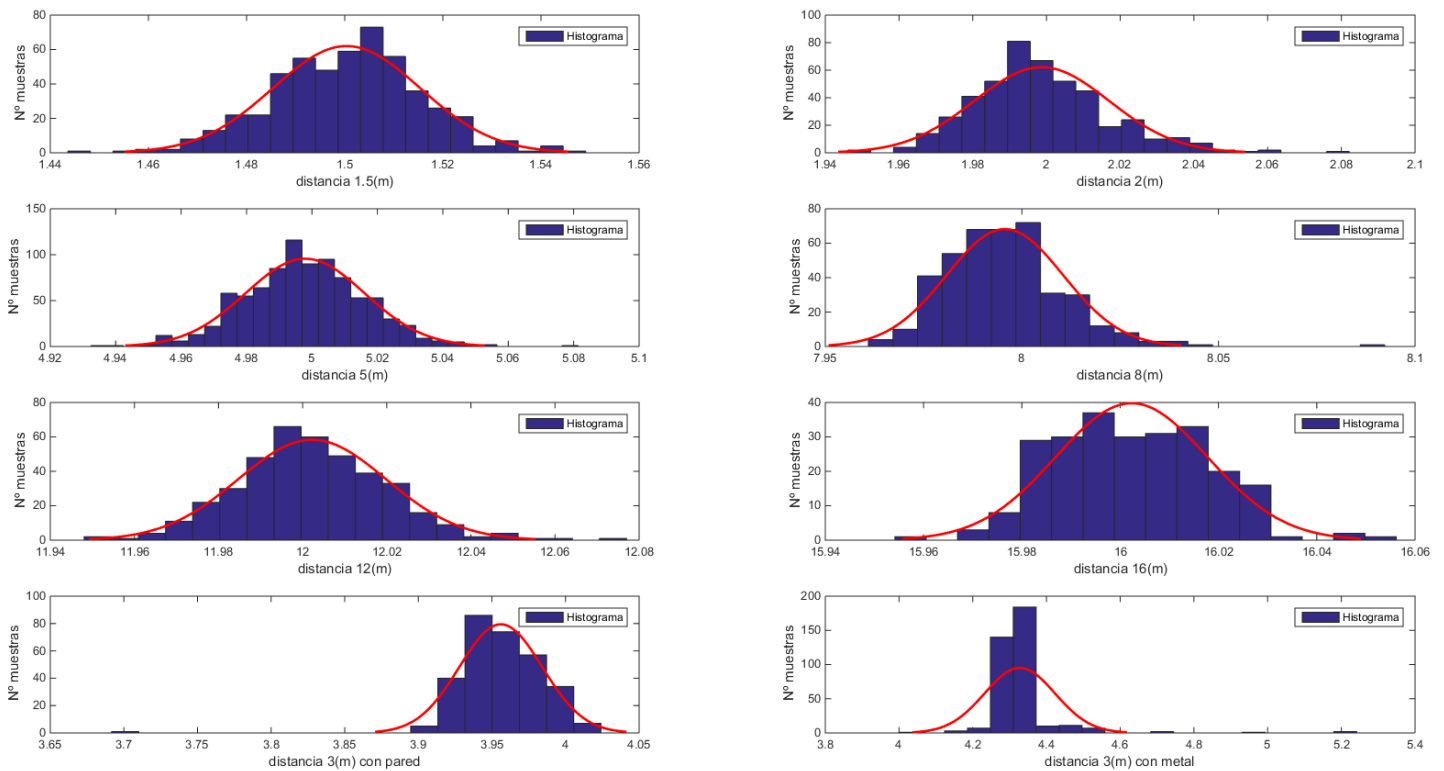


Ilustración 4-v. Histograma con función de densidad normal.

Por último, vamos a representar el histograma de la distribución de la probabilidad, en la figura 4-vi.

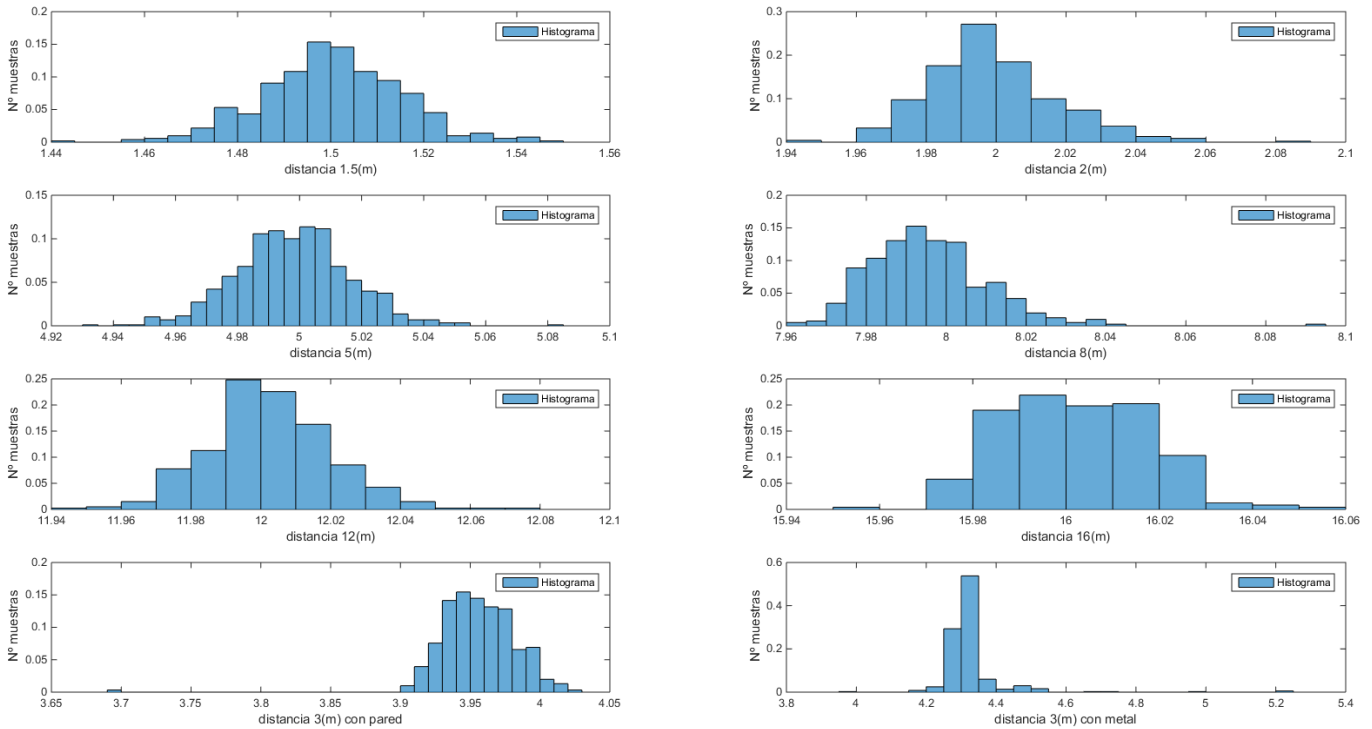


Ilustración 4-vi. Distribución de la probabilidad.

Es importante ver las diferencias entre los resultados con o sin visión directa:

- **Visión directa (LOS)** → se corresponde con las 6 gráficas superiores en las anteriores figuras (4-iii, 4-v y 4-vi), podemos apreciar que el comienzo de la señal puede detectarse con gran precisión, como ya sabemos, en este caso la señal ha sufrido la degradación de todo el canal multirrayecto, como se muestra en las figuras 4-i y 4-ii. Lo que ocurre es que esta degradación no perjudica a la detección del rayo directo y los valores estimados de la distancia varían unos centímetros, tanto a la izquierda como a la derecha de la media, esto quiere decir el histograma es aproximadamente simétrico y podemos modelarlo como una campana de Gauss.

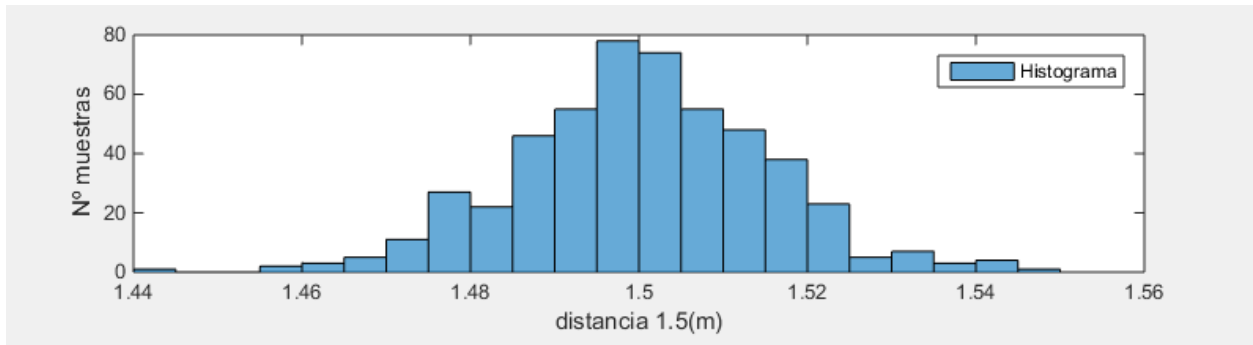


Ilustración 4-vii. Histograma de las medidas de distancia para la situación de visión directa (LOS) en el caso de transmisores a 1.5m.

- Visión no directa (NLOS)** → se corresponde con las dos gráficas inferiores, cuando no tenemos línea de visión directa, la señal sufre un retardo provocado por la obstrucción total o parcial del rayo directo que afecta a la distancia estimada, aumentando el error ya que la distancia estimada tiene un sesgo positivo. A la hora de modelar el histograma, se traduce para cada distancia real considerada en una campana de Gauss que está centrada en un valor distinto de la distancia real, en concreto un valor mayor que la distancia real, consecuencia del sesgo positivo en la estimación.

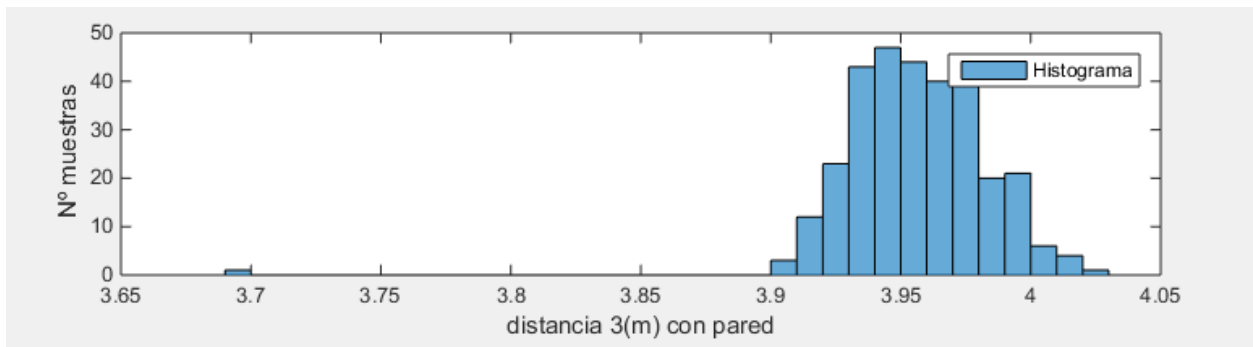


Ilustración 4-viii. Histograma de las medidas de distancia para la situación de visión no directa (NLOS) en el caso de transmisores a 3m de distancia con una pared en medio como obstáculo.

También podemos representar la función de distribución empírica acumulativa, la cual se puede considerar como una función de distribución discreta que asigna probabilidad igual a $1/n$ a cada uno de los n valores. [32]

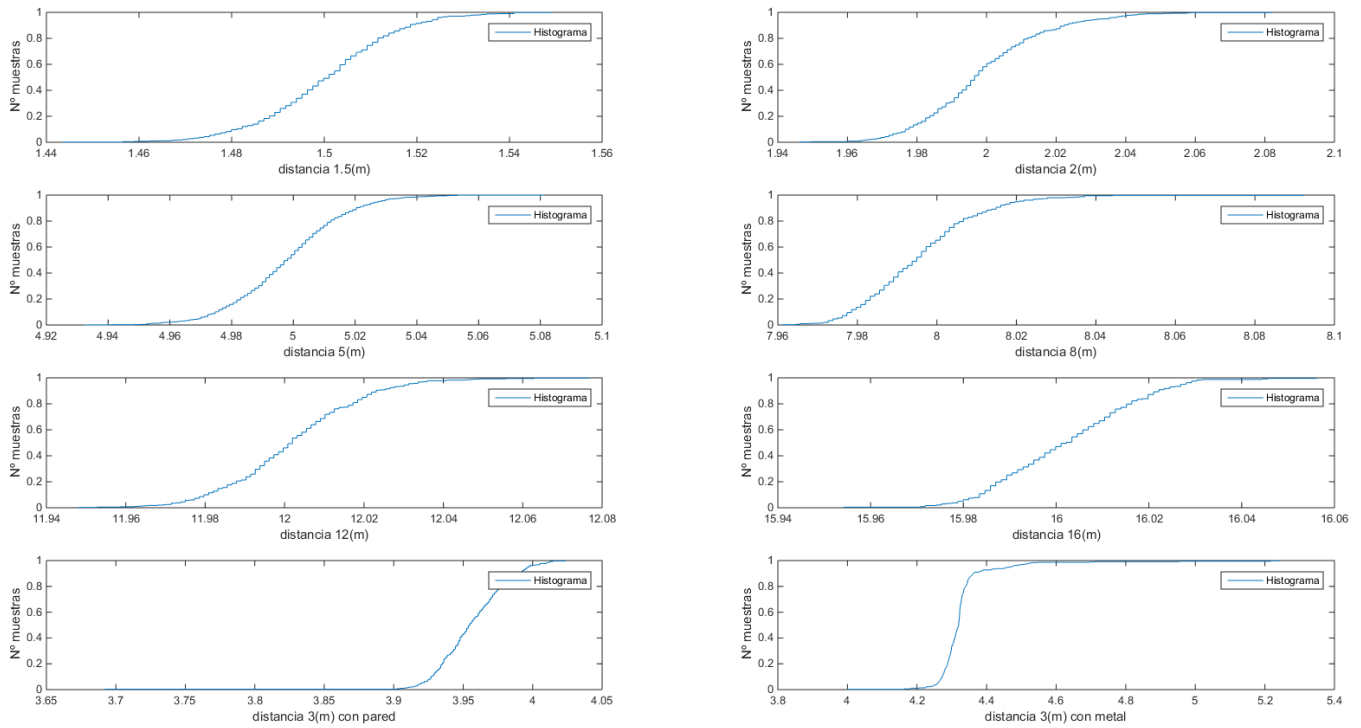


Ilustración 4-ix. ECDF

4.5. Distribución Normal de las medidas de distancia

Comenzamos realizando nuestros experimentos como explicamos anteriormente, usando el software de DecaWave, para cada valor deseado de distancia real guardamos un log con el suficiente número de muestras TX-RX para representar el histograma de las medidas de distancia.

Hemos usado la siguiente bibliografía: [33] [34] [35] [36] [6]

En la siguiente imagen (4-x) tenemos un esquema del proceso seguido hasta ahora.

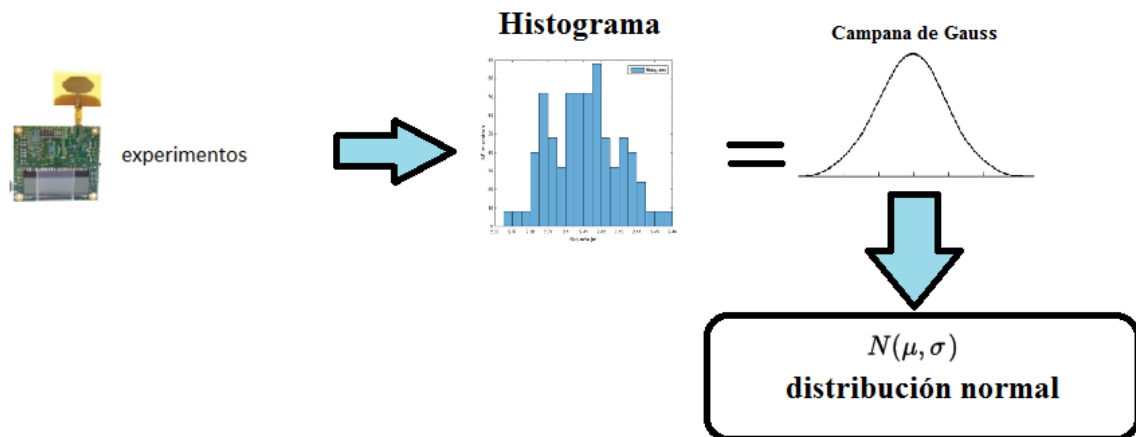


Ilustración 4-x. Proceso seguido para modelar la distancia medida, para una distancia real determinada.

Como vemos en la imagen 4-x, para cada distancia real 'd' podemos modelar nuestra distancia medida como una variable aleatoria que sigue una **distribución normal de media $\mu(d)$ y desviación típica $\sigma(d)$** .

4.5.1 Media de las medidas de distancia

A continuación, se muestra una gráfica de cada situación (ver el apartado 3.5.2 [Parámetros y situación](#)) con los valores medidos y la distancia real, gracias al script de Matlab [minimosCuadrados.m](#) y [medidasDeDistancia.m](#)

1) Distancia corta

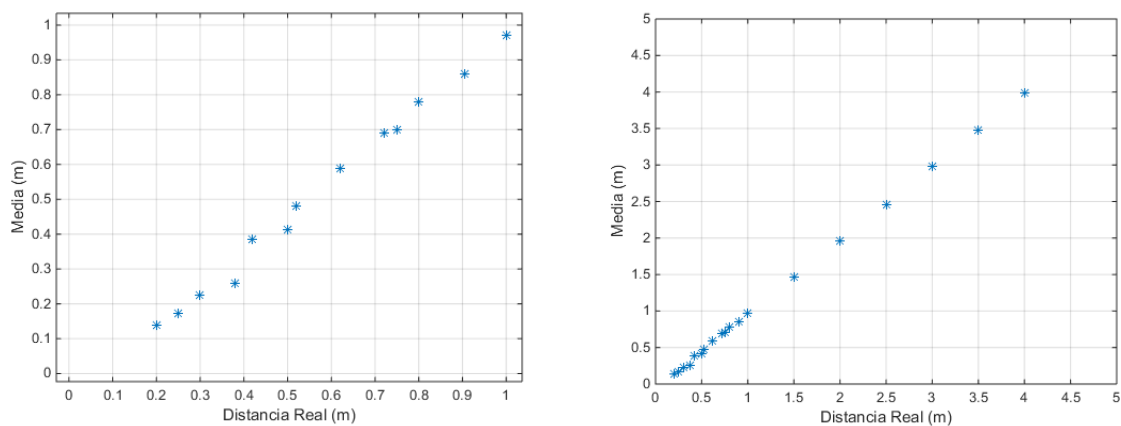


Ilustración 4-xi. Media de las medidas de distancia en función de la distancia real. A la izquierda, Rango 0-1m y a la derecha Rango 0-5m.

2) Distancia media

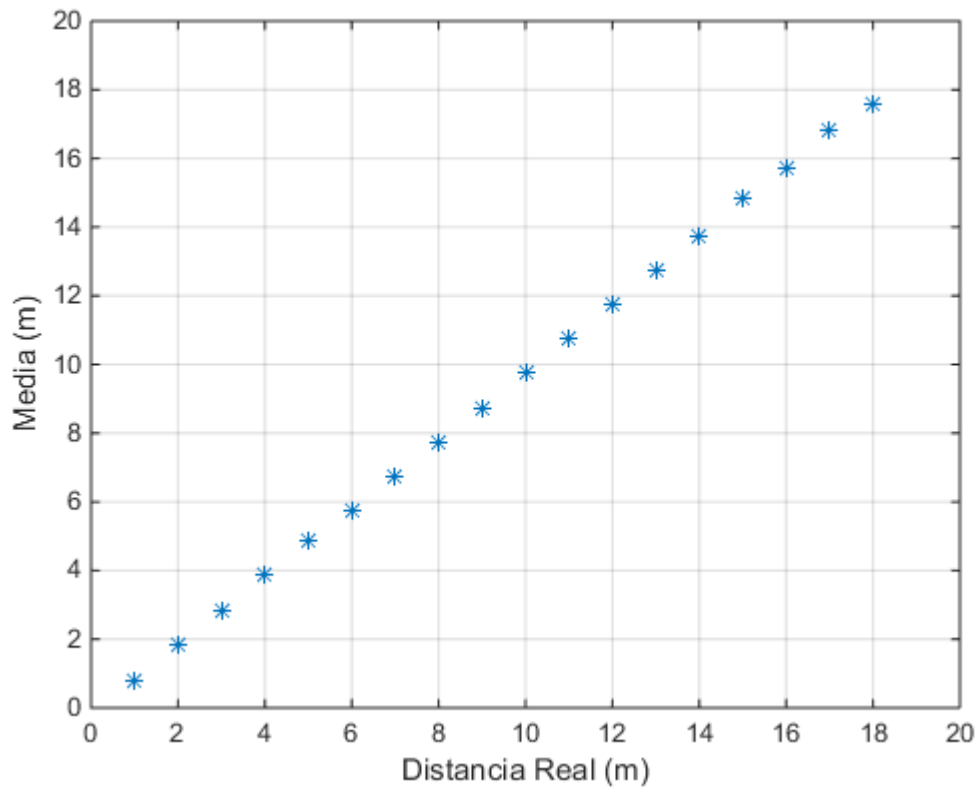


Ilustración 4-xii. Media de las medidas de distancia en función de la distancia real. Rango 0-20m.

3) Distancia larga

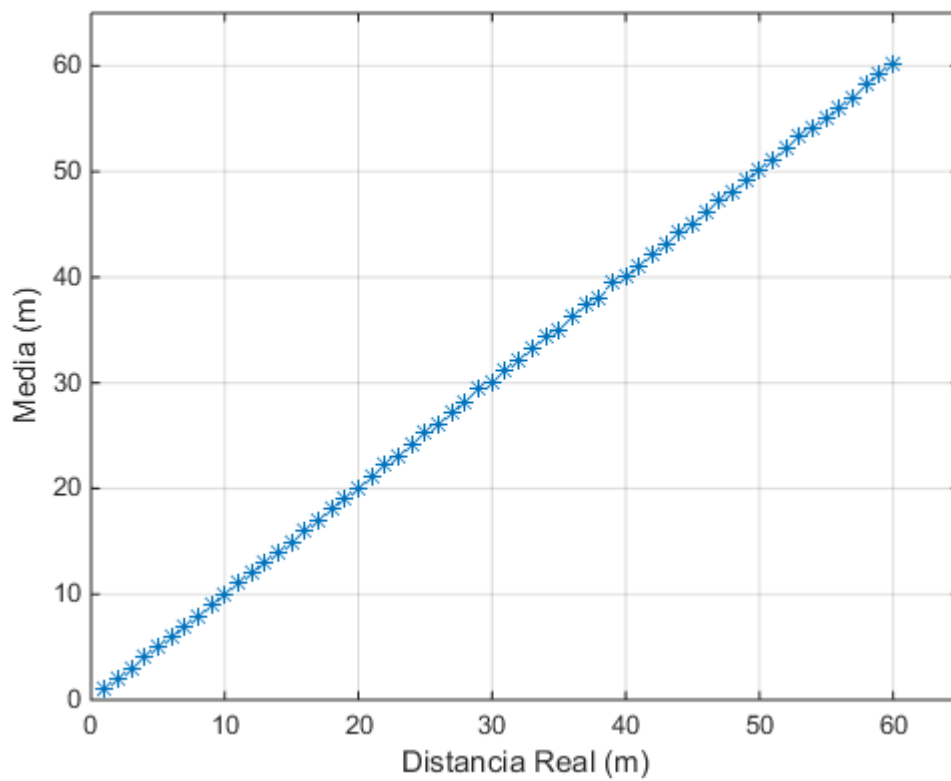


Ilustración 4-xiii. Media de las medidas de distancia en función de la distancia real. Rango 0-60m.

Como vemos en las imágenes 4-xi, 4-xii y 4-xiii, en el primer rango de 0 a 1 m, al acercar mucho los equipos se pierde precisión.

En el momento que nos alejamos más de un metro, la media de **las medidas de distancia** se mantiene prácticamente igual a la distancia real **con un error de varios centímetros** con la medida real. Usando los pasillos de la ETSI, como se detalla en el apartado 3.5.2 [Parámetros y situación](#) hemos llegado hasta los 60m de distancia sin apenas aumentar el error. DecaWave asegura que el rango puede llegar hasta los 250m. A partir de esa distancia el error aumentaría hasta hacerlo inviable.

4.5.2 Desviación típica de las medidas de distancia

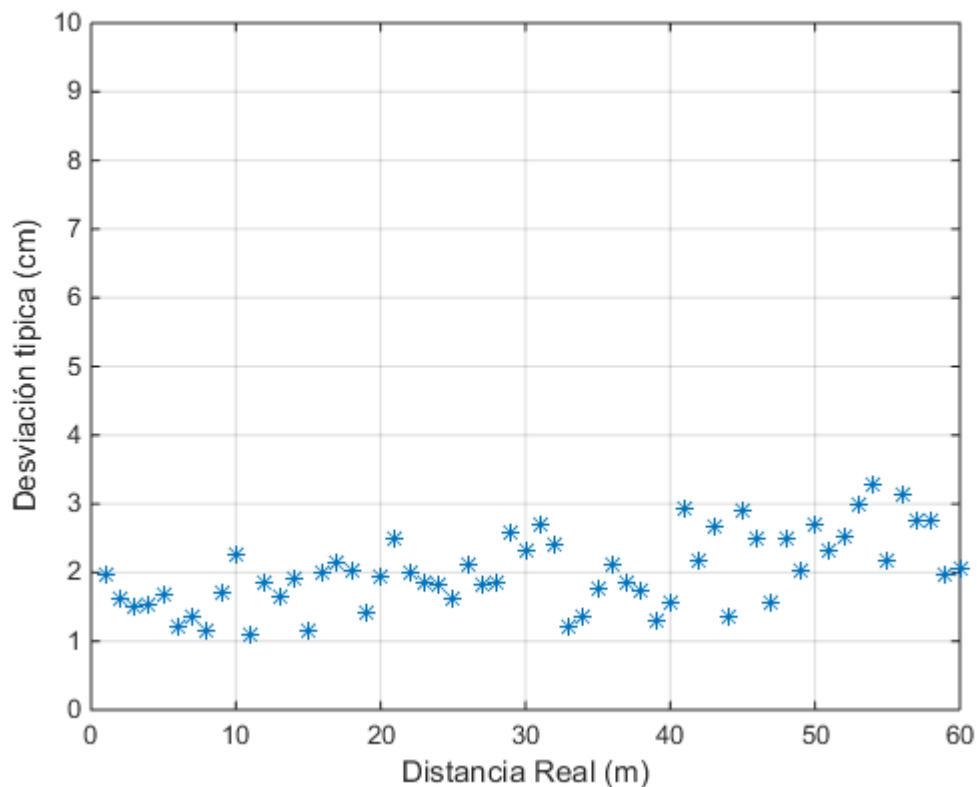


Ilustración 4-xiv. Desviación típica de las medidas de distancia en función de la distancia real.

En la figura 4-xiv se muestra la desviación típica de las medidas de distancia en función de la distancia real. Vemos cómo la desviación típica va aumentando progresivamente, por tanto, vamos a aproximar por mínimos cuadrados para obtener un modelo sencillo de desviación típica.

4.6. Mínimos cuadrados

En este apartado, vamos a aplicar la técnica de mínimos cuadrados para ajustar la media y la desviación típica con el criterio de mínimo error cuadrático. Concretamente vamos a partir de la situación de larga distancia (Ver el apartado 3.5.2.1 [Medidas de larga distancia \(1m – 60m\)](#);) ya que es la situación con mayor rango.

Hemos usado la siguiente bibliografía además de la ya citada en este apartado: [37] [25] [38] [39] [40] [41] [42]

Para aplicar esta técnica hemos usado el script de Matlab [minimosCuadrados.m](#). y hemos empleado la siguiente función de Matlab:

- **polyfit**: $p = \text{polyfit}(x, y, n)$,devuelve los coeficientes de un polinomio $p(x)$ de grado n (en nuestro caso de grado 1) que es un mejor ajuste (mínimos cuadrados) para los datos en y . Los coeficientes p son en potencias descendentes, y la longitud de p es $n+1$.

A continuación, vamos a usar el script de Matlab [medidasDeDistancia.m](#)

4.6.1 Modelo de la media de las medidas de distancia, en función de la distancia real.

Como vemos en la siguiente imagen, la media de las medidas de distancia en función de la distancia real queda aproximada a una línea con pendiente igual a 1, con tan solo unos centímetros de error casi inapreciables en esta gráfica.

En este caso, hemos aplicado mínimos cuadrados a la [situación de larga distancia](#), ya que es la situación a partir de la cual vamos a modelar nuestro error.

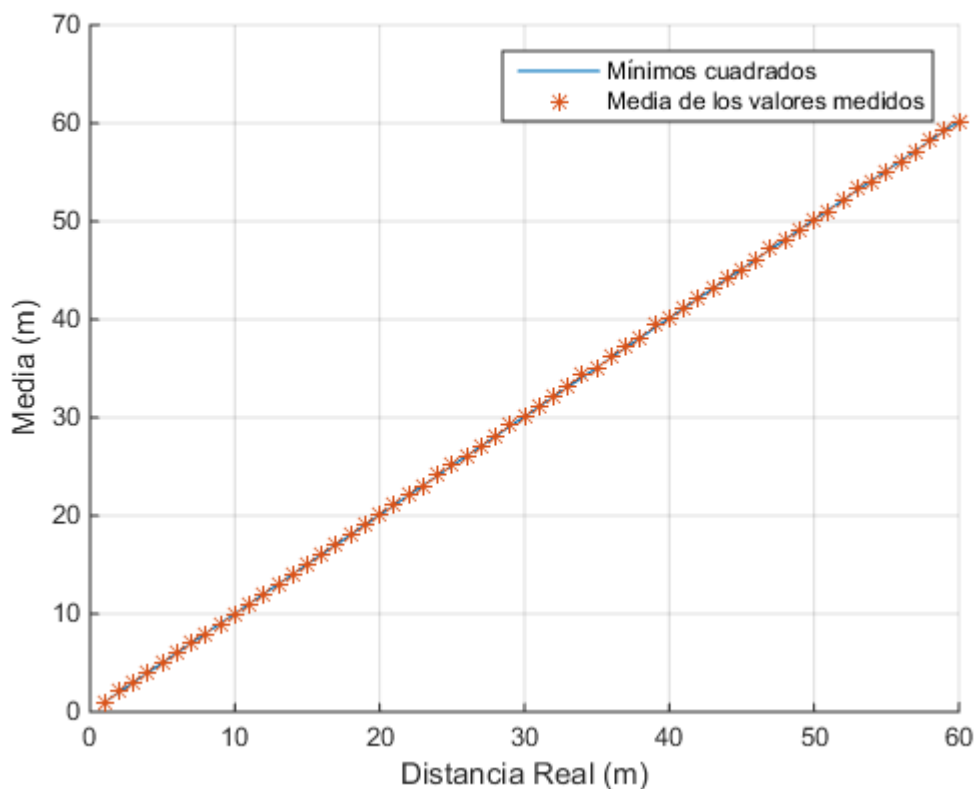


Ilustración 4-xv. Aproximación por mínimos cuadrados de la media de las medidas de distancia, en función de la distancia real.

4.6.2 Modelo de la desviación típica de las medidas de distancia, en función de la distancia real.

Para la desviación típica de las medidas de distancia obtenemos un leve aumento, modelado como lineal, al aumentar la distancia real.

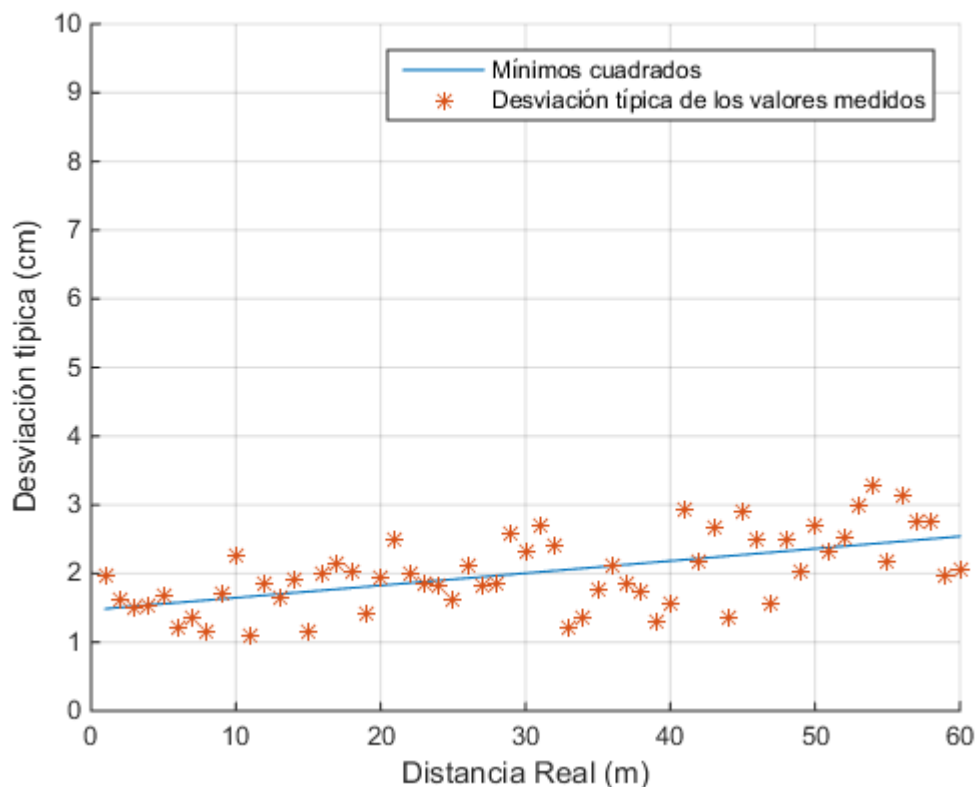


Ilustración 4-xvi. Aproximación por mínimos cuadrados de la desviación típica de las medidas de distancia, en función de la distancia real.

Vemos en la figura 4-xvi que, en 60 m de distancia real, el valor de la desviación típica no llega a superar los 4 cm.

4.6.3 Modelos

Vamos a resumir lo que tenemos hasta aquí, hemos sacado histograma de las medidas de distancia y obtenido la siguiente conclusión: Para el caso LOS (línea de visión directa), vemos que el histograma de las medidas de distancia tiene forma de la famosa *Campana de Gauss*, esta campana sale centrada aproximadamente en la distancia real, por lo que el error puede modelarse como una Gaussiana de media cercana a cero.

A continuación, hemos aplicado el algoritmo de “mínimos cuadrados” a la media y desviación típica en la situación de larga distancia, ya que es en la que más rango tenemos.

En este proyecto se podrían haber seguido dos caminos distintos, dos modelos totalmente compatibles:

- Modelo de la distancia medida, el aplicado en este proyecto, la distancia simulada se modela como una Variable aleatoria que sigue una distribución normal cuyos parámetros dependen de la distancia real:

$$\text{Medida simulada} = \text{Variable aleatoria (distancia real)}$$

- Modelo de error, la distancia simulada se modela como la suma de la distancia real más un error que sigue una distribución normal:

$$\text{Medida simulada} = \text{Medida real} + \text{error aleatorio}$$

Cualesquiera de los dos modelos son válidos a la hora de usar un algoritmo de posicionamiento, como veremos en el capítulo 5 [Sistema de posicionamiento](#)

4.6.3.1 Modelo de distancia medida

A continuación, en la figura 4-xvii podemos ver el proceso seguido desde que realizamos los experimentos hasta finalmente modelar la distancia medida, explicado en el apartado anterior 4.6.3 Modelos.

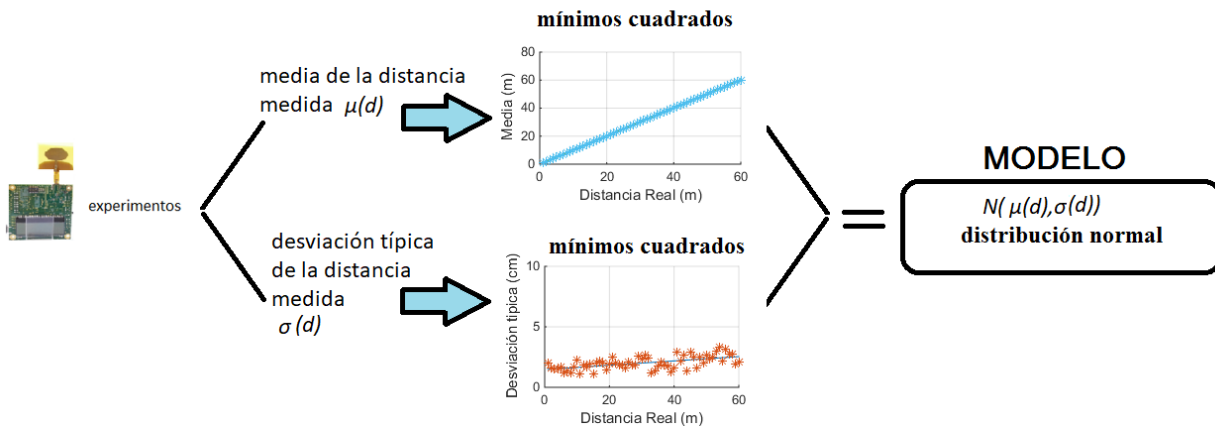


Ilustración 4-xvii. Proceso seguido a partir de los experimentos hasta el modelo de la distancia medida.

El modelo de distancia medida es el modelo que usaremos en los apartados posteriores, básicamente modelamos la distancia medida como una variable aleatoria en función de la distancia real.

$$\text{Medida simulada} = \text{Variable aleatoria (medida real)}.$$

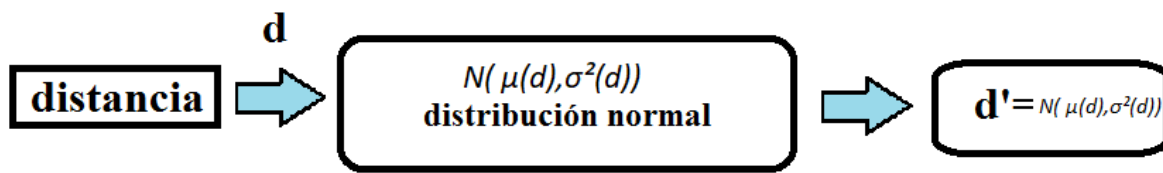


Ilustración 4-xviii. Diagrama de bloques del modelo de la distancia medida.

En la figura 4-xviii vemos el diagrama de bloques correspondiente al modelo de la distancia medida.

5 SISTEMA DE POSICIONAMIENTO

Hay algo que da esplendor a cuanto existe, y es la ilusión de encontrar algo a la vuelta de la esquina.

(Gilbert Keith Chesterton)

En este capítulo vamos a aplicar nuestro modelo de la distancia medida a distintas situaciones reales y simuladas donde intentaremos estimar la posición de un objeto u objetos mediante un algoritmo de localización.

5.1 Introducción

Vamos a diferenciar dos situaciones, en la primera, a partir de medidas reales, le aplicaremos nuestro modelo de distancia para obtener las **medidas simuladas** y posteriormente un algoritmo de localización para obtener la localización aproximada (figura 5-i).

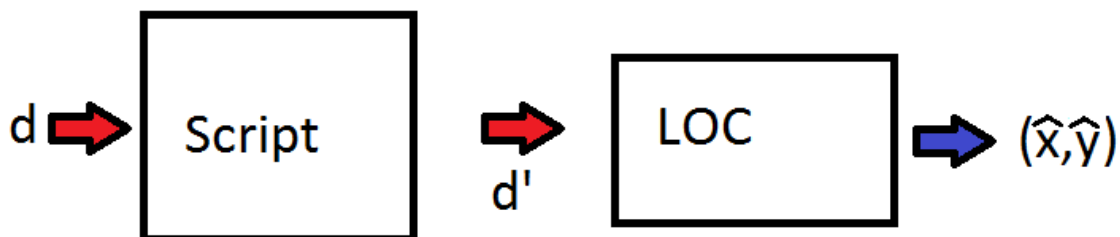


Ilustración 5-i. Diagrama de bloques del proceso de localización usando el modelo de distancia medida.

En la segunda, usaremos **medidas reales** obtenidas mediante el kit de DecaWave a las que le aplicaremos el mismo algoritmo de localización para estimar la localización (figura 5-ii).



Ilustración 5-ii. Diagrama de bloques del proceso de localización usando las medidas reales obtenidas del kit de DecaWave.

Es importante detallar el significado de cada variable, en la siguiente tabla podremos encontrarlos.

Símbolo	Significado	Unidades	Descripción
d	Distancia real	m	Distancia física real entre dos nodos
d'	Medida de distancia	m	Medida simulada mediante nuestro modelo
r	Medida de distancia experimental	m	Medida de distancia que nos proporciona nuestro sistema DW1000 (La distancia que aparece en los LCD de las placas)
(\hat{x}, \hat{y})	Posición estimada	(m,m)	Posición estimada

Tabla 6. Parámetros y definición.

5.2. Algoritmo de localización

Existen cientos de algoritmos y métodos distintos para calcular de forma más o menos precisa la posición de un objeto, en nuestro caso se ha elegido la **trilateración** por simplicidad y rapidez. [43]

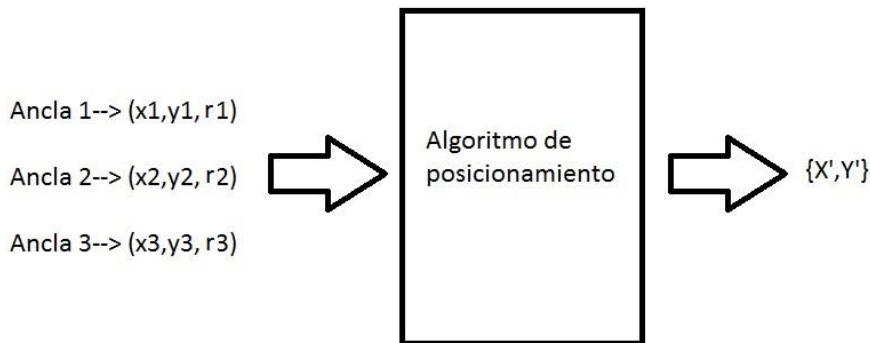


Ilustración 5-iii. Algoritmo de posicionamiento

Como indicamos anteriormente, este método destaca por su simplicidad. Con un mínimo de tres anclas y sus respectivas medidas podemos aproximar la situación de objeto, esto se consigue trazando una circunferencia con radio 'distancia medida' y centro en cada ancla. La región determinada por la intersección de las esferas nos determina la posición estimada. Cuantas más anclas tengamos más precisión obtendremos.

Nuestro algoritmo trabaja en tres dimensiones, encontrando las intersecciones entre las tres esferas, pero proyecta sobre el plano XY para encontrar la solución única al problema

En la siguiente imagen podremos ver un ejemplo en el caso que las medidas fueran perfectas, sin error.

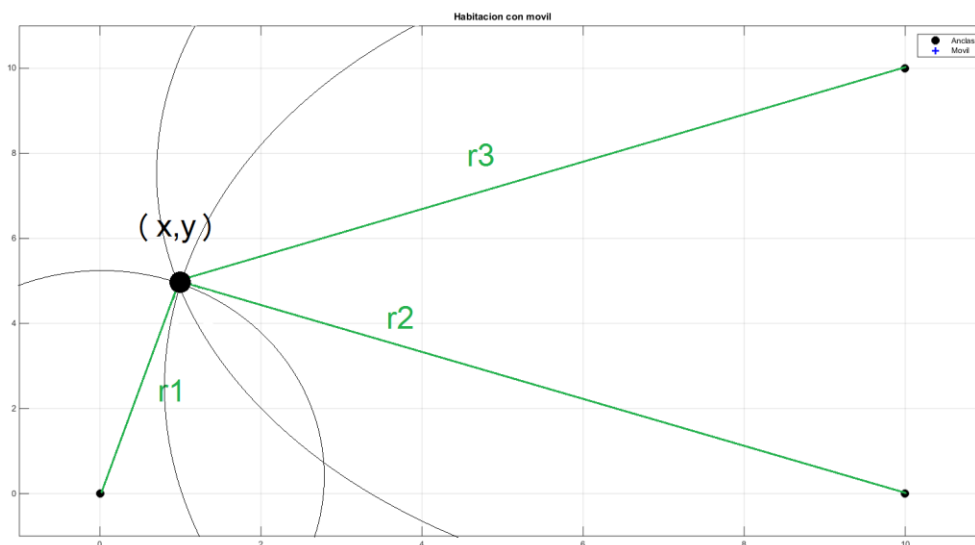


Ilustración 5-iv. Intersección de 3 esferas proyectadas sobre el eje XY con medidas sin error.

5.2.1 Implementación en Matlab

En este apartado vamos a explicar los pasos a seguir para estimar la posición usando la trilateración en Matlab.

Para hallar la posición de nuestro punto objetivo (P a partir de ahora), basta con encontrar la intersección de las tres esferas que forman las 3 anclas.

Estas esferas tienen de radio cada una la medida de distancia que hemos simulado con nuestro modelo.

Comenzamos ubicando nuestras tres anclas en el plano xy.

Como estamos en dos dimensiones, $z=0$.

A continuación, debemos aplicar dos limitaciones al elegir la posición de los ejes para hallar la derivación de la solución del problema de trilateración tridimensional.

Una de las anclas debe estar en el origen y otra en el eje X.

En la siguiente imagen podemos ver la posición de nuestras anclas. Hemos colocado P1 en el origen, P2 en el eje X y por comodidad P3 en el eje Y.

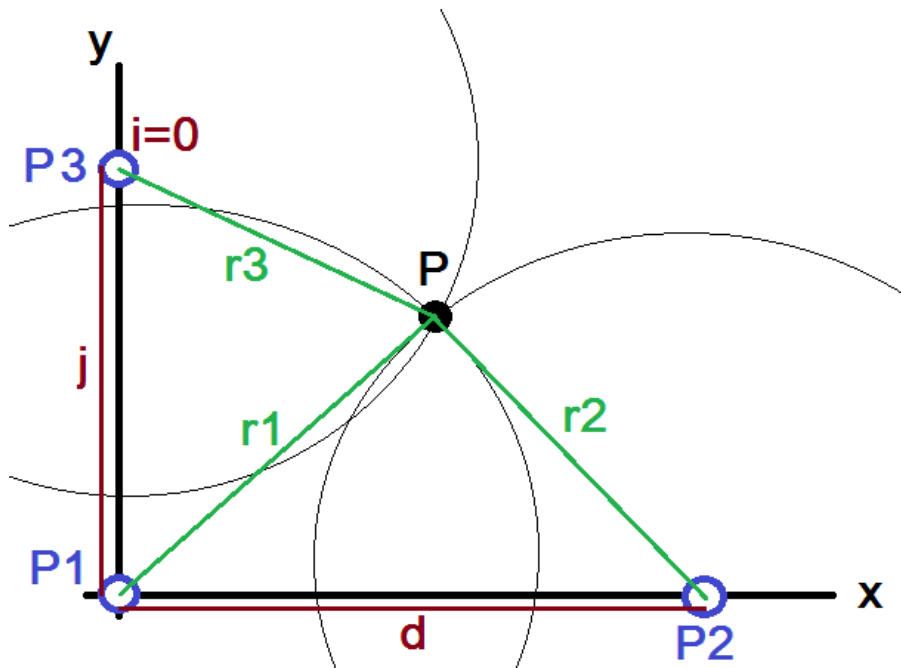


Ilustración 5-v. Situación de las anclas en el plano XY.

Es importante destacar que la posición de las anclas respecto del plano XY puede ser cualquiera, ya que podemos trasladar cualquier conjunto de tres puntos para cumplir con las limitaciones anteriores, encontrar el punto objetivo y luego invertir la traslación para volver al sistema de coordenadas original.

Comenzamos definiendo las ecuaciones de las tres esferas.

$$r_1^2 = x^2 + y^2 + z^2 \quad \text{III}$$

$$r_2^2 = (x - d)^2 + y^2 + z^2 \quad \text{IV}$$

$$r_3^2 = (x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2 \quad \text{V}$$

Para encontrar las intersecciones de la primera y segunda esfera, restamos la primera ecuación (III) menos la segunda (IV):

$$\begin{aligned} r_1^2 - r_2^2 &= x^2 - (x^2 + d^2 - 2xd) \\ r_1^2 - r_2^2 &= -d^2 + 2xd \end{aligned}$$

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad \text{VI}$$

Sustituyendo en cualquiera de las dos primeras ecuaciones obtenemos la intersección de ellas.

Sustituimos en la primera por simplicidad (III):

$$r_1^2 = \left(\frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}\right)^2 + y^2 + z^2 \quad \text{VII}$$

Ya tenemos dos posibles puntos objetivos, usamos la tercera ecuación (V) para determinar cuál es la solución.

Despejamos las incógnitas “y” y “z” en la tercera ecuación (V) y esta última (VII):

$$y^2 + z^2 = r_1^2 - \left(\frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}\right)^2$$

$$\begin{aligned} r_3^2 &= (x - i)^2 + (y - j)^2 + z^2 \\ r_3^2 &= (x - i)^2 + y^2 + j^2 - 2yj + z^2 \\ y^2 + z^2 &= r_3^2 - (x - i)^2 - j^2 + 2yj \end{aligned}$$

Igualamos:

$$r_3^2 - (x - i)^2 - j^2 + 2yj = r_1^2 - \left(\frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}\right)^2$$

Sabemos de (VI) que

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d}$$

Por tanto:

$$r_3^2 - (x - i)^2 - j^2 + 2yj = r_1^2 - x^2$$

Despejando para y obtenemos:

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 - x^2 + (x - i)^2 + j^2}{2j} = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x \quad \text{VIII}$$

Con lo que obtendríamos nuestra posición estimada $\{x,y\}$

*En nuestro caso, $i=0$, ya que P3 está sobre el eje Y

5.3. Medidas simuladas

En esta situación hemos utilizado los siguientes scripts de Matlab (Apéndice C. Ficheros de Matlab): [scriptModelo.m](#) [variableAleatoria.m](#) [trilateracion.m](#) [minimosCuadrados.m](#)

5.3.1 Introducción.

En esta primera situación vamos a partir de una situación imaginaria, como una habitación vacía de 10x10m.

Primero vamos a calcular la **distancia real** de las anclas con el nodo objetivo, es importante destacar que en todo momento estamos suponiendo que este nodo está quieto en esa posición.

Usando un script de Matlab, vamos a modelar la distancia medida como explicamos anteriormente, siguiendo una **distribución normal** con una media y desviación típica obtenida de la toma de datos en los experimentos con el hardware de decaWave.

Esa **medida de distancia simulada** es lo que en nuestro segundo caso consideramos medidas obtenidas de nuestras antenas de decaWave.

Por último, gracias al **algoritmo de localización** explicado anteriormente, calcularemos la posición aproximada de nuestro objeto.

En la siguiente imagen 5-vi podemos ver esto de forma analítica.

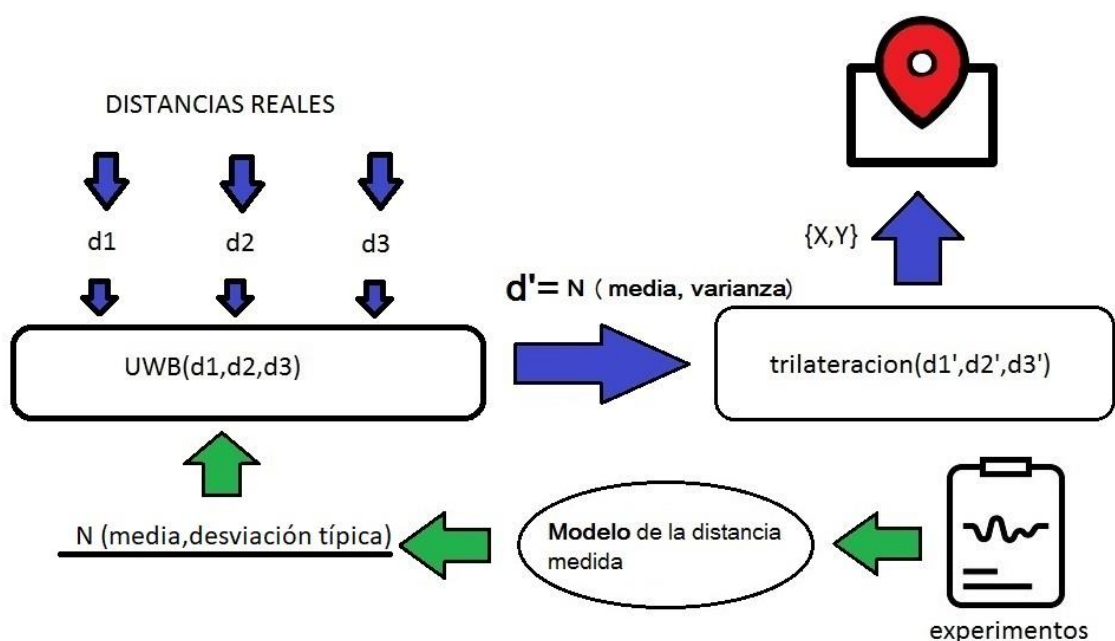


Ilustración 5-vi. Esquema del proceso de localización para el caso de medidas simuladas.

5.3.2 Caso de medidas simuladas para un objeto de posición fija

5.3.2.1 Habitación

Como hemos comentado, partimos de la situación de una habitación vacía de 10x10m sin ningún tipo de obstáculo en su interior.

Las anclas están colocadas en cada esquina, dejando una vacía. [44] [45]

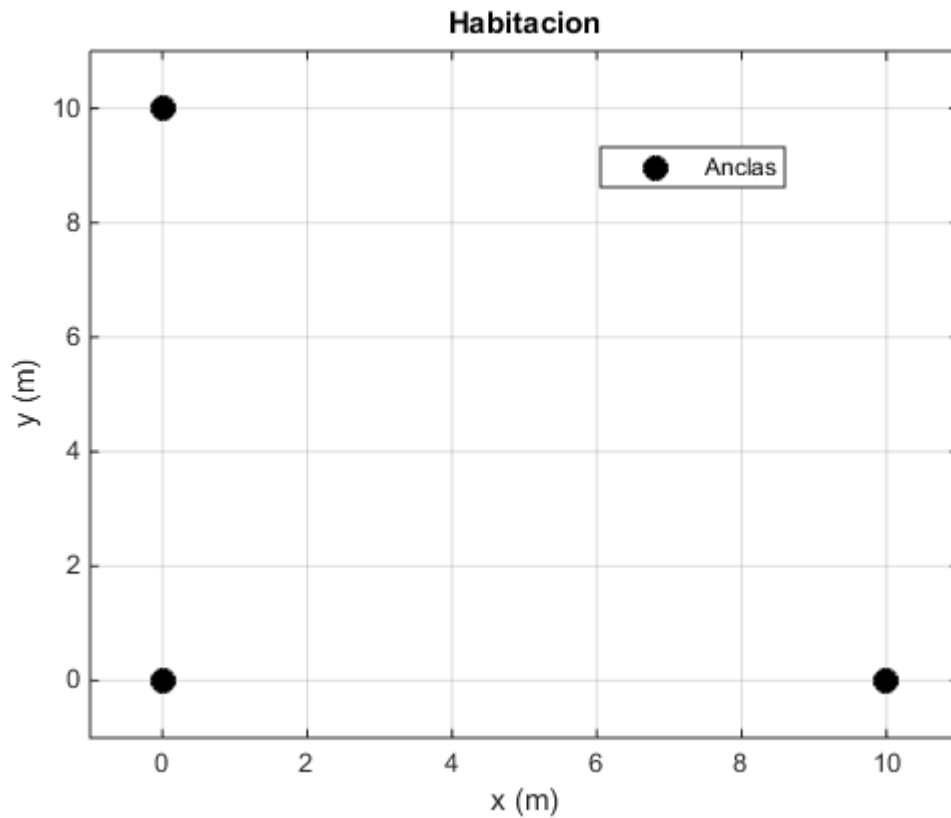


Ilustración 5-vii. Habitación.

5.3.2.2 Posición exacta

Ya definidas las posiciones de las anclas, vamos a colocar nuestro nodo, lo identificaremos con una cruz azul.

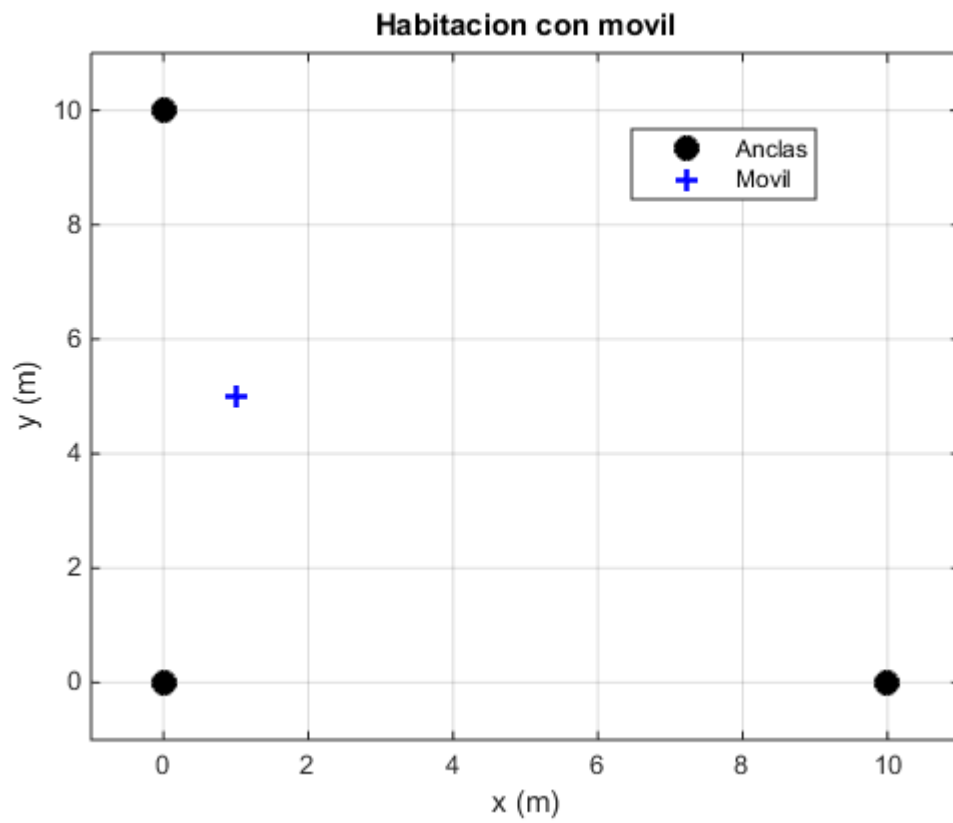


Ilustración 5-viii. Habitación con móvil.

5.3.2.3 Posición estimada

Una vez ejecutemos nuestro script de Matlab, nos representará la estimación de la posición y el error de localización, como vemos la estimación tiene una precisión de cms. [46]

El error de localización en este caso es de 0.0212 m, lo definimos como la distancia entre la posición verdadera y la posición estimada (Lo obtenemos gracias al script [scriptModelo.m](#)).

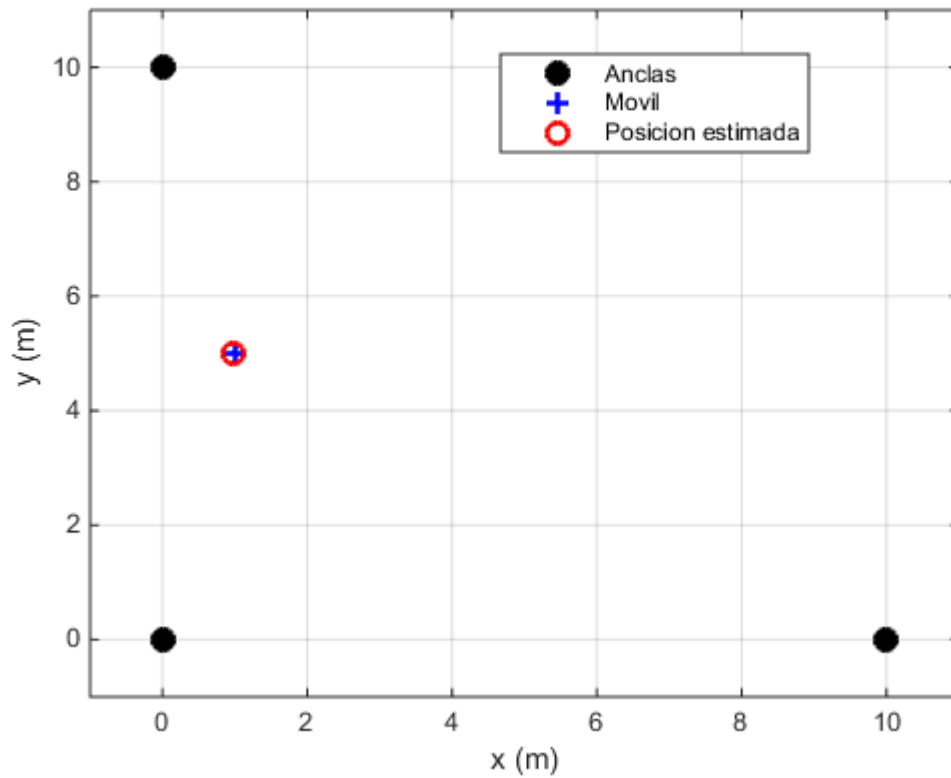


Ilustración 5-ix. Posición estimada.

5.3.3 Caso de medidas simuladas para un objeto móvil

En este caso vamos a simular el movimiento de un objeto en una habitación.

*Es importante destacar que la situación sigue siendo simulada, ya que vamos a partir de una situación ideal en la que la habitación está vacía y en la que solo contamos con las líneas de visión directa, descartando las medidas procedentes de líneas de visión no directa. Además de simular la posición en un plano 2D, por lo que las anclas estarían situadas a la misma altura que el nodo que se desplaza.

Scripts utilizados: [scriptMOV.m](#) [trilateracionMOV.m](#) [variableAleatoria.m](#) y [minimosCuadrados.m](#)

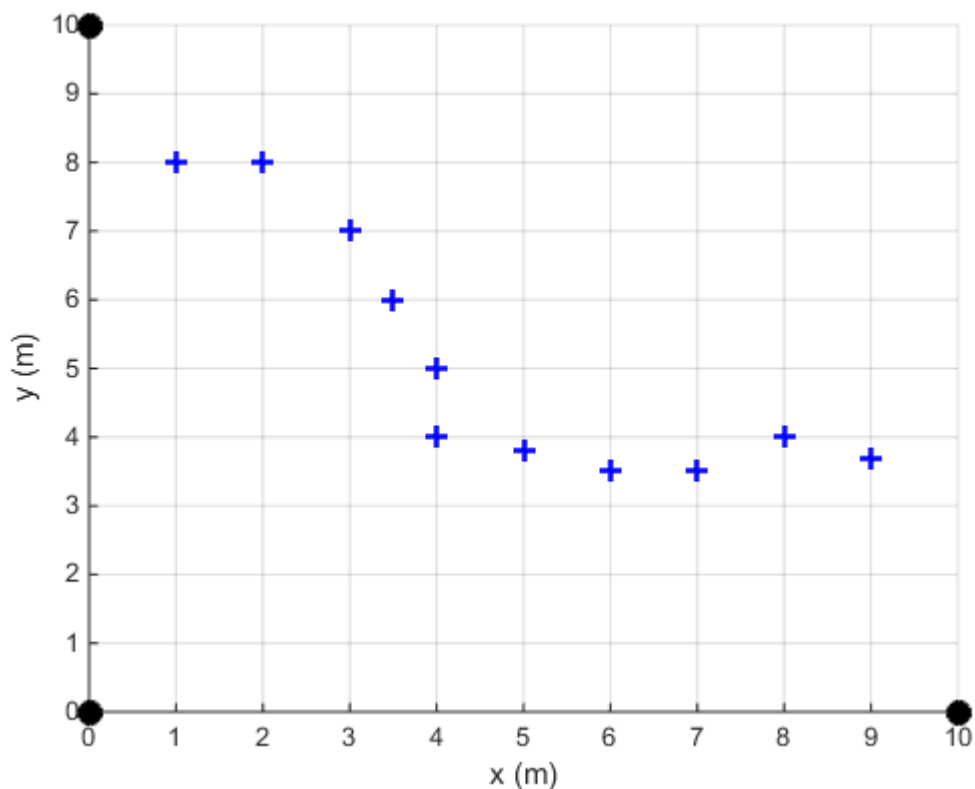


Ilustración 5-x. Habitación con posiciones de desplazamiento.

En la imagen superior (5-x) vemos el mapa base del que vamos a partir. A continuación, simulamos 11 posiciones de un objeto que se desplaza a través de la habitación, como vemos en el resultado, la precisión tan alta es válida para la inmensa mayoría de las posibles aplicaciones.

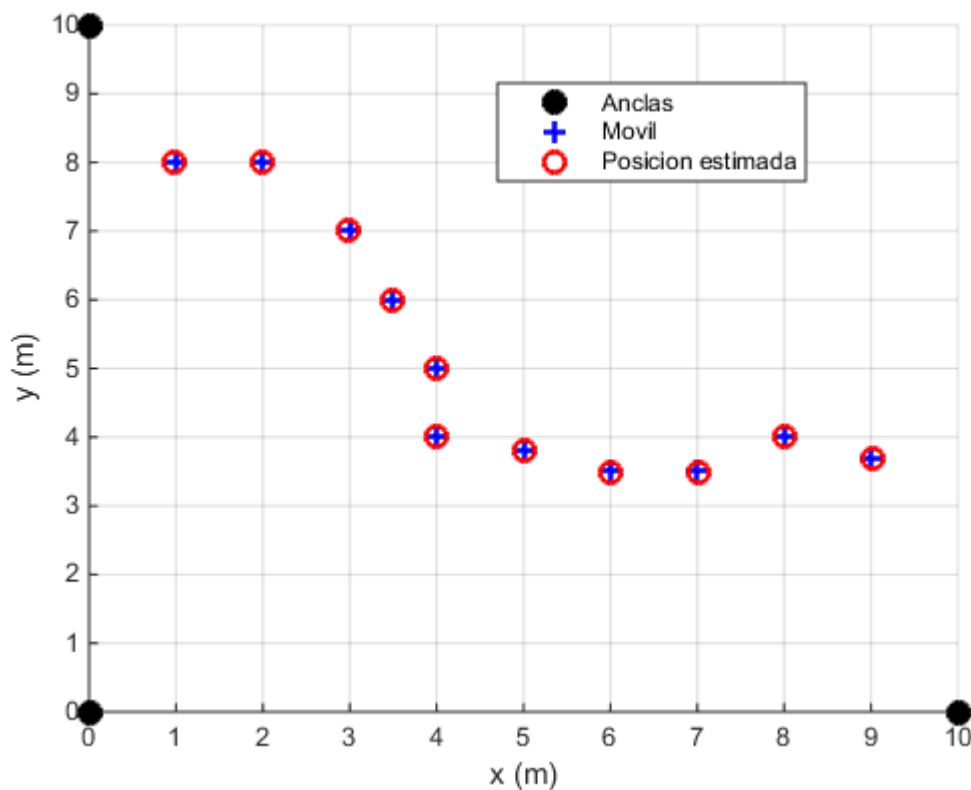


Ilustración 5-xi. Movimiento

Finalmente obtenemos un RMSE (Root Mean Squared Error) calculado a lo largo de la trayectoria de 0.0153m.

5.4 Medidas reales

En esta situación vamos a usar los siguientes scripts de Matlab: [scriptDeca.m](#) y [trilateracionDeca.m](#)

5.4.1 Introducción

En esta segunda situación vamos a partir de una situación real, con una habitación vacía de 3x3m.

Para llevar a cabo este experimento, necesitamos tres anclas y un tag, al tener solo un par de antenas de decaWave, el proceso seguido es el siguiente.

Se analizarán 3 situaciones distintas, correspondiente a las tres anclas, por tanto, dejaremos una de nuestros transmisores inmóvil en alguna parte de la habitación configurada como TAG, y la otra es la que cambiaremos de posición, configurada como ANCLA.

Obtendremos tres medidas de distancia en las tres posiciones de las anclas, y gracias al **algoritmo de localización** explicado anteriormente, calcularemos la posición aproximada de nuestro objeto.

En la siguiente imagen (5-xii) podemos ver esto de forma analítica.

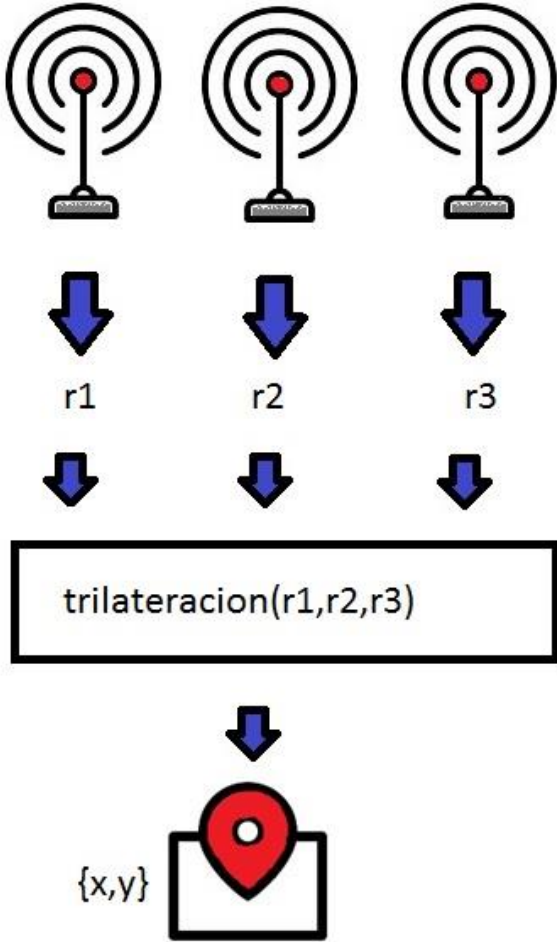


Ilustración 5-xii. Caso basado en medidas reales.

5.4.2 Habitación

Como hemos comentado, partimos de la situación de una habitación vacía de 3x3m sin ningún tipo de obstáculo en su interior.

Las anclas están colocadas en cada esquina, dejando una vacía.

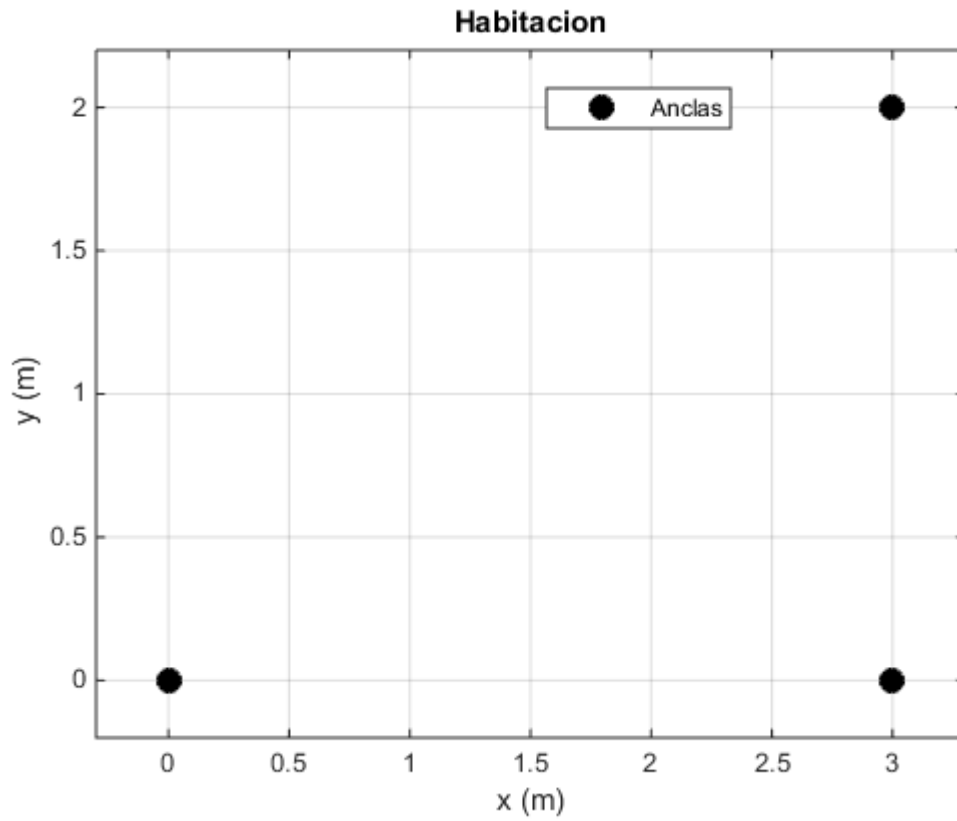


Ilustración 5-xiii. Habitación vacía

5.4.3 Posición exacta

Ya definidas las posiciones de las anclas, vamos a colocar nuestro nodo, lo identificaremos con una cruz azul.

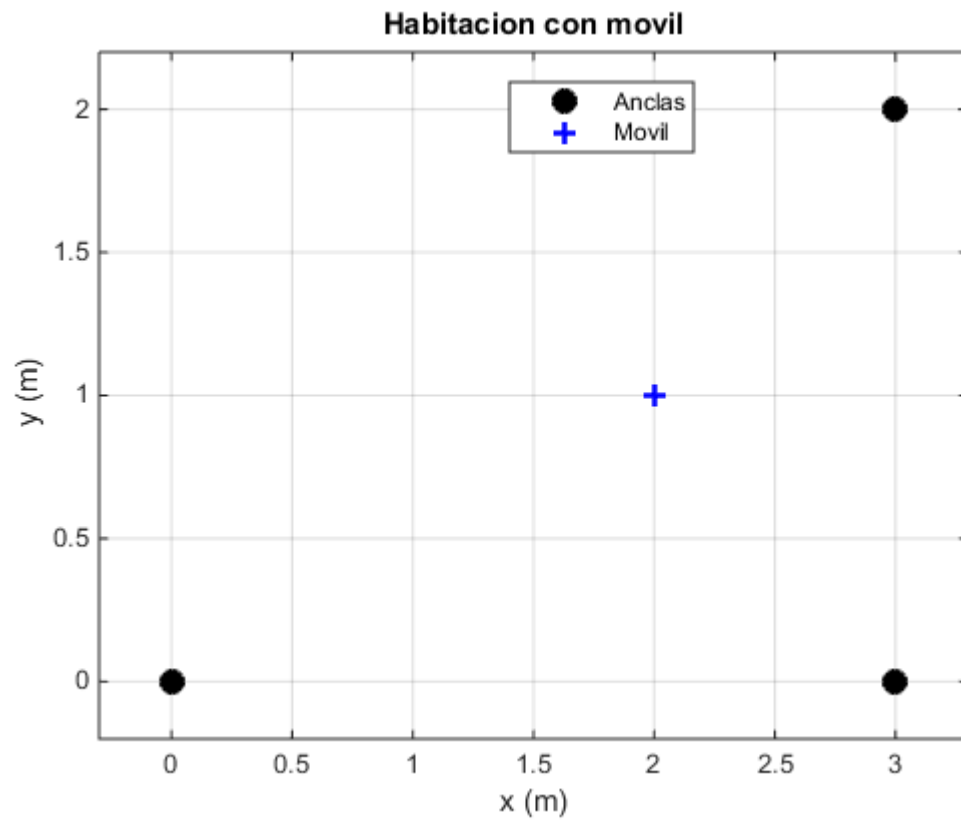


Ilustración 5-xiv. Habitación con móvil.

5.4.4 Posición estimada

Una vez ejecutemos nuestro script de Matlab, nos representará la estimación de la posición y el error cuadrático medio, como vemos la estimación tiene una precisión de cms.

El error de localización en este caso es de 0.0172m., lo definimos como la distancia entre la posición verdadera y la posición estimada (Lo obtenemos gracias al script [scriptDeca.m](#)).

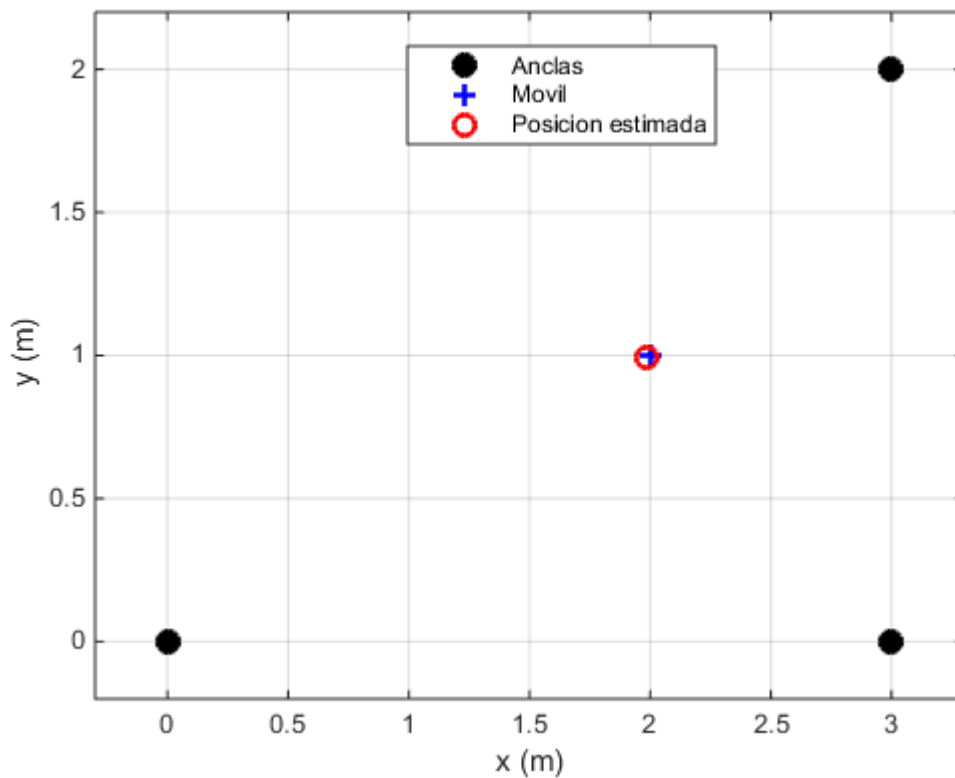


Ilustración 5-xv. Posición estimada

6 OBSTÁCULOS

Hasta ahora hemos considerado que siempre estaremos en la situación de visión directa, y esto no se ajusta a la realidad, en la que frecuentemente tendremos algún tipo de obstáculo que limite parcial o completamente la visión en nuestro sistema de comunicación.

Este tema sería interesante para proponerse como un futuro TFG, ya que lo que aquí se explica será una breve introducción.

6.1. Introducción

Para realizar los siguientes experimentos nos hemos ubicado en el departamento de Teoría de la señal y comunicaciones. En una habitación destinada para ello, usando como obstáculos paredes, sillas o armarios metálicos.

En esta sección se ha utilizado el siguiente script de Matlab: [SignalUWB.m](#)

6.2. Obstrucción parcial del rayo directo

En esta situación, hemos usado paredes o cualquier tipo de objeto no metálico para realizar las mediciones. Podemos consultar la tabla XX para ver el resultado exacto de las mediciones.

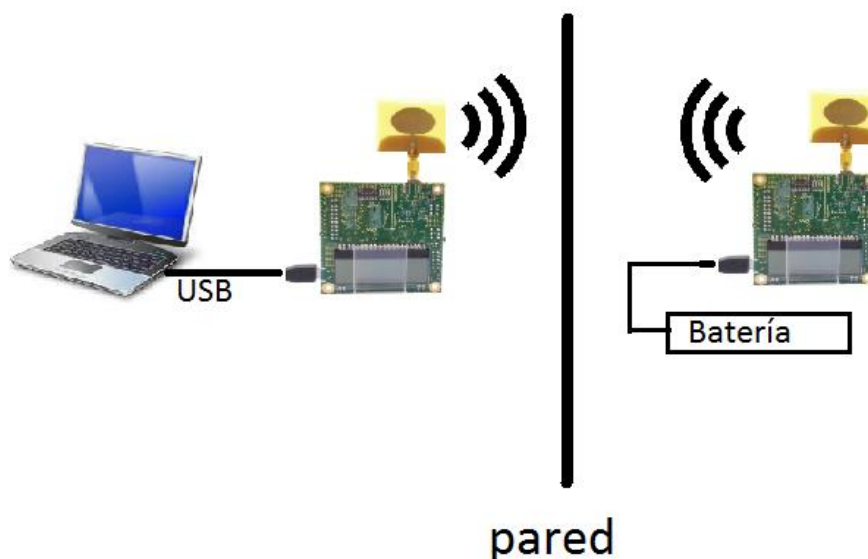


Ilustración 6-i. Obstrucción parcial del rayo directo con una pared como obstáculo.

Vamos a recordar la forma de la señal recibida cuando nos encontrábamos en la situación de **visión directa**:

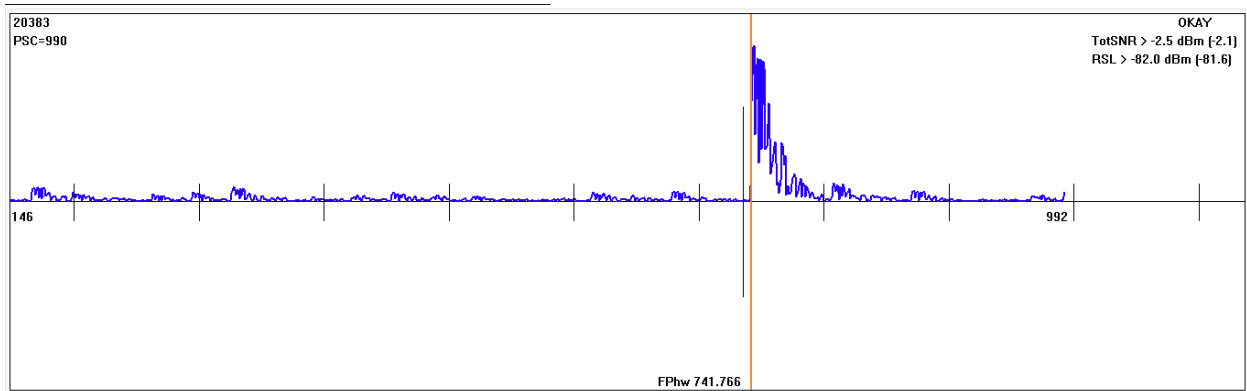


Ilustración 6-ii. Amplitud de la señal recibida en magnitud, para el caso de visión directa

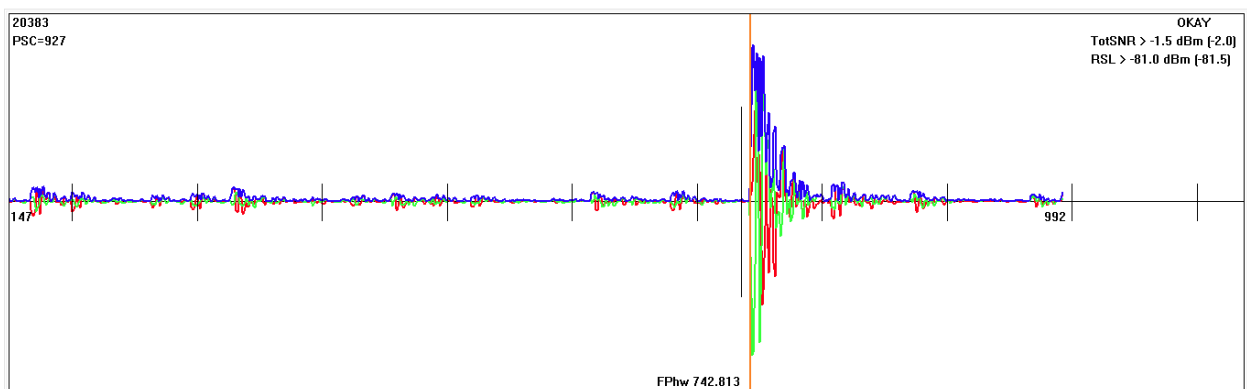


Ilustración 6-iii. Amplitud de la señal recibida en magnitud, para el caso de visión directa incluyendo valores reales e imaginarios.

Y ahora vemos la señal recibida, con una pared como obstáculo (distancia real de 2,5m):

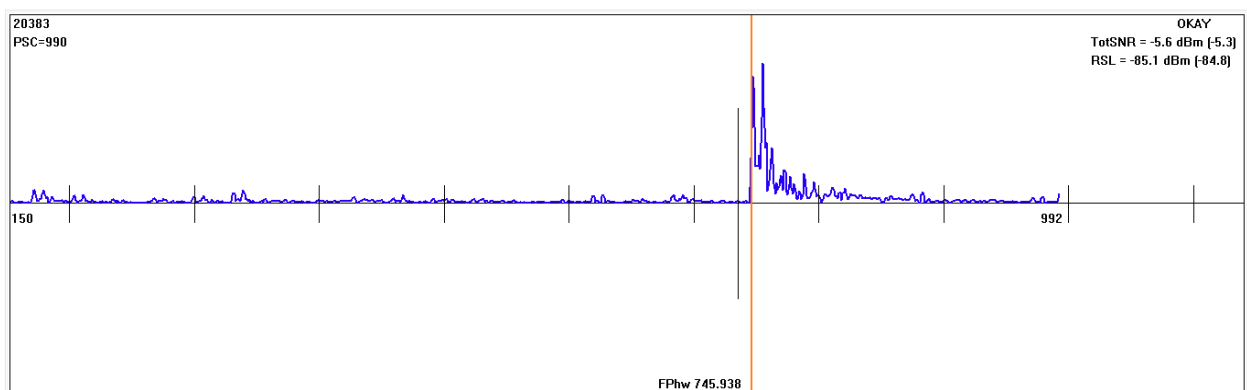


Ilustración 6-iv. Pared como obstáculo.

Como vemos en la figura 6-iv, la pared atenúa levemente el rayo directo (en comparación con el caso de visión directa representado en las figuras 6-ii y 6-iii), de manera que ya no se corresponde con el de máxima energía. Sin embargo, hay algoritmos de estimación del tiempo de llegada que pueden solventar esta dificultad

reduciendo el error de estimación al valor debido al retardo por propagación a través de un medio material distinto del aire. Por ejemplo, en la figura puede apreciarse que el algoritmo implementado por defecto por DecaWave ofrece una estimación satisfactoria.

6.2.1 Análisis

Vamos a colocar los nodos a una distancia de 140 centímetros (valdría cualquier situación) con una pared entre los nodos que impida la visión directa entre ellos. A continuación, analizamos la señal recibida en dos instantes diferentes.

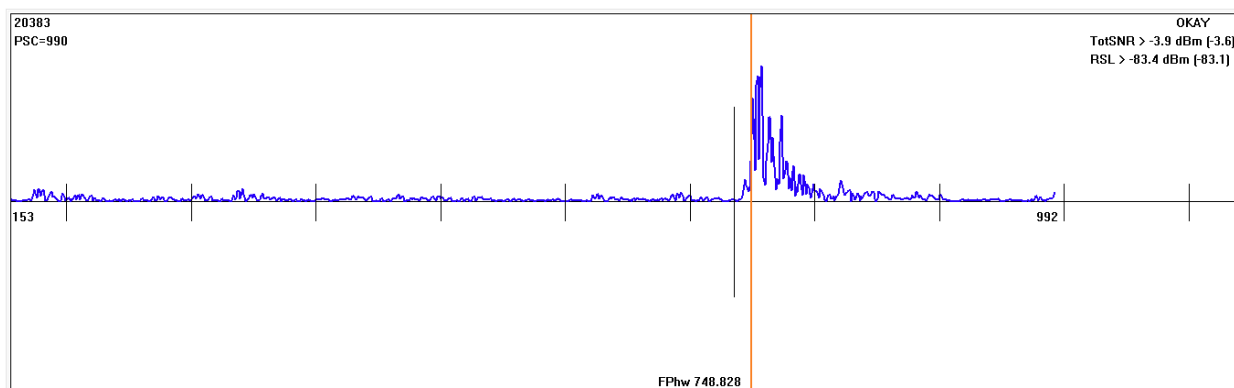


Ilustración 6-v. Rayo por debajo del umbral.

En la figura 6-vii, aunque no podemos ver el rayo directo, sabemos que se ha tomado como ruido porque el error en la medida ha sido bastante grande. También podemos apreciar como no se ha elegido como rayo directo un rayo anterior al elegido, ya que no sobrepasa el umbral de potencia.

La medida de distancia en ese instante de tiempo fue de 3.41 metros.

Tanto en la figura 6-vii como en la figura 6-viii vemos en el inferior un parámetro FPhw, este parámetro indica el valor del tiempo donde el sistema ha estimado que está el camino directo y será muy útil en los próximos análisis.

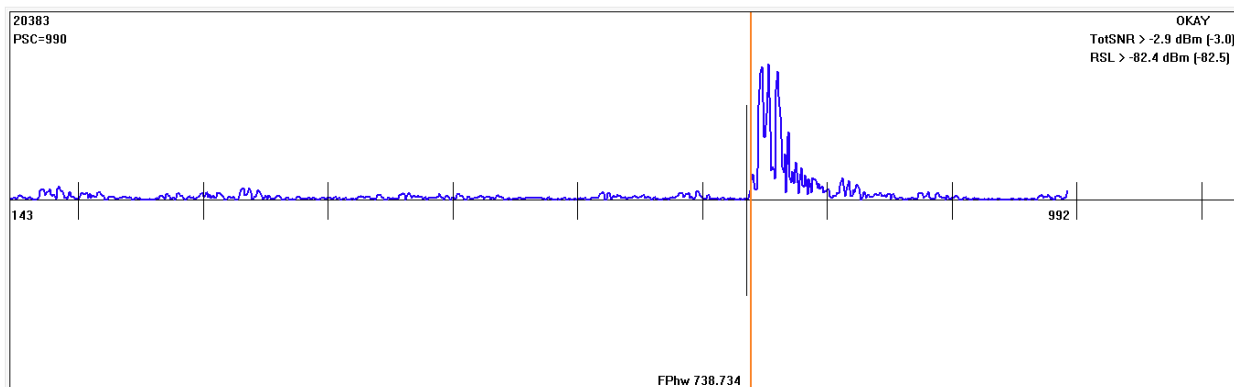


Ilustración 6-vi. Rayo por encima del umbral

En la figura 6-viii, en cambio, el algoritmo interno del transmisor DW1000 ha considerado un nuevo rayo

como rayo directo o 'first path', ya que ha superado el umbral mínimo de potencia para no ser considerado como ruido. Observando el parámetro FPhw, vemos que en la figura 6-viii 'FPhw' es menor que en la figura 6-vii, esto quiere decir que el considerado como nuevo rayo directo tiene un tiempo de propagación menor que en la situación anterior de la figura 6-vii.

La medida de distancia en ese instante de tiempo fue de 3.005 metros. Esta medida tiene un error menor que en la situación anterior de la figura 6-vii, ya que el rayo que se ha elegido como rayo directo ha tenido un tiempo de propagación menor, y por tanto se ha estimado una distancia menor.

Ambas mediciones (figuras 6-vii y 6-viii) se han realizado en la misma situación y distancia, sin embargo, la atenuación que sufre la señal varía en cada momento y depende de muchos factores que no podemos controlar.

Igualmente, en ambas situaciones (figuras 6-vii y 6-viii), debido al error tan grande al estimar la distancia medida, podemos concluir que estamos en la situación de visión no directa (NLOS), ya que se ha tomado como 'first path' una reflexión, aumentando así el tiempo de propagación y como resultado la distancia medida. Lo que se correspondería con la realidad, ya que hemos situado los nodos sin visión directa entre ellos.

*Según DecaWave, si la diferencia entre la potencia de la señal recibida y del primer rayo por encima del umbral, es inferior a 6dB el canal es probable que sea LOS, mientras que si la diferencia es mayor que 10dB el canal es probable que sea NLOS.

6.3. Obstrucción total del rayo directo

En esta situación, vamos a usar un armario de metal como obstáculo, realizaremos distintas pruebas a diferentes distancias para estudiar su comportamiento.

Es de esperar que el resultado sea bastante peor que en la situación anterior (pared) debido a un bloqueo total del rayo directo por parte del metal.

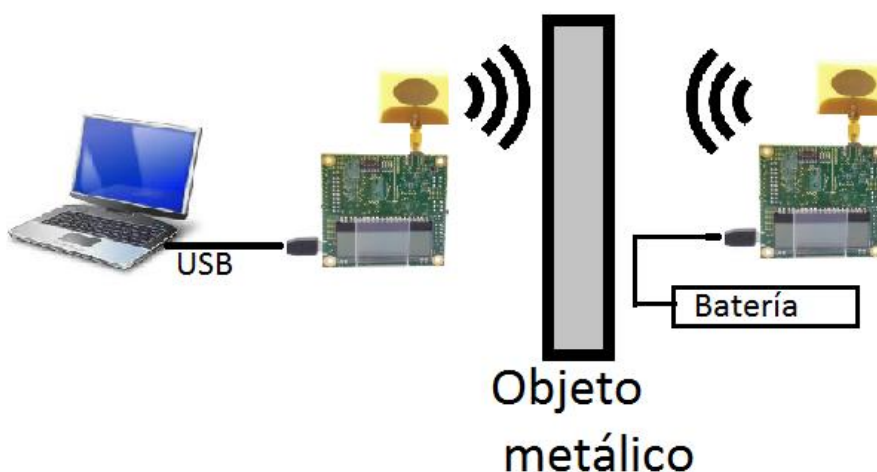


Ilustración 6-vii. Obstrucción total del rayo directo con un objeto metálico como obstáculo.

6.3.1 Análisis

Empezamos realizando pruebas a una distancia corta (medio metro entre los nodos). En este caso obtenemos una medida de distancia de 1.25 metros (media de 50 mediciones), una medición con un error de 75 cms, totalmente inaceptable en la mayoría de aplicaciones de alta precisión.

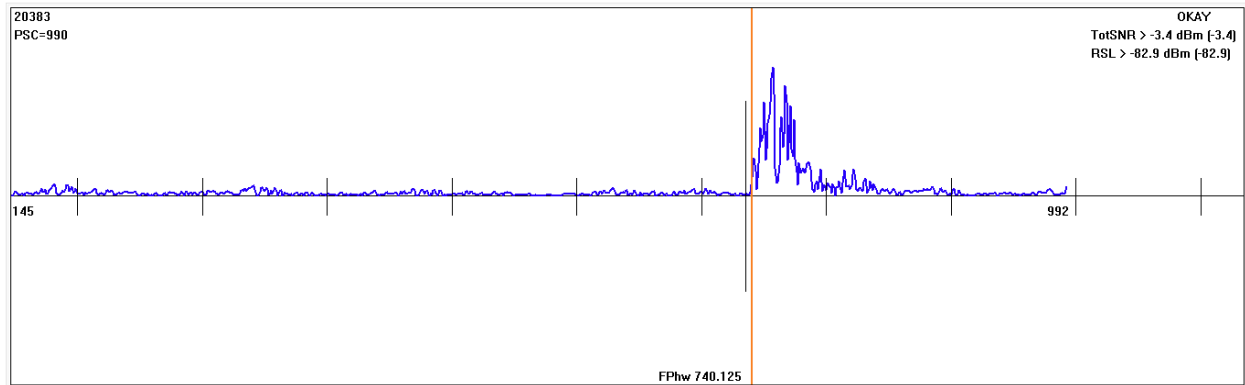


Ilustración 6-viii. Distancia corta

Esto es debido a que el primer rayo, correspondiente a la línea de visión directa entre los dos nodos, ha sido bloqueado totalmente. Al no haber un rayo directo que supere el umbral de potencia, en el instante que correspondería a ese rayo directo solamente hay ruido. Por tanto, el rayo elegido por el algoritmo ('first path') se correspondería con la primera reflexión que supere el umbral de potencia.

Al calcular la distancia medida, obtendremos un desfase positivo por el siguiente motivo. El software de nuestro sistema tiene un umbral de potencia recibida por la cual decide cuál ha sido el rayo directo o 'first path'. En el caso de que nuestro rayo directo no supere ese umbral (por atenuación al atravesar distintos materiales), se tomará como rayo directo el siguiente que sobrepase ese umbral. Esto quiere decir que tratará una reflexión como el rayo directo, provocando así un retardo positivo en el tiempo de propagación y por lo tanto un error positivo en el resultado de la medición.

7 RESULTADOS Y CONCLUSIONES

En este apartado vamos a exponer las conclusiones finales de este proyecto.

Diferenciamos claramente dos partes; la parte del modelado de la medida de distancia y el sistema de posicionamiento.

En el modelado de la distancia medida, en el caso de visión directa, llegamos a la conclusión de que podemos modelar nuestra distancia medida como una variable aleatoria que sigue una **distribución normal de media $\mu(d)$ y desviación típica $\sigma(d)$** , siendo d la distancia real entre los nodos considerados. Hemos observado que es útil considerar el modelo como función de la distancia real, ya que la desviación típica de las medidas aumenta con la misma. El modelo obtenido permite hacer una simulación realista de un sistema de localización basado en un dispositivo actual con tecnología UWB. Para el caso de visión no directa, no podemos aplicar este modelo, por lo que quedaría como línea de trabajo futura.

En la parte del sistema de posicionamiento, hemos tomado dos caminos:

- Utilizando nuestro modelo de distancia medida:

En esta situación, hemos obtenido una **precisión de centímetros**, tal y como garantiza el fabricante DecaWave, para la situación de un objeto fijo en una habitación vacía con tres anclas y en todo momento sobre el plano XY (bidimensional).

También se ha simulado el posible movimiento de un objeto, simulando varias posiciones y obteniendo la raíz del error cuadrático medio del total de las posiciones simuladas. En los casos simulados el RMSE ha sido del orden de cm, no superando los 3 cm.

- Partiendo de medidas reales obtenidas con el kit del fabricante DecaWave:

En esta situación utilizamos los transmisores y el software que nos proporciona DecaWave.

Los resultados varían según el lugar donde realicemos los experimentos:

- o Cuando nos encontramos en una habitación vacía y con visión directa en todas las mediciones, los resultados son idénticos al caso en que utilizamos el modelo de distancia medida, en cuanto a orden de magnitud del error.

Destacar que, dentro de la Escuela Técnica Superior de Sevilla, lugar donde se han realizado los experimentos, con visión directa, no hemos encontrado una distancia entre los transmisores donde el error empiece a ser significativo, lo cual podría interpretarse como el alcance del sistema. (Distancia máxima comprobada: 65m).

- o En el momento que existe algún obstáculo (visión no directa), la precisión varía notablemente, dependiendo del tipo de obstáculo la precisión se ve afectada en mayor o menor medida.

La finalidad del presente proyecto es la evaluación de un dispositivo actual basado en tecnología UWB en la aplicación de la localización en interiores. En concreto, un dispositivo del fabricante DecaWave basado en el estándar IEEE802.15.4-2011. Concluimos, por tanto:

La tecnología UWB es apropiada para la localización en interiores. En los casos en los que el objeto a localizar tenga visión directa con al menos tres anclas, la estimación tiene un error de escasos centímetros, y lo mejor aún, el alcance es mayor al resto de tecnologías con las que compite. Además, destacamos su capacidad de penetración en los casos sin visión directa frente a otras tecnologías, aunque habrá tipos de obstáculos que provoquen un error importante, por lo que la mitigación de los errores en los casos sin línea de visión directa sigue constituyendo un reto vigente. Gracias a su inmunidad al efecto multi-camino, es posible distinguir entre la señal directa y las señales reflejadas en los obstáculos. Todas estas ventajas sin interferir en otros sistemas de comunicaciones (los demás sistemas ven las señales UWB como ruido).

La alta precisión obtenida en el caso de visión directa sugiere que los sistemas UWB basados en una estrategia de detección y descarte de las medidas sin línea de visión directa constituyen una alternativa prometedora para los sistemas de localización.

El único punto negativo encontrado para esta tecnología es su coste de implantación en la actualidad. Hay pocos fabricantes en comparación con otras tecnologías y existe menos competencia. Además, la tecnología no está tan extendida en el usuario medio como el resto de tecnologías, por lo que resulta más complicado vender un sistema UWB para localizar, por ejemplo, alimentos en un centro comercial, que vender un sistema basado en WiFi para el mismo propósito, ya que es una tecnología más conocida.

Sin embargo, los estudios de esta tecnología están aumentando en los últimos años notablemente, queda claro que, si aumentan de la misma forma los fabricantes de transmisores UWB, tal y como está ocurriendo (Agilion, CDS Wireless, Eliko, LLC RTLS, Sewio, Zigpos...), pronto veremos muchos sistemas de localización basados en esta tecnología en situaciones cotidianas.

8 APÉNDICE A: TABLAS

8.1 Visión directa (LOS)

8.1.1 INT - INT

8.1.1.1 Distancia Larga

a) Medidas de distancia

<i>Experimentos/ Distancia real(cm)</i>	<i>1°</i>	<i>2°</i>	<i>3°</i>	<i>4°</i>	<i>5°</i>	<i>Media (cm)</i>
50	41	42	42	40	42	41.1
100	96	97	97	97	99	97.2
150	146	146	148	148	147	147
200	196	194	196	197	195	195.6
250	246	245	244	247	248	246
300	296	298	296	301	299	298
350	349	349	346	348	349	348.2
400	398	397	399	398	399	398.2

8.1.1.2 Distancia corta

a) Medidas de distancia

<i>Experimentos/ real(cm)</i>	<i>Distancia 1°</i>	<i>Error (cm)</i>
42	38	4
52	48	4
65	59	3
72	70	2
82	80	2
92	90	2
102	102	0
112	11	1

8.1.2 INT –EXT

8.1.2.1 Distancia Corta

- En habitación cerrada.

<i>Distancia real (m)</i>	<i>Media de medidas (m)</i>	<i>las Desviación (cm)</i>	<i>típica ToF (ns)</i>
0.405	0.22	2.31	0.674
0.905	0.72	1.22	2.411
1.405	1.23	1.75	4.120
1.905	1.772	1.92	5.880
2.405	2.25	1.88	7.443
2.905	2.77	1.46	9.21
3.405	3.28	2.09	10.790
3.905	3.74	1.66	12.490

8.1.2.2 Distancia Larga

<i>Distancia real (m)</i>	<i>Media de las medidas (m)</i>	<i>Desviación típica (cm)</i>	<i>ToF (ns)</i>
1	0.81	2.70	
2	1.88	1.93	
3	2.80	1.70	9.2
4	3.88	1.69	12.9
5	4.87	1.96	16.2
6	5.77	2.14	19.2
7	6.72	2.08	22.5
8	7.75	2.6	25.8
9	8.70	1.51	29.01
10	9.74	1.42	32.45
11	10.76	1.7	35.9
12	11.74	1.44	39.1
13	12.72	1.27	42.4
14	13.74	2.31	46.01
15	14.83	2.38	49.5
16	15.73	2.28	52.5
17	16.80	2.45	55.9
18	17.86	2.54	59.6

<i>Distancia real (m)</i>	<i>Media de las medidas (m)</i>	<i>Desviación típica (cm)</i>	<i>ToF (ns)</i>
1	1.0108	1.98	3.433
2	2.0669	1.61	6.831
3	2.9739	1.49	9.951
4	4.0620	1.53	13.572
5	5.0036	1.68	16.680
6	5.9330	1.20	19.766
7	6.9595	1.35	23.076
8	7.9331	1.15	26.456
9	8.9285	1.71	29.782
10	9.9347	2.25	32.998
11	10.9924	1.09	36.705
12	11.9588	1.86	39.872
13	12.9369	1.65	43.234
14	13.9565	1.90	46.507
15	14.9097	1.14	49.739
16	15.9357	2.01	53.172
17	17.0996	3.15	57.147
18	18.0650	3.02	60.240
19	19.0774	1.42	63.605
20	20.0077	1.95	66.703
22	22.2090	3.48	73.912
24	24.1143	2.00	80.544
26	26.0786	1.85	87.081

28	28.0738	1.83	93.854
30	30.0104	1.63	100.114
35	35.0413	2.11	116.838
40	40.0498	1.82	133.562
45	45.0740	1.85	150.483
50	50.1057	2.57	167.166
55	55.0451	2.33	183.655
60	60.1013	2.70	200.544

8.2 Visión no directa (NLOS)

8.2.1 INT – INT con objeto metálico

<i>Distancia(cm)</i>	<i>1° Toma (cm)</i>	<i>2° Toma (cm)</i>	<i>3° Toma (cm)</i>	<i>Error aprox(cm)</i>
22	90	93	89	70
30	127	110	125	90
40	95	94	95	55
50	102	111	105	55
60	105	101	111	50
70	115	109	124	50
80	131	123	160	50
90	140	160	157	50
100	132	161	155	50

9 APÉNDICE B. INSTALACIÓN Y USO DEL SOFTWARE

9.1. Instalación

Para realizar nuestros experimentos, hemos usado un software incluido en el paquete EVK1000, a continuación, un breve resumen con los pasos a seguir:

A) USB virtual COM:

Comenzamos instalando el driver que permite al PC conectar el puerto EVB1000 USB y usar el EVB1000 ARM software USB-to-SPI. Este driver está disponible en la página de ST Microelectronics:

<http://www.st.com/web/en/catalog/tools/FM147/CL1794/SC961/SS1533/PF257938>

STSW-STM32102 STM32 Virtual COM Port Driver

● Active


Design Resources

[Top](#)

Quick Links Technical Notes & Articles ▼

Technical Documentation

Technical Notes & Articles


Description	Version	Size
 <i>TN0072: Software toolchains and STM32 features</i>	2.4	98 KB

Publications and Collaterals

Flyer

Description	Version	Size
 <i>STM32Cube eases STM32 development</i>	FLSTM32CUB0915	410 KB

Brochure

Description	Version	Size
 <i>STM32 32-bit MCU family - Leading supplier of ARM® Cortex®-M microcontrollers</i>	BRSTM320215	1,025 KB

Get Software

[Top](#)

Part Number	Version	Marketing Status	Order From ST
STSW-STM32102	1.4.0	Active	Download

Ilustración 9-i. Software

- B) Descargamos el fichero “stsw-stm32102.zip”, una vez descargado lo ejecutamos y seguimos las instrucciones para completar la instalación:





▶ Este equipo ▶ Disco local (C:) ▶ Archivos de programa (x86) ▶ STMicroelectronics ▶ Software ▶ Virtual comport driver ▶ Win8				
Nombre	Fecha de modifica...	Tipo	Tamaño	
 dpinst_amd64.exe	23/07/2010 21:28	Aplicación	1.026 KB	
 dpinst_x86.exe	23/07/2010 21:28	Aplicación	901 KB	
 stmcdc.cat	08/10/2014 0:28	Catálogo de segur...	8 KB	
 stmcdc.inf	28/08/2013 11:26	Información sobre...	2 KB	

Ilustración 9-ii

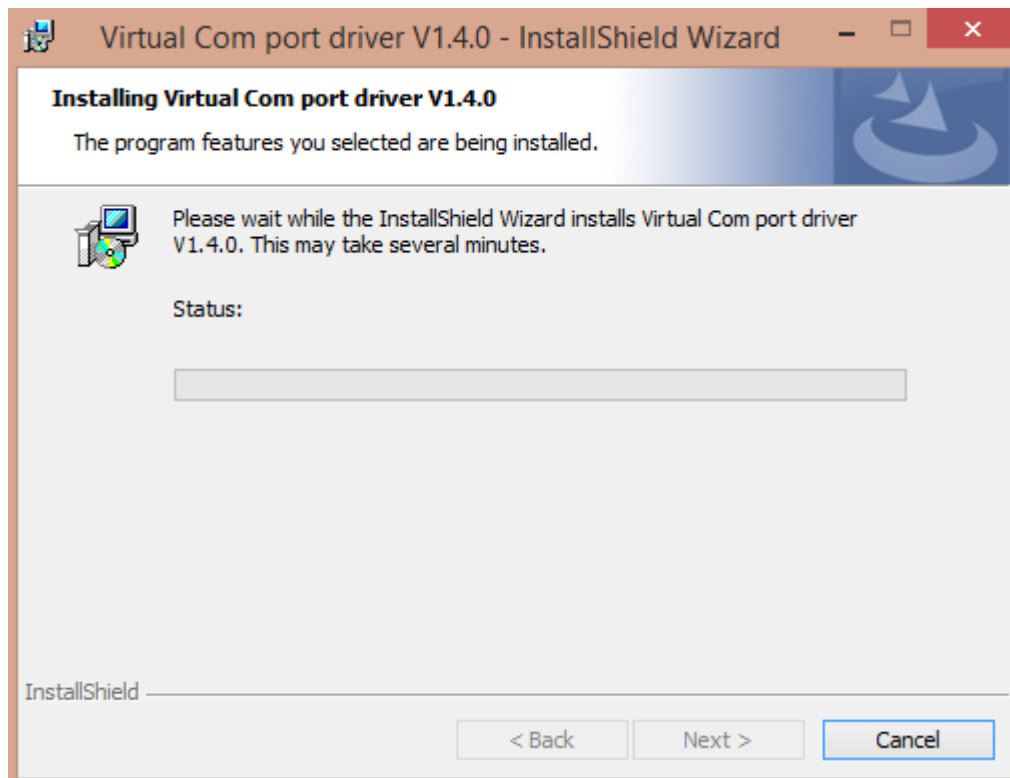


Ilustración 9-iii. Instalación

C) Ya podemos lanzar nuestra aplicación, ejecutamos el fichero “DecaRanging.exe”

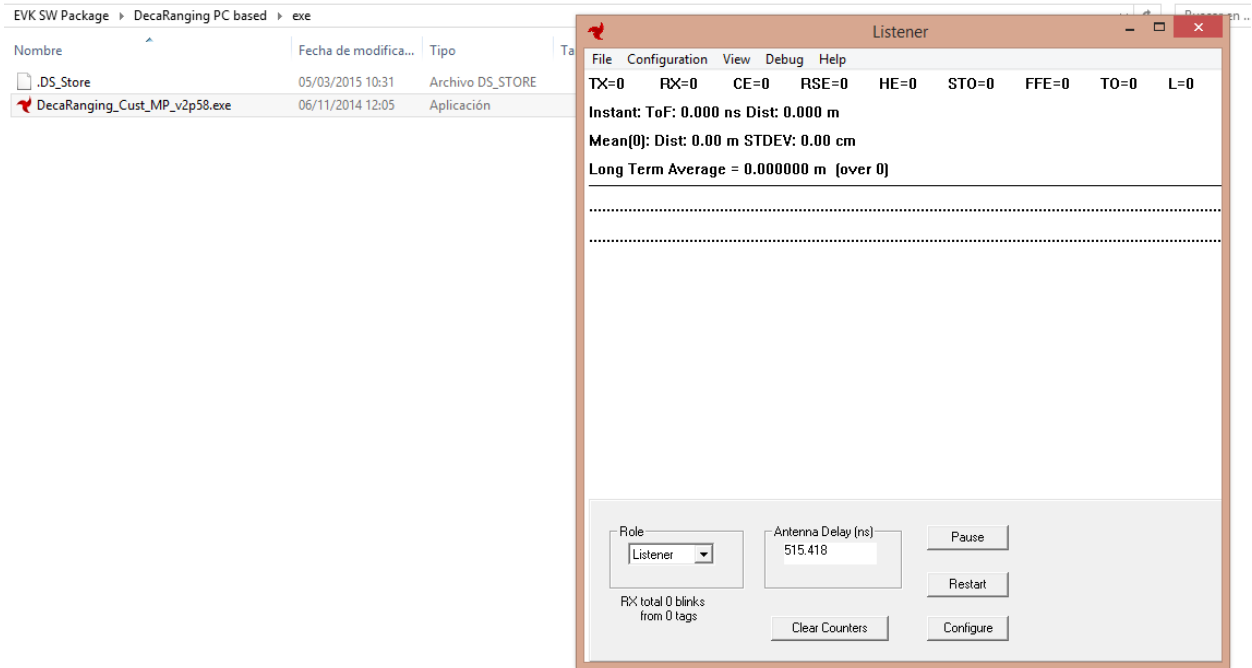


Ilustración 9-iv. Estado inicial del software

9.2. Uso

En esta sección vamos a explicar cómo usar nuestro software proporcionado por decaWave.

Una vez instalado nuestro programa según [Instalación](#), recordaremos la situación inicial:

Por un lado, tenemos un nodo configurado como ancla, el cual está conectado vía USB a un PC con la aplicación DecaRanging (véase [INT-EXT](#)), y por otro lado tenemos un nodo configurado como tag controlado por EVB1000 ON-BOARD RANGING APPLICATION.

A continuación, vamos a emparejar nuestros nodos, como vimos en [Emparejamiento](#), nuestro tag comienza a enviar 'blink' a la espera de ser escuchado y respondido por otro nodo.

Tenemos que configurar nuestra ancla para que pueda escuchar estos mensajes blink.

Para ello, configuramos los parámetros para que operen en el mismo canal y con la misma configuración.

TX=0 RX=5 CE=0 RSE=0 HE=0 STO=2 FFE=0 TO=0 L=0

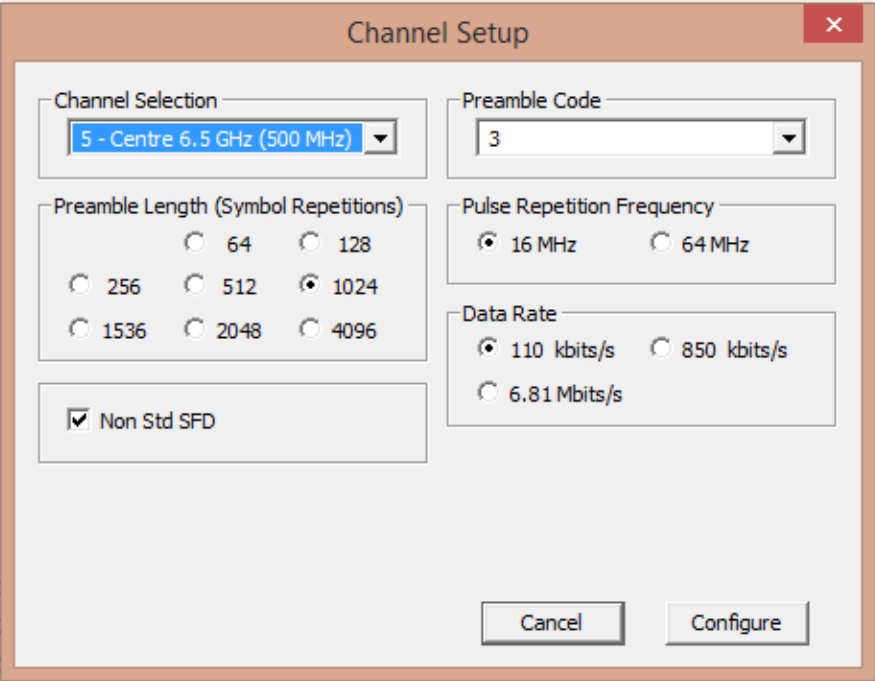
Instant: ToF: 0.000 ns Dist: 0.000 m

Mean[0]: Dist: 0.00 m STDEV: 0.00 cm

Long Term Average = 0.000000 m (over 0)

.....

.....



(12) C

(12) C

(12) C

(12) C5FFE8F9375E20090410479B

(12) C500E8F9375E200904107627

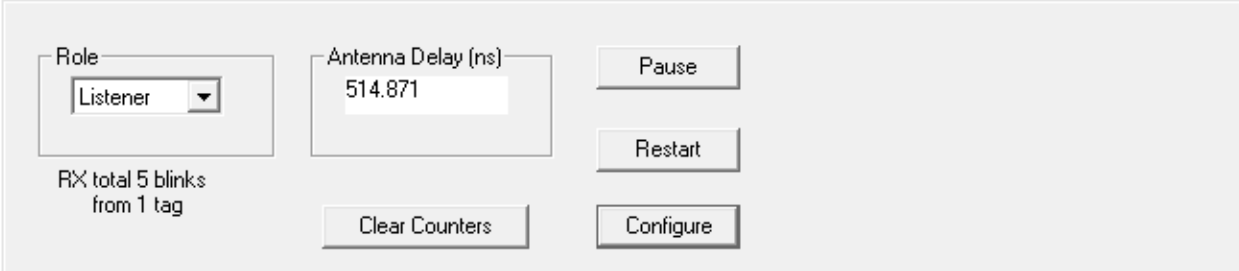
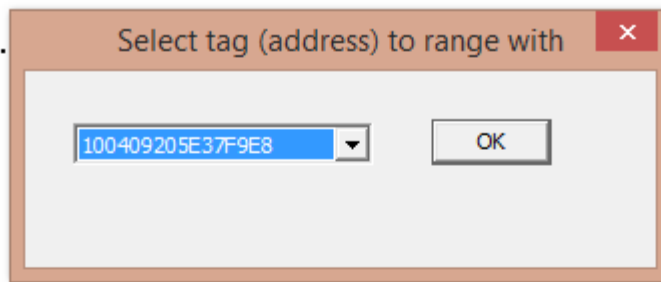


Ilustración 9-v. Configuración del Ancla.

Esta es la configuración elegida ya que nuestro tag opera con esos parámetros (Véase [Ajuste](#) , para la configuración del nodo).

Es importante destacar que tenemos que configurar nuestra ancla al principio con el rol de 'listener', para que se mantenga a la escucha y a la espera de ser emparejada.

Si hemos configurado correctamente ambos nodos, comenzaremos a recibir los mensajes 'blink'. Lo siguiente que haremos será cambiar el rol a 'anchor' (ancla), nos aparecerá un mensaje y tendremos que elegir la dirección de nuestro tag. En la imagen podemos ver de fondo los mensajes 'blink' y el cuadro de diálogo con la elección de nuestro tag.



(12) C5FCE8F9375E20090410404D
 (12) C5FDE8F9375E20090410BD00
 (12) C5FEE8F9375E20090410BAD6
 (12) C5FFE8F9375E20090410479B
 (12) C500E8F9375E200904107627
 (12) C501E8F9375E200904108B6A
 (12) C514E8F9375E2009041007E7
 (12) C515E8F9375E20090410FAAA
 (12) C516E8F9375E20090410FD7C
 (12) C517E8F9375E200904100031
 (12) C518E8F9375E2009041028A7
 (12) C519E8F9375E20090410D5EA

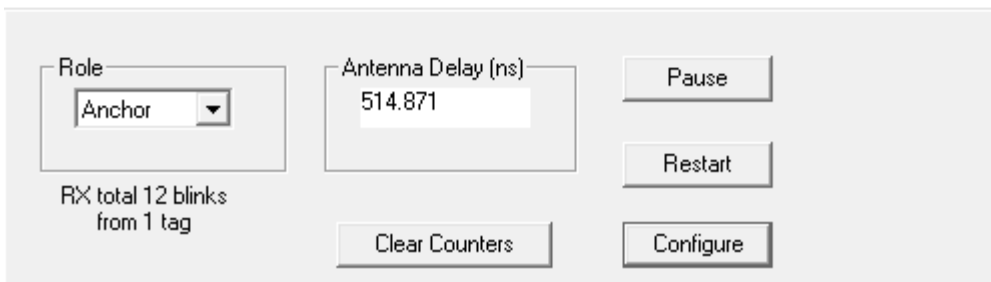


Ilustración 9-vi. Mensajes 'blink'.

Estos pasos son los que definen el emparejamiento, a continuación, el ancla envía un mensaje de inicio de Ranging para asociarse y terminar la fase de emparejamiento.

En la pantalla de nuestro PC Podemos ver la distancia estimada:

TX=27 RX=27 CE=0 RSE=0 HE=0 STO=0 FFE=0 TO=13 L=0
Instant: ToF: 8.134 ns Dist: 2.438 m
Mean(8): Dist: 2.38 m STDEV(50): 0.00 cm
Long Term Average = 2.378372 m [over 13]

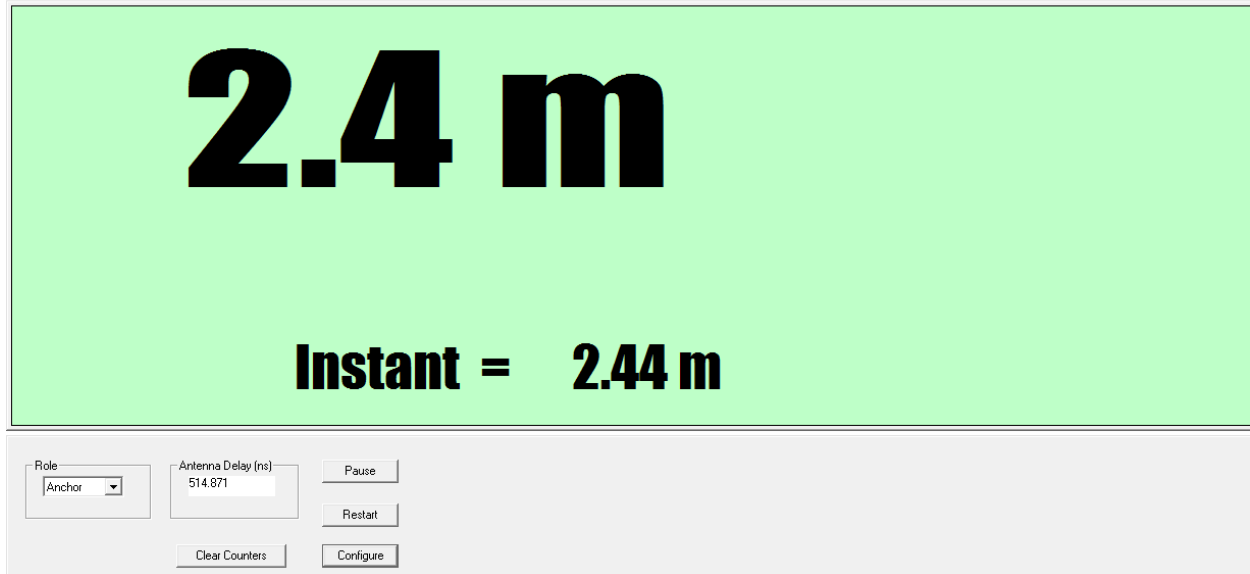


Ilustración 9-vii. Ranging.

9.2.1 Logs

En este apartado vamos a explicar los distintos logs que podemos conseguir usando la aplicación de decaWave.

En las opciones que tenemos en la parte superior de la ventana, es 'Debug', en ella tenemos dos opciones destacadas para guardar los logs.

La primera opción es *Log Channel Responses* en la cual guardamos toda la información sobre las tramas enviadas y la respuesta impulsiva del canal.

La segunda opción es *Log SPI Activity*, en esta opción almacenamos todo el tráfico SPI, esta opción es menos relevante, pero en otros proyectos puede ser de gran ayuda.

Cuando pulsamos en cualquiera de las opciones, comienza el debug, en la parte inferior derecha aparece un botón 'stop logging' el cual una vez pulsado detiene el debug y guarda automáticamente un nuevo fichero. Este nuevo fichero se encuentra dentro de la raíz de la aplicación, con la extensión xxxSPI.log para la segunda opción y xxxAccum.log para la primera opción.

A continuación, vamos a ver un ejemplo de cada opción.

9.2.1.1 Log Channel Responses

En este tipo de fichero nos encontramos con dos tipos de tramas, por un lado, las tramas enviadas y por otro las recibidas junto con la distancia estimada.

El intervalo de envío de tramas es de un segundo, por lo tanto, tendremos tantas tramas como segundos dure nuestro debugging.

Ejemplo de trama enviada:

```
[TXD]
TX Frame TimeStamp Raw = 64 3C1A8C41
Adding Antenna Delay = 0064 3C1A8C41
07 Tx time = 6.737422100376227e+000

29 F6 Rx time = 6.887418896093124e+000 6677616C77

29 F6 Rx time(un) = 6.887419142628206e+000 667761AA00

txdly 4041 rxdly 4041
RX DATA: 41ccf6cade82f9375e20900310e8f9375e2009041029410090d30001a4dd0e0341e4274a05e6af

RX OK WInd(0735), HLP(0744.3750), PSC(0902), SLP(0000.0000), RC(0066 77616C77), DCR(0), DCI(0), NTH(10CC), T(87AC), RSL(-080.5963), FSL(-085.5260), RSMPL(0C)
Accum Len 992
```

Ilustración 9-viii. Trama TX

Ejemplo de trama recibida:

```
Anchor ToF: 4.636 ns Dist: 1.389559 m ClockOffset: -23.131 ppm

aRxT 00000023b4da3c0 aTxT 00000023b4a3fb7

aRxT1 3732.972756 aTxT1 255.267803 ns

tRxT 00000023b46e036 tTxT 00000023b4a4040

tRxT1 -3204.283103 tTxT1 257.411859 ns

pollRespRTD 000000000036409 respFinalRTD 000000ffffc9ff6

[TXD]
TX Frame TimeStamp Raw = 68 7DA76E41
Adding Antenna Delay = 0068 7DA76E41
08 Tx time = 7.023498903260842e+000

21 F7 Rx time = 7.487391517740885e+000 6F646EBAD4

21 F7 Rx time(un) = 7.487391762820513e+000 6F646EF800

txdly 4041 rxdly 4041
RX DATA: 41ccf7cade82f9375e20900310e8f9375e200904102100008c8c

RX OK WInd(0735), HLP(0745.7031), PSC(0870), SLP(0000.0000), RC(006F 646EBAD4), DCR(0), DCI(0), NTH(0FED), T(87AC), RSL(-080.8400), FSL(-086.1874), RSMPL(0D)
Accum Len 992
```

Ilustración 9-ix. Trama RX

Cada trama va acompañada de la respuesta impulsiva del canal en ese instante, se representa con dos columnas, una con los valores imaginarios y la otra con los valores reales.

Ejemplo de respuesta impulsiva:

```
347, 131
454, 182
492, 423
203, 565
103, 400
49, 142
317, 206
595, 451
488, 677
310, 644
-20, 1545
-65, 1774
-148, 1992
-3, 2360
67, 1332
639, -1286
595, -954
-419, 395
-9, 223
1115, -517
1342, -706
567, -257
219, -99
770, -503
865, -358
188, 48
-230, 176
-1007, 249
-1065, 156
-383, 27
315, -137
181, -45
-489, 66
```

Ilustración 9-x. Respuesta impulsiva

Lo más importante de este fichero es la respuesta impulsiva del canal para su posterior análisis, y la distancia estimada en cada trama recibida, para obtener la media y desviación típica de la misma.

9.2.1.2 Log SPI Activity.

En nuestra situación, esta opción tiene menos interés, ya que la información que obtenemos no es relevante para estimar la posición. Un ejemplo del tráfico SPI sería el siguiente:

```
259-Read: [6F04 ] 00 00 00 00 <OK>
259-Read: [6F08 ] 7C 01 00 00 <OK>
259-Read: [6F0C ] 00 00 00 00 <OK>
259-Read: [6F10 ] 06 00 00 00 <OK>
259-Read: [6F14 ] AD 00 5A 01 <OK>
259-Read: [6F18 ] CE 00 00 00 <OK>
259-Read: [0F   ] 02 <OK>
259-Read: [4F03 ] 02 <OK>
259-Write [8D   ] 00 01 <OK>
```

Ilustración 9-xi. Tráfico SPI

9.2.2 Exportar datos con Matlab

A continuación, vamos a ver cómo exportar estos datos a Matlab y cómo tratarlos.

Partimos de un fichero generado con la opción Log Channel Responses. Mediante la consola de Linux creamos el siguiente script:

```
#!/bin/bash
# -*- ENCODING: UTF-8 -*-
sudo cat $2 | grep -ao "Dist: *. m" >>$1
sed -i 's/Dist: //g' "$1"
sed -i 's/ m//g' "$1"
```

Para llamarlo desde la consola seguimos la siguiente nomenclatura (en la misma carpeta que el script):
./script.sh {ficheroDeSalida} {ficheroDeEntrada}

El funcionamiento de este script es fácil, las dos primeras líneas son comunes a la hora de crear un script, en la tercera línea mostramos por pantalla el contenido del fichero de entrada y le aplicamos el filtro para que solo guardemos en el fichero de salida las líneas que contengan “Dist: ...m”. Sabemos de [Log Channel Responses](#) que, de toda la trama recibida, el único dato que nos interesa para el análisis del histograma es la distancia estimada en cada trama. Por tanto, con grep, nos quedamos solo con todas las distancias estimadas dentro del fichero. Recordar que los logs se corresponden a medidas fijas en una determinada posición.

Las dos líneas siguientes tienen como función despejar los datos y dejar una columna con todas las distancias estimadas.

Una vez tenemos “limpio” el fichero, procedemos a la exportación a Matlab. Con los siguientes comandos exportamos los datos a nuestro entorno de trabajo:

```
A = importdata('150cmLISTO.log');  
figure(1)  
histogram(A)
```

Esto es un extracto del fichero [distribucionNormalDefinitiva.m](#)

Un ejemplo de un fichero sería el siguiente:

```
4.885205  
4.840646  
4.860580  
4.878169  
4.868788  
4.891068  
4.882859  
4.889895  
4.925073  
4.909829  
4.880514  
4.881687  
4.878169  
4.923900  
4.906311  
4.928590  
4.920382  
4.926245  
4.899276  
4.925073
```

9.2.3 Ficheros

En esta sección se van a describir los ficheros obtenidos por el software del fabricante DecaWave y utilizados en Matlab:

- 150cmLISTO.log → Visión directa a 1.5m
- 3mconparedLISTO.log → Visión no directa a 3m con una pared como obstáculo
- 3mmetalLISTO.log → Visión no directa a 3m con un armario de metal como obstáculo
- 5mLISTO.log → Visión directa a 5m
- 8mLISTO.log → Visión directa a 8m
- 12mmLISTO.log → Visión directa a 12m
- 16mLISTO.log → Visión directa a 16m
- 200mLISTO.log → Visión directa a 2m

Estos ficheros están disponibles en: <https://drive.google.com/file/d/OB->

[GCMvDvSZQTV&list=PL3RGIYmZDZEE/view?usp=sharing](https://www.youtube.com/watch?v=GCMvDvSZQTV&list=PL3RGIYmZDZEE/view?usp=sharing).

10 APÉNDICE C. FICHEROS DE MATLAB

10.1 Modelo

Ficheros de Matlab utilizados en el capítulo 4: Modelo

10.1.1 signalUWB.m

```
%Script para la representación de la respuesta impulsiva de una señal UWB,  
% gracias a los logs de decawave.  
% APARTADO 4 -> MODELO  
% Autor: Luis de la calle  
%%  
t=1:1:992;  
load('prueba.txt');  
x1=prueba(:,1);  
x2=prueba(:,2);  
  
figure(1)  
plot(t,x1,'r');  
hold on;  
plot(t,x2,'b');  
legend('Valores Imaginarios','Valores Reales')  
xlabel('Time (ns)');  
ylabel('Ampitude (')');  
hold off;  
  
% PSC indica el número de símbolos de preámbulo acumulado  
% Num superior izq indica el valor maximo de la amplitud de la pantalla  
% FPHW indica el valor del tiempo donde esta el camino directo  
  
figure(2)  
z=sqrt(x1.^2+x2.^2);  
plot(t,z)  
xlabel('Time (ns)');  
ylabel('Ampitude (')');
```

10.1.2 distribucionNormalDefinitiva.m

```
% Este script de Matlab, usando un log de Decawave con mas de 700 tomas en  
% un mismo instante, analiza los resultados de las formas de onda en las  
% distintas gráficas, llegando al resultado que las tomas de datos siguen  
% una distribución normal Gaussiana.  
% APARTADO 4 -> MODELO  
% Autor: Luis de la calle  
%%
```

```
%%Comenzamos cargando las distintas pruebas
```

```
A = importdata('150mLISTO.log');  
B = importdata('3mconparedLISTO.log');  
C = importdata('3mmetalLISTO.log');  
D = importdata('5mLISTO.log');  
E = importdata('8mLISTO.log');  
F = importdata('12mmLISTO.log');  
G = importdata('16mLISTO.log');  
H = importdata('200mLISTO.log');
```

```
figure(1)  
subplot(4,2,1)  
histogram(A)  
legend('Histograma')  
xlabel('distancia 1.5(m)');  
ylabel('Nº muestras');  
subplot(4,2,2)  
histogram(H)  
legend('Histograma')  
xlabel('distancia 2(m)');  
ylabel('Nº muestras');  
subplot(4,2,3)  
histogram(D)  
legend('Histograma')  
xlabel('distancia 5(m)');  
ylabel('Nº muestras');  
subplot(4,2,4)  
histogram(E)  
legend('Histograma')  
xlabel('distancia 8(m)');  
ylabel('Nº muestras');  
subplot(4,2,5)  
histogram(F)  
legend('Histograma')
```

```
xlabel('distancia 12(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,6)
histogram(G)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 16(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,7)
histogram(B)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 3(m) con pared');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,8)
histogram(C)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 3(m) con metal');
ylabel('Nº muestras');

figure(2)
subplot(4,2,1)
histfit(A)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 1.5(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,2)
histfit(H)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 2(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,3)
histfit(D)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 5(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,4)
histfit(E)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 8(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,5)
histfit(F)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 12(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,6)
histfit(G)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 16(m)');
```

```

ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,7)
histfit(B)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 3(m) con pared');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,8)
histfit(C)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 3(m) con metal');
ylabel('Nº muestras');

figure(3)
subplot(4,2,1)
histogram(A,'Normalization','probability')
legend('Histograma')
xlabel('distancia 1.5(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,2)
histogram(H,'Normalization','probability')
legend('Histograma')
xlabel('distancia 2(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,3)
histogram(D,'Normalization','probability')
legend('Histograma')
xlabel('distancia 5(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,4)
histogram(E,'Normalization','probability')
legend('Histograma')
xlabel('distancia 8(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,5)
histogram(F,'Normalization','probability')
legend('Histograma')
xlabel('distancia 12(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,6)
histogram(G,'Normalization','probability')
legend('Histograma')
xlabel('distancia 16(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,7)
histogram(B,'Normalization','probability')
legend('Histograma')
xlabel('distancia 3(m) con pared');
ylabel('Nº muestras');

```

```
subplot(4,2,8)
histogram(C,'Normalization','probability')
legend('Histograma')
xlabel('distancia 3(m) con metal');
ylabel('Nº muestras');
```

```
figure(4)
subplot(4,2,1)
ecdf(A)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 1.5(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,2)
ecdf(H)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 2(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,3)
ecdf(D)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 5(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,4)
ecdf(E)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 8(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,5)
ecdf(F)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 12(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,6)
ecdf(G)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 16(m)');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,7)
ecdf(B)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 3(m) con pared');
ylabel('Nº muestras');
subplot(4,2,8)
ecdf(C)
legend('Histograma')
xlabel('distancia 3(m) con metal');
ylabel('Nº muestras');
```

10.1.3 minimosCuadrados.m

```
% Esta funcion calcula la recta con minimos cuadrados que relaciona la media y desviación tipica con la distancia
% APARTADOS 4 Y 5
% Autor: Luis de la Calle
%%
```

```
%distancia larga
```

```
%Media
```

```
X=[1.0108, 2.0669, 2.9739, 4.0620, 5.0036, 5.9330, 6.9595, 7.9331, 8.9285, 9.9347, 10.9924,
11.9588, 12.9369, 13.9565, 14.9097, 15.93577,17.0258,18.0650,19.0774,20.0077,
21.1010,22.2090,23.0120,24.1143,25.2231,26.0786,27.1412,28.0738,29.3876,30.0104,31.1595,
32.0781,33.1990,34.3096,35.0413,36.2581,37.3391,38.0840,39.4510,
40.0498,41.0976,42.0769,43.1714,44.2764,
45.0740,46.1184,47.2374,48.0597,49.1621,50.1057,51.0110,52.1745,53.3309,54.0812,
55.0451,56.0057,57.0024,58.3157,59.2030,60.1013];
```

```
%Desviación tipica en cm
```

```
Z=[1.98,1.61, 1.49, 1.53,
1.68,1.20,1.35,1.15,1.71,2.25,1.09,1.86,1.65,1.90,1.14,2.01,2.15,2.02,1.42,1.95,2.48,2.185,1.83,
1.63,2.11,1.82,1.85,2.57,2.33,2.70,2.41,1.2,1.36,1.75,2.10,1.86,1.73,1.31,1.07,2.93,2.16,2.67,1.3
7,2.91,2.49,1.56,2.48,2.03,2.69,2.33,2.51,2.98,3.29,2.16,3.12,2.75,2.75,1.96,2.06];
```

```
%Desviación tipica en metros
```

```
Z=Z./100;
```

```
%valores
```

```
Y=1:60;
```

```
Z=Z/100;
```

```
%Minimos cuadrados-->media
```

```
mcMed=polyfit(Y,X,1); %  $y=mc(0)*x+mc(1)$ 
```

```
%Minimos cuadrados-->Desviación tipica
```

```
mcVar=polyfit(Y,Z,1); % 1-->recta 2-->curva
```

```
save minimosCuadrados.mat
```

10.1.4 medidasDeDistancia.m

```
% Medidas de distancia - representación de la media y desviación tipica de las
% distintas tomas de datos
% APARTADO 4 -> MODELO
% Autor: Luis de la calle
%%
```

```

%valores
%%
%distancia larga
%Media
X=[1.0108, 2.0669, 2.9739, 4.0620, 5.0036, 5.9330, 6.9595, 7.9331, 8.9285, 9.9347, 10.9924,
11.9588, 12.9369, 13.9565, 14.9097, 15.93577,17.0258,18.0650,19.0774,20.0077,
21.1010,22.2090,23.0120,24.1143,25.2231,26.0786,27.1412,28.0738,29.3876,30.0104,31.1595,
32.0781,33.1990,34.3096,35.0413,36.2581,37.3391,38.0840,39.4510,
40.0498,41.0976,42.0769,43.1714,44.2764,
45.0740,46.1184,47.2374,48.0597,49.1621,50.1057,51.0110,52.1745,53.3309,54.0812,
55.0451,56.0057,57.0024,58.3157,59.2030,60.1013];
%desviación típica
Z=[1.98,1.61, 1.49, 1.53,
1.68,1.20,1.35,1.15,1.71,2.25,1.09,1.86,1.65,1.90,1.14,2.01,2.15,2.02,1.42,1.95,2.48,2,1.85,1.83,
1.63,2.11,1.82,1.85,2.57,2.33,2.70,2.41,1.2,1.36,1.75,2.10,1.86,1.73,1.31,1.57,2.93,2.16,2.67,1.3
7,2.91,2.49,1.56,2.48,2.03,2.69,2.33,2.51,2.98,3.29,2.16,3.12,2.75,2.75,1.96,2.06];
%valores
Y=1:60;

%%
%distancia media
%media
X2=[0.81,1.85,2.80,3.88,4.87,5.77,6.72,7.75,8.70,9.74,10.76,11.74,12.72,13.74,14.83,15.73,16.8
0,17.56];
%valores
Y2=1:18;
%desviación típica
Z2=[2.70,1.93,1.70,1.69,1.96,2.14,2.08,2.60,1.51,1.42,1.70,1.44,1.27,2.31,2.38,2.28,2.45,2.54];

%%
%distancia corta
%media
X3=[14,17.21,22.6,25.88,38.36,41.4,48,59,69,70,77.82,86,97.2,147,195.6,246,298,348.2,398.2]/
100;
%valores
Y3=[20,25,30,38,42,50,52,62,72,75,80,90.5,100,150,200,250,300,350,400]/100;
%desviación típica
Z3=[2.31,1.22,1.75,1.92,1.88,1.46,2.09,1.66,2.65,1.61,2.01,2.52,2.11,1.08,2.17,2.89];

%%
%representacion Media

figure(1)
plot(Y,X, '*'); %plot(X,Y, '-r');
% legend('Valores medidos')
xlabel('Distancia Real (m)');
ylabel('Media (m)');

```



```

axis([ 0 65 0 65 ]);
grid on

figure(2)
plot(Y2,X2, '*'); %plot(X,Y, '-r');
% legend('Valores medidos')
xlabel('Distancia Real (m)');
ylabel('Media (m)');
axis([ 0 20 0 20 ]);
grid on

figure(3)
plot(Y3,X3, '*'); %plot(X,Y, '-r');
% legend('Valores medidos')
xlabel('Distancia Real (m)');
ylabel('Media (m)');
axis([ 0 5 0 5 ]);
grid on

%%
%representacion desviación típica

%Z=[1.98,1.61, 1.49, 1.53,
1.68,1.20,1.35,1.15,1.71,2.25,1.09,1.86,1.65,1.90,1.14,2.01,3.15,3.02,1.42,1.95,3.48,2,1.85,1.83,
1.63,2.11,1.82,1.85,2.57,2.33,2.70];
%Z=Z/10;
figure(4)
plot(Y,Z, '*');
% legend('Valores medidos')
xlabel('Distancia Real (m)');
ylabel('Desviación típica (cm)');
axis([ 0 60 0 10 ]);
grid on

%Representación del Histograma

% figure(5);
% Thist=0:0.5:5;
% hist(Z,Thist);
% legend('Histograma')
% xlabel('Varianza (cm^2)');

%Minimos cuadrados-->media

mcMed=polyfit(Y,X,1); % y=mc(0)*x+mc(1)
%representamos la recta
Yminc=Y;
Ypm=polyval(mcMed,Yminc);

```

```
figure(6);
hold on
plot(Yminc,Ypm)
plot(Y,X,'*'); %plot(X,Y,'-r');
legend('Mínimos cuadrados','Media de los valores medidos');
grid on
xlabel('Distancia Real (m)');
ylabel('Media (m)');
hold off

%Minimos cuadrados-->desviación típica

mcVar=polyfit(Y,Z,1); % 1-->recta 2-->curva
%representamos la recta
YmincVar=Y;
Ypv=polyval(mcVar,YmincVar);
figure(7);
hold on
plot(YmincVar,Ypv)
grid on
plot(Y,Z,'*');
xlabel('Distancia Real (m)');
ylabel('Desviación típica (cm)');
legend('Mínimos cuadrados','Desviación típica de los valores medidos');
axis([ 0 60 0 10 ]);
hold off
```

10.2 Sistema de Posicionamiento

Ficheros de Matlab utilizados en el capítulo 5.

10.2.1 Medidas simuladas

10.2.1.1 scriptModelo.m

```
% Script BASE para la ejecucion del algoritmo de posicionamiento
% se parte de las distancias reales entre un nodo y las anclas, la distancia
% se modela como una variable aleatoria que sigue una distribucion normal,
% a esa distancia simulada se le aplica el algoritmo de localización
% APARTADO 5 -> POSICIONAMIENTO
%Autor: Luis de la Calle
%%

%-----Datos hardcodeados-----
% POSICION DE LAS ANCLAS
% RESTRICCIONES:
% - todas las anclas deben estar en el plano z=0
% - Un ancla debe estar en el origen y otra sobre el eje X
% ANCLA 1-->(0,0)
% ANCLA 2-->(10,0)
% ANCLA 3 -->(0,10)
AnclasX=[0,10,0];
AnclasY=[0,0,10];
a=3;%numero de anclas
s=1; %numero de nodos

%posicion de los nodos
NodoX=[1,2,3,4,5];
NodoY=[5,4,3,2,2];

%-----

%para cada ancla y nodo, inicializamos las matrices
%           Nodo1  Nodo2  Nodo3
% MATRIZ = [ d11 , d12 , d13 ]  Ancla 1
%           [ d21 , d22 , d23 ]  Ancla 2
%           [ d31 , d32 , d33 ]  Ancla 3

dAncla=zeros(a,s);
dSimulada=zeros(a,s);
errorAcumuladoTotal=0;
```

```

for c = 1:1:s %para cada nodo
    for cd = 1:1:a %para cada ancla
        %distancia real
        dAncla(cd,c)=sqrt( (abs(AnclasX(cd)-NodoX(c))^2) + (abs(AnclasY(cd)-NodoY(c))^2) );
        %distancia simulada
        dSimulada(cd,c)=variableAleatoria(dAncla(cd,c));
    end

[posx(c),posy(c),errorCuadratico]=trilateration(a,AnclasX,AnclasY,dSimulada(:,c),NodoX(c),NodoY
(c));
    errorAcumuladoTotal=errorAcumuladoTotal+errorCuadratico;
end
MSE=(sum(errorAcumuladoTotal)/(s)); % Mean Squared Error
RMSE = sqrt(MSE) % Root Mean Squared Error

```

10.2.1.2 variableAleatoria.m

```

% Función variableAleatoria.m, esta función obtiene del fichero
% minimosCuadrados.mat la recta de minimos cuadrados de la media y desviación típica de
nuestra toma de datos,
% a continuación calculamos la variable aleatoria normal en funcion de la media y desviación
típica anterior, esta sería
% nuestra distancia estimada, que es lo que devuelve nuestra funcion
% APARTADO 5 -> POSICIONAMIENTO
%Autor: Luis de la Calle
%%
function [medidaSimulada] = variableAleatoria(distReal )

load('minimosCuadrados.mat')

%calculamos la media y desviación típica
media= mcMed(1)*distReal+mcMed(2); %mc(0)*X+mc(1)
desvTipica=mcVar(1)*distReal+mcVar(2);

% Distribucion normal
rng(0,'twister');
a = desvTipica;
b = media;
y = (a)*randn(1) + b;
medidaSimulada=y;

end

```

10.2.1.3 trilateracion.m

```
% Algoritmo de localizacion BASE, en este caso usamos la trilateracion
% La explicación la encontramos en el APARTADO v del presente documento
%Autor: Luis de la Calle
%%
function [x, y,errorCuadratico] = trilateration(a, AnclasX,AnclasY, dSimulada,NodoX,NodoY )

%limpiamos las figuras
clf(figure(1));
clf(figure(2));
clf(figure(3));
% clf(figure(4));

% Numero y posicion de las anclas
nAnclas=a;
P=zeros(a,2);

for c = 1:1:a %para cada nodo
    D(c)=dSimulada(c,1);
    P(c,1)=AnclasX(c);
    P(c,2)=AnclasY(c);
end

posicionAncla = P;
posicionMovil= [NodoX NodoY];

%% Transformación

% i = dot(ex, (P(3,:) - P(1,:)));
i = 0; %en nuestro caso i=0 porque P3 esta en el eje Y

ex = (P(2,:) - P(1,:)) / (norm(P(2,:) - P(1,:))); %eje X
ey = (P(3,:) - P(1,:) - i*ex) / (norm(P(3,:) - P(1,:) - i*ex)); %eje Y

d = norm(P(2,:) - P(1,:)); %distancia entre las anclas 1 y 2 sobre el eje X
j = dot(ey, (P(3,:) - P(1,:))); %distancia entre las anclas 1 y 3 sobre el eje Y

%% Estimacion

x = ((D(1)^2) - (D(2)^2) + (d^2))/(2*d); %ejeX
y = (((D(1)^2) - (D(3)^2) + (i^2) + (j^2))/(2*j)) - ((i/j)*x); %ejeY

%% Representación

%habitación
```

```

figure(1);

plot(posicionAncla(:,1),posicionAncla(:,2),'ko','MarkerSize',8,'lineWidth',2,'MarkerFaceColor','k');
grid on
hold on
title(['Habitacion'])
legend('Anclas')
axis([-0.1 1.1 -0.1 1.1]*10)
xlabel('x (m)');
ylabel('y (m)');

```

%habitacion con movil

```

figure(2);

plot(posicionAncla(:,1),posicionAncla(:,2),'ko','MarkerSize',8,'lineWidth',2,'MarkerFaceColor','k');
grid on
hold on
plot(posicionMovil(:,1),posicionMovil(:,2),'b+','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
title(['Habitacion con movil'])
legend('Anclas','Movil')
axis([-0.1 1.1 -0.1 1.1]*10)
    xlabel('x (m)');
ylabel('y (m)');

```

%Estimación

```

figure(3)

plot(posicionAncla(:,1),posicionAncla(:,2),'ko','MarkerSize',8,'lineWidth',2,'MarkerFaceColor','k');
grid on
hold on
%posicion fija
plot(posicionMovil(:,1),posicionMovil(:,2),'b+','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
%posicion estimada
plot(x,y,'ro','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
axis([-0.1 1.1 -0.1 1.1]*10)
legend('Anclas','Movil','Posicion estimada')
axis([-0.1 1.1 -0.1 1.1]*10)
xlabel('x (m)');
ylabel('y (m)');
%Root Mean Squared Error
posicionMovilEst=[x,y];
error=(posicionMovilEst-posicionMovil);
% error cuadrático para cada posición
errorCuadratico=error.^2;

```

```

%ETSI
%plot biblio http://blogs.mathworks.com/steve/2007/01/01/superimposing-line-plots/
% figure(4)
% bw = imread('biblioteca.JPG');
% minX=0;
% maxX=10;
% minY=0;
% maxY=10;
% imagesc([minX maxX],[minY maxY],flipud(bw));
% %posicionAncla;
% %posicionMovil;
% hold on;
%
plot(posicionAncla(:,1),posicionAncla(:,2),'ko','MarkerSize',8,'lineWidth',2,'MarkerFaceColor','k');
% grid on
% %posicion fija
% plot(posicionMovil(:,1),posicionMovil(:,2),'b+','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
% %posicion estimada
% plot(x,y,'ro','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
% set(gca,'ydir','normal');
% legend('Anclas','Movil','Posicion estimada')

```

end

10.2.2 Medidas reales

10.2.2.1 scriptDeca.m

```

% Script BASE para la ejecucion del algoritmo de posicionamiento
% se Parte de las distancias estimadas que porporciona nuestro Hardware de decaWave entre
un nodo y las anclas,
% a esa distancia estimada se le aplica el algoritmo de
% localización
%Autor: Luis de la Calle
%%

%-----Datos hardcodeados-----
% POSICION DE LAS ANCLAS
% ANCLA 1-->(0,0)
% ANCLA 2-->(0,10)
% ANCLA 3 -->(10,10)
AnclasX=[0,3,3];
AnclasY=[0,0,2];
a=3;%numero de anclas
s=1; %numero de nodos
NodoX=[2,2,3,4,5];
NodoY=[1,4,3,2,2];
%NodoX=3;
%NodoY=5;

%-----

%para cada ancla y nodo
dAncla=zeros(a,s);
dSimulada=zeros(a,s);
errorAcumuladoTotal=0;
dSimulada(1,1)=2.1940;
dSimulada(2,1)=1.3827;
dSimulada(3,1)=1.3904;

for c = 1:1:s %para cada nodo

[posx(c),posy(c),errorCuadratico]=trilateracionDeca(a,AnclasX,AnclasY,dSimulada(:,c),NodoX(c),N
odoY(c));
    errorAcumuladoTotal=errorAcumuladoTotal+errorCuadratico;
end
MSE=(sum(errorAcumuladoTotal)/(s)); % Mean Squared Error
RMSE = sqrt(MSE) % Root Mean Squared Error

```


10.2.2.2 trilateracionDeca.m

```
function [x, y,errorCuadratico] = trilateracionDeca(a, AnclasX,AnclasY, dSimulada,NodoX,NodoY )
```

```
%limpiamos las figuras
```

```
clf(figure(1));  
clf(figure(2));  
clf(figure(3));
```

```
%%LLAMADA
```

```
nAnclas=a;  
P=zeros(a,2);
```

```
for c = 1:1:a %para cada nodo
```

```
    D(c)=dSimulada(c,1);  
    P(c,1)=AnclasX(c);  
    P(c,2)=AnclasY(c);
```

```
end
```

```
posicionAncla = P;  
posicionMovil= [NodoX NodoY];
```

```
%% Transformación
```

```
ex = (P(2,:) - P(1,:)) / (norm(P(2,:) - P(1,:))); %eje X  
i = dot(ex, (P(3,:) - P(1,:)));  
ey = (P(3,:) - P(1,:) - i*ex) / (norm(P(3,:) - P(1,:) - i*ex)); %eje Y
```

```
d = norm(P(2,:) - P(1,:)); %distancia entre las anclas 1 y 2 sobre el eje X  
j = dot(ey, (P(3,:) - P(1,:))); %distancia entre las anclas 1 y 3 sobre el eje Y
```

```
%% Estimacion
```

```
x = ((D(1)^2) - (D(2)^2) + (d^2))/(2*d); %ejeX  
y = (((D(1)^2) - (D(3)^2) + (i^2) + (j^2))/(2*j)) - ((i/j)*x); %ejeY
```

```
%% Representación
```

```
%habitación  
figure(1);
```

```

plot(posicionAncla(:,1),posicionAncla(:,2),'ko','MarkerSize',8,'lineWidth',2,'MarkerFaceColor','k');
grid on
hold on
title(['Habitacion'])
legend('Anclas')
axis([-0.3 3.3 -0.2 2.2])
xlabel('x (m)');
ylabel('y (m)');

```

```
%habitacion con movil
```

```
figure(2);
```

```

plot(posicionAncla(:,1),posicionAncla(:,2),'ko','MarkerSize',8,'lineWidth',2,'MarkerFaceColor','k');
grid on
hold on
plot(posicionMovil(:,1),posicionMovil(:,2),'b+','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
title(['Habitacion con movil'])
legend('Anclas','Movil')
axis([-0.3 3.3 -0.2 2.2])
    xlabel('x (m)');
    ylabel('y (m)');

```

```
%Estimación
```

```
figure(3)
```

```

plot(posicionAncla(:,1),posicionAncla(:,2),'ko','MarkerSize',8,'lineWidth',2,'MarkerFaceColor','k');
grid on
hold on
%posicion fija
plot(posicionMovil(:,1),posicionMovil(:,2),'b+','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
%posicion estimada
plot(x,y,'ro','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
axis([-0.1 1.1 -0.1 1.1]*3)
legend('Anclas','Movil','Posicion estimada')
axis([-0.3 3.3 -0.2 2.2])
    xlabel('x (m)');
    ylabel('y (m)');
%Root Mean Squared Error
posicionMovilEst=[x,y];
error=(posicionMovilEst-posicionMovil);
% error cuadrático para cada posición
errorCuadratico=error.^2;

```

```
end
```

10.2.3 Medidas simuladas con movimiento

10.2.3.1 scriptMOV.m

```
% Este script es una extension del script BASE script.m para la ejecucion del algoritmo de
posicionamiento
% en este caso, el objetivo de este script es simular y calcular la
% posicion estimada de un objeto en una habitación con distintas posiciones
% localización
%Autor: Luis de la Calle
%%

%% -----Datos hardcodeados-----
% POSICION DE LAS ANCLAS
% ANCLA 1-->(0,0)
% ANCLA 2-->(0,10)
% ANCLA 3 -->(10,10)
AnclasX=[0,10,0];
AnclasY=[0,0,10];
a=3;%numero de anclas
s=11; %numero de nodos
NodoX=[1,2,3,3.5,4,4,5,6,7,8,9];
NodoY=[8,8,7,6,5,4,3.8,3.5,3.5,4,3.7];
%NodoX=3;
%NodoY=5;

%% -----

%para cada ancla y nodo
dAncla=zeros(a,s);
dSimulada=zeros(a,s);
errorAcumuladoTotal=0;

for c = 1:1:s %para cada nodo
    for cd = 1:1:a %para cada ancla
        dAncla(cd,c)=sqrt( (abs(AnclasX(cd)-NodoX(c))^2) + (abs(AnclasY(cd)-NodoY(c))^2) );
        dSimulada(cd,c)=variableAleatoria(dAncla(cd,c));
    end

[posx(c),posy(c),errorCuadratico]=trilaterationMOV(c,a,AnclasX,AnclasY,dSimulada(:,c),NodoX(c),
NodoY(c));
    errorAcumuladoTotal=errorAcumuladoTotal+errorCuadratico;
end
MSE=(sum(errorAcumuladoTotal)/(s)); % Mean Squared Error
RMSE = sqrt(MSE) % Root Mean Squared Error
```

10.2.3.2 trilateracionMOV.m

```

% Función que extiende al la función BASE trilateracion.m, en este caso
% para la situacion de la biblioteca de la ETSI
%Autor: Luis de la Calle
%%
function [x, y,errorCuadratico] = trilaterationETSI(iteracion,a, AnclasX,AnclasY,
dSimulada,NodoX,NodoY )
%function [x, y] = trilateration( AnclasX,AnclasY,a, dA, dB, dC,NodoX,NodoY )

%%LLAMADA
%% UWB pruebas lejos --> calculo distUWB.m
nAnclas=a;
P=zeros(a,2);

for c = 1:1:a %para cada nodo
    D(c)=dSimulada(c,1);
    P(c,1)=AnclasX(c);
    P(c,2)=AnclasY(c);
end

posicionAncla = P;
posicionMovil= [NodoX NodoY];

%% Transformación
% transform to get circle 1 at origin
% transform to get circle 2 on x axis
ex = (P(2,:) - P(1,:)) / (norm(P(2,:) - P(1,:)));
i = dot(ex, (P(3,:) - P(1,:)));
ey = (P(3,:) - P(1,:) - i*ex) / (norm(P(3,:) - P(1,:) - i*ex));

d = norm(P(2,:) - P(1,:));
j = dot(ey, (P(3,:) - P(1,:)));

%% Estimacion

x = ((D(1)^2) - (D(2)^2) + (d^2))/(2*d); %ejeY
y = (((D(1)^2) - (D(3)^2) + (i^2) + (j^2))/(2*j)) - ((i/j)*x); %ejeX

%plot biblio http://blogs.mathworks.com/steve/2007/01/01/superimposing-line-plots/
figure(1)
% bw = imread('biblioteca.JPG');
minX=0;

```

```

maxX=10;
minY=0;
maxY=10;
hold on;
if(iteracion==1)
% imagesc([minX maxX],[minY maxY],flipud(bw));
set(gca,'ydir','normal');
end

plot(posicionAncla(:,1),posicionAncla(:,2),'ko','MarkerSize',8,'lineWidth',2,'MarkerFaceColor','k');
grid on
%posicion fija
plot(posicionMovil(:,1),posicionMovil(:,2),'b+','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
%posicion estimada
plot(x,y,'ro','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
legend('Anclas','Movil','Posicion estimada')
    xlabel('x (m)');
    ylabel('y (m)');

figure(2)
hold on

plot(posicionAncla(:,1),posicionAncla(:,2),'ko','MarkerSize',8,'lineWidth',2,'MarkerFaceColor','k');
grid on
%posicion fija
plot(posicionMovil(:,1),posicionMovil(:,2),'b+','MarkerSize',8,'lineWidth',2);
hold off
xlabel('x (m)');
ylabel('y (m)');

posicionMovilEst=[x,y];
error=(posicionMovilEst-posicionMovil);
% error cuadrático para cada posición
errorCuadratico=error.^2;

end

```

REFERENCIAS

- [1] Gobierno de los Estados Unidos, «Sistema de Posicionamiento Global,» [En línea]. Available: <http://www.gps.gov/systems/gps/spanish.php>.
- [2] J. S. G. Henao, Tecnología Ultra-Wideband.
- [3] Univ Autónoma de Madrid TAC, Temas avanzados en comunicaciones, 2007-2008.
- [4] CCM - Comunidad informática, «Introducción a Wi-Fi (802.11),» [En línea]. Available: <http://es.ccm.net/contents/789-introduccion-a-wi-fi-802-11-o-wifi>.
- [5] A. J. (. T. D. Corporation), A Non-Technical Manager's Guide to Indoor Tracking Systems Or, Dazzling Your Technical Staff with your In-depth Knowledge.
- [6] A. J. (. T. D. Corporation), Or, Dazzling Your Technical Staff with your In-depth Knowledge.
- [7] J. I. Cracovski, Tecnología emergente: banda ultra ancha (1ª edición), Buenos Aires, 2007.
- [8] J. Diaz, Tecnología ULTRA-WIDEBAND (UWB) -La revolución a corto alcance.
- [9] Lawrence Livermore National Laboratory, «The Ultrawideband Revolution,» [En línea]. Available: <https://str.llnl.gov/str/September04/Azevedo.html>.
- [10] R. J. Millán, UWB (Ultra Wide-Band).
- [11] M. A. Ráez Montejo, Principios básicos de transmisión por radio.
- [12] Wikipedia, «Ultrawideband,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Ultrawideband>.
- [13] Producciones el sotano, «La respuesta de impulso, esa gran desconocida,» [En línea]. Available: <http://www.produccioneselesotano.com/la-respuesta-de-impulso-esa-gran-desconocida/>.
- [14] M. E. Alonso, Sistemas de localización avanzados en entornos interiores basados en tecnología UWB.
- [15] Estudio de técnicas de mapeo para la localización en interiores mediante redes de sensores. Capítulo 2 (Localización en interiores y tecnología UWB).
- [16] V. Lakkundi., Ultra Wideband Communications: History, Evolution and Emergence.
- [17] M. Z. Win, D. Dardari, A. F. Molisch, W. Wiesbeck y J. Zhang, History and Applications of UWB.
- [18] H. G. Schantz, Three Centuries of UWB Antenna Development.
- [19] DecaWave, «DW1000 DATASHEET,» [En línea]. Available: <https://www.decawave.com/support>.
- [20] DecaWave, «DW1000 PRODUCT BRIEF,» [En línea]. Available: <https://www.decawave.com/support>.

- [21] DecaWave, «DW1000 USER MANUAL,» [En línea]. Available: <https://www.decawave.com/support>.
- [22] DecaWave, «EVK1000 USER MANUAL,» [En línea]. Available: <https://www.decawave.com/support>.
- [23] Wikipedia, «Frecuencia,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Frecuencia>.
- [24] Vuelarc, «Frecuencias,» [En línea]. Available: http://vuelarc.com/Frecuencias/frecuencia_atenuacio.html.
- [25] B. Alavi y K. Pahlavan, «Modeling of the TOA-based Distance Measurement. Error Using UWB Indoor Radio Measurements,» *IEEE*, 2006.
- [26] B. Efron y R. Tibshirani, An Introduction to the bootstrap.
- [27] O. Kirchkamp, Resampling methods, 2014.
- [28] Metodos de Remuestreo.Tema 2. Distribucion Emprica.
- [29] F. t. Brain, «Campana de Gauss,» [En línea]. Available: <https://feelthebrain.me/tag/campana-de-gauss/>.
- [30] EcuRed, «Campana de Gauss,» [En línea]. Available: https://www.ecured.cu/Campana_de_Gauss.
- [31] The MathWorks, Inc., «Histogram with a distribution fit,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/stats/histfit.html>.
- [32] The MathWorks, Inc, «Empirical cumulative distribution function,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/stats/ecdf.html>.
- [33] Universidad del País Vasco. Departamento de Arquitectura y Tecnología de Computadores, Procesado digital de imagen y sonido. Tema 4 Sistemas LTI.
- [34] Wikipedia, «Distribución Normal,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Distribuci%C3%B3n_normal.
- [35] Wikipedia, «Varianza,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Varianza>.
- [36] F. R. Henriquez y C. d. I. y. d. E. A. (CINVESTAV), Distribuciones de Probabilidad Normal.
- [37] Wikipedia, «Número complejo,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_complejo.
- [38] Wikipedia, «Mínimos cuadrados,» [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/M%C3%ADnimos_cuadrados.
- [39] Universidad de Cantabria, Ajuste por mínimos cuadrados.
- [40] Escuela Politécnica de Ingeniería de Minas y Energía Torrelavega, FISICA I. Ajuste por mínimos cuadrados.
- [41] J. Z. Román, Ajuste de una recta por mínimos cuadrados.
- [42] The MathWorks, Inc., «Polynomial curve fitting,» [En línea]. Available:

<https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/polyfit.html>..

- [43] Wikipedia, «Trilateración,» [En línea]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Trilateraci%C3%B3n>.
- [44] The MathWorks, Inc., «Display image with scaled colors,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/matlab/ref/imagesc.html>.
- [45] S. Eddins, «Superimposing line plots on images,» 2007. [En línea]. Available: <http://blogs.mathworks.com/steve/2007/01/01/superimposing-line-plots/>.
- [46] The MathWorks, Inc., «Random Numbers from Normal Distribution with Specific Mean and Variance,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/matlab/math/random-numbers-with-specific-mean-and-variance.html>.
- [47] Aenor, «UNE-EN 12504-4:2006,» [En línea]. Available: <http://www.aenor.es/aenor/normas/normas/fichanorma.asp?tipo=N&codigo=N0035266#.WOUSVaL-vIU>.
- [48] D. A. C. Velázquez, Cobertura dentro de construcciones para Comunicaciones Personales Móviles Vía Satélite . Modelo de propagación para interiores.
- [49] «Comportamiento de solidos heterogéneos (hormigón) frente a solicitaciones ultrasónicas,» [En línea]. Available: <http://propagaciondeondascom1.blogspot.com.es/2012/11/atenuacion-y-absorcion-de-ondas.html>.

